

## Research Paper

## Comparison Between the Efficiency of Plain GAC and Supported GAC With Manganese Oxide for Toluene Adsorption From Waste Air Stream

Fatemeh Rezaei<sup>1</sup>, \*Gholamreza Moussavi<sup>2</sup>, Alireza Riyahi Bakhtiari<sup>3</sup>, Yadollah Yamini<sup>4</sup>

1. PhD, Department of Environment, School of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Full Professor, Department of Environmental Health, School of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Environment, School of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4. Full Professor, Department of Chemistry, School of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.



**Citation** Rezaei F, Moussavi Gh, Riyahi Bakhtiari A, Yamini Y. [Comparison Between the Efficiency of Plain GAC and Supported GAC With Manganese Oxide for Toluene Adsorption From Waste Air Stream (Persian)]. Journal of Sabzevar University of Medical Sciences. 2017; 23(6): 836-847. <http://dx.doi.org/10.21859/sums-2306836>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.21859/sums-2306836>

Received: 02 Jul. 2016

Accepted: 16 Oct. 2016

**ABSTRACT**

**Backgrounds** Type of adsorbent is the most important parameter to adsorb volatile organic compounds (VOCs) from the air stream. Application of a selective adsorbent could lead to the higher efficiency and lower costs in the adsorption processes. The current study aimed at investigating the efficiency of manganese oxide impregnated on GAC support (MnO/GAC) to remove toluene from air stream. The efficiency of MnO/GAC and GAC adsorbents for toluene removal were compared at the same experimental conditions.

**Methods & Materials** The MnO/GAC preparation method was Sol-gel. Retention time (0.5, 1, 1.5, 2, and 4 seconds), inlet toluene concentration (100, 200, 300, and 400 part per million, by volume) and the temperature of the air stream (25, 50, 75, and 100°C) were examined as the main functional parameters in the adsorption process.

**Results** Breakthrough time of MnO/GAC adsorbent in comparison to that of the plain GAC increased 6% to 11% at the retention time of 0.5 to 4 seconds. Adsorption capacity of GAC and MnO/GAC increased 67.9% and 61.1% by increasing inlet toluene concentration from 100 to 400 ppmv, respectively. Breakthrough time of GAC and MnO/GAC decreased 57.9% and 59.6% by increasing inlet toluene concentration from 100 to 400 ppmv, respectively. Breakthrough time of GAC decreased from 41 to 26 hours by increasing the temperature of the air stream from 25 °C to 100°C. Direct air temperature increase affected the MnO/GAC efficiency for toluene adsorption and the breakthrough time increased from 46 to 57 hours.

**Conclusion** Results of the current study showed that MnO/GAC could be applied as a good substitution for GAC in the adsorption of VOCs from air streams.

**Keywords:**

Absorption, Toluene, Manganese Oxide, Activated Carbon

**\* Corresponding Author:**

Gholamreza Moussavi, Full Professor

Address: Department of Environmental Health, School of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 82883827

E-mail: moussavi@modares.ac.ir

## مقایسه کارایی کربن فعال ساده و پوشانده شده با اکسید منگنز در جذب تولوئن از جریان هوای آلوده

فاطمه رشایی<sup>۱</sup>، غلامرضا موسوی<sup>۲</sup>، علیرضا ریاحی بختیاری<sup>۳</sup>، یدالله یحیی<sup>۴</sup>

- ۱- دکتری، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- استادیار تمام، گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۴- استادیار تمام، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

## چکیده

تاریخ دریافت: ۱۳ تیر ۱۳۹۵  
تاریخ پذیرش: ۲۵ مهر ۱۳۹۵

**هدف:** مهم ترین شاخص مؤثر در جذب آلاینده های فرار از هوا نوع جاذب است به کار گیری جاذب های گزینش پذیر، به حذف آلاینده با هزینه کمتر و کارایی بیشتر منجر می شود. در این تحقیق، کارایی جاذب اکسید منگنز پوشانده شده بر سطح کربن فعال (MnO/GAC) برای حذف تولوئن از هوا بررسی شد. همچنین کارایی جاذب MnO/GAC در شرایط آزمایشی یکسان با کربن فعال ساده مقایسه شد.

**مواد و روش ها:** جاذب MnO/GAC با روش سل ژل تولید شد. زمان ماند (۱/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۴ ثانیه) و غلظت تولوئن ورودی (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ppm) و دمای هوای ورودی (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد)، به عنوان شاخص های عملکردی مؤثر بر فرایند جذب آزمایش شد. کارایی جاذب های GAC و MnO/GAC بر اساس زمان نقطه شکست و ظرفیت جذب تعیین شد.

**یافته ها:** زمان نقطه شکست جاذب MnO/GAC در مقایسه با GAC در زمان های ماند ۱/۵ تا ۴ ثانیه، ۱۱ تا ۶ درصد افزایش یافت. افزایش غلظت تولوئن ورودی از ۱۰۰ به ۴۰۰ ppm، زمان نقطه شکست را کاهش و ظرفیت جذب را به ترتیب به میزان ۵۷٪ و ۶۷٪ درصد برای GAC و ۶۱٪ و ۶۱٪ درصد برای MnO/GAC افزایش داد. افزون بر این افزایش دمای هوای ورودی به راکتور از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سانتی گراد، زمان نقطه شکست جاذب GAC را از ۴۱ به ۲۶ ساعت کاهش داد. کارایی جاذب MnO/GAC با افزایش دما رابطه مستقیم داشته به طوری که زمان شکست ستون از ۴۶ به ۵۷ ساعت افزایش یافت.

**نتیجه گیری:** نتایج نشان داد که جاذب MnO/GAC می تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای GAC در جذب ترکیب های فرار از جریان هوا به کار گرفته شود.

## کلیدواژه ها:

جذب، تولوئن، اکسید منگنز، کربن فعال

## مقدمه

بیشتر متخصصان عقیده دارند که قرارگیری مداوم و مکرر در معرض حلال های آلی، مانند تولوئن در طول ماه ها یا سال ها می تواند تأثیر احتمالاً دائمی و طولانی مدتی بر سیستم اعصاب مرکزی داشته باشد [۳، ۴]. پژوهش ها نشان می دهد قرار گرفتن در معرض سطوح زیاد تولوئن می تواند باعث سوزش ریه ها و درد در ناحیه سینه و ورم ریه می شود [۳، ۵، ۶]. ACGIH در گزارش سالیانه خود، مقدار حد آستانه<sup>۱</sup> مجاز تولوئن را برای هشت ساعت کار روزانه بر اساس ستی بودن و تأثیر تولوئن روی سیستم اعصاب مرکزی،  $20 \text{ ppm}$  ( $75 \text{ mg/m}^3$ ) پیشنهاد کرده است [۷]. همچنین انجمن NIOSH مقدار آن را برای هشت ساعت کار

ترکیب های آلی فرار (VOCs)، دسته مهمی از آلاینده های هوا در فضای آزاد و محصور است. این دسته از ترکیب ها بعد از ذره های معلق، بیشترین فراوانی تنوع انتشار را در اتمسفر دارد [۱]. VOCها با تخریب ازن استراتوسفری و محدود فتوشیمیایی و تشدید آثار گازهای گلخانه ای مرتبط است [۲]. یکی از VOCs متداول و فراوان، تولوئن ( $C_6H_6$ ) است. این ترکیب به عنوان ماده اولیه در تولید محصول هایی از این دست استفاده می شود: حلال رنگ، تینر رنگ، پلاستیک ها، ضد عفونی کننده و گندزد، مرکب و رنگ ها، فرآورده های دارویی، جوهر چاپ، چسب، ساخت فوم، تولید بتن بنز آلدئید، اسید بنزواتیک و تی ان تی [۳].

1. Threshold limit value

\* نویسنده مسئول:

دکتر غلامرضا موسوی

نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه بهداشت محیط.

تلفن: ۸۲۸۸۳۸۲۷ (۳۱) ۰۹۸

پست الکترونیکی: moussavi@modares.ac.ir



زمان نقطه شکست بستر را در مقایسه با جذب رس، به تنهایی افزایش می‌دهد. همچنین جاذب پوشانده شده با اکسیدهای فلزی پس از زمان نقطه شکست، کارایی خود را به مدت بیست ساعت حفظ کرد که این امر خاصیت کاتالیزوری اکسیدمنگنز و اکسید آهن را تأیید می‌کند [۲۲].

محققان فعالیت کاتالیستی اکسیدمنگنز را به چند ظرفیتی بودن ساختار آن و قدرت جابه‌جایی اکسیژن شبکه‌ای نسبت دادند. افزون‌بر این مشخص شده است که وجود جای خالی کاتیون‌ها در ساختار اکسیدمنگنز، کارایی آن را در حذف ترکیب‌های آلاینده بهبود می‌بخشد [۱۱]. از آنجاکه اکسیدمنگنز به صورت پودر است، کاربرد آن در ستون‌های جذب آلاینده‌های هوا با محدودیت‌هایی روبه‌روست. برای غلبه بر این مشکل و ثابت نگه داشتن پودر اکسیدمنگنز، می‌توان از بستر نگهدارنده<sup>۲</sup> گرانولی استفاده کرد. از میان بسترهای رایج، کربن فعال به دلیل ویژگی ظرفیت جذب بسیار، سطح ویژه فراوان، قطبی نبودن، قیمت ارزان و سهولت استفاده، به صورت گسترده در فرایند جذب VOCs از جریان هوا استفاده می‌شود [۲۵].

بنابراین می‌توان انتظار داشت با به کارگیری اکسیدمنگنز پوشانده شده بر سطح کربن فعال، به طور همزمان مزایای مربوط به جاذب و کاتالیست به دست آید با این فرض جاذب کامپوزیت اکسیدمنگنز و کربن فعال (MnO/GAC) افزون بر جذب ترکیب‌های آلاینده، اکسیدمنگنز آن‌ها را تجزیه می‌کند و احتمالاً زمان اشباع جاذب و نقطه شکست ستون به تأخیر می‌افتد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون برای تجزیه و جذب VOCها از هوا، جاذب کامپوزیت کربن فعال و اکسیدمنگنز استفاده نشده است؛ بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی کارایی اکسیدمنگنز پوشانده شده بر بستر کربن فعال در حذف تولون از جریان هوای آلوده است. در مطالعه حاضر، عوامل زمان ماند و غلظت آلاینده ورودی و دمای هوای ورودی به عنوان شاخص‌های عملکردی مؤثر بر فرایند جذب سطحی در نظر گرفته شد. برای این منظور، اثر هر یک از شاخص‌های عملکردی به صورت جداگانه بر کارایی جاذب کربن فعال به تنهایی و کربن فعال پوشانده شده با اکسیدمنگنز بررسی و در نهایت نتایج به دست آمده از جاذب‌ها مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

### تهیه و آماده‌سازی جاذب

جاذب MnO/GAC با روش سل ژل<sup>۲</sup> تولید شد [۲۶، ۲۵]. از ۲/۵ گرم نیترات منگنز  $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  و ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰ گرم کربن فعال با مش ۰/۸ تا ۱/۱ میلی‌لیتر (Merck CO) به منظور تهیه سوسپانسیون اولیه استفاده شد. همچنین

روزانه ppm ۱۰۰ برای ده دقیقه در یک نوبت کاری ppm ۱۰۰ کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای ایران نیز حد مجاز یک نوبت کاری را ۲۰ ppm اعلام کرده است. [۸، ۹].

باتوجه به تأثیر مخرب تولون بر محیط زیست و سلامتی انسان، به کارگیری روش‌هایی برای نظارت بر این آلاینده و حذف آن ضروری است. یکی از روش‌های متداول حذف آلاینده‌های فرار از جریان هوا، فرایند جذب سطحی است [۱۰]. جاذب مناسب می‌تواند بین ۹۰ تا ۹۹ درصد از آلاینده‌های هوای ورودی را جذب کند [۱۱]. مشکل عمده در فرایند جذب سطحی، کاهش کارایی جاذب بر اثر اشباع شدن با ترکیب‌های آلاینده و ترکیب‌های حدواسط تولید شده طی فرایند است [۱۲]؛ بنابراین در سال‌های اخیر محققان به استفاده یا تولید جاذب‌هایی روی آورده‌اند که افزون بر توان جذبی فراوان، همزمان توانایی کاتالیستی در تجزیه و حذف آلاینده را داشته باشد. ویژگی کاتالیستی جاذب تخریب آلاینده در حین فرایند جذب روی بستر را باعث می‌شود [۱۳]؛ از این رو عمر مفید استفاده از جاذب برای حذف آلاینده افزایش و در نتیجه نیاز به احیای مکرر جاذب و هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

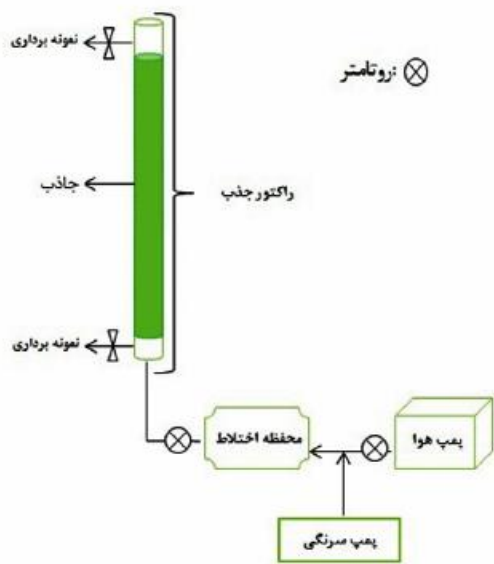
در سال‌های اخیر، محققان فراوانی توانایی کاتالیزوری اکسیدهای فلزی واسطه را در فرایندهای حذف آلاینده‌های هوا اثبات کرده‌اند [۱۸-۱۴]. از میان فلزهای واسطه، اکسیدهای منگنز به عنوان فعال‌ترین اکسیدهای فلزی برای اکسیداسیون VOCs و نیز ترکیب‌های دوستدار محیط زیست شناخته شده است [۱۹]. در این زمینه، کیم و همکاران (۲۰۱۰) در حذف تولون با استفاده از اکسیدهای فلزی  $Mn, Cu, Mo, Fe, V, Co$ ، بررسی‌هایی کردند. Zn و Ni پوشانده شده بر سطح آلومینا در حضور این بررسی‌هایی نام برده، اکسیدمنگنز بیشترین کارایی را در دماهای کمتر از ۵۳۳ کلین برای تجزیه تولون دارد [۱۹]. همچنین افزایش دما تا ۵۰۰ کلین، به میزان ۸۰ درصد فعالیت کاتالیستی اکسیدمنگنز و تجزیه تولون را افزایش داد.

سانتوز و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه اکسیداسیون تولون با استفاده از MnO نشان دادند که کمبود اکسیژن در ساختار شبکه اکسیدمنگنز و وجود گروه‌های هیدروکسیل سطحی، عوامل مؤثر بر واکنش‌های تجزیه‌ای تولون با استفاده از MnO است. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اکسیژن موجود در ساختار شبکه MnO، مولکول‌های آبی را بر اساس سازوکار مارس و فن کرولن<sup>۲</sup> اکسید و سپس اکسیژن موجود در جریان هوای ورودی باردهنگر اکسیژن شبکه‌ای را احیا می‌کند [۱۷]. میسرا و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که ترکیب اکسیدهای فلزی منگنز و آهن پوشانده شده روی مونتموریلونیت برای حذف استون (۵۵۰ ppm) از جریان هوا،

3. Support

4. Sol-gel

2. Mars & Van Krevelen



تصویر ۱. شماتیک سیستم آزمایش.

راحی آزمایش‌ها و متغیرهای مطالعه شده

آزمایش‌ها به صورت تغییر یک متغیر در هر زمان انجام شده بنابراین در هر مرحله از آزمایش تمامی متغیرها ثابت نگه داشته و تنها اثر یک متغیر بررسی شد. متغیرهای مطالعه شده در تحقیق و سطوح آزمایشی هر یک از آن‌ها در جدول شماره ۱ آورده شده است.

#### سنجش کارایی جاذب‌ها

شاخص عملکرد هر یک از جاذب‌ها براساس میزان حذف تولوئن و زمان نقطه شکست (نسبت  $C_0/C_t$  معادل ۵۰ درصد) در نظر گرفته شد. در نهایت کارایی سیستم در هر مرحله و هر آزمایش براساس مقایسه غلظت تولوئن قبل از ورود به راکتور و پس از خروج جریان هوا از آن سنجیده شد. برای این منظور هر دسته از آزمایش‌ها دو بار تکرار و میانگین به عنوان نتیجه گزارش شد.

برای تشکیل ژل، هیدروکسید سدیم یک معمولی به کار رفت. مخلوط ژل به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس برای تشکیل اکسید منگنز بر بستر، به مدت چهار ساعت در گوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد [۲۷، ۲۸]. جاذب‌های به کار رفته در این تحقیق، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف مادون قرمز (FTIR) بررسی شد.

#### سیستم آزمایشی

طرح شماتیک سیستم آزمایشی در تصویر شماره ۱ آورده شده است. سیستم استفاده شده شامل سه بخش بود: ورودی (بخش تزریق) و راکتور و خروجی. بخش ورودی شامل پمپ هوا، پمپ سرنجی، محفظه اختلاط و روتامتر بود. برای تأمین غلظت‌های مدنظر آلاینده، از پمپ تزریق سرنجی به همراه پمپ هوا و به منظور یکنواخت و ثابت کردن غلظت گاز تولوئن تولیدی، از محفظه اختلاط بعد از دستگاه تزریق سرنجی استفاده شد [۱۳]. روتامترهای نصب شده در مسیر بر میزان دبی هوای ورودی به راکتور نظارت می‌کرد.

برای انجام آزمایش‌های جذب، راکتوری با این ویژگی‌ها طراحی شد: شکل استوانه با جریان مدووم از پایین به بالا، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، قطر داخلی ۱۵ میلی‌متر و صفحه مشبک نصب شده در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از انتهای راکتور برای قراردادن جاذب‌ها. حجم جاذب‌های به کار رفته در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۷  $CM^3$  بود. بخش خروجی سیستم آزمایشی شامل درجه‌های نمونه برداری و خروجی هوای تصفیه شده بود. برای اندازه‌گیری غلظت تولوئن خروجی، از دستگاه خوانش مستقیم فوجک تایگر<sup>۵</sup> با حد تشخیص ۱ ppb استفاده شد. دتکتور دستگاه از نوع PID<sup>۶</sup> بود که به صورت هم‌زمان نمونه برداری و اندازه‌گیری را انجام می‌داد.

5. Phocheck Tiger

6. Photo Ionization Detector (PID)

جدول ۱. متغیرهای مطالعه شده در آزمایش.

متغیرهای آزمایشی شده	سطوح آزمایش
زمان واکنش (زمان ماند)	۱/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۴ ثانیه
نوع جاذب	GAC و MnO/GAC
غلظت تولوئن ورودی به راکتور	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ppm
دمای گاز ورودی	۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

تصویر ۱. شماتیک سیستم آزمایش.



درصد حذف تولوئن براساس رابطه ۱ محاسبه شد [۱۳، ۲۶]:

رابطه ۱.

$$RE = [(C_i - C_o) / C_i] \times 100\%$$

در این رابطه،  $C_i$  غلظت تولوئن ورودی (ppmv) و  $C_o$  غلظت تولوئن خروجی (ppmv) و RE درصد حذف تولوئن است.

بهمنظور محاسبه ظرفیت جذب از انتگرال گیری زیر سطح منحنی، از رابطه ۲ استفاده شد [۱۳، ۲۴]:

رابطه ۲.

$$BC = (C_{in} \times t_{bk} \times Q) / M$$

در این رابطه،  $BC$  ظرفیت جذب برحسب میلی گرم آلاینده جذب شده تا زمان نقطه شکست به ازای واحد جرم جذب (mg/g)،  $t_{bk}$  زمان نقطه شکست برحسب ساعت،  $Q$  دبی هوای ورودی به رآکتور برحسب  $m^3/h$  و  $M$  مقدار جذب به کاررفته برحسب گرم است. در نهایت کارایی هر یک از جاذب ها در شرایط بهینه با الگوهای جذب گاز یون و نلسون و توماس مطابقت داده شد. الگوی یون و نلسون براساس فرضیه تناسب میزان کاهش احتمال جذب برای هر مولکول مجذوب، بر احتمال جذب و شکست آن استوار است. این الگو می تواند برای پیش بینی رفتار نقطه شکست و کارایی جاذب در جذب گازها براساس رابطه ۳ (فرم خطی شده معادله) به کار می رود:

رابطه ۳.

$$\ln [C_i / C_o - C_i] = K_{YN} t - \tau K_{YN}$$

اجزای این رابطه، نشان دهنده مفاهیم زیر است:

$C_o$ : غلظت آلاینده ورودی به ستون جذب (mg/m<sup>3</sup>)

$C_i$ : غلظت آلاینده خروجی در ستون جذب در زمان  $t$  (mg/m<sup>3</sup>)

$K_{YN}$ : ثابت یون و نلسون (h<sup>-2</sup>)

$\tau$ : زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد منحنی نقطه شکست (h).

براساس فرم خطی معادله یون و نلسون (رابطه ۳)، مقادیر  $K_{YN}$  و  $\tau$  به ترتیب از شیب و عرض از مبدأ منحنی  $\ln [C_i / C_o - C_i]$  در برابر زمان نمونه برداری ( $t$ ) محاسبه می شود.

الگوی توماس بر این فرض استوار است که رفتار جریان در بستر جذب به صورت جریان قالبی است و هیچ اختلاط محوری در ستون وجود ندارد. در این الگو، حداکثر ظرفیت جذب و ثابت نرخ جذب در فرایندهای پیوسته براساس رابطه ۴ محاسبه می شود:

رابطه ۴.

$$\ln [(C_o / C_i) - 1] = (K_{TH} q_o m / Q) - K_{TH} C_o t$$

اجزای این رابطه، مفاهیم زیر را بیان می کند:

$C_o$ : غلظت آلاینده ورودی به ستون جذب (mg/m<sup>3</sup>)

$C_i$ : غلظت آلاینده خروجی در ستون جذب در زمان  $t$  (mg/m<sup>3</sup>)

$K_{TH}$ : ثابت توماس (m<sup>3</sup>/mg. h)

$m$ : جرم جاذب (g)

$q_o$ : حداکثر ظرفیت جذب (mg/g)

$Q$ : دبی حجمی (m<sup>3</sup>/h)

$t$ : زمان (h)

مقادیر  $K_{TH}$  و  $q_o$  با رسم منحنی  $\ln [(C_o / C_i) - 1]$  در برابر زمان ( $t$ ) محاسبه می شود.

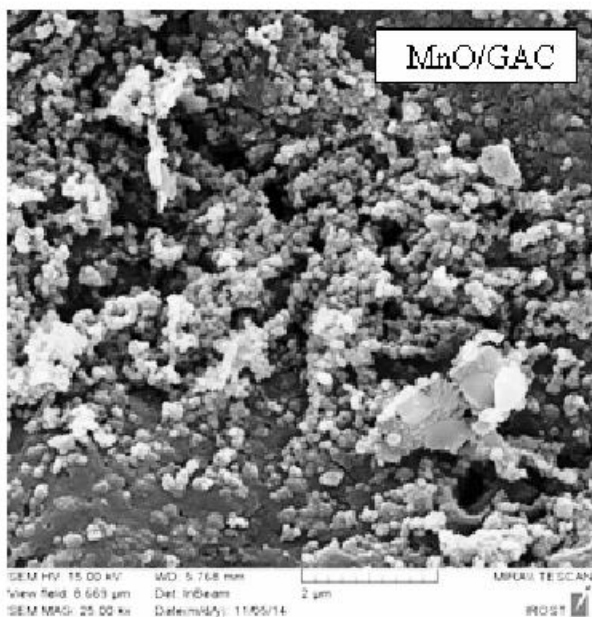
### یافته ها

#### مرفولوژی سطحی و طیف مادون قرمز

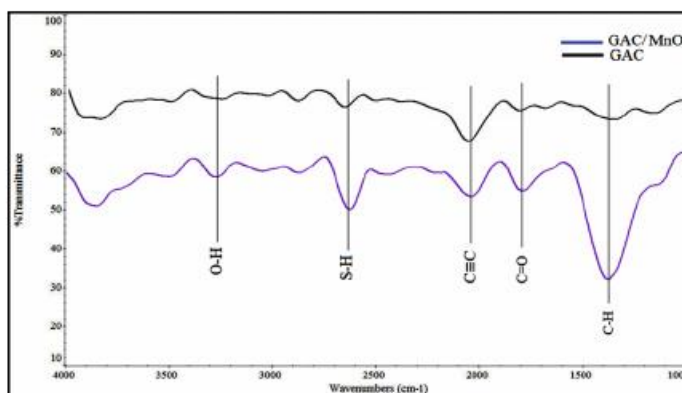
نتایج مربوطه مرفولوژی سطحی جاذب ها و طیف مادون قرمز برای تعیین گروه های عاملی سطحی در تصویر شماره ۲ الف و ب نشان داده شده است. براساس نتایج مرفولوژی سطحی (تصویر شماره ۲ الف)، کربن فعال منافذ ناپیکنواختی در سطح دارد که پوشاندن سطح کربن فعال با اکسید منگنز به پیکنواخت و همسان سازی شکل منافذ در سطح جاذب منجر شده است. نتایج مربوطه طیف مادون قرمز در تصویر شماره ۲ ب نشان می دهد که گروه های عاملی اصلی بر سطح کربن فعال شامل S-H و C=C از ترکیب های تیول است. این در حالی است که جاذب کربن فعال پوشانده شده با اکسید منگنز افزون بر گروه های عاملی مذکور، گروه های عاملی آلکان ها (C-H) و کربونیل (C=O) و هیدروکسیل (O-H) از الکل ها را دارد. همچنین شدت پیک های FTIR در جاذب MnO/GAC در مقایسه با GAC افزایش یافته که این موضوع گویای افزایش گروه های عاملی بر سطح جاذب MnO/GAC است.

#### تأثیر زمان واکنش

برای بررسی اثر زمان واکنش بر کارایی هر یک از جاذب ها، غلظت تولوئن ورودی برابر با ۱۰۰ ppm دمای هوای ۲۵ درجه سانتی گراد در تمامی آزمایش ها ثابت نگه داشته شد و دبی هوای ورودی از ۰/۱ تا ۰/۸ L/min (معادل زمان ماند ۰/۱۵ تا ۴ ثانیه) تغییر داده شد. نتایج مربوطه اثر زمان ماند بر منحنی شکست و نمودار ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC در تصویر شماره ۳ الف و ب آورده شده است. براساس منحنی های شکست در تصویر شماره



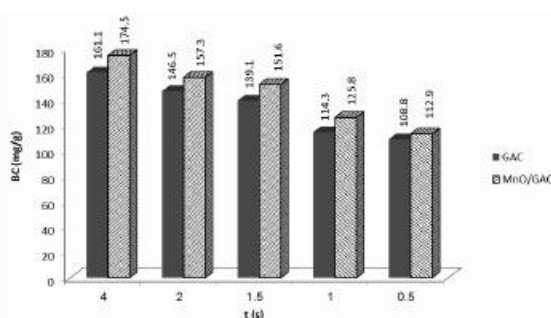
تصویر ۲ الف. مورفولوژی سطحی جاذب‌های GAC و MnO/GAC (بزرگنمایی ۲۵ kx).



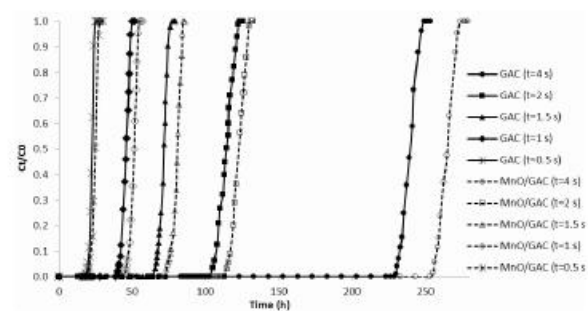
تصویر ۲ ب. طیف مادون قرمز جاذب‌های GAC و MnO/GAC و تعیین گروه‌های عاملی سطحی.

۳ الف. زمان نقطه شکست در هر دو جاذب با کم شدن زمان ماند کاهش یافت. بدین ترتیب زمان نقطه شکست جاذب کربن فعال با کاهش زمان ماند از ۴ به ۱/۵ ثانیه زمان نقطه شکست جاذب MnO/GAC را به ترتیب از ۲۵۶/۱ به ۱۱۵/۵، ۷۴/۲۵، ۴۶/۲۵ و ۲۳/۷ ساعت به ۱۰/۵، ۶۶/۵، ۴۱ و ۱۹/۵ ساعت کاهش یافت.

۳ ب. اثر زمان ماند بر کارایی جاذب GAC (نشانه توپز نشان دهنده خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نشانه توخالی نشان دهنده خطوط منقطع) در غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ ppm و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی گراد.

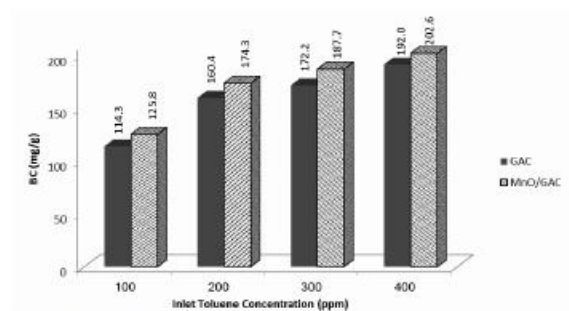


تصویر ۳ الف. اثر زمان ماند بر کارایی جاذب GAC (نشانه توپز نشان دهنده خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نشانه توخالی نشان دهنده خطوط منقطع) در غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ ppm و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی گراد.



تصویر ۳ ب. اثر زمان ماند بر کارایی جاذب GAC (نشانه توپز نشان دهنده خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نشانه توخالی نشان دهنده خطوط منقطع) در غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ ppm و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی گراد.





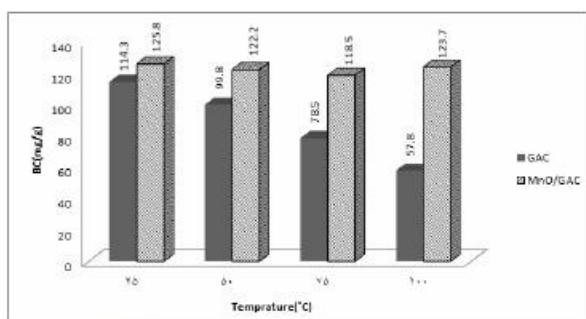
تصویر ۴ ب. مقایسه ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC در غلظت‌های ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm (زمان ماند ۱ ثانیه و دمای هوا ۲۵ درجه سانتی‌گراد).

تصویر ۴ ب. مقایسه ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC در غلظت‌های ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm (زمان ماند ۱ ثانیه و دمای هوا ۲۵ درجه سانتی‌گراد).

محاسبه شده برای هر یک از جاذب‌های آزمایش شده افزایش یافت (تصویر شماره ۴ ب).

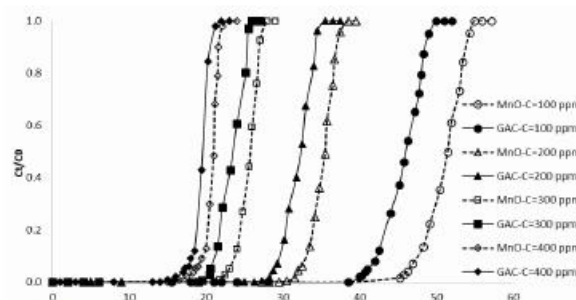
#### تأثیر دمای هوای ورودی

برای بررسی اثر دمای هوای ورودی بر کارایی هر یک از جاذب‌های GAC و MnO/GAC آزمایش‌ها در زمان ماند ۱ ثانیه و غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ ppm انجام شد و دمای هوای ورودی از ۲۵ به ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر داده شد. اثر تغییر دما بر منحنی نقطه شکست و ظرفیت جذب هر یک از جاذب‌ها در تصویر شماره ۵ الف و ب آورده شده است. براساس تصویر شماره ۵ الف، زمان نقطه شکست جاذب GAC با افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب از ۴۱ ساعت به ۳۹ و ۳۳ و ۲۶ ساعت کاهش یافت. کاهش زمان شکست، ظرفیت جذب GAC را با افزایش دما کاهش داد (تصویر شماره ۵ ب). براساس تصویر شماره ۵ الف، زمان نقطه شکست MnO/GAC با افزایش دما از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب از ۴۶/۲۵ به ۴۹ و ۵۱ و ۵۷ ساعت افزایش یافته است. تصویر شماره ۵ ب نشان می‌دهد که جاذب MnO/GAC با



تصویر ۵ ب. مقایسه ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC در دمای هوای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ C (زمان ماند ۱ ثانیه و غلظت تولوئن ۴۰۰ ppm)

تصویر ۵ ب. مقایسه ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC در دمای هوای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ C (زمان ماند ۱ ثانیه و غلظت تولوئن ۴۰۰ ppm)



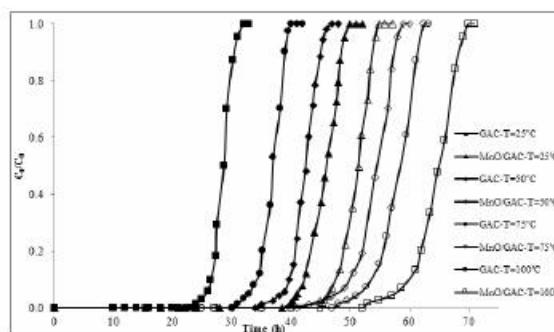
تصویر ۴ الف. اثر غلظت تولوئن ورودی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm بر کارایی جاذب GAC (نقاط توپر نشان‌دهنده خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نقاط توخالی نشان‌دهنده خطوط منقطع) در زمان ماند ۱ ثانیه و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

تصویر ۴ الف. اثر غلظت تولوئن ورودی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm بر کارایی جاذب GAC (نقاط توپر نشان‌دهنده خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نقاط توخالی نشان‌دهنده خطوط منقطع) در زمان ماند ۱ ثانیه و دمای هوای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

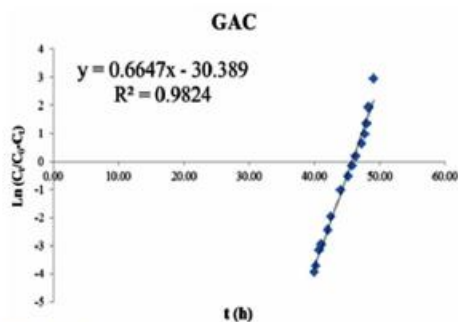
۲۰/۷۵ ساعت کاهش داد. ظرفیت جذب هر دو جاذب با افزایش زمان ماند، رابطه مستقیمی داشت (تصویر شماره ۳ ب).

#### تأثیر غلظت تولوئن ورودی

به منظور بررسی اثر غلظت تولوئن ورودی بر کارایی هر یک از جاذب‌ها، دبی هوای ورودی ۰/۴ L/min و دمای هوا ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد و غلظت تولوئن ورودی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm تغییر داده شد. نتایج مربوط به اثر غلظت تولوئن ورودی بر کارایی جاذب‌های GAC و MnO/GAC در تصویر شماره ۴ الف و ب نشان داده شده است. براساس تصویر شماره ۴ الف، زمان نقطه شکست در هر دو جاذب با افزایش غلظت تولوئن ورودی کاهش یافت. بدین ترتیب زمان نقطه شکست جاذب کربن فعال با افزایش غلظت تولوئن از ۱۰۰ به ۲۰۰ و ۳۰۰ ppm و به ترتیب از ۴۱ ساعت به ۲۸/۷۶ و ۲۰/۱۵ و ۱۷/۲۵ ساعت کاهش یافت. زمان نقطه شکست جاذب MnO/GAC با افزایش غلظت تولوئن ورودی از ۱۰۰ به ۴۰۰ ppm به ترتیب از ۴۶/۲۵ ساعت به ۳۲ و ۲۳ و ۱۸/۶۵ ساعت کاهش یافت. براساس رابطه شماره ۲، با افزایش غلظت تولوئن ورودی ظرفیت جذب



تصویر ۵ الف. اثر دمای هوای ورودی بر کارایی جاذب GAC (نقاط توپر - خطوط پیوسته) و جاذب MnO/GAC (نقاط توخالی - خطوط منقطع) در زمان ماند ۱ ثانیه و غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ ppm



تصویر ۶

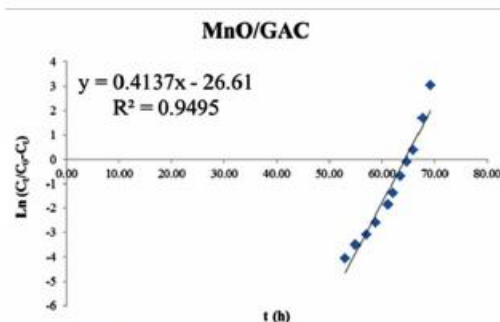
تصویر ۶ ب. نتایج مطابقت داده شده از آزمایش های جذب با استفاده از جاذب های GAC و MnO/GAC در شرایط بهینه با الگوی جذب توماس.

ستون جاذب سریع تر رخ می دهد [۳۲، ۳۱، ۱۳].

مقایسه بین منحنی های شکست و ظرفیت جذب دو جاذب نشان می دهد که جاذب MnO/GAC در تمامی زمان های ماند آزمایش شده، کارایی بیشتری در مقایسه با GAC داشته است (تصویر شماره ۳ الف و ب). بیشترین افزایش کارایی MnO/GAC در مقایسه با GAC در زمان ماند ۱ ثانیه به دست آمده به طوری که جاذب MnO/GAC زمان نقطه شکست و ظرفیت جذب را در مقایسه با جاذب گرین فعال به ترتیب ۱۲/۸ و ۹/۹ درصد افزایش داد. بیشتر بودن ظرفیت جاذب MnO/GAC در مقایسه با GAC، احتمالاً به توانایی اکسید منگنز برای تخریب تولوئن جذب شده بر سطح جاذب مربوط است [۱۱].

ظرفیت کاتالیزوری اکسید منگنز در تجزیه ترکیب های آلی در پژوهش های مختلف اثبات شده است [۲۹، ۲۷]. میشر و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که ترکیب اکسید های فلزی منگنز و آهن پوشانده شده بر مونتموریلونیت برای حذف استون (۵۵۰ ppm) از جریان هوا، زمان نقطه شکست بستر را در مقایسه با جاذب رس، به تنهایی افزایش داده است. افزون بر این جاذب پوشانده شده با اکسید های فلزی پس از زمان نقطه شکست کارایی خود را به مدت بیست ساعت حفظ کرده است. این امر خاصیت کاتالیزوری اکسید منگنز و اکسید آهن را تأیید می کند [۲۲].

سانتوز و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه اکسیداسیون تولوئن با استفاده از MnO نشان دادند که کمبود اکسیژن در ساختار شبکه اکسید منگنز و وجود گروه های هیدروکسیل سطحی، عوامل مؤثر در واکنش های تجزیه ای تولوئن با استفاده از MnO است. نتایج بررسی آن ها نشان داد که اکسیژن موجود در ساختار شبکه MnO، مولکول های آلی را بر اساس سازوکار ماریس و فن کرولین اکسید و سپس اکسیژن موجود در جریان هوای ورودی بار دیگر اکسیژن شبکه ای را احیا می کند [۳۱]. همچنین ثابت شده است که تولوئن جذب شده، بر جابه جایی اکسیژن شبکه ای تأثیر می گذارد و به مرور زمان باعث فعالیت کمتر اکسیژن شبکه



تصویر ۶ الف.

نتایج مطابقت داده شده از آزمایش های جذب با استفاده از جاذب های GAC و MnO/GAC در شرایط بهینه با الگوی جذب گاز یون و نلسون.

افزایش دما، کارایی بیشتری در حذف تولوئن از هوا داشته و ظرفیت جذب با دما افزایش یافته است.

#### ایزوترم های جذب

نتایج مربوط به الگوهای برازش داده شده با جاذب های GAC و MnO/GAC در شرایط بهینه آزمایشی در تصویر شماره ۶ الف و ب نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، الگوهای جذب گاز یون و نلسون و توماس با ضریب همبستگی چشمگیری با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. بر این اساس در الگوی جذب گاز یون و نلسون، ضریب همبستگی و زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد از منحنی شکست در ستون GAC به ترتیب برابر با ۹۸ درصد و ۴۵/۷ ساعت و در ستون MnO/GAC برابر با ۹۴ درصد و ۶۴/۳ ساعت به دست آمده با استفاده از الگوی توماس، مقدار ضریب همبستگی و حداکثر ظرفیت جذب برای جاذب گرین فعال به ترتیب برابر با ۹۶ درصد و ۴۴/۷ mg/g و برای جاذب MnO/GAC برابر با ۹۶ درصد و ۵۱/۱ mg/g به دست آمد.

#### بحث

##### اثر زمان ماند

بر اساس تصویر شماره ۳ الف و ب، افزایش زمان ماند از ۰/۵ به ۴ ثانیه زمان نقطه شکست و ظرفیت جذب GAC و MnO/GAC را افزایش داده است. بر این اساس افزایش زمان ماند به کارایی بیشتر جاذب ها در حذف آلاینده تولوئن از جریان هوا منجر شده است. این یافته ها با مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. آن ها در حذف تولوئن با استفاده از GAC دریافتند که با کاهش زمان واکنش، زمان نقطه شکست بستر کاهش می یابد [۲۸]. پژوهشگران نشان داده اند که با کاهش زمان ماند، آلاینده فرصت کمتری برای نفوذ به بستر جاذب پیدا می کند بنابراین احتمال باند شدن مولکول آلاینده با جایگاه های فعال جاذب کاهش می یابد [۳۰]. با افزایش دبی یا به عبارت دیگر کاهش زمان ماند، حجم هوای تصفیه شده به ازای واحد زمان افزایش می یابد. از این رو اشباع



می‌شود [۱۷، ۱۱]. این مسئله می‌تواند دلیل احتمالی اشباع جاذب MnO/GAC به‌مرور زمان باشد.

پیومتی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه حذف اتیلن و تولون و پروپیلن با استفاده از اکسیدهای منگنز نشان دادند که جاذب‌های  $Mn_xO_y$  به‌دلیل وجود گروه‌های عاملی سطحی شامل هیدروکسیل، کربنات،  $O^-$  و  $O_2^{2-}$  توانایی حذف و شکست مولکول‌های آلی را دارد [۲۰]. نتایج طیف مادون قرمز جاذب‌های آزمایش شده در تحقیق نشان داد که گروه‌های عاملی هیدروکسیل و گروپ‌نیل در سطح جاذب MnO/GAC تولید شده است؛ در حالی که این گروه‌های عاملی در سطح جاذب کربن فعال وجود نداشت. در تحقیق حاضر ظرفیت جذب MnO/GAC در مقایسه با جاذب GAC بین ۴ تا ۱۰ درصد در زمان‌های ماند مختلف افزایش یافته است که به‌خوبی با بررسی‌های ذکر شده مطابقت دارد.

#### اثر غلظت تولون ورودی

بر اساس تصویر شماره ۴ الف و ب، افزایش غلظت تولون ورودی از ۱۰۰ به ۴۰۰ ppm زمان نقطه شکست جاذب‌های GAC و MnO/GAC را کاهش داده است. همچنین افزایش غلظت تولون ورودی، ظرفیت جذب به‌دست‌آمده را برای هر یک از جاذب‌ها افزایش داد. برخی از محققان اثر غلظت در فرایند جذب آلاینده‌ها از جریان هوای آلوده را بررسی کرده‌اند. چن و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی حذف تولون با استفاده از ZSM-5 و کامپوزیت PSSF دریافتند که با کاهش غلظت تولون ورودی زمان نقطه شکست بستر افزایش می‌یابد. همچنین لیو و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه حذف تولون با استفاده از جاذب کربن فعال و کامپوزیت میکروفیبر دریافتند که افزایش غلظت تولون ورودی، زمان نقطه شکست بستر را کاهش می‌دهد [۲۸]. با افزایش غلظت، جرم بیشتری از تولون به‌ازای واحد زمان از هوا حذف می‌شود؛ بنابراین زمان اشباع جاذب کاهش می‌یابد [۲۱، ۱۳]. افزون‌بر این با افزایش غلظت، نسبت تعداد مولکول‌های آلاینده به تعداد جایگاه‌های فعال موجود بر سطح جاذب افزایش می‌یابد؛ بنابراین اشباع کامل جایگاه‌های جذب موجود بر سطح جاذب در مدت کوتاه‌تری رخ می‌دهد [۲۴].

مقایسه بین ظرفیت جذب دو جاذب در تصویر شماره ۴ ب نشان می‌دهد که ظرفیت جذب MnO/GAC در مقایسه با جاذب GAC بین ۸ تا ۱۳ درصد در غلظت‌های ورودی مختلف افزایش یافته است. حداکثر افزایش کارایی MnO/GAC در مقایسه با GAC در غلظت تولون ورودی، ۱۰۰ ppm به‌دست آمده؛ به‌طوری‌که در غلظت ۱۰۰ ppm، زمان نقطه شکست جاذب MnO/GAC در مقایسه با جاذب کربن فعال، ۱۲/۸ درصد بیشتر بوده است. بیشتر بودن ظرفیت جذب MnO/GAC در مقایسه با GAC احتمالاً به جایگاه‌های فعال بیشتر در سطح MnO برای

تجزیه و شکست مولکول‌های آلی مربوط است.

محققان نشان داده‌اند که فعالیت کاتالیستی اکسیدفلازی با حضور گروه‌های هیدروکسیل و مولکول‌های اکسیژن باندشده بر سطح، ارتباط مستقیمی دارد. این گروه‌ها با حضور خود بر سطح اکسیدفلازی، امکان انتقال و جابه‌جایی اتم اکسیژن درون شبکه را فراهم می‌کند. حضور این گروه‌های عاملی در سطح اکسیدمنگنز در پژوهش‌های مختلفی اثبات شده است. گفتنی است که نتایج طیف مادون قرمز به‌دست‌آمده از جاذب‌های GAC و MnO/GAC در این مطالعه، با مطالعه‌های دیگر مطابقت دارد [۳۱، ۱۱].

#### اثر دمای هوای ورودی

نتایج نشان می‌دهد که جاذب کربن فعال بهترین کارایی را برای جذب تولون از جریان هوا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد داشته است (تصویر شماره ۵ الف و ب). کاهش کارایی جاذب کربن فعال با افزایش دما، احتمالاً به‌دلیل جذب فیزیکی تولون بر جاذب GAC است. جذب فیزیکی، واکنشی گرمازاست؛ بنابراین با افزایش دما میزان جذب کاهش می‌یابد [۱]. پرزپورسکی و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه جذب دی‌اکسیدسولفور از جریان هوا با استفاده از کربن نشان دادند که میزان جذب  $SO_2$  با افزایش دمای بستر جاذب کاهش می‌یابد. هنگامی که ترکیب‌های آلی بیشتر وقت‌ها به‌صورت فیزیکی با گروه‌های عاملی سطحی روی بستر پیوند برقرار می‌کنند، افزایش دما به جداسازی مولکول‌های جذب‌شده از روی سطح منجر می‌شود. در حقیقت انرژی گرمایی اضافه، پیوندهای وان‌دروالس تشکیل‌شده بین مولکول آلاینده و سطح جاذب را می‌شکند؛ بنابراین کارایی جاذب در جذب مولکول‌های آلاینده کاهش می‌یابد [۲۹].

محققان افزایش کارایی جاذب MnO/GAC با افزایش دما را به فعالیت کاتالیستی بیشتر اکسیدمنگنز در دماهای بیشتر نسبت داده‌اند [۲۴، ۵]. کیم و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه حذف تولون با استفاده از اکسیدهای فلزی Zn، Ni، Co، V، Fe، Mo، Cu و Mn پوشانده‌شده بر سطح آلومینا نشان دادند که اکسیدمنگنز از میان اکسیدهای فلزهای نام‌برده، بیشترین کارایی را در دماهای کمتر از ۵۳۳ کلین برای تجزیه تولون دارد. همچنین افزایش دما تا ۵۰۰ کلین، به‌میزان ۸۰ درصد فعالیت کاتالیستی اکسیدمنگنز و تجزیه تولون را افزایش داد [۱۹].

رضایی و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه حذف تولون با استفاده از اکسیدمنگنز پوشانده‌شده بر آلومینا در حضور ازن نشان دادند که اکسیدمنگنز با افزایش دمای هوای ورودی از ۲۲ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد بیشتری از مولکول‌های ازن را تخریب می‌کند [۲۴]. مولکول ازن از نظر حرارتی تا دمای ۵۲۳ کلین پایدار است؛ بنابراین در دماهای پایین‌تر، تنها در حضور کاتالیست



## References

- [1] Alvarez-merino MA, Moreno-castilla C. Adsorption of  $SO_2$  from flowing air by alkaline-oxide-containing activated carbons. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1997; 13(3-4):229-40. doi: 10.1016/s0926-3373(96)00108-7
- [2] Ojala S, Pitkääho S, Laitinen T, Niskala Koivikko N, Brahmı R, Gaalová J, et al. Catalysis in VOC abatement. *Topics in Catalysis*. 2011; 54(16-18):1224-56. doi: 10.1007/s11244-011-9747-1
- [3] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for toluene. 1<sup>st</sup> ed. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency; 2000.
- [4] Ozawa M, Yuzuriha H, Haneda M. Total oxidation of toluene and oxygen storage capacity of zirconia-sol modified ceria zirconia. *Catalysis Communications*. 2013; 30:32-5. doi: 10.1016/j.catcom.2012.10.008
- [5] Deng QF, Ren TZ, Yuan ZY. Mesoporous manganese oxide nanoparticles for the catalytic total oxidation of toluene. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2013; 108(2):507-18. doi: 10.1007/s11144-012-0528-z
- [6] Huang YC, Luo CH, Yang S, Lin YC, Chuang CY. Improved removal of indoor volatile organic compounds by activated carbon fiber filters calcined with copper oxide catalyst. *Clean - Soil, Air, Water*. 2010; 38(11):993-7. doi: 10.1002/clean.200900302
- [7] ACGIH, Guide to occupational exposure values [Internet]. 2012 [Cited 2012 November 08]. Available from: <http://www.acgih.org/resources/press/TLV2012list.htm>.
- [8] Ministry of Health and Medical Education. [Occupational exposure level (Persian)]. 3<sup>rd</sup> ed. Tehran: Center of Work and Environmental Health. 2012.
- [9] ATSDR. Toxicological Profile for Toluene [Internet]. 2012 [Cited 2012 August 08]. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp56.pdf>.
- [10] Sasaki T, Matsumoto A, Yamashita Y. The effect of the pore size and volume of activated carbon on adsorption efficiency of vapor phase compounds in cigarette smoke. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008; 325(3):166-72. doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.05.001
- [11] Wai KCHI. Catalytic ozonation of vocs over different porous materials [PhD dissertation]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology; 2009.
- [12] Nawrocki J, Kasprzyk-Hordern B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010; 99(1-2):27-42. doi: 10.1016/j.apcatb.2010.06.033
- [13] Moussavi G, Rashidi R, Khavanin A. The efficacy of GAC/MgO composite for destructive adsorption of benzene from waste air stream. *Chemical Engineering Journal*. 2013; 228:741-7. doi: 10.1016/j.cej.2013.05.032
- [14] Kim SC, Park YK, Nah JW. Property of a highly active bimetallic catalyst based on a supported manganese oxide for the complete oxidation of toluene. *Powder Technology*. 2014; 266:292-8. doi: 10.1016/j.powtec.2014.06.049
- [15] Torrente-Murciano L, Gilbank A, Puertolas B, Garcia T, Solsona B, Chadwick D. Shape-dependency activity of nanostructured  $CeO_2$  in the total oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons.

می‌تواند به مولکول اکسیژن و اکسیژن اتمی تجزیه شود [۲۴].  
[۱۱]. براین اساس با افزایش فعالیت کاتالیستی اکسید منگنز در دماهای بالاتر، میزان بیشتری از آلاینده تجزیه می‌شود و نقطه شکست و اشباع ستون در مدت زمان طولانی تری رخ می‌دهد.

افزون بر این مقایسه منحنی شکست جاذب‌های GAC و  $MnO$  نشان می‌دهد که نسبت تغییرات  $C_p/C_0$  در مقایسه با زمان در جاذب GAC، با افزایش دما افزایش می‌یابد. در حقیقت شیب منحنی شکست در جاذب GAC با افزایش دما از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است؛ بنابراین سینتیک واکنش (تغییر سرعت واکنش در واحد زمان) با افزایش دما کاهش می‌یابد؛ یعنی سرعت جذب آلاینده با افزایش دما کاهش می‌یابد. این روند درباره جاذب  $MnO/GAC$  برعکس بوده است که نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که کامپوزیت اکسید منگنز و کربن فعال می‌تواند ظرفیت جذب و زمان نقطه شکست ستون را به میزان درخور توجهی در مقایسه با جاذب کربن فعال در شرایط آزمایشی مختلف افزایش دهد. براساس یافته‌های تحقیق جاذب  $MnO/GAC$  می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای GAC در فرایندهای حذف آلاینده‌های فرار از هوا به کار گرفته شود.

در پژوهش حاضر، از جاذب GAC و  $MnO/GAC$  برای حذف تولوئن از جریان هوا استفاده شد. کارایی هر یک از جاذب‌های آزمایش شده در زمان‌های ماند ۰/۵ تا ۴ ثانیه و غلظت تولوئن ورودی ۱۰۰ تا ۴۰۰ ppm و دمای هوای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی و آزمایش شد. نتایج نشان داد که به طور کلی جاذب  $MnO/GAC$  در مقایسه با GAC در حذف تولوئن از جریان هوای آلوده کارایی بیشتری داشت. همچنین کارایی هر دو جاذب با افزایش زمان ماند، رابطه مستقیم و با افزایش غلظت تولوئن ورودی، رابطه معکوس داشت. جاذب کربن فعال در دمای هوای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دماهای بالاتر در حذف تولوئن از جریان هوا، کارایی بیشتری داشت. این در حالی بود که بیشترین زمان نقطه شکست و ظرفیت جذب با استفاده از جاذب  $MnO/GAC$  در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که جاذب  $MnO/GAC$  می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای کربن فعال به منظور حذف ترکیب‌های آلی فرار از جریان هوا استفاده شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت مالی و خدمات آزمایشگاهی دانشگاه تربیت مدرس برای انجام این تحقیق قدردانی می‌کنند.



- Applied Catalysis B: Environmental. 2013; 132-133:116-22. doi: 10.1016/j.apcatb.2012.10.030
- [16] Aramendia MA, Borau V, Jiménez C, Marinas A, Marinas JM, Ruiz JR, et al. Magnesium-containing mixed oxides as basic catalysts: base characterization by carbon dioxide TPD-MS and test reactions. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2004; 218(1):81-90. doi: 10.1016/j.molcata.2004.04.006
- [17] Santos VP, Carabineiro SAC, Tavares PB, Pereira MFR, Órfão JJM, Figueiredo JL. Oxidation of CO, ethanol and toluene over TiO<sub>2</sub> supported noble metal catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010; 99(1-2):198-205. doi: 10.1016/j.apcatb.2010.06.020
- [18] Wu G, Wei W, Cui L. Adsorption and catalytic ozonation performance of activated carbon and cobalt-supported activated carbon derived from brewing yeast. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2013; 92(1):36-40. doi: 10.1002/cjce.21796
- [19] Kim SC, Shim WG. Catalytic combustion of VOCs over a series of manganese oxide catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010; 98(3-4):180-5. doi: 10.1016/j.apcatb.2010.05.027
- [20] Gil RR, Ruiz B, Lozano MS, Martín MJ, Fuente E. VOCs removal by adsorption onto activated carbons from biocollagenic wastes of vegetable tanning. *Chemical Engineering Journal*. 2014; 245:80-8. doi: 10.1016/j.cej.2014.02.012
- [21] Gironi F, Piemonte V. VOCs removal from dilute vapour streams by adsorption onto activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2011; 172(2-3):671-7. doi: 10.1016/j.cej.2011.06.034
- [22] Mishra T, Mohapatra P, Parida KM. Synthesis, characterisation and catalytic evaluation of iron-manganese mixed oxide pillared clay for VOC decomposition reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008; 79(3):279-85. doi: 10.1016/j.apcatb.2007.10.030
- [23] Moussavi G, Mahmoudi M. Degradation and biodegradability improvement of the reactive red 198 azo dye using catalytic ozonation with MgO nanocrystals. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 152(1):1-7. doi: 10.1016/j.cej.2009.03.014
- [24] Moussavi G, Aghapour AA, Yaghmaeian K. The degradation and mineralization of catechol using ozonation catalyzed with MgO/GAC composite in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Journal*. 2014; 249:302-10. doi: 10.1016/j.cej.2014.03.059
- [25] Rezaei E, Soltan J, Chen N. Catalytic oxidation of toluene by ozone over alumina supported manganese oxides: Effect of catalyst loading. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2013; 136-137:239-47. doi: 10.1016/j.apcatb.2013.01.061
- [26] Einaga H, Futamura S. Catalytic oxidation of benzene with ozone over alumina-supported manganese oxides. *Journal of Catalysis*. 2004; 227(2):304-12. doi: 10.1016/j.jcat.2004.07.029
- [27] Zhu T, Li J, Liang W, Jin Y. Synergistic effect of catalyst for oxidation removal of toluene. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165(1-3):1258-60. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.085
- [28] Liu J, Yan Y, Zhang H. Adsorption dynamics of toluene in composite bed with microfibrinous entrapped activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2011; 173(2):456-62. doi: 10.1016/j.cej.2011.08.004
- [29] rzeźpiński J, Czyżewski A, Kapica J, Moszyński D, Grzmil B, Tryba B, et al. Low temperature removal of SO<sub>2</sub> traces from air by MgO-loaded porous carbons. *Chemical Engineering Journal*. 2012; 191:147-53. doi: 10.1016/j.cej.2012.02.087
- [30] Xi Y, Reed C, Lee YK, Oyama ST. Acetone oxidation using ozone on manganese oxide catalysts. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005; 109(37):17587-96. doi: 10.1021/jp052930g
- [31] Santos VP, Pereira MFR, Órfão JJM, Figueiredo JL. The role of lattice oxygen on the activity of manganese oxides towards the oxidation of volatile organic compounds. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010; 99(1-2):353-63. doi: 10.1016/j.apcatb.2010.07.007
- [32] Leili M, Moussavi Gh, Nadafi K, Ghaffari M. [The investigation of single ozonation process, catalytic ozonation process and single adsorption on activated carbon efficiencies for removal of furfural from aqueous solution (Persian)]. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*. 2013; 20(1):51-61.

