



Photocatalytic removal of toluene vapor from air in the adsorption-photocatalytic bed

Samira Kazemi, MSc Student of Occupational Health Engineering, Social Determinants of Health Research Center, Research Institute for Prevention of Non-Communicable Diseases, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Ali Safari Variani, Associate Professor, Social Determinants of Health Research Center, Research Institute for Prevention of Non-Communicable Diseases, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Hadis Khoshnavaz, MSc Student of Occupational Health Engineering, Social Determinants of Health Research Center, Research Institute for Prevention of Non-Communicable Diseases, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Ahmad Nikpey, (*Corresponding author) Associate Professor, Social Determinants of Health Research Center, Research Institute for Prevention of Non-Communicable Diseases, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran.
a.nikpey@qums.ac.ir

Abstract

Background and aims: Clean air is one of the most important components of health and sustainable development. Every person breathes about 10 kg of air per day and if it contains pollutants, it will have a serious impact on their health. Indoor air quality (IAQ) is one of the major health issues that have been addressed in recent years with changes in lifestyle patterns. Usually, due to the increased time of presence and activity in these environments and reduced air exchange with the outdoor environment, indoor air quality is poorer than outdoor environments. Toluene is a Volatile organic compound with widespread applications. VOCs has a high vapor pressure and high emission rate to environment. Due to its adverse effects on human and environment health, they must be controlled before discharging to the environment. Photo catalytic oxidation process is one of the environment-friendly and effective methods for the remove the organic compounds from the air which likely to be better in combination with other methods such as adsorption. Through the process of PCO, UV radiation adsorption on TiO_2 is associated with forming electron and holes from electron escape. The resulted electrons have got high levels of oxidation power and act as a strong oxidant producing superoxide ion. The resulted holes have good oxidation potential; with superoxide ions, they make good conditions for oxidation of most organic compounds to less hazardous compounds such as carbon dioxide and aqueous vapor. The most important limitation of Photo catalytic oxidation process is the dependence of the contaminant removal on the surface chemistry and the residence time of the contaminant on the photo catalyst surface. The most important limitation of the adsorption method is the decrease in adsorption removal efficiency and elimination capacity due to the filling of the adsorption sites. According to this, by combining adsorption and photo catalytic oxidation, it is possible to increase the time of contaminant presence at photo catalytic oxidation sites and to enhance the surface chemistry and on the other hand, to restore the adsorption sites. This study is conducted with the aim at examining the effects of combination Activated carbon and Titanium dioxide (TiO_2) on the toluene removal efficiency.

Methodols: In order to prepare samples, 5g of TiO_2 and 5g of TiO_2 and 1g of activated carbon dissolve in separate 100 ml distilled water under vigorous stirring. The surface modification was done by dip-coating method. The efficiency of the photocatalytic oxidation of toluene is evaluated in two separate reactors exposed to ultraviolet light. Additionally, to investigate the effect of initial concentration of toluene and airflow rate on the photocatalytic removal efficiency in photocatalytic and photocatalytic-adsorption beds, the RSM method was used to design experiments. Also, Scanning Electron Microscopy was used to determine catalysts surface morphology. First, to obtain the adsorption capacity in both reactors, with the UV lamp being off, the considered concentrations were added to the reactors in 2-5 L/m airflows. Then, adsorption capacity of adsorption beds were evaluated according to the time needed for the outlet concentration to reach 10% of the inlet amount, as the fraction point of the adsorbent and saturated capacity. Next, to compare the removal efficiency of toluene in the two reactors, the lamps were immediately turned on; concentrations were gradually decreased and when the outlet concentration was balanced, the data was collected.

Results: Images from an electron microscope of surfaces of the two catalysts showed that the distribution of nanoparticles on glass wool was similar and the particle size in the non-combined catalyst were smaller than 95 nm, and smaller than 87 nm in the adsorbent catalyst. In other words, the size of nanoparticles led to more contact area of the pollutant

Keywords

Indoor Air Quality (IAQ),
Titanium Dioxide (TiO_2),
Activated Carbon,
Volatile Organic Compounds,
Toluene,
Photocatalytic Oxidation,
Adsorption -
Photocatalytic bed

Received: 02/01/2018

Accepted: 24/09/2018

with the catalyst, increased reaction as well as removal efficiency. SEM photography confirmed that, combining TiO₂ with activated carbon, the pores in the activated carbon were occupied and it made a good place for TiO₂. Controlling the process of photocatalytic elimination in photocatalysts indicated that in TiO₂-AC reactor, removal efficiency and elimination capacity of toluene were higher than TiO₂ reactor and combining adsorbent with photocatalyst may lead to enhanced photocatalytic oxidation efficiency of organic compounds. The results illustrate that the removal efficiency and elimination capacity of toluene in photocatalytic and photocatalytic-adsorption beds are Influenced by airflow rate and inlet concentration of toluene. In optimized operational conditions, the removal efficiency in both combined and non- combined reactors in inlet loadings of 84.5 and 1.65 mg/m³.s and retention time of 2 and 8.5 s, was 99.98% and 95.14%, respectively. Also, elimination capacity in optimized operational points in the two adsorbent and non-adsorbent photocatalysts was 5008.71 and 1204.85 mg/m³.min, respectively. As the statistical analysis by Minitab indicated, in the concentration range of 10-40 ppm and the airflow of 2-5 L/min (in 2-8.5 s retention time) in the combined reactor, the removal efficiencies were 90% (min.) and 99% (max.); however, in the non-combined reactor, the minimum of removal efficiency was 10% and the maximum was 90%.

The results of this study also indicated that the retention time had a significant effect on the removal efficiency and the elimination capacity of toluene, that is, at the constant inlet concentration (25 ppm) increased with increase in retention time of the non-composite reactor. However, in the adsorbent reactor, lower retention time led to higher removal efficiency. According to the results, toluene removal efficiency and elimination capacity levels in the combined reactor in time retentions of 2, 3.3 and 8.5 s increased compared to the non-combined reactor. Also, evaluation of the effects of initial toluene concentration on removal efficiency and elimination capacity showed that they were higher in the combined vs the non-combined reactor. Removal efficiency of both photocatalysts was influenced by the initial concentration of toluene, so that, in TiO₂ higher inlet concentration led to lower removal efficiency. Nevertheless, in the adsorbent photocatalyst, there was an increase in removal efficiency with higher concentrations. According to the findings, the production of CO₂ was dependent on toluene inlet concentration and the airflow. In the combined photocatalyst, the minimum and maximum of the produced carbon dioxide were 40 ppm and 80 ppm, respectively. And it was 84.82 in the optimum operational point (46.2 ppm; 5.62 L/min). However, in the non-combined reactor, the produced CO₂ was 29.2 ppm in the optimum operational point and its minimum and maximum were 10 ppm and 25 ppm, respectively. The results also reported that in the given concentration and airflow, production of CO₂ in TiO₂-AC reactor was higher than TiO₂.

Conclusion: Results of the present study indicated that combining titanium dioxide with activated carbon adsorbent is a useful method in removing toluene gas from air under UV and combining photocatalytic elimination with adsorption process by activated carbon led to increased removal efficiency. Self-cleaning photocatalyst had high efficiency in the present study and the use of photocatalytic-adsorption bed can as a suitable method with high removal efficiency causing adsorption and treatment of the pollutants. In other word, combination Activated carbon with Titanium dioxide improved the functionality of activity of photocatalytic oxidation through promoting adsorption sites and increasing residence time of the pollutant in the bed. Results also indicated that removal efficiency was influenced by initial concentration of toluene and retention time of pollutants on the bed and optimizing these parameters may lead to maximum efficiency in photocatalytic setups. The combined catalysts with surface adsorbents led to improved decomposition efficiency based on photocatalytic decomposition and it is likely that the improvement is mostly the result of increasing adsorption sites compared to limited adsorption sites found in the photocatalyst. On the other hand, with more adsorption site, the pollutant had much more time to have contact with photocatalysts and consequently improved circumstances for surface oxidation reactions.

Conflicts of interest: None

Funding: None

How to cite this article:

Kazemi S, Safari Variani A, Khoshnavaz H, Nikpey A. Photocatalytic removal of toluene vapor from air in the adsorption-photocatalytic bed. *Iran Occupational Health*. 2019-2020 (Dec-Jan);16(5):75-87.

*This work is published under [CC BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/) licence



بررسی حذف فوتوکاتالیتیک بخار تولوئن از هوا در بستر جذبی - فوتوکاتالیتیکی

سمیرا کاظمی: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت (SDH)، پژوهشکده پیشگیری از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

علی صفری واریانی: دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت (SDH)، پژوهشکده پیشگیری از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

حدیث خوشنواز: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت (SDH)، پژوهشکده پیشگیری از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

احمد نیک پی: (* نویسنده مسئول) دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت (SDH)، پژوهشکده پیشگیری از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران. anikpey@qums.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: کیفیت هوا در محیط‌های داخلی (IAQ) یکی از موضوعات مهم در حوزه سلامت می‌باشد که در چند سال اخیر و با تغییر در الگوهای زندگی مورد توجه قرار گرفته است. تولوئن یکی از ترکیبات آلی با کاربرد گسترده صنعتی می‌باشد. این ترکیب‌ها به دلیل فشار بخار بالایی که دارند از پتانسیل انتشار و ایجاد مواجهه تنفسی در فرآیندهای ساخت و حتی در هنگام استفاده از محصولات که در ساخت آنها استفاده شده‌اند برخوردار هستند. با توجه به اثرات بهداشتی ترکیبات آلی فرار، کنترل آنها پیش از تخلیه به محیط زیست و همچنین ارائه روش‌هایی برای کنترل آنها در محیط‌های داخلی ضروری به نظر می‌رسد. فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی ترکیبات آلی فرار یکی از روش‌های موثر و همسو با محیط زیست در زمینه حذف ترکیبات آلی فرار محسوب می‌شود. مهم‌ترین محدودیت این روش، وابستگی حذف آلاینده به شیمی سطح و زمان ماند آلاینده بر سطح بستر می‌باشد. در این مطالعه به منظور بهبود افزایش زمان ماند و بهبود کارایی حذف، از مخلوطی از دی-اکسید تیتانیوم و کربن فعال در ساخت بستر جذبی-فوتوکاتالیتیکی استفاده شد. این مطالعه با هدف بررسی کارایی حذف بخار تولوئن در بستر جذبی-فوتوکاتالیتیکی انجام گردید.

روش بررسی: در این پژوهش، از دی اکسید تیتانیوم و مخلوط دی اکسید تیتانیوم و کربن فعال پودری محلول در آب مقطر جهت ساخت بستر فوتوکاتالیتیکی و بستر جذبی-فوتوکاتالیتیکی استفاده شد. لایه نشانی بسترها به روش غوطه‌ور سازی بستر پشم شیشه انجام شد. بررسی توزیع سایزی ذرات و کیفیت لایه نشانی به روش میکروسکوپ الکترونی انجام گردید. کارایی اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی تولوئن در دو راکتور مجزا در حضور تابش فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمون‌ها به منظور بررسی تاثیر غلظت اولیه تولوئن و گذر حجمی جریان بر کارایی حذف فوتوکاتالیتیکی در سیستم‌های فوتوکاتالیتیکی و جذبی-فوتوکاتالیتیکی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که راندمان حذف و ظرفیت حذف تولوئن در بسترهای فوتوکاتالیتیکی و جذبی-فوتوکاتالیتیکی متأثر از گذر حجمی جریان و غلظت ورودی آلاینده به سیستم بود. در شرایط بهینه عملیاتی، راندمان حذف در بسترهای فوتوکاتالیتیکی و جذبی-فوتوکاتالیتیکی به ترتیب در بارگذاری ۸۴/۵ و ۱/۶۵ میلی گرم به ازای متر مکعب در ثانیه و زمان ماند ۲ و ۸/۵ ثانیه، ۹۹/۹۸٪ و ۹۵/۱۴٪ به دست آمد و ظرفیت حذف نیز در نقاط بهینه عملیاتی در دو فوتوکاتالیست جذبی و غیر جذبی ۵۰۰۸/۷۱ و ۱۲۰۴/۸۵ میلی گرم به ازای هر متر مکعب در دقیقه بود.

نتیجه گیری: بسترهای حذف فوتوکاتالیتیکی از کارایی خوبی در زمینه حذف ترکیبات آلی در محیط‌های داخلی، برخوردار هستند. تلفیق آنها با جاذب‌های سطحی منجر به توسعه بسترهای خودپالای جذبی-کاتالیتیکی می‌شود که ظرفیت حذف آلاینده را تا ۵ برابر بسترهای کاتالیتیکی بهبود بخشیده و زمینه ساز کوچک سازی بستر کنترلی و امکان استفاده از آنها را در سیستم‌های تصفیه هوای خانگی و صنعتی فراهم می‌نماید. افزایش کارایی حذف در بسترهای جذبی-فوتوکاتالیتیکی با افزایش هواگذر به دلیل کاسته شدن از ضخامت لایه مرزی و بهبود انتقال جرم از جریان هوا به سایت‌های جذبی و کاتالیتیکی می‌باشد.

تعارض منافع: گزارش نشده است.

منبع حمایت کننده: حامی مالی نداشته است.

شیوه استناد به این مقاله:

Kazemi S, Safari Variani A, Khoshnavaz H, Nikpey A. Photocatalytic removal of toluene vapor from air in the adsorption-photocatalytic bed. *Iran Occupational Health*. 2019-2020 (Dec-Jan);16(5):75-87.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با [CC BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/) صورت گرفته است

مقدمه

محسوب می‌شوند که علاوه بر مقرون به صرفه بودن و سازگاری با محیط زیست از کارایی بالایی در زمینه حذف طیف گسترده‌ای از ترکیب‌های آلی و معدنی و حتی عوامل زیستی برخوردار هستند (۹-۷).

در فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی، جذب تابش ماوراء بنفش (UV) در سطح کاتالیست همراه با تشکیل الکترون و حفره‌های حاصل از خارج شدن الکترون‌ها می‌باشد.

الکترون‌های حاصل از قدرت احیاء بالایی برخوردار بوده و با تولید یون سوپر اکسید، به عنوان اکسید کننده قوی عمل می‌کنند. حفره‌های ایجاد شده نیز از پتانسیل اکسید کنندگی خوبی برخوردار بوده و در کنار یون‌های سوپراکسید شرایط مناسبی را برای اکسید کردن اغلب ترکیبات آلی به ترکیبات کم خطر از قبیل دی اکسید کربن و بخار آب فراهم می‌کنند (۱۰، ۱۱).

اگرچه در سال‌های اخیر فرآیند اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی با ترکیبات نیمه هادی مختلفی انجام شده است ولی به‌واسطه ارزانی و ایمن بودن، پایداری شیمیایی، غیر سمی بودن، فعالیت فوتوکاتالیتیکی بهتر نسبت به سایر مواد فوتوکاتالیستی، سهولت آماده سازی در آزمایشگاه، اغلب مطالعات و کاربردهای عملیاتی بر دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) متمرکز می‌باشد (۱۲).

فرآیندهای اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی، محدود به شیمی سطح بوده و کارایی آنها وابسته به انتقال جرم آلاینده از جریان هوا به سطح کاتالیست و سرعت تجزیه آلاینده می‌باشد. بر این اساس در سال‌های اخیر به منظور ارتقاء و بهبود راندمان اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی و حتی صرفه جویی در مصرف انرژی، فرضیه تلفیق فوتوکاتالیست و جاذب‌های سطحی مطرح شده است. با تلفیق TiO_2 با جاذب‌هایی همانند کربن فعال، سیلیکاژل، آلومنیوم اکسید، زئولیت و ... کارایی حذف فوتوکاتالیتیکی در مقایسه با TiO_2 افزایش می‌یابد. از میان جاذب‌های مذکور، کربن فعال به دلیل ظرفیت جذب و سطح ویژه بالا، غیر قطبی بودن، قیمت ارزان و سهولت استفاده، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۳، ۱۴). نتایج مطالعات محققانی همچون گارکیا (۱۵) و لو (۱۶) که به بررسی تاثیر کربن فعال بر حذف فوتوکاتالیتیکی آلاینده‌های مختلف پرداختند،

کیفیت هوا در محیط‌های داخلی (IAQ) از موضوعات مهم در حوزه سلامت می‌باشد که در چند سال اخیر و با تغییر در الگوهای زندگی مورد توجه قرار گرفته است. امروزه، بیش از ۷۰ تا ۹۰ درصد از وقت خود را در محیط داخلی نظیر منزل، اداره، محل‌های کاری صنعتی، مترو، اتومبیل و ... سپری می‌کنیم و کیفیت هوا در چنین محیط‌هایی تاثیر مهمی بر سلامتی خواهد داشت.

IAQ تحت تاثیر آلاینده‌های مختلف گازی و ذره‌ای است و در این میان ترکیبات آلی فرار^۱ (VOC) از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند (۱، ۲). این ترکیبات به دلیل دارا بودن فشار بخار بالا، از ظرفیت انتشار و ایجاد مواجهه تنفسی قابل توجهی برخوردار هستند. مواجهه تنفسی با ترکیبات آلی فرار، با طیف گسترده‌ای از اثرات بهداشتی همراه است، لذا کنترل مواجهه تنفسی با این ترکیبات در محیط‌های داخلی حائز اهمیت است (۳).

تولوئن یکی از ترکیبات آلی فرار است که از کاربرد گسترده‌ای در صنایع نظامی، شیمیایی و سوخت خودروها برخوردار است و به‌عنوان نماینده ترکیبات آلی فرار در اغلب مطالعات تصفیه هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد (۴).

مصرف جهانی تولوئن، سالانه ۱۰ میلیون تن و انتشار اتمسفری آن در آمریکا سالیانه در حدود ۰/۴۵ میلیون تن می‌باشد. اثرات بهداشتی تولوئن نظیر سرطان‌زایی احتمالی، جهش‌زایی، تاثیر سوء بر سیستم عصبی و اختلالات بینایی و شنوایی، حد مجاز مواجهه شغلی^۲ (OEL-TWA) با آن را به ۲۰ ppm کاهش داده است (۵، ۶).

به منظور حذف ترکیبات آلی فرار هوا برد، روش‌های مختلفی وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایب مخصوص به خود هستند. روش‌های اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی^۳ (PCO) از روش‌های نوظهور تصفیه هوای آلوده به ترکیبات آلی در دما و فشار محیطی

¹ Volatile Organic Compound

² Occupational Exposure Limits -Time Weighted Average

³ Photo Catalytic Oxidation

شدت تابش لامپ 4.1mw/cm^2 بود که توسط دستگاه UV Light meter مدل UV-C-254 ساخت شرکت Lutron اندازه گیری شد.

تعیین مورفولوژی و ساختار سطح کاتالیست‌ها به روش تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از میکروسکوپ ساخت شرکت KYKY مدل EM-3200 انجام گردید. به منظور حصول به نتایج مطمئن‌تر، کاستن از اثر عوامل کنترل نشده و بررسی اثرات همزمان فاکتورها، طراحی آماری آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی^۴ (CCD) در ۵ سطح برای متغیرهای مورد مطالعه (غلظت و ورودی تولوئن و هواگذر) توسط نرم افزار Minitab 17 انجام شد.

به منظور شناسایی نقاط بهینه عملیاتی، به روش CCD تعداد دفعات آزمون با توجه به پارامترهای مستقل (غلظت و هواگذر)، ۱۴ به دست آمد که برای دستیابی به دقت و صحت بیشتر و کاهش اثر متغیرهای غیر قابل کنترل و با در نظر گرفتن سه بار تکرار، تعداد ۴۲ آزمایش برآورد شد.

جریان هوای مورد نیاز توسط یک دستگاه کمپرسور تامین شد که پس از تنظیم فلو، فشار و عبور از فیلتر زغال فعال متناسب با اهداف پژوهش، به دو شاخه تقسیم می‌شد (شکل ۱).

جهت تهیه غلظت تولوئن در محدوده غلظتی مورد نظر (۱۰-۴۰ ppm) از سیستم دینامیک غلظت سازی مبتنی بر خرطوم خلاء استفاده شد که از انعطاف پذیری، سرعت و اعتماد پذیری بالایی در غلظت سازی برخوردار است (۱۸).

در مرحله اول، به منظور تعیین ظرفیت جذب در هر دو رآکتور، در حالی که لامپ UV خاموش بود، غلظت‌های معین متناسب با اهداف تحقیق در هواگذرهای ۵-۲ لیتر بر دقیقه وارد رآکتورها شد و ارزیابی ظرفیت جذب بسترهای جذبی بر اساس زمان رسیدن غلظت در خروجی به ۱۰ درصد غلظت ورودی بستر به عنوان نقطه شکست جاذب و ظرفیت جذب اشباعی انجام شد (۱۵).

در مرحله بعد، به منظور مقایسه کارایی حذف تولوئن

بهبود کارایی تجزیه در سیستم‌های جذبی-کاتالیتیکی نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به کاربرد گسترده تولوئن و اهمیت کنترل آن در محیط‌های داخلی مسکونی و شغلی به روشی ارزان و بی نیاز از فرآیندهای احیاء جاذب، این مطالعه با هدف تصفیه هوای آلوده به بخار تولوئن در بستر جذبی-کاتالیتیکی انجام شد.

روش بررسی

مطالعه در دو دستگاه رآکتور شیشه ای استوانه ای به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، قطر داخلی ۳/۸ سانتی‌متر و با حجم موثر ۱۹۳ میلی لیتر با الگوی جریان رو به بالا انجام شد.

دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در مطالعه (TiO_2) P25 از شرکت Evonik Industries AG با نام تجاری Aeroxide تهیه شد. پشم شیشه به شماره 1040860250 و کربن فعال پودری مورد استفاده به شماره 1021860250 ساخت شرکت مرک بودند.

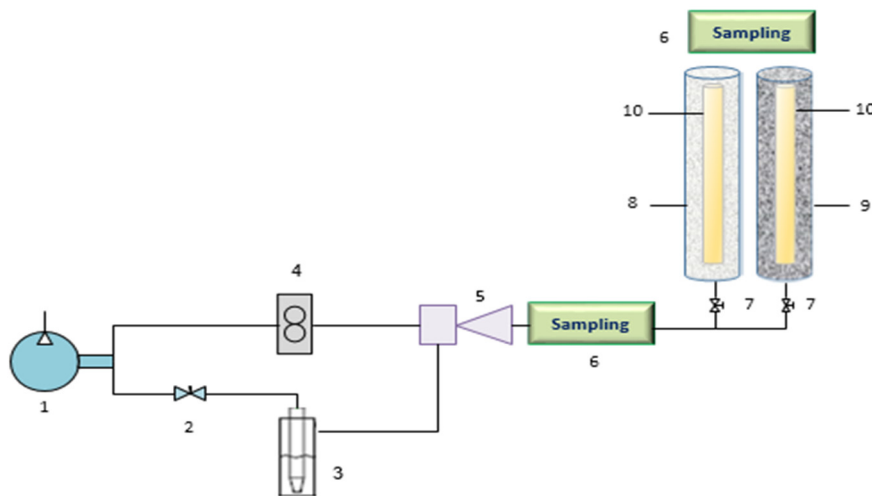
به منظور تهیه بستر کاتالیتیکی از ۵ گرم دی‌اکسید تیتانیوم و برای آماده‌سازی بستر جذبی - کاتالیتیکی، از ۵ گرم دی اکسید تیتانیوم و ۱ گرم کربن فعال استفاده شد. مقادیر فوق در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر به صورت سوسپانسیون تهیه گردید و در شرایط هم زدن شدید، پشم شیشه به مخلوط فوق اضافه شد و در همین شرایط به روش غوطه وری، لایه نشانی بر روی پشم شیشه انجام گردید.

هر دو فوتوکاتالیست در شرایط مشابه به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و نهایتاً تثبیت کاتالیست و تبدیل آن به پلی‌مورفیسم آاناتاز بر روی پشم شیشه در مدت ۳ ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد (۱۷).

پس از آماده سازی فوتوکاتالیست‌ها، پشم شیشه اصلاح شده با دی اکسید تیتانیوم و پشم شیشه تلفیق شده با کربن فعال در مقدار مساوی در فاصله ۱۳ میلی متری بین لامپ و دیواره رآکتور قرار داده شد.

برای فعال سازی فوتوکاتالیست، در هر رآکتور از یک عدد لامپ UV-C ساخت شرکت فیلیپس دارای توان ۱۵ وات (با طول موج اصلی ۲۵۴ نانومتر) استفاده گردید.

⁴ Central Composite Design



۱) کمپرسور هوا، ۲. شیر سوزنی تنظیم هوا، ۳. ایمپینجر تولوئن، ۴. روماتر، ۵. خرطوم خلاء، ۶. محل نمونه برداری، ۷. شیر تنظیم فلو، ۸. راکتور TiO_2 ، ۹. راکتور $AC + TiO_2$ ، ۱۰. لامپ UV

شکل ۱- طرح شماتیکی سیستم آزمایشگاهی ارزیابی کارایی بسترهای فوتوکاتالیتیکی و جذبی- فوتوکاتالیتیکی

دستگاه GC مدل Agilent-7890B با آشکارساز FID و ستون موئین HP5 ($30\text{ m}, 0.32\text{ mm}, 0.25\text{ }\mu\text{m}$) انجام شد.

اندازه‌گیری غلظت CO_2 در جریان هوای ورودی و خروجی راکتورها توسط دستگاه قرائت مستقیم Supco مدل IAQ55 دارای حسگر مادون قرمز NDIR انجام شد.

یافته‌ها

تصاویر الکترونی SEM (شکل‌های ۲ و ۳) نشان داد که قطر ذرات کاتالیست TiO_2 در محدوده $38/4$ تا $94/2$ نانومتر بود و قطر ذرات TiO_2 تلفیق شده با کربن فعال در محدوده $37/9$ تا $86/8$ نانومتر بود که به صورت تصادفی بر روی الیاف پشم شیشه لایه نشانی شده بودند.

بر اساس تحلیل‌های آماری انجام شده توسط نرم افزار Minitab، در محدوده غلظتی 10 تا 40 ppm و هواگذر 2 تا 5 لیتر بر دقیقه (زمان ماند 2 تا $8/5$ ثانیه) در بستر جذبی- کاتالیتیکی، راندمان حذف تقریباً ثابت و در محدوده 90% تا 99% بود، در حالی که در بستر کاتالیتیکی در شرایط مشابه راندمان حذف متغیر و حداقل 10% و با افزایش زمان ماند جریان به حداکثر 90% می‌رسید.

همچنین بررسی میزان فعالیت جذبی در دو

در دو راکتور، بلافاصله لامپ‌ها را روشن نموده و غلظت به تدریج کاهش یافته و زمانی که غلظت خروجی به تعادل رسید، داده‌ها جمع‌آوری شد.

راندمان حذف و ظرفیت حذف (مقدار آلاینده حذف شده به ازای هر متر مکعب بستر در واحد زمان) به ترتیب با استفاده از روابط شماره ۱ و ۲ محاسبه گردید و در نرم افزار Minitab با استفاده از آنالیز واریانس برای بررسی معنادار بودن اثر پارامترهای مستقل بر متغیرهای وابسته و آنالیز رگرسیون به منظور بررسی اثر متغیرها بر روی هم، نقاط بهینه عملیاتی در راکتورها تعیین شد.

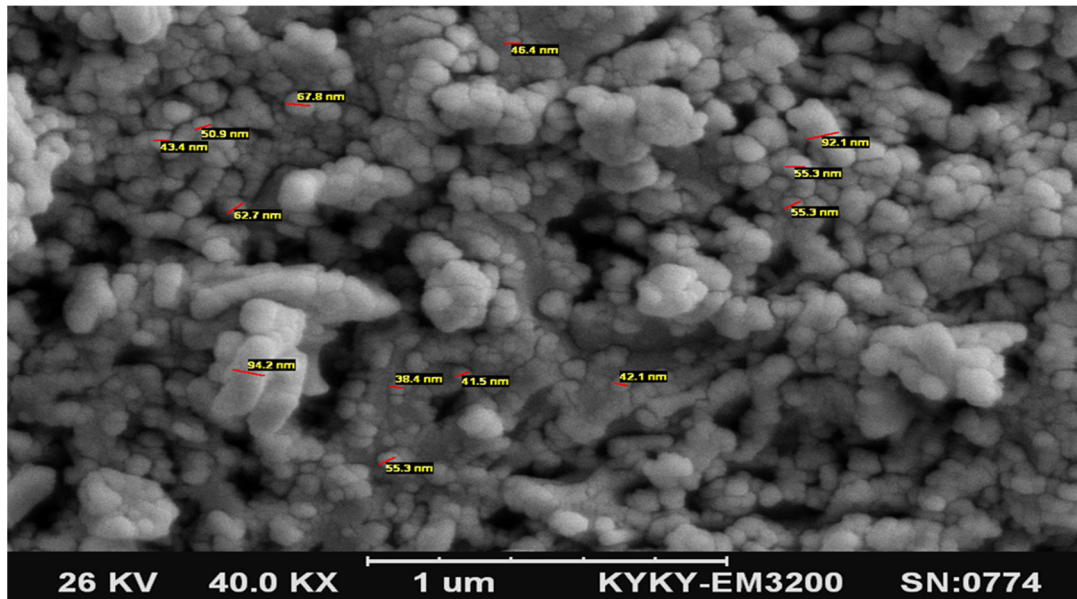
$$1) \text{ Removal efficiency (\%)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

در این رابطه C_{in} و C_{out} به ترتیب غلظت ورودی و خروجی تولوئن بر حسب ppm می‌باشد.

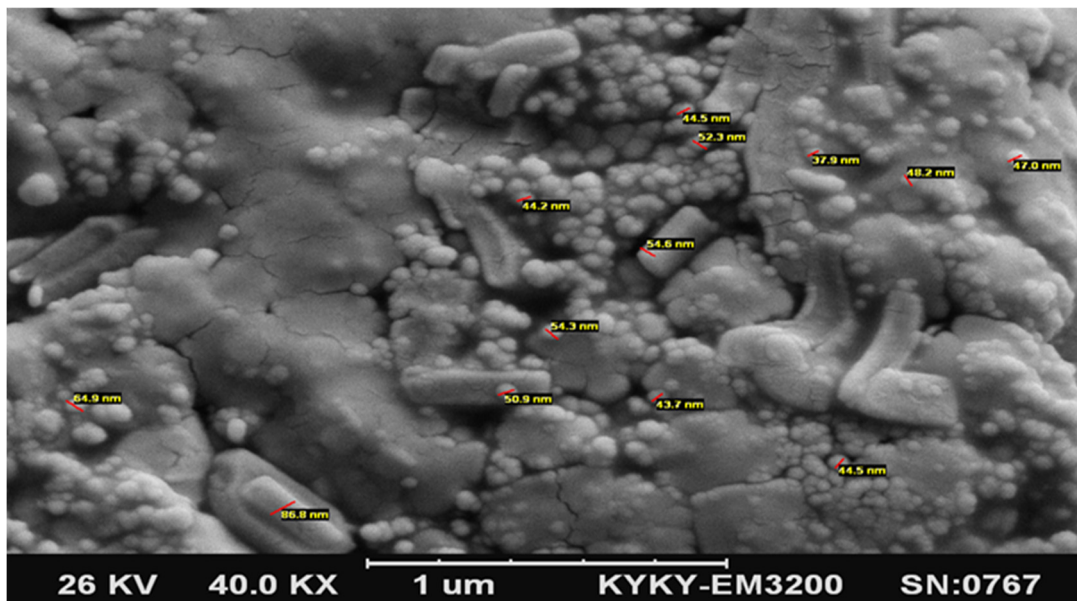
$$2) \text{ Elimination Capacity (mgr/m}^3\text{.min)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{V} \times Q$$

همچنین در رابطه شماره ۲ C_{in} غلظت ورودی و C_{out} غلظت خروجی بر حسب میلی‌گرم بر مترمکعب، V حجم راکتور بر حسب متر مکعب و Q فلوی جریان بر حسب مترمکعب در دقیقه می‌باشد.

اندازه‌گیری غلظت تولوئن در ورودی و خروجی راکتورها با تزریق 100 میکرولیتر نمونه گازی به



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از کاتالیست دی اکسید تیتانیوم نشانده شده بر روی الیاف پشم شیشه



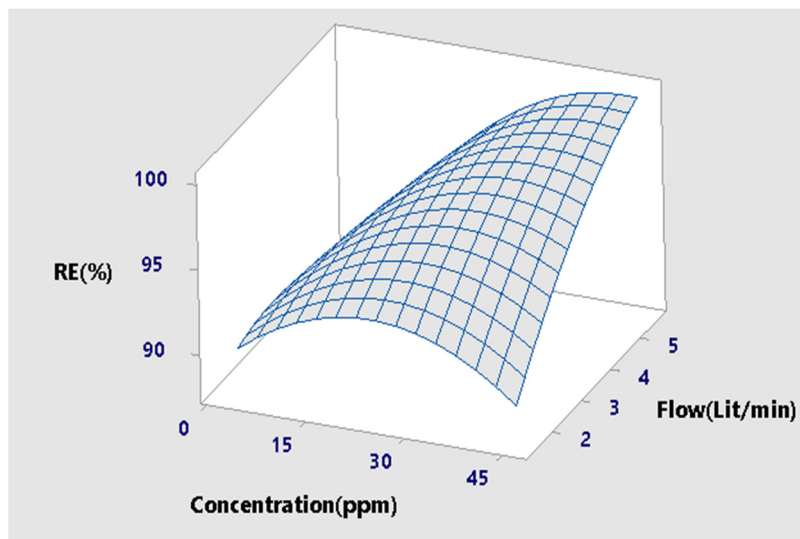
شکل ۳- تصویر SEM از کاتالیست دی اکسید تیتانیوم تلفیق شده با کربن فعال لایه نشانی شده بر روی پشم شیشه

و زمان ماند ۲ ثانیه (هواگذر ۵/۶۲ لیتر بر دقیقه) بود که در این شرایط راندمان حذف به ۹۹/۹۸ درصد و ظرفیت حذف به ۵۰۰۸ میلی گرم به ازای هر متر مکعب در دقیقه می‌رسید و بین گذر حجمی جریان و غلظت تولوئن ورودی با راندمان تجزیه ارتباط مستقیمی مشاهده شد، به طوری که با افزایش فلوی جریان و غلظت ورودی، راندمان حذف نیز افزایش می‌یافت (شکل ۴).

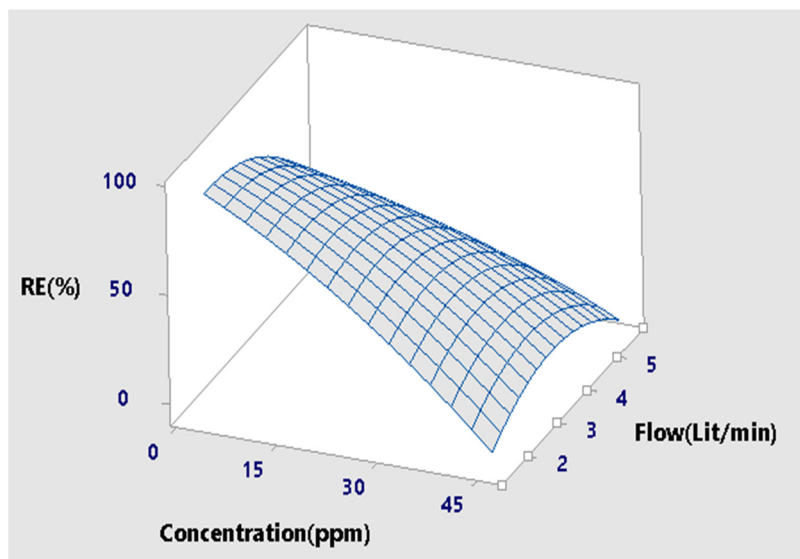
در بستر کاتالیتیکی با کاهش هواگذر و غلظت ورودی

فوتوکاتالیست نشان داد که در بستر کاتالیتیکی جذب سطحی انجام نشد، ولی در بستر جذبی- کاتالیتیکی، جذب سطحی توسط کربن فعال در محدوده ۳/۷۷ تا ۱۱/۳۱ میلی گرم تولوئن ورودی به ازای گرم جذب بود و در تمام آزمایش‌ها در یک دقیقه اول ورود جریان هوای حاوی تولوئن به بستر جذبی- کاتالیتیکی، کارایی جذب بین ۹۷٪ تا ۱۰۰٪ بود.

بر اساس نتایج به دست آمده، نقطه عملیاتی بهینه در بستر جذبی- کاتالیتیکی، در غلظت ورودی ۴۶/۲ ppm



شکل ۴- منحنی ارتباط بین غلظت ورودی و فلوی جریان با راندمان حذف در راکتور TiO_2-AC

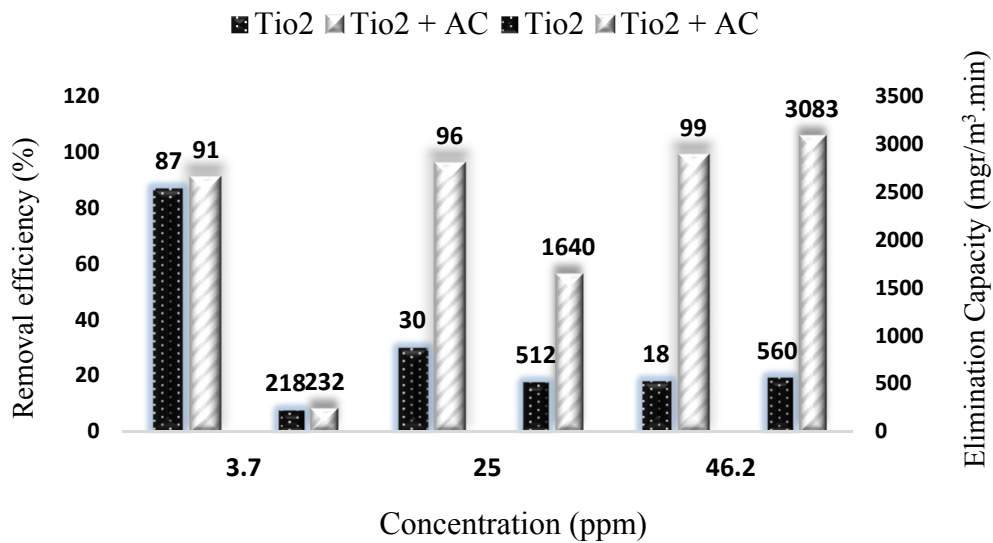


شکل ۵- منحنی ارتباط بین غلظت ورودی و فلوی جریان با راندمان حذف در راکتور TiO_2

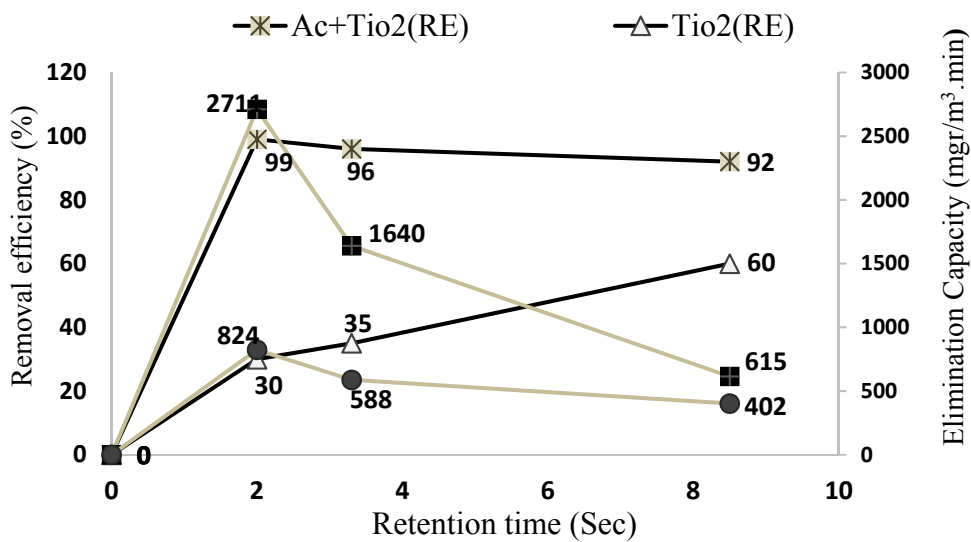
کارایی حذف با افزایش غلظت، افزایش یافت (نمودار ۱).

نتایج این مطالعه نشان داد که زمان ماند تاثیر معناداری بر راندمان حذف و ظرفیت حذف تولوئن داشت، به طوری که در غلظت ورودی ثابت (۲۵ ppm) با افزایش زمان ماند در بستر کاتالیتیکی، راندمان حذف افزایش یافت، در حالی که در بستر جذبی- کاتالیتیکی با کاهش زمان ماند، راندمان حذف افزایش یافت. بر اساس یافته‌ها میزان کارایی حذف و ظرفیت حذف تولوئن در بستر جذبی- کاتالیتیکی در هر یک از زمان‌های ماند ۲، ۳/۳ و ۸/۵ ثانیه نسبت به بستر کاتالیتیکی افزایش یافت (نمودار ۲).

به راکتور، راندمان حذف افزایش می‌یافت (شکل ۵) و در نقطه بهینه که متناظر به غلظت ۳/۷ ppm و هواگذر ۱/۳۷ لیتر بر دقیقه (زمان ماند ۸/۵ ثانیه) بود، راندمان حذف برابر ۹۵/۱۴ درصد و ظرفیت حذف ۱۳۷۳ میلی گرم به ازای هر متر مکعب در دقیقه بود. بررسی تاثیر غلظت اولیه تولوئن بر راندمان و ظرفیت حذف در بستر جذبی- کاتالیتیکی نسبت به بستر کاتالیتیکی گویای آن بود که راندمان حذف و ظرفیت حذف افزایش یافته و کارایی حذف هر دو بستر تحت تاثیر غلظت اولیه تولوئن بود، به طوری که در بستر کاتالیتیکی با افزایش غلظت ورودی، راندمان حذف کاهش یافت، در حالی که در بستر جذبی- کاتالیتیکی،



نمودار ۱- تأثیر غلظت اولیه تولوئن بر راندمان حذف و ظرفیت حذف تولوئن در هواگذر ۳/۵ لیتر بر دقیقه



نمودار ۲- تأثیر زمان ماند بر راندمان حذف و ظرفیت حذف تولوئن در غلظت ورودی ۲۵ ppm

بیشتری نسبت به بستر کاتالیتیکی برخوردار بود.

بحث و نتیجه گیری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از سطح دو بستر نشان داد که پراکندگی نانو ذرات بر الیاف پشم شیشه در هر دو بستر تقریباً مشابه هم بوده و سایز ذرات در بستر کاتالیتیکی کمتر از ۹۵ نانومتر و در بستر جذبی- کاتالیتیکی کمتر از ۸۷ نانومتر است که با نتایج مطالعه پالاتو که در آن سایز نانو ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر بود، تقریباً همخوانی دارد (۱۷). به بیانی دیگر

بر اساس یافته‌ها، میزان تولید شده وابسته به غلظت ورودی تولوئن، زمان ماند جریان هوا و نوع بستر بود. در بستر جذبی- کاتالیتیکی با توجه به شرایط عملیاتی، میزان CO₂ تولید شده در محدوده ppm -۸۰ و ۴۰ و در نقطه بهینه عملیاتی (غلظت ۴۶/۲ ppm و فلوی ۵/۶۲ لیتر بر دقیقه)، مقدار آن به ۸۴/۸۲ ppm می‌رسید، در حالی که در بستر کاتالیتیکی CO₂ تولید شده ۱۰-۲۵ ppm و در نقطه بهینه عملیاتی به ۲۹/۲ ppm می‌رسید. به طور کلی در تمامی شرایط عملیاتی CO₂ تولید شده در بستر جذبی- کاتالیتیکی از افزایش

کاهش تولید رادیکال هیدروکسیل می‌باشد، از اینرو با افزایش غلظت آلاینده، کارایی حذف در سیستم کاهش می‌یافت.

در مطالعه حاضر در بستر جذبی-کاتالیتیکی با افزایش غلظت ورودی تولوئن، راندمان حذف از ۹۱٪ به ۹۹٪ افزایش یافت که با نتایج پژوهش انجام شده توسط اسلیمین که در آن با افزایش غلظت اولیه تولوئن در محدوده ۲۰ ppb تا ۴۰۰ ppb ارتقاء راندمان حذف تا ۹۵٪ گزارش شد (۲۳) و مطالعه هویلی که با افزایش غلظت ورودی، میزان حذف فرمالدئید افزایش یافت (۲۴) مطابقت دارد. به نظر می‌رسد با افزایش غلظت و افزایش تعداد مولکول‌های جذب شده، تعداد مولکول بیشتری در اختیار جایگاه‌های فوتوکاتالیتیکی قرار گرفته و سینتیک‌های حذفی از واکنش‌های مرتبه صفر به درجه یک تغییر می‌کنند.

همچنین مقایسه راندمان تجزیه و ظرفیت حذف در هواگذر یکسان و غلظت‌های ورودی متفاوت بین دو راکتور موثداً آن بود که در غلظت‌های کم، راندمان حذف و ظرفیت حذف در بسترهای کاتالیتیکی و جذبی-کاتالیتیکی اختلاف چندانی با یکدیگر نداشتند، در حالی که با افزایش بار ورودی، بستر جذبی-کاتالیتیکی از راندمان و ظرفیت حذف به مراتب بهتری نسبت به بستر فوتوکاتالیستی برخوردار بود که با مطالعه تاکوچی همخوانی دارد (۲۵).

نتایج نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ورودی در هواگذر ثابت، در هر دو بستر ظرفیت حذف افزایش یافته است به طوری که در غلظت‌های جذبی-کاتالیتیکی از $3/7 \text{ ppm}$ تا $46/2 \text{ ppm}$ ظرفیت حذف در بستر جذبی-کاتالیتیکی از $232 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{min}$ به $3083 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{min}$ و در بستر کاتالیتیکی از ۲۱۸ به $560 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{min}$ افزایش یافت. در مطالعه هویلی و همکارانش با افزایش غلظت از $0/33$ تا $2/16$ میلی‌گرم بر مترمکعب ظرفیت حذف به صورت خطی افزایش می‌یافت (۲۴). همچنین در مطالعه یو ظرفیت حذف فرمالدئید، با افزایش غلظت اولیه از $0/8 \text{ ppm}$ به 2 از 60 به 150 میلی‌مول بر مترمکعب در دقیقه افزایش یافت که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد (۲۶). نتایج تحلیل آماری نشان داد که در بستر فوتوکاتالیتیکی با افزایش هواگذر از $1/37$ به $5/62$ لیتر بر دقیقه (کاهش زمان ماند از $8/5$ به 2 ثانیه) راندمان

سایز ریز ذرات دی‌اکسید تیتانیوم سبب افزایش سطح تماس آلاینده با کاتالیست، افزایش واکنش و راندمان حذف شده است. تصاویر SEM موثداً آن بود که با تلفیق TiO_2 و کربن فعال، منافذ موجود در ساختار متخلخل کربن فعال اشغال شده است و کربن فعال احتمالاً بستر مناسبی برای دی‌اکسید تیتانیوم محسوب می‌شود.

بررسی روند حذف فوتوکاتالیتیکی در فوتوکاتالیست‌ها بیانگر آن است که در بستر جذبی-کاتالیتیکی، کارایی حذف و ظرفیت حذف تولوئن بیشتر از بستر کاتالیتیکی بوده و تلفیق جاذب با فوتوکاتالیست می‌تواند سبب ارتقاء کارایی اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی ترکیبات آلی شود، که با یافته‌های مطالعه ماتوس و همکاران و رضایی و همکارانش مطابقت دارد (۱۴، ۱۹). در این مطالعات، محققان به بررسی تاثیر کربن فعال بر تجزیه فوتوکاتالیتیکی بخار تولوئن پرداختند که نتایج نشان دهنده افزایش راندمان حذف تا ۹۸٪ بود. پژوهش‌لی نیز که بر روی حذف تولوئن انجام شد نشان داد که با تلفیق کربن فعال و TiO_2 راندمان تجزیه از ۵۰٪ در بستر کاتالیتیکی به ۸۹/۵٪ در بستر جذبی-کاتالیتیکی بهبود یافت که با نتایج حاصل از این مطالعه همخوانی دارد (۲۰).

یافته‌های حاصل از تجزیه فوتوکاتالیتیکی تولوئن در بستر کاتالیتیکی نشان داد که با افزایش غلظت ورودی از $3/7 \text{ ppm}$ به $46/2 \text{ ppm}$ کارایی حذف از ۸۷٪ به ۱۸٪ کاهش یافته است که با مطالعه "تنها" که با افزایش غلظت ورودی تولوئن از 20 ppm به 400 ppm ، کاهش راندمان تجزیه از $38/5$ ٪ به $4/5$ ٪ گزارش شد، مطابقت دارد (۲۱).

نتایج پژوهش انجام شده توسط رنگ کوی نشان داد که با افزایش غلظت فرمالدئید از $2/5$ به 25 میلی‌گرم بر مترمکعب، کارایی حذف از ۷۳٪ به ۴۰٪ می‌رسد (۱۲) لیانگ نیز در مطالعه خود گزارش کرد که با افزایش غلظت ورودی تولوئن از $0/05$ به $0/3$ مول بر متر مکعب، راندمان حذف از ۸۵٪ به ۳۰٪ کاهش یافت، که با مطالعه حاضر همسو می‌باشد (۲۲).

به نظر می‌رسد که کاهش کارایی حذف با افزایش غلظت به دلیل محدودیت در جایگاه‌های فعال موجود در سطح کاتالیست و اشغال شدن آنها توسط مواد بینابینی حاصل از اکسیداسیون ناقص مواد آلی در اثر واکنش‌های اکسیداسیون فوتوکاتالیتیکی و در نتیجه

حذف از ۶۰٪ به ۳۰٪ کاهش یافت که با پژوهش انجام شده توسط اسلیمن و همکارانش (۲۳) که در آن با افزایش هواگذر از ۷۰ به ۳۵۰ میلی لیتر بر دقیقه، کارایی تجزیه تولوئن از ۹۵٪ به ۶۵٪ کاهش یافت، همسو می باشد و پژوهش لیانگ که با افزایش هواگذر از ۳ به ۹ لیتر بر دقیقه کاهش راندمان حذف تولوئن از ۶۱/۹٪ به ۳۰٪ به دست آمد همخوانی دارد (۲۲).

با توجه به اینکه حذف فوتوکاتالیتیکی مبتنی بر شیمی سطح و کینتیک‌های حذف درجه صفر است، کاستن از زمان ماند، سبب افزایش سرعت و ماندگاری آلاینده در سطح بستر می شود. اگرچه افزایش سرعت منجر به کاسته شدن از ضخامت لایه مرزی و افزایش انتقال جرم به سطح کاتالیست می شود ولی سرعت واکنش‌ها عامل محدوده کننده به شمار آمده و در نهایت از کارایی حذف کاتالیست کاسته می شود. بر این اساس در سیستم‌های فوتوکاتالیستی زمان ماند کافی برای حذف آلاینده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و با افزایش زمان ماند کارایی تجزیه و ظرفیت حذف بهبود می یابد.

نتایج این مطالعه گویای آن است که استفاده از بستر تلفیقی دی اکسید تیتانیوم با جاذب کربن فعال در حضور تابش UV-C ضمن ایجاد روشی کاربردی و مطمئن در زمینه حذف ترکیبات آلی از هوا به طور ضمنی قادر به حذف عوامل میکروبی نیز می باشد که خود به عنوان مزیتی در زمینه تصفیه هوا در محیط‌های داخلی محسوب می شود. چنین بسترهایی را می توان به عنوان فیلترهای جذبی خودپالا و با عمر نامحدود در نظر گرفت که بدون نیاز به احیاء و یا تعویض دوره ای بستر جذبی، عملیات جذب سطحی و احیاء بستر را به طور مداوم انجام داده و ضمناً مشکلات مربوط به مدیریت پسمان جاذب‌های مصرف شده را هم بر طرف می نمایند. یافته‌ها بیانگر آن است که کارایی حذف متأثر از غلظت اولیه تولوئن و زمان ماند آلاینده در بستر است و با بهینه سازی این پارامترها می توان به حداکثر راندمان در سیستم‌های فوتوکاتالیتیکی دست یافت. کاتالیست‌های تلفیق شده با جاذب‌های سطحی سبب بهبود راندمان تجزیه مبتنی بر تجزیه فوتوکاتالیتیکی می شوند و احتمالاً بخش زیادی از این بهبود بواسطه افزایش جایگاه‌های جذبی در مقایسه با سایت‌های جذبی محدود موجود در فوتوکاتالیست می باشد. از سوی دیگر با افزایش جایگاه‌های جذبی، آلاینده زمان بیشتری در تماس با فوتوکاتالیست خواهد بود و در نتیجه شرایط بهتری برای واکنش‌های اکسیداسیون سطحی ایجاد خواهد شد.

در طی دوره مطالعه کاهش در کارایی و ظرفیت حذف در بستر جذبی- کاتالیتیکی مشاهده نشد ولی در

افزودن جاذب به فوتوکاتالیست سبب افزایش زمان ماند آلاینده در بستر فوتوکاتالیتیکی و ارتقاء راندمان حذف می شود، به طوری در فوتوکاتالیست اصلاح شده با کربن فعال با کاهش هواگذر، از ۵/۶۲ به ۱/۳۷ لیتر بر دقیقه راندمان حذف از ۹۹٪ به ۹۲٪ کاهش یافت که با نتایج مطالعه هویلی (۲۴) بر روی حذف فرمالدئید و پژوهشی که وانگ در آن حذف تولوئن را با استفاده از TiO_2 تلفیق شده با کربن فعال بررسی نمود و با افزایش هواگذر از ۱ تا ۴ لیتر بر دقیقه، راندمان حذف از ۴٪ به ۹۵٪ ارتقاء یافت مطابقت دارد (۲۷).

به طور کلی با افزایش هواگذر به دلیل کاسته شدن از ضخامت لایه مرزی، مقدار بیشتری از مولکول‌های آلاینده به سطح جذبی- فوتوکاتالیتیکی بستر مهاجرت کرده و تجزیه می شوند. با کاهش هواگذر یا افزایش زمان ماند جریان هوا بر روی بستر، الگوی جریان به شرایط لامینار نزدیک شده و با تشکیل لایه مرزی بر روی بستر جذبی- فوتوکاتالیتیکی، انتقال جرم مولکول‌های آلاینده به سطح فوتوکاتالیست محدود و در نهایت از راندمان حذف کاسته می شود.

همچنین نتایج حاصل از این مطالعه مؤید آن بود که

formaldehyde: evaluation of sensory irritation in relation to carcinogenicity. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2006;44(2):1-44.60.

12. Rangkooy HA, Rezaee A, Khavanin A, Jafari AJ, Khoopaie AR. A Study on Photocatalytic Removal of Formaldehyde from Air Using ZnO Nanoparticles Immobilized on Bone Char. *Qom Uni Med Sci J*. 2011;7(2).

13. Rezaei F, Moussavi G, Riyahi Bakhtiari A, Yamini Y. Toluene adsorption from waste air stream using activated carbon impregnated with manganese and magnesium metal oxides. *Iran J Health Environ*. 2016;8(4):491-508.

14. Matos J, Garcia A, Chovelon J-M, Ferronato C. Combination of adsorption on activated carbon and oxidative photocatalysis on TiO₂ for gaseous toluene remediation. *Open Mat Sci J*. 2010;4:23-5.

15. Garcia A, Matos J. Photocatalytic activity of TiO₂ on activated carbon under visible light in the photodegradation of phenol. *Open Mater Sci J*. 2010;4(2).

16. Lu Y, Wang D, Ma C, Yang H. The effect of activated carbon adsorption on the photocatalytic removal of formaldehyde. *Build Environ*. 2010;45(3):615-21.

17. Palau J, Colomer M, Penya-Roja JM, Martinez-Soria V. Photodegradation of toluene, m-xylene, and n-butyl acetate and their mixtures over TiO₂ catalyst on glass fibers. *Indust Engineer Chem Res*. 2012;51(17): 5986-94.

18. Nikpey A, Nikpey M, Kazemian H. Removal of methyl tertiary butyl ether (MTBE) vapour from contaminated air streams using different bacterial cultures in biotrickling filter. *J Environ Health Sci Engineer*. 2006;3(2):117-22.

19. Rezaee A, Pourtaghi G, Khavanin A, Mamooory RS, Ghaneian M, Godini H. Photocatalytic decomposition of gaseous toluene by TiO₂ nanoparticles coated on activated carbon. *J Environ Health Sci Engineer*. 2008;5(4):305-10.

20. Ao C, Lee S. Indoor air purification by photocatalyst TiO₂ immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. *Chem Engineer Sci*. 2005;60(1):103-9.

21. Tanha F, Rangkooy H, Jaafarzadeh N, Valipour F, Arefian I. A study on photocatalytic removal of Toluene from air using ZnO-SnO₂ coupled oxide immobilized on Activated Carbon. *Iran Occup Health*. 2017;13(6):1-9.

22. Liang W, Li J, He H. Photo-catalytic degradation of volatile organic compounds (VOCs) over titanium dioxide thin film. *Adv Aspects Spectroscopy: InTech*; 2012.

23. Sleiman M, Conchon P, Ferronato C, Chovelon J-M. Photocatalytic oxidation of toluene at indoor air levels (ppbv): Towards a better assessment of conversion, reaction intermediates and mineralization. *Appl Catalys B: Environ*. 2009;86(3):159-65.

بخش‌هایی از بستر کاتالیتیکی که از تابش کافی برخوردار نبود، تجمع مواد آلی تا حدی تجزیه شده به رنگ قهوه‌ای بر سطح بستر مشاهده شد. تجمع این مواد بر سطح بستر سبب کاستن از کارایی حذف می‌گردد. برای احیاء مجدد بستر، نیاز به شستشوی بستر با هوای تمیز در حضور لامپ ماوراء بنفش بود.

References

1. Maudhuit A, Raillard C, Héquet V, Le Coq L, Sablayrolles J, Molins L. Adsorption phenomena in photocatalytic reactions: the case of toluene, acetone and heptane. *Chem Engineer J*. 2011;170(2):464-70.

2. Lin L, Chai Y, Zhao B, Wei W, He D, He B, et al. Photocatalytic oxidation for degradation of VOCs. *Open J Inorgan Chem*. 2013;3(1):14.

3. Ivanova S, Pérez A, Centeno MÁ, Odriozola JA. Structured catalysts for volatile organic compound removal. Elsevier Science: Amsterdam; 2013. p. 233-56.

4. Palau J, Penya-Roja JM, Gabaldón C, Javier Álvarez-Hornos F, Sempere F, Martínez-Soria V. UV photocatalytic oxidation of paint solvent compounds in air using an annular TiO₂-supported reactor. *J Chem Technol Biotechnol*. 2011;86(2):273-81.

5. Chen Y, Crittenden JC, Hackney S, Sutter L, Hand DW. Preparation of a novel TiO₂-based p-n junction nanotube photocatalyst. *Environ Sci Technol*. 2005;39(5):1201-8.

6. Ghorbani Shahna F, Bahrami A, Ebrahimi H. The hybrid effect of non-thermal plasma and activated carbon-zinc oxide nanocomposite on the removal of volatile organic compounds in air. *Iran Occup Health*. 2017;14(4):24-13.

7. Yu H, Zhang J, editors. Comparative study of photocatalytic oxidation on the degradation of formaldehyde and fuzzy mathematics evaluation of filters. Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering; 2012: International Society for Optics and Photonics.

8. Asilian Mahabady H, Khavanin A, Aresoomandan S. Efficiency evaluation of the photocatalytic removal of toluene vapour by titanium dioxide nanoparticles immobilized on ZSM-5 zeolite. *Iran Occup Health*. 2018;15(1):17-25

9. Chen J, Poon CS. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Build Environ*. 2009;44(9):1899-906.

10. An JY, Kim S, Kim HJ, Seo J. Emission behavior of formaldehyde and TVOC from engineered flooring in under heating and air circulation systems. *Build Environ*. 2010;45(8):1826-33.

11. Arts JH, Rennen MA, de Heer C. Inhaled

24. Yu H, Zhang K, Rossi C. Experimental study of the photocatalytic degradation of formaldehyde in indoor air using a nano-particulate titanium dioxide photocatalyst. *Indoor Built Environ.* 2007;16(6):529-37.
25. Takeuchi M, Hidaka M, Anpo M. Efficient removal of toluene and benzene in gas phase by the TiO₂/Y-zeolite hybrid photocatalyst. *J Hazard Mat.* 2012;237:133-9.
26. Yu KP, Lee GWM, Hung AJ. Removal of indoor α -pinene with a fiber optic illuminated honeycomb monolith photocatalytic reactor. *J Environ Sci Health, Part A.* 2014;49(10):1110-5.
27. Chen J, Qin Y, Chen Z, Yang Z, Yang W, Wang Y. Gas circulating fluidized beds photocatalytic regeneration of I-TiO₂ modified activated carbons saturated with toluene. *Chem Engineer J.* 2016;293:281-90.