

حذف تولوئن از هوای اتمسفری با استفاده از جاذب نانو کربن فعال

شهناز تیموری^۱؛ سید علیرضا حاجی سید میرزا حسینی^۱ و حمید شیرخانلو^{۲*}

۱ - دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۲ - پژوهشگاه صنعت نفت، ضلع غربی دهکده المپیک، واحد نشر پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۹۷/۰۲/۱۵ - تاریخ پذیرش ۹۷/۰۴/۱۸)

چکیده:

کاربرد وسیع تولوئن در صنایع شیمیایی باعث شده که مطالعات مختلفی در خصوص کنترل و کاهش بخارات تولوئن از هوا صورت گیرد. هدف از این مطالعه، بررسی امکان حذف تولوئن هوا با استفاده از جاذب نانو کربن فعال به عنوان جایگزینی مناسب برای کربن فعال تجاری می باشد. ابتدا جاذب نانو کربن فعال با سایز مشخص سنتز شده و برای حذف تولوئن از هوا، در دو سیستم استاتیک و دینامیک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی برای شناسایی مورفولوژی سطح جاذب ها و از دستگاه گاز کروماتوگرافی با آشکارساز یونیزاسیون شعله برای تعیین غلظت اولیه و نهایی تولوئن در هوا استفاده گردید. برای بهینه نمودن میزان جذب تولوئن توسط نانو کربن فعال، تاثیر عواملی همچون دما، رطوبت، غلظت تولوئن، مقدار جاذب و زمان تماس بررسی شد. میزان ظرفیت جذب نانو کربن فعال و کربن فعال تجاری برای حذف تولوئن هوا در دمای محیطی به ترتیب ۲۰۷/۶ و ۱۸۵/۲ میلی گرم بر گرم و راندمان جذب آنها به ترتیب ۹۸/۴ و ۴۴/۲ درصد در سیستم دینامیک بدست آمد. ظرفیت جذب جاذب در رطوبت ثابت، با افزایش مدت زمان تماس و دما به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. بر اساس نتایج جذب تولوئن هوا، نانو کربن فعال سنتز شده دارای سطح بیشتری نسبت به کربن فعال بوده و در شرایط بهینه ظرفیت و راندمان جذب بیشتری دارد. همچنین با توجه به مقدار مصرفی و تکرار پذیری جاذب، استفاده این روش از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.

کلید واژگان: تولوئن هوا، کربن فعال، نانو کربن فعال، جذب، بازجذب

۱. مقدمه

هوای تنفسی که توسط مرکز ملی بهداشت و ایمنی حرفه ای (NIOSH) و سازمان محیط زیست آمریکا (EPA) گزارش شده است به ترتیب ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و ۰.۲۳ میلی گرم بر لیتر هوا می باشد (Prüss-Üstün *et al.*, ۲۰۰۵; MinKim *et al.*, ۲۰۱۵; Blair *et al.*, ۲۰۱۸). از جمله دغدغه های اصلی متخصصان محیط زیست در صنایع، نحوه کنترل ترکیبات آلی فرار نظیر تولوئن در صنایع و فرآیندها در مراحل مختلف تولید است. جذب سطحی با نانو مواد یکی از مهمترین روش های حذف ترکیبات آلی فرار است (Gangupomu *et al.*, ۲۰۱۶; Nasri *et al.*, ۲۰۱۵; Hamadani, ۲۰۱۵; Ncibi *et al.*, ۲۰۱۶). با توسعه تکنیک های جدید استخراج و بهبود روش های موجود، گرایش به سمت نانو مواد مبتنی بر کربن سوق پیدا کرده است (Zhang *et al.*, ۲۰۱۳). در میان جاذب های مختلفی که در تکنولوژی جذب سطحی استفاده می شود، کربن فعال به علت سادگی کاربرد، هزینه های عملیاتی پایین، ساختار متخلخل، سطح فعال و بازیافت موثر اغلب مواد آلی فرار از آن، بطور گسترده ای برای حذف مواد آلی فرار از هوای اتمسفری در صنایع استفاده می شود. گرمای جذب بر روی کربن فعال کمتر از سایر جاذبها بوده و لذا احیای آن در دمای کم امکان پذیر است. این ماده می تواند به شکل پودر، گرانول یا قرص ساخته شود و در مقایسه با سایر جاذبها طیف جذبی وسیع، پایداری فیزیکی و شیمیایی بالا داشته و تولید آن راحت تر می باشد. در سال های اخیر تعداد زیادی از نانو مواد مبتنی بر کربن، به عنوان مواد جاذب مورد استفاده قرار گرفته اند در واقع نانو مواد کربن طیف وسیعی از اشکال آلوتروپی کربن را در بر می گیرد. آنها می توانند به

ترکیبات آلی فرار یکی از آلاینده های بسیار مهم هوای اتمسفری هستند که به طور عمده از طریق وسایل نقلیه موتوری و فرایندهای صنعتی از جمله صنایع نفت و پتروشیمی، در هوا منتشر می شوند. منبع اصلی ترکیبات آلی فرار در هوای کلانشهرها، بواسطه گازهای خروجی از آگزوز اتومبیل است (Huang *et al.*, ۲۰۱۸; Bari *et al.*, ۲۰۱۶; Baudic *et al.*, ۲۰۱۶; Chen *et al.*, ۲۰۱۶; An *et al.*, ۲۰۱۶). این ترکیبات دسته ای از ترکیبات آروماتیک تک حلقه ای سمی هستند که انتشار آنها در هوا می تواند تاثیر قابل توجهی روی سلامت انسانها و کیفیت هوا بگذارد. ترکیبات آلی فرار از چند طریق بر اتمسفر تاثیر می گذارند. این ترکیبات توسط رادیکال های هیدروکسیل، ازن، رادیکال های نیترات و هالوژن ها (کلر، برم و ید) در جو اکسید می شوند. علاوه بر این با اکسیدهای نیتروژن باعث تشکیل ازن در تروپوسفر می شود. ازن برای انسان و طبیعت سمی است و موجب تشکیل مه دود فتوشیمیایی می شود. تولوئن یکی از ترکیبات آلی فرار، مایعی بی رنگ و آتش گیری است و به عنوان حلال در صنایع مختلفی چون رنگ و رزین کاربرد دارد. گاهی در انسان باعث سرطان می شود (Nowak *et al.*, ۲۰۱۸; Carlos-Wallace *et al.*, ۲۰۱۵; Nutta *et al.*, ۲۰۱۸; Harbison *et al.*, ۲۰۱۵; Stenehjem *et al.*, ۲۰۱۸). تولوئن یکی از مهمترین ترکیبات آلی فرار و از مواد بنیادی و مهم در ساختار پتروشیمی محسوب می شود. این ترکیب از آلاینده های محیط زیست است و مقادیر بالای مواجهه با آن باعث مرگ و بیهوشی در انسان می شود. استاندارد مواجهه با تولوئن در محیط کار و

اندازه مشخص سنتز شد و با طراحی پایلوت شبیه ساز هوای اتمسفری، جذب بخارات تولوئن توسط نانو کربن فعال و کربن فعال تجاری مقایسه گردید. همچنین نتایج حاصل از جذب سطحی دینامیک، جذب سطحی استاتیک و تاثیر پارامترهای موثر بر هر جذب نظیر مقدار جاذب، میزان جریان گاز تولوئن، دما، زمان تماس و تکرارپذیری جاذب مورد بررسی قرار گرفت.

۲.۲. سنتز و تهیه جاذب

جاذب نانو کربن فعال در پژوهشکده سلامت صنعت نفت ایران تهیه شد. کربن فعال با ترکیب وزن مشخصی مواد کربنی با محلول KOH، با نسبت وزنی KOH به کربن برابر ۲ به ۵ تهیه شد. بعد از آن محلول حاصل در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک شد. نمونه ی خشک شده در یک لوله ی کوارتزی در کوره با دمای ۸۵۰، در مدت زمان یک ساعت با نرخ گرمادهی ۵ درجه سانتی گراد بر دقیقه همراه با جریان نیتروژن، پیرولیز شد. نمونه ی ذغالی شده ی حاصله در محلول اسیدکلریدریک و آب مقطر در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت شسته شد. سپس نمونه با آب مقطر گرم و سرد شسته شد تا به پی اچ (pH) ۶ تا ۷ برسد. در نهایت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد در جریان هوا خشک شد (Rashidi et al., ۲۰۱۶).

۳.۲. بررسی ساختار نانو کربن فعال با

میکروسکوپ الکترونی

پس از سنتز جاذب ها تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی جاذب ها (SEM) تا ۵۰۰ نانومتر بزرگ نمایی، تصاویر میکروسکوپی الکترونی انتقالی جاذب ها (TEM) تا ۳۰ نانومتر بزرگ نمایی و طیف

عنوان مواد جاذب جدید برای پاکسازی و پیش تغلیظ نمونه مورد استفاده قرار گیرند (Liu et al., ۲۰۱۲). Shirkhanloo et al., ۲۰۱۵). ساختارهای مشخص نانو مواد مبتنی بر کربن این امکان را به آنها می دهد که با مولکول های آلی از طریق نیروهای غیر کوالانسی، نیروهای واندروالسی و تعاملات آبریز از قبیل پیوندهای هیدروژنی، برهمکنش های پای پای و نیروهای الکترواستاتیک پیوند برقرار کنند (Zhang et al., ۲۰۱۳). این تعاملات و ساختارهای نانومتری لایه توخالی آن ها را به گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان جاذب تبدیل می کند. در سال های اخیر تعداد زیادی از نانو مواد مبتنی بر کربن از جمله نانو الماس، فولرن، نانو لوله های کربنی، گرافن، نانوفیبرهای گرافیت و همچنین ساختارهای عامل دار شده به عنوان جاذب مورد بررسی قرار گرفته اند. هدف از این مطالعه، بررسی حذف تولوئن از هوای اتمسفری با استفاده از جاذب نانو کربن فعال به عنوان جاذبی مناسب و مقرون به صرفه می باشد.

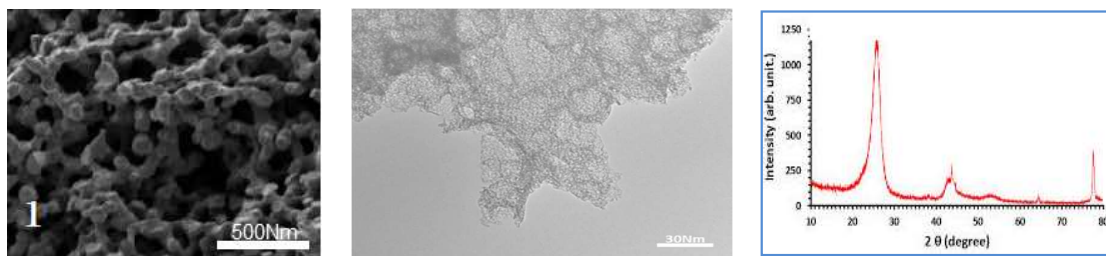
۲. مواد و روش ها

۱.۲. دستگاه ها و مواد مصرفی

در این مطالعه از میکروسکوپ الکترونی (Zeiss) برای شناسایی ساختار جاذب ها و از دستگاه گاز کروماتوگرافی (Varian ۳۸۰۰) با ستون مویی با طول ۲۵ متر و قطر ۰/۲۵ میلی متر و آشکار ساز یونیزاسیون شعله (FID) ساخت کشور آلمان برای اندازه گیری غلظت تولوئن قبل و بعد از جذب استفاده شد. از فلومتر حباب صابون برای تنظیم دبی هوای عبوری استفاده شد. تولوئن با خلوص ۹۹٪ و مواد اولیه کربن فعال از نمایندگی شرکت مرک در ایران فراهم شد. کربن فعال به صورت نانو ذرات با

تولون می باشد. نتایج تصویر برداری الکترونی از نانو کربن فعال در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکست اشعه ایکس جاذب ها (XRD) تهیه گردید. تصاویر حاکی از آن بود که نانو کربن فعال از نظر مورفولوژی دارای سطوح بیشتری برای جذب بخارات



شکل ۱- تصاویر الکترونی (الف) روبشی (ب) انتقالی و (ج) اشعه ایکس نانو کربن فعال

تولون به دستگاه GC تزریق گردید. آزمایشات در رطوبت ثابت ۳۲٪ و در دو زمان ثابت ۱۰ و ۳۰ دقیقه و در دماهای مختلف انجام شد. میانگین ظرفیت جذب جاذب ها بر حسب میلی گرم بر گرم بعد از ۱۰ بار تکرار طبق معادله زیر محاسبه شد.

$$q_e = \frac{(C_e - C_e) \times V}{m} \quad \text{معادله ۱}$$

در این رابطه، q_e ظرفیت جذب (میلی گرم بر گرم)، C_e غلظت اولیه تولون (میلی گرم بر لیتر)، C_e غلظت نهایی تولون (میلی گرم بر لیتر)، V حجم ویال (لیتر) و m جرم جاذب (گرم) بود.

۴،۲. طراحی سیستم دینامیک برای محاسبه راندمان جذب

در این سیستم، از یک بخار ساز توسط حمام ترمو استاتیک استفاده شد. میزان بخار آب و اکسیژن خالص به نسبت مشخص توسط شیر تنظیم، به داخل کیسه هوا هدایت شد. با استفاده از شناساگرهای گاز اکسیژن و بخار آب در هر لحظه میزان اکسیژن و بخار آب در کیسه هوا تعیین گردید. از طرف دیگر مایع تولون از طریق ایمپینجر وارد کیسه هوا شده و بخارات آن در معرض بخار آب و اکسیژن، فضای

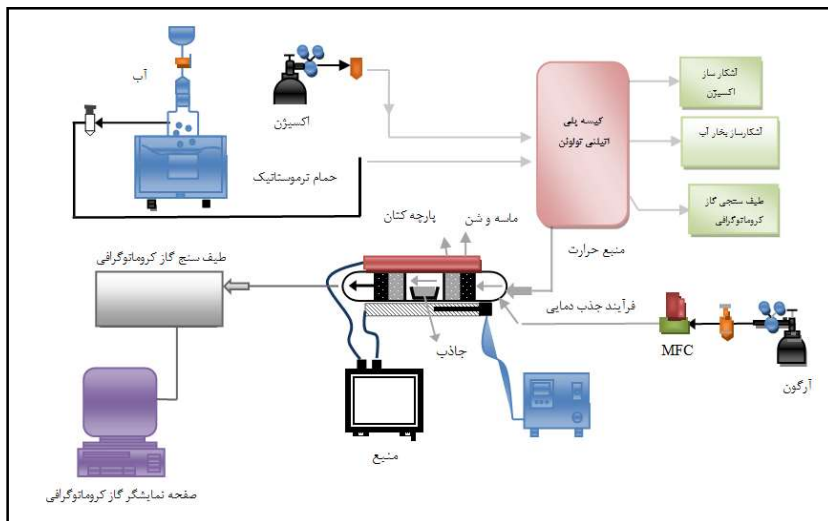
۴،۲. منحنی کالیبراسیون تولون

برای بدست آوردن منحنی استاندارد ابتدا گستره غلظتی تولون از ۵ میلی گرم بر لیتر تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در کیسه های نمونه برداری ساخته شد و برای آنالیز به دستگاه GC تزریق شد. این منحنی طبق روش پیشنهادی نایوش ۱۵۰۱ رسم شد (NIOSH method, ۲۰۱۶). دمای تزریق ۲۰۰ درجه سانتیگراد بود و دمای ستون از ۳۵ درجه سانتیگراد با سرعت ۲۰ درجه در دقیقه به ۹۰ درجه سانتیگراد در دقیقه افزایش یافت. لازم به ذکر است هر غلظتی از تولون سه بار به دستگاه تزریق شد و میانگین سه غلظت در نظر گرفته شده است. نمودار کالیبراسیون بر حسب مساحت بر غلظت رسم گردید.

۵،۲. طراحی سیستم استاتیک برای محاسبه ظرفیت جذب

برای محاسبه ظرفیت جذب در سیستم استاتیک، غلظت های بالایی از تولون (۱۰۰-۱۰۰۰ میلی گرم) توسط سرنگ تزریق مایع به ویال های شیشه ای حاوی جاذب ها (۰،۲ گرم) تزریق شد. سپس ۴۰۰ میکرولیتر از هوای داخل ویال برای آنالیز مقدار

کیسه پر کرد (شکل ۲).



شکل ۲- سیستم دینامیک طراحی شده برای محاسبه راندمان جذب جاذب ها

تزریق شده و سپس بر طبق معادله ۲ راندمان جذب محاسبه گردید.

$$\text{معادله ۲} \quad \frac{\text{غلظت نهایی تولوئن (ppm)}}{\text{غلظت اولیه تولوئن (ppm)}} = (\%) \text{ راندمان جذب}$$

۷،۲. مدل ایزوترم جذب لانگموئر

در این مطالعه از مدل ایزوترم لانگموئر برای بررسی محاسبه حداکثر ظرفیت جذب جاذب استفاده شد. ایزوترم های جذب معادلاتی هستند که در حالت تعادل بکار رفته و جهت تعیین ظرفیت تئوریکی جذب یک آلاینده مشخص بکار می روند. مدل ایزوترم جذب لانگموئر مربوط به جذب تک لایه ای است و انرژی یکسان جذب در سطح، از مفروضات معادله آن است. نسبت توزیع ماده حل شدنی بین دو فاز تابعی از غلظت ماده حل شدنی مورد نظر، غلظت و خصوصیات مواد حل شدنی رقیب و خصوصیات محلول می باشد. بهترین روش بیان این توزیع تعیین مقدار q_e به عنوان تابعی از C_e در دمای ثابت

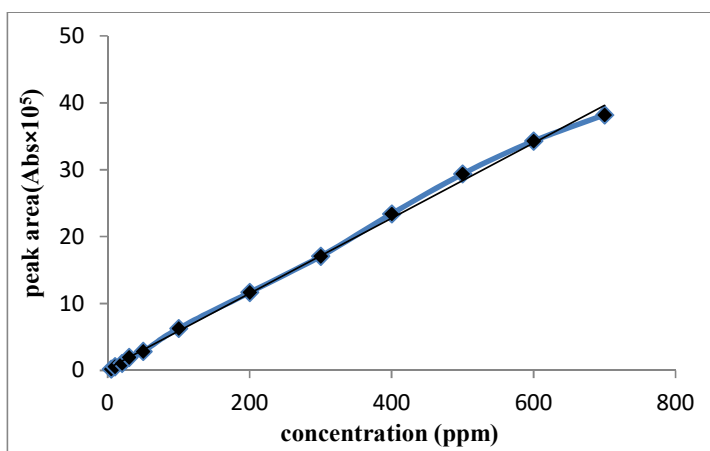
در سیستم دینامیک طراحی شده برای محاسبه راندمان جذب کربن فعال و نانو کربن فعال غلظت های مختلفی از تولوئن با سرنگ تزریق مایع از محلول اولیه برداشته و داخل ایمپینجر تزریق می شود. استاندارد مرکز ملی بهداشت و ایمنی آمریکا (NIOSH)، میزان مواجهه با تولوئن در هوای محیط کار ۱۰۰ پی پی ام می باشد. براین اساس میزان غلظت های تولوئن بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در دبی های مختلف با جرم های متفاوت جاذب مورد بررسی قرار گرفت. هوای حاوی تولوئن در زمان های ۱-۱۰ دقیقه با دبی های مختلف ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی لیتر بر دقیقه از ایمپینجر به سمت کربن فعال و نانو کربن فعال با مقادیرهای ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی گرم عبور نموده و به داخل کیسه هوا هدایت می شود. بر اساس حجم نمونه های آنالیز بهترین شرایط جذب بهینه و انتخاب گردید. محتوای کیسه هوا برای آنالیز به دستگاه گاز کروماتوگرافی

۳. نتایج

در این تحقیق برای دو سیستم استاتیک و دینامیک نتایج ذیل حاصل شد. ظرفیت و راندمان جذب تولوئن توسط جاذب در سیستم دینامیک و استاتیک مورد بررسی و نتایج مقایسه قرار گرفته است. در سیستم دینامیک تاثیر متغیرها بر راندمان جذب بررسی و بهینه گردید. طراحی سیستم استاتیک و دینامیک در آزمایشگاه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران و آزمایشگاه پژوهشکده سلامت صنعت نفت تهران انجام شد. نتایج تجربی بدست آمده به شرح ذیل می باشد.

۱.۳.۱. منحنی کالیبراسیون

منحنی کالیبراسیون غلظت تولوئن با توجه به معادله $y = ax + b$ به صورت $y = 0.0562x + 0.2768$ بدست آمد و این معادله برای محاسبات ظرفیت و راندمان جذب بکار گرفته شد (شکل ۴).



شکل ۴- نمودار منحنی کالیبراسیون تولوئن
 $Y = 0.0562X + 0.2768; R^2 = 0.9982$

می باشد. q_e مقدار ماده حل شدنی جذب شده در واحد جرم جاذب و همچنین غلظت باقیمانده ماده حل شدن در حال تعادل است. معمولاً مقدار ماده جذب شده در واحد جرم جاذب، با افزایش غلظت افزایش می یابد، اما این رابطه خطی نیست. متداول ترین رابطه C_e و q_e مربوط به سیستم هایی می شود که در آن ها یک لایه منفرد (به عرض یک مولکول) از مولکول های ماده حل شدنی در سطح جاذب تشکیل می شود (Yi et al., 2016). ایزوترم لانگموئر به صورت زیر می باشد:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{ab} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{b} \quad \text{معادله ۳}$$

C_e : غلظت ماده جذب شونده در حالت تعادل بر حسب میلی گرم بر لیتر، q_e : مقدار ماده جذب شده در حالت تعادل بر حسب میلی گرم بر گرم، a ثابتی است که به پیوستگی محل های جذب و انرژی جذب بستگی دارد، b : حداکثر یون فلزی جذب شده برای تکمیل یک لایه، ثابتی است که به ظرفیت جذب بستگی دارد.

۲.۳. ظرفیت جذب جاذب ها

و ۱۰ میلی گرم از جاذب ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ۳۲٪ و غلظتهای مختلفی از تولوئن

برای تعیین مقادیر بهینه دما و زمان تماس، مقدار ۵

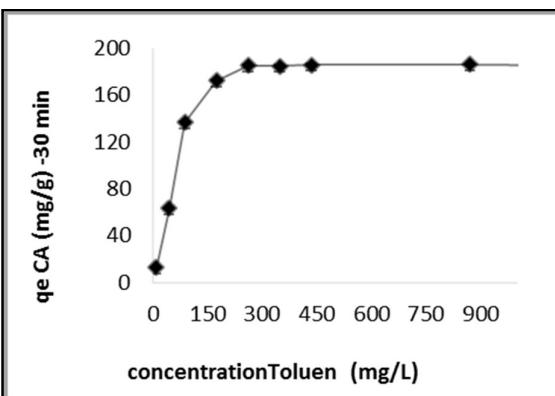
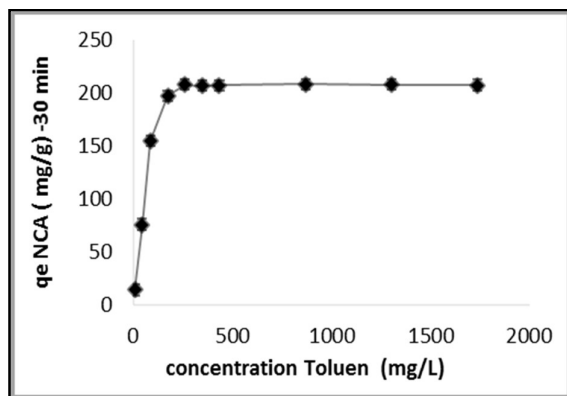
حذف تولوئن از هوای اتمسفری ...

ظرفیت جذب جذب جاذب ها دارد. ظرفیت جذب جاذب ها در سیستم استاتیک در جدول ۱ و نمودارهای ۱ و ۲ آورده شده است.

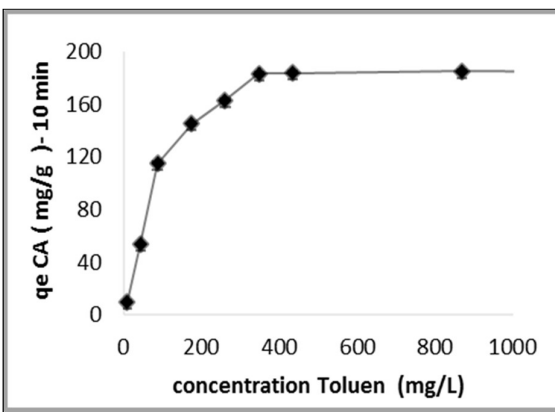
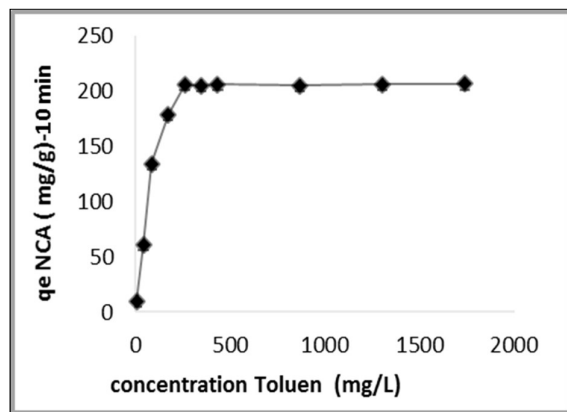
۸/۶ الی ۷۷/۴ میلی گرم) در ویال شیشه ای در دو زمان تماس ۱۰ دقیقه و ۳۰ دقیقه بکار گرفته شد. افزایش مدت زمان تماس، تاثیر مثبت بر افزایش

جدول ۱- مقایسه ظرفیت جذب و ایزوترم جذب سطحی تولوئن از هوا توسط جاذب ها در ۲۵ درجه سانتیگراد

معادله	ظرفیت جذب mg/g	ماکزیمم ظرفیت جذب	a	R ²	زمان	جاذب
$y=0.1026x+0.0028$	۲۰۷/۶	۳۵۷/۱۴	۰/۰۲۷۲	۰/۹۶۰۴	۳۰	نانو کربن فعال
$y=0.3312x+0.0011$	۲۰۵/۸	۹۰۹/۰۹	۰/۰۰۳	۰/۹۵۶۶	۱۰	نانو کربن فعال
$y=0.11785x+0.0037$	۱۸۵/۲	۲۷۰/۲۷	۰/۰۲۰۷	۰/۹۸۸۶	۳۰	کربن فعال
$y=0.3682x+0.0029$	۱۷۹/۴	۳۴۴/۸۲	۰/۰۰۷	۰/۹۸۶۵	۱۰	کربن فعال



نمودار ۱- ظرفیت جذب کربن فعال و نانو کربن فعال در زمان ۳۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد



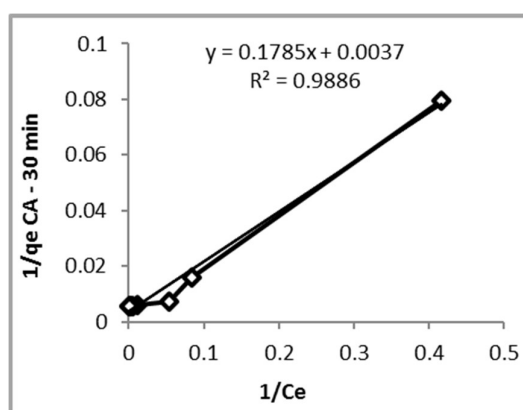
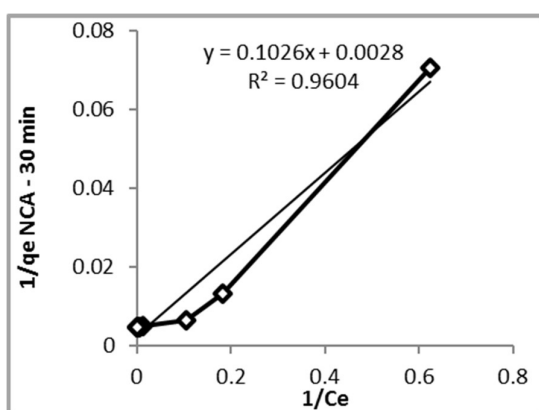
نمودار ۲- ظرفیت جذب کربن فعال و نانو کربن فعال در زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

لانگموئر (a) بدست آمد. مقدار ضریب رگرسیون بدست آمده نشان دهنده جذب قابل قبول تولوئن توسط نانو کربن فعال می باشد (نمودار ۳ و ۴) (Shir Khanloo et al., ۲۰۱۵)

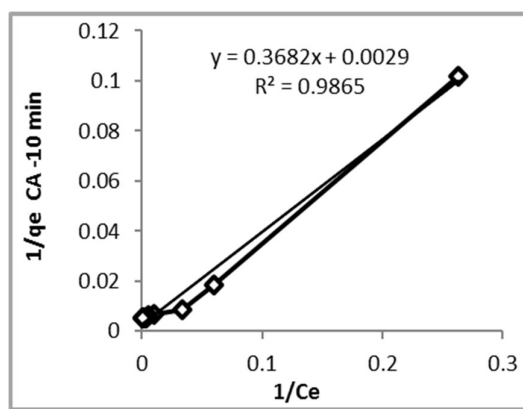
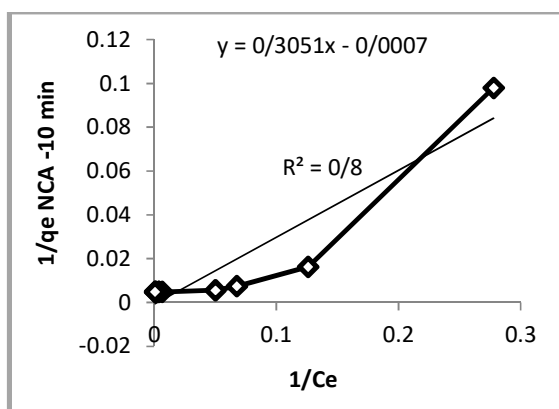
۳.۳. ماکزیمم ظرفیت جذب بر اساس ایزوترم

جذب سطحی لانگموئر

ایزوترم لانگموئر برای جذب سطحی تولوئن توسط مقادیر متفاوتی از $1/C_e$ و $1/q_e$ بکار برده شد و معادله خط و عدد رگرسیون بدست آمد. پس از آن با توجه به مقادیر حداکثر ظرفیت جذب (b) ثابت



نمودار ۳- ایزوترم جذب سطحی کربن فعال و نانو کربن فعال در زمان تماس ۳۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد



نمودار ۴- ایزوترم جذب سطحی کربن فعال و نانو کربن فعال در زمان تماس ۱۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

مورد بررسی قرار گرفت. در پایلوت طراحی شده تاثیر متغیرهای مختلف از جمله دما، زمان تماس، غلظت تولوئن و مقادیر جذب بر جذب تولوئن از طریق اندازه گیری غلظت تولوئن با دستگاه گاز کروماتوگرافی

۴.۳. راندمان جذب جاذب ها و اثر متغیرها بر جذب

با توجه به تاثیر پذیری میزان راندمان جذب کربن فعال و نانو کربن فعال از سایر متغیرها، تاثیر هر یک از متغیرهای مذکور بر روی میزان راندمان جذب

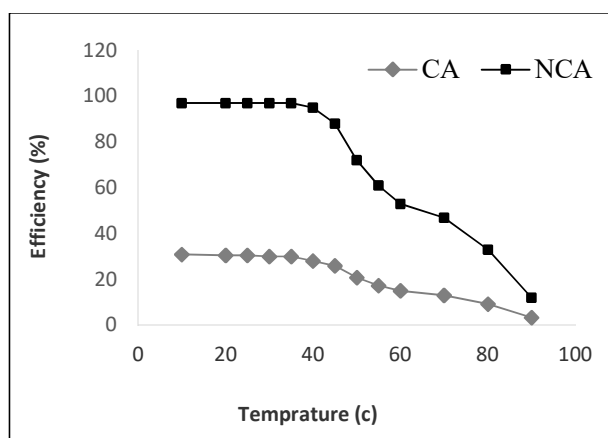
و ۱۰ میلی گرم از جاذب ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ۳۲٪ و غلظتهای مختلفی از تولوئن (۸/۶ الی ۷۷/۴ میلی گرم) در ویال شیشه ای در دو زمان تماس ۱۰ دقیقه و ۳۰ دقیقه ریخته شد. سپس با تزریق مقداری از گاز داخل ویال به GC، میزان جذب توسط جاذب ها تعیین گردید. نتایج نشان داد دمای بهینه جذب برای هر دو جاذب ۰ الی ۲۵ درجه سانتیگراد و دمای بهینه واجذب برای جاذب نانو کربن فعال ۹۸ درجه سانتیگراد بود. بنابراین بعد از انجام جذب و واجذب های متعدد در دمای بهینه، بهترین زمان تماس جذب تولوئن توسط کربن فعال و نانو کربن فعال به ترتیب (۱۰ دقیقه و ۲۰ ثانیه) و (۱۰ دقیقه و ۱۰ ثانیه) بدست آمد (نمودار ۵).

مورد بررسی شد. برای بررسی بازیافت حرارتی و بررسی تکرارپذیری جاذب ها از روش بازجذب حرارتی استفاده شد. برای بررسی زمان ماندگاری بر روی جاذب، مقدار جرم و دبی، هوای حاوی تولوئن از روی جاذب عبور داده شد و سپس اختلاف وزن جاذب قبل و بعد از عبور تولوئن تعیین گردید. به منظور باز جزی حرارتی، دمای جاذب افزایش یافت و با عبور جریان گاز آرگون بازجذب حرارتی انجام شد. برای محاسبه راندمان جاذب از رابطه زیر استفاده شد. معادله ۳

جرم تولوئن نهایی / جرم تولوئن اضافه شده = راندمان (%)

۳.۵. اثر دما و زمان تماس

برای تعیین مقادیر بهینه دما و زمان تماس، مقدار ۵



نمودار ۵- مقایسه میزان درصد راندمان جذب تولوئن توسط جاذب ها در دماهای متفاوت

و گاز آرگون

برای تعیین حداکثر میزان جذب تولوئن توسط جاذب، مقادیر مختلفی از آنها بکار گرفته شد. در یک غلظت مشخص تولوئن جرم های مختلف کربن فعال و نانو کربن فعال (۳۰-۱ میلی گرم) استفاده گردید. نتایج نشان داد که میزان بهینه جاذب نانو کربن فعال ۵ میلی گرم و کربن فعال ۳۰ میلی گرم در شرایط گاز آرگون و ۷۵ میلی گرم در شرایط هوای اتمسفری

۳.۶. اثر دبی در شرایط هوای اتمسفری و گاز آرگون

مقدار بهینه دبی گاز عبوری تولوئن در شرایط اتمسفری ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه برای جاذب نانو کربن فعال با راندمان جذب ۹۸٪ و ۱۵۰ میلی لیتر بر دقیقه برای جاذب کربن فعال با راندمان جذب ۹۰٪ بدست آمد (نمودار ۶).

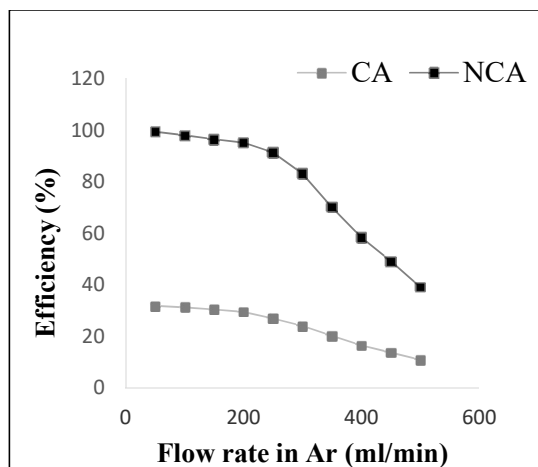
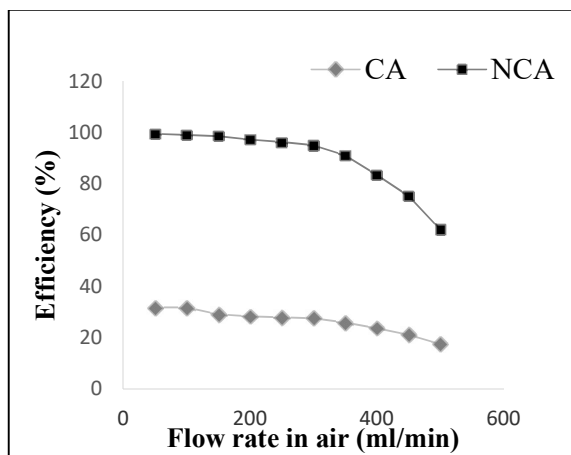
۳.۷. اثر مقدار جاذب در شرایط هوای اتمسفری

می باشد (نمودار ۷).

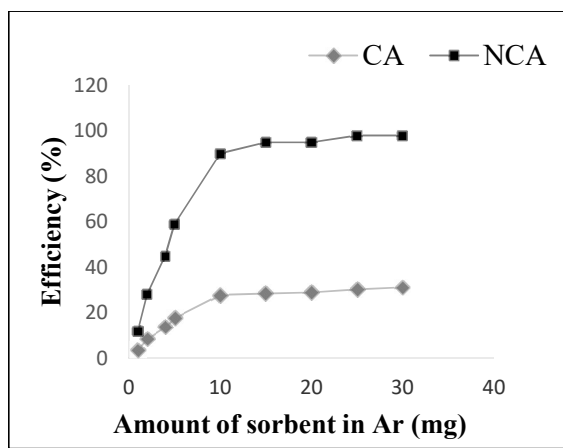
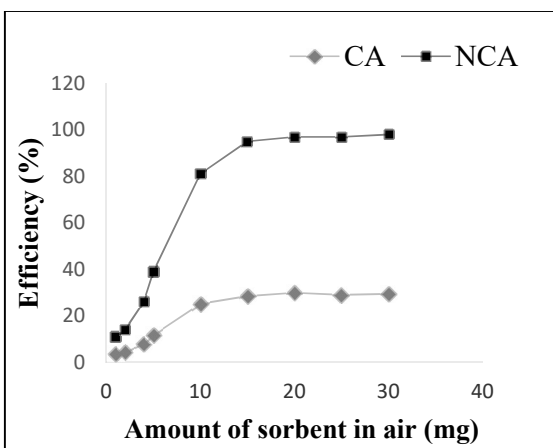
۸.۳. قابلیت استفاده مجدد از جاذب ها

برای تعیین قابلیت استفاده مجدد از جاذب ها، مقدار غلظت مشخصی از تولوئن در پایلوت دینامیک ساخته شد. ۵ میلی گرم از جاذب های کربن فعال و نانو کربن فعال برای موارد متعدد مورد جذب و واجذب

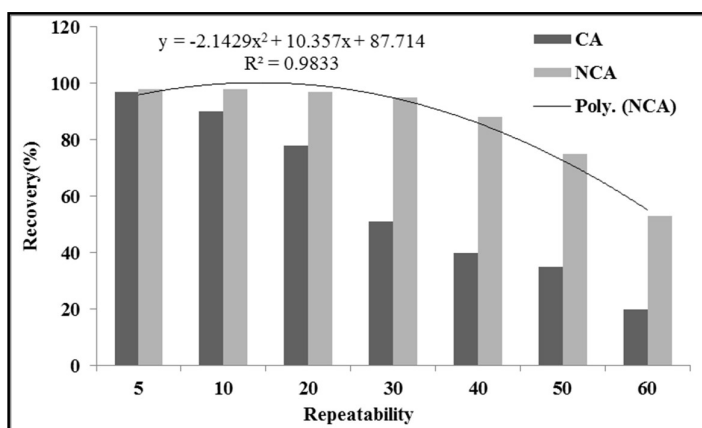
قرار گرفتند که نتایج بعد از ۳۰ بار تکرار پی در پی، راندمان حداکثری جذب نانو کربن فعال را بیش از ۹۵٪ و برای کربن فعال کمتر از ۳۲٪ نشان داد. این امر نشان از قابلیت بالای استفاده مجدد و عمر طولانی جاذب نانو کربن فعال می باشد (نمودار ۸).



نمودار ۶- مقایسه میزان درصد راندمان جذب در دبی های مختلف تولوئن در شرایط گاز آرگون و هوای اتمسفری پایلوت



نمودار ۷- مقایسه میزان درصد راندمان جذب در مقادیرهای مختلف جاذب در شرایط گاز آرگون و هوای اتمسفری



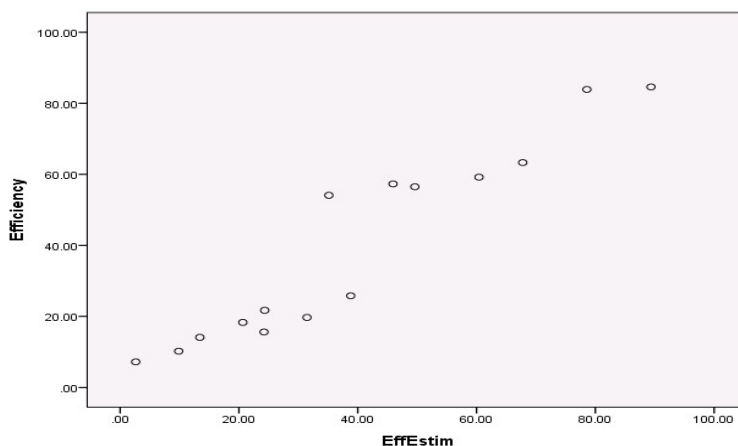
نمودار ۸- قابلیت استفاده متعدد از جاذب های مورد بررسی

دبی گاز تولوئن و مقدار جاذب مورد کاربرد، با نرم افزار SPSS مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۵).

۹,۳. آنالیز آماری نتایج راندمان جذب توسط نانو

کربن فعال

نتایج حاصل از راندمان جذب تولوئن توسط نانو کربن فعال به منظور بکارگیری در صنعت و محاسبه میزان



شکل ۵- راندمان جذب نانو کربن فعال در شرایط بهینه

بیشتری برای حذف تولوئن هوا نسبت به کربن فعال دارد. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش بخار آب و اکسیژن هوا تاثیر جزئی در جذب تولوئن و راندمان جذب دارد. همچنین افزایش دمای محیط می تواند بر روی بازده جاذب ها تاثیر گذاشته و راندمان جذب را کاهش دهد. بر اساس مطالعه اصائلو و همکاران در سال ۲۰۱۵، جذب تولوئن هوا در شرایط مختلف از جمله زمان تماس، مقدار جاذب، غلظت جاذب، رطوبت و دما مورد بررسی و بهینه

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه حذف تولوئن توسط دو جاذب کربن فعال و نانو کربن فعال در دو سیستم استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد راندمان جذب در سیستم دینامیک کمتر از مقدار آن در سیستم استاتیک می باشد. کارایی جذب تولوئن هوا توسط نانو کربن فعال با جاذب کربن فعال در شرایط متفاوت دما و رطوبت هوا مقایسه شد. نتایج نشان داد نانو کربن فعال راندمان و تکرار پذیری

شده از پوسته های درخت و غلظت های متفاوت تولوئن وجود داشت. حذف تولوئن بوسیله کربن فعال تولید شده در مدل فروندلیچ از قابلیت بالایی برخوردار بود ولی از نانو کربن فعال کمتر بود. نانو ذرات نانو کربن فعال از یکنواختی بهتری نسبت به کربن فعال تولید شده از پوسته های درخت برخوردار دادر بوده و ظرفیت جذب بالاتری دارد (Tham *et al.*, ۲۰۱۱). آیت حسین و همکارانش برای حذف تولوئن از هوا از نانو ذرات اکسید تیتانیم (TiO_2) به عنوان فتو کاتالیست استفاده نمودند. ذرات دی اکسید تیتانیم را روی سطح سیمانی نشانده وبر اساس روشهای فتو کاتالیستی میزان ۳ میکرو گرم تولوئن بر لیتر هوا را تا ۲۰٪ کاهش دادند و این مقدار ۲۵٪ نانو ذرات کربن فعال می باشد. زن همکارانش برای حذف تولوئن از هوا از فیبر کربنی فعال (activated carbon fiber) روی سیلیس بر اساس کاتالیست کلرید پلاتین/ نیکل (Pt/Ni) استفاده نمودند. ساخت این کاتالیست وجاذب گران قیمت وبازده آن کمتر از نانو کربن فعال بوده واز ظرفیت جذب کمتری نسبت به نانو کربن فعال برخوردار است (Zhen *et al.*, ۲۰۱۶). این تحقیق، به خوبی کاربرد و کارایی فناوری نانو را برای حفاظت از محیط زیست و هوا نشان داده و نانو ذرات کربنی تاثیر به سزایی در حذف تولوئن هوا دارد. نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی نانو کربن فعال و مقایسه آن با مورفولوژی کربن فعال نشان داد که نانو کربن فعال سطوح بیشتری برای جذب سطحی تولوئن دارد. همچنین مطالعات پایلوت دینامیکی و استاتیکی نشان داد که امکان جذب بخارات تولوئن توسط نانو کربن فعال در شرایط محیط کار و هوای اتمسفری وجود دارد و پتانسیل جذب تولوئن توسط آن بیشتر از جذب تولوئن توسط

سازی قرار گرفت. ظرفیت جذب تولوئن برای گرافن اکساید اصلاح شده با مایع یونی، میزان ۱۲۶ میلی گرم بر گرم بود که از ظرفیت جذب نانو کربن فعال ۲۰۷٫۶ میلی گرم بر گرم کمتر می باشد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، مایع یونی پوشش داده شده روی گرافن اکساید نقش اساسی در جذب تولوئن هوا داشته ولی در مطالعه اخیر نانو کربن نقش اصلی در جذب تولوئن هوا دارد که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر از مایع یونی می باشد (Osanloo *et al.*, ۲۰۱۵). سیو و همکاران در مطالعه ای در سال ۲۰۱۰ جذب بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و پارا زایلن هوا را بوسیله کربن نانو تیوب های اکسید شده با هیپوکلرید سدیم مورد بررسی قرار دادند. کربن نانو تیوب هایی که به روش رسوب کاتالیستی بخار شیمیایی ساخته شده بودند، به وسیله محلول هیپوکلرید سدیم ۲ مولار برای ۲ ساعت در نقطه جوش برای حذف نمونه های آلی متصل به دیواره های کربن نانو تیوبها خالص سازی شدند. نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت جذب جاذب با افزایش زمان افزایش می یابد ولی این روش کارایی و ظرفیت جذب کمتری نسبت به نانو کربن فعال داشته و حذف تولوئن هوا را کمتر از بنزن و اتیل بنزن انجام می دهد (Su *et al.*, ۲۰۱۰). تحقیقی که در سال ۲۰۱۵ توسط توهم و همکاران در راستای یافتن جاذب های کم هزینه برای ترکیبات آلی فرار انجام شد. در این تحقیق اثربخشی کربن فعال تولید شده از پوسته های درخت (Durian Shell Activated Carbon) برای از بین بردن بخارهای تولوئن مورد ارزیابی قرار گرفت. کارایی حذف تولوئن توسط پوسته درخت با استفاده از غلظت های متفاوت تولوئن بررسی شد. تفاوت ناچیزی بین جذب تولوئن توسط کربن فعال تولید

تقدیر و تشکر

این مطالعه با حمایت پژوهشکده سلامت صنعت نفت انجام شده است. بدینوسیله از همیاری و حمایت ریاست محترم پژوهشکده سلامت صنعت نفت و نیز همکاری مسئولین محترم آزمایشگاه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران تشکر و قدرانی به عمل می آید.

کربن فعال می باشد. با توجه به رابطه مستقیم بین راندمان جذب جاذب ها و جرم های مختلف آنها در شرایط بهینه، استفاده از نانو کربن فعال نسبت به کربن فعال مقرون به صرفه تر است. از آنجا که مقدار جرم جاذب نانو کربن فعال مورد استفاده در مطالعه نسبت به جاذب های دیگر بسیار پایین بوده و راندمان بالایی را در جذب تولوئن نشان داده می توان انتظار داشت که در مقادیر جرم جاذب بیشتر بتوان غلظت های بالایی از تولوئن هوا را نیز جذب نمود.

References:

- An, J., Zhu, B., Wang, H., Li, Y., Lin, X. and Yang, H., ۲۰۱۴. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China. *Atmospheric environment*, ۹۷, pp.۲۰۶-۲۱۴.
- Bari, M.A., Kindziarski, W.B. and Spink, D., ۲۰۱۶. Twelve-year trends in ambient concentrations of volatile organic compounds in a community of the Alberta Oil Sands Region, Canada. *Environment international*, ۹۱, pp.۴۰-۵۰.
- Baudic, A., Gros, V., Sauvage, S., Locoge, N., Sanchez, O., Sarda-Estève, R., Kalogridis, C., Petit, J.E., Bonnaire, N., Baisnée, D. and Favez, O., ۲۰۱۶. Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۶(۱۸), pp.۱۱۹۶۱-۱۱۹۸۹.
- Chen, Y.C., Chiang, H.C., Hsu, C.Y., Yang, T.T., Lin, T.Y., Chen, M.J., Chen, N.T. and Wu, Y.S., ۲۰۱۶. Ambient PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Changhua County, central Taiwan: Seasonal variation, source apportionment and cancer risk assessment. *Environmental pollution*, ۲۱۸, pp.۳۷۲-۳۸۲. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.016>, ۲۰۱۶.
- Carlos-Wallace, F.M., Zhang, L., Smith, M.T., Rader, G. and Steinmaus, C., ۲۰۱۵. Parental, in utero, and early-life exposure to benzene and the risk of childhood leukemia: a meta-analysis. *American journal of epidemiology*, ۱۸۳(۱), pp.۱-۱۴.
- Gangupomu, R.H., Sattler, M.L. and Ramirez, D., ۲۰۱۶. Comparative study of carbon nanotubes and granular activated carbon: physicochemical properties and adsorption capacities. *Journal of hazardous materials*, ۳۰۲, pp.۳۶۲-۳۷۴.
- Huang, Z., Kong, S., Xing, X., Mao, Y., Hu, T., Ding, Y., Li, G., Liu, D., Li, S. and Qi, S., ۲۰۱۸. Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for ۱ year. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۸(۷), pp.۴۵۶۷-۴۶۷۹.
- Harbison, R.D., Bourgeois, M.M. and Johnson, G.T., ۲۰۱۵. *Hamilton and Hardy's industrial toxicology*. John Wiley & Sons.
- Hamadianian, M., Tavangar, Z. and Naseh, S., ۲۰۱۶. The modification of benzene adsorption on zigzag single-wall carbon nanotubes by carboxylation. *Materials Research Express*, ۳(۱۲), pp.۱۲۵۰۱۰.
- Hussein, A., Al Anbari, R., and Hassan, M., ۲۰۱۸. Toluene concentrations reduction by using photocatalytic coating methods for cementitious materials. *MATEC, web of conferences*, ۱۶۲, ۰۵۰۰۳.
- Liu, Q., Shi, J. and Jiang, G., ۲۰۱۲. Application of

- graphene in analytical sample preparation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, ۳۷, pp. ۱-۱۱.
- MinKim, Ji., HoonKim, ji., YeonLee, c., WookJerng, D., SeonAhn, Ho., ۲۰۱۸. Toluene and acetaldehyde removal from air. *Journal of Hazardous Materials*, ۳۴۴(۱۵), pp. ۴۵۸-۴۶۵.
- Mohammed, J., Nasri, N.S., Zaini, M.A.A., Hamza, U.D. and Ani, F.N., ۲۰۱۵. Adsorption of benzene and toluene onto KOH activated coconut shell based carbon treated with NH₃. *International Biodeterioration & Biodegradation*, ۱۰۲, pp. ۲۴۵-۲۵۵.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M. and Pasher, J., ۲۰۱۸. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, ۲۹, pp. ۴۰-۴۸.
- Ncibi, M.C. and Sillanpää, M., ۲۰۱۵. Mesoporous carbonaceous materials for single and simultaneous removal of organic pollutants: activated carbons vs. carbon nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, ۲۰۷, pp. ۲۳۷-۲۴۷.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH; ۲۰۱۶). Manual of analytical methods, method ۱۵۰۱.
- Pearce, N., Blair, A., Vineis, P., Ahrens, W., Andersen, A., Anto, J.M., Armstrong, B.K., Baccarelli, A.A., Beland, F.A., Berrington, A. and Bertazzi, P.A., ۲۰۱۵. Evaluating carcinogenic hazards to humans. *Environmental health perspectives*, ۱۲۳(۶), p. ۵۰۷.
- Stenehjem, J.S., Kjærheim, K., Bråtveit, M., Samuelsen, S.O., Barone-Adesi, F., Rothman, N., Lan, Q. and Grimsrud, T.K., ۲۰۱۵. Benzene exposure and risk of lymphohaematopoietic cancers in ۲۵ ۰۰۰ offshore oil industry workers. *British journal of cancer*, ۱۱۲(۹), pp. ۱۶۰۳-۱۶۱۴.
- Shirkhanloo, H., Osanloo, M. and Qurban Dadras, O., ۲۰۱۵. Nobel Method for Toluene Removal from Air Based on Ionic Liquid Modified Nano-Graphen. *International Journal of Occupational Hygiene*, ۷(۱), pp. ۱-۵.
- Su, F., Lu, C. and Hu, S., ۲۰۱۰. Adsorption of benzene, toluene, ethylbenzene and p-xylene by NaOCl-oxidized carbon nanotubes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, ۳۵۳, pp. ۸۳-۹۱.
- Rashidi, A. M., Kazemi, D., Izadi, N., Pourkhalil, M., Jorsaraei, A., ۲۰۱۶. Preparation of nanoporous activated carbon and its application as nano adsorbent for CO₂ storage. *Korean Journal of Chemical Engineering*, ۳۳ (۲), pp. ۶۱۶-۶۲۲.
- Taneepanichsku, N., Loonsamrong, W., Tungasingkarn, T., Gelaye, B. and Williams, M.A., ۲۰۱۸. Occupational exposure to BTEX compounds among enclosed multi-storey car park workers in central Bangkok area. *Indoor and Built Environment*, ۲۷(۵), pp. ۶۲۲-۶۲۹.
- Tham, Y., Latif, P. A., Abdullah, A., Shamala, A. and Taufiq-yap, Y., ۲۰۱۵. Performances of toluene removal by activated carbon derived from durian shell. *Bioresource technology*, ۱۰۲, pp. ۷۲۴-۷۲۸.
- World Health Organization (WHO). ۲۰۱۶. Indoor Air Pollution and Health. Geneva Switzerland. Available: <http://www.who.int/mediacentre>.
- Yi, Z., Yao, J., Zhu, M., Chen, H., Wang, F. and Liu, X., ۲۰۱۶. Kinetics, equilibrium, and thermodynamics investigation. Springer plus, ۵(۱), pp. ۱۱۶۰-۱۱۷۴.
- Zhang, B.T., Zheng, X., Li, H.F. and Lin, J.M., ۲۰۱۳. Application of carbon-based nanomaterials in sample preparation: a review. *Analytica chimica acta*, ۷۸۴, pp. ۱-۱۷.
- Zhen-Zhen, X., Lin W., Ge C., Lei, S. and Yi-Bo Z., ۲۰۱۶. Adsorption properties of regenerative materials for removal of low concentration of toluene. *Journal of the Air & Waste Management Association*, ۶۶(۱۲), pp. ۱۲۲۴-۱۲۳۶.