



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## حذف تولوئن گازی توسط بیوفیلتر مخروط کاج/کمپوست: راه‌اندازی، عملکرد و بهینه‌سازی

زهره نادری<sup>۱</sup>، هیوا حسینی<sup>۱</sup>، مقداد پیرصاحب<sup>۱</sup>، اکبر برزگر<sup>۲</sup>، سارا کیانپور<sup>۱\*</sup>

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
۲- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: تولوئن یکی از مهمترین ترکیبات آلی فرار است که علاوه بر ایجاد مشکلات زیست‌محیطی، سلامت انسان را نیز تهدید می‌کند. بنابراین مطالعه حاضر با هدف تعیین عملکرد بیوفیلتر مبتنی بر بستر مخروط کاج/کمپوست جهت حذف بخارات تولوئن از جریان هوای آلوده انجام شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

روش بررسی: در این پژوهش یک بیوفیلتر با حجم ۱۹/۴۶۸ L طراحی و ساخته شد. بستر بیوفیلتر از دو قسمت به ارتفاع ۲۶ cm تشکیل و با مخلوطی از کمپوست و مخروط کاج به نسبت حجمی ۱:۱ پر شد. پس از تلقیح بستر با لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری و سازگار نمودن آن با تولوئن، عملکرد بیوفیلتر در قسمت‌های مختلف بستر در غلظت تولوئن ورودی  $2/5-5/5 \text{ g/m}^3$  و زمان ماند بستر خالی (EBRT)  $1/3$ ،  $1/7$  و  $2/43 \text{ min}$  مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج به لحاظ آماری نیز تجزیه و تحلیل شدند.

واژگان کلیدی: تجزیه زیستی، مخروط کاج، ترکیبات آلی فرار، کمپوست

یافته‌ها: در EBRT  $2/43 \text{ min}$  و غلظت‌های تولوئن ورودی  $2/5-5/5 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف به ۱۰۰ درصد رسید. همچنین با کاهش EBRT از کارایی حذف کاسته شد. نتایج نشان داد که کارایی حذف در قسمت اول بستر بیوفیلتر بیشتر از قسمت دوم آن بود. در غلظت تولوئن ورودی  $2/62 \text{ g/m}^3$  و EBRT  $1/7 \text{ min}$ ، حداکثر ظرفیت حذف ( $EC_{max}$ ) بیوفیلتر  $2/74 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$  بدست آمد.

نتیجه‌گیری: در کلیه شرایط بهره‌برداری بیوفیلتر، غلظت خروجی بیوفیلتر مخروط کاج/کمپوست، پایین‌تر از استاندارد WHO ( $260 \mu\text{g/m}^3$ ) بود. همچنین، ظرفیت حذف بالای بیوفیلتر قابلیت آن را در حذف تولوئن از جریان گازهای آلوده تأیید کرد.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

kianpoursara7@gmail.com

Please cite this article as: Naderi Z, Hossaini H, Pirsahab M, Barzegar A, Kianpour S. Gaseous toluene removal by pine-cone/compost biofilter: setup, performance, and optimization. Iranian Journal of Health and Environment. 2022;15(3):493-508.



## مقدمه

تولوئن یک ترکیب آلی فرار است که در صنعت و محصولات تجاری مانند لوازم آرایشی، جوهر، چسب و رنگ استفاده می‌شود (۱). این ترکیب به‌عنوان ماده خام برای سنتز ترکیباتی مانند تری نیترو تولوئن، کلروآمین-T، ساخارین و بسیاری از مواد رنگزا مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲). بالاترین سطوح مواجهه با تولوئن در صنعت نقاشی، چاپ، خودرو و کفش دیده می‌شود (۳). حضور تولوئن در هوای محیطی باعث تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی در فصل زمستان و آسیب به غشای برگ گیاهان می‌شود. این ماده همچنین موجب آسیب به سیستم عصبی، کبد، ریه، کلیه‌ها (۴) و افزایش خواب‌آلودگی، سردردهای مکرر، تحریک چشم و اختلال حافظه در انسان می‌گردد (۵). مسمومیت مزمن ناشی از استنشاق تولوئن در غلظت  $200-400 \text{ mg/m}^3$  رخ می‌دهد (۶).

فرایندهای اصلی جهت حذف تولوئن از جریان هوا شامل جذب سطحی، احتراق کاتالیزوری، ازن‌زنی و جداسازی غشایی است. این فرایندها اغلب محدودیت‌های زیست‌محیطی دارند و به دلیل کارایی پایین و مصرف انرژی بالا، گران هستند (۷-۹). بنابراین روش‌های تصفیه بیولوژیکی مانند بیوفیلتر، جایگزین مناسبی برای این تکنیک‌ها هستند. در فرایند بیوفیلتراسیون از میکروارگانیسم‌های زنده برای جذب و از بین بردن آلاینده استفاده می‌شود. این فرایند براساس مکانیسم‌های جذب، تجزیه زیستی و دفع آلاینده‌های فاز گاز صورت می‌گیرد (۱۰). مزایای بیوفیلتراسیون شامل ساخت و بهره‌برداری ارزان و عملکرد مؤثر در دمای اتاق، غلظت پایین و میزان جریان و رطوبت بالاست. این فرایند راندمان حذف بالایی دارد و به‌عنوان فناوری سبز از مواد شیمیایی استفاده نمی‌کند و زائدات خطرناک در محیط زیست بجا نمی‌گذارد (۱۱).

بستر، مهمترین بخش بیوفیلتر را تشکیل می‌دهد زیرا رشد میکروبی مناسب را فراهم می‌کند. مشخصات بستر مناسب شامل سطح ویژه و تخلخل بالا، ظرفیت نگهداشت آب مناسب،

در دسترس بودن مواد مغذی ذاتی و وجود یک میکروفلور بومی متراکم و متنوع است (۱۲). موادی که به‌عنوان بستر بیوفیلتر بکار می‌روند شامل مواد آلی (خاک، کمپوست)، مواد مصنوعی (پلاستیک، سرامیک، فوم پلی اورتان) و مواد آلی بدون مواد مغذی (پرلیت، سنگ گدازه) هستند (۱۳). مواد آلی دوام نسبتاً کمی دارند و دارای معایبی مانند فشرده شدن و در نتیجه افزایش افت فشار و کانالیزه شدن هستند (۱۴). مواد بی‌اثر دارای معایبی مانند کمبود مواد مغذی و بیومس، رطوبت پایین و سطح ویژه کوچک هستند. همچنین مواد مصنوعی مانند حلقه‌های پلاستیکی و مهره‌های سرامیکی گران هستند و دفع نهایی آنها برای محیط زیست مضر است (۱۳). در نتیجه، استفاده از مخلوط مواد آلی و بی‌اثر تلقیح شده با کنسرسیون میکروبی سازگار، عملکرد بهتر و افت فشار کم بیوفیلتر را فراهم می‌کند (۱۵). در مطالعات مختلف موادی مانند بقایای محصولات کشاورزی، پوست درخت خرما و کمپوست همراه با مهره سرامیکی و سنگ گدازه به‌عنوان بستر گزارش شده است (۱۶-۱۹). Singh و همکاران (۱۶) از بیوفیلتر با بستر ساقه (yellow-gram) (*Cajanus cajan*) جهت حذف بخارات تولوئن استفاده کردند. Natarajan و همکاران (۱۷) تجزیه زیستی تولوئن با بیوفیلتر پوست درخت خرما را بررسی کردند. همچنین در مطالعه Malakar و همکاران (۱۸) حذف تولوئن در یک بیوفیلتر پر شده با مهره‌های سرامیکی و کمپوست مورد مطالعه قرار گرفت. با این حال تاکنون از بیوفیلتر مبتنی بر بستر مخروط کاج/کمپوست برای حذف هیچ‌گونه آلاینده گازی استفاده نشده است. مخروط کاج می‌تواند به‌عنوان یک بستر طبیعی با سطح ویژه بالا برابر  $320 \text{ m}^2/\text{m}^3$  و مقاومت آئرودینامیکی پایین معادل  $40 \text{ Pa/m}$  با سرعت  $1 \text{ m/s}$  بکار رود. تخلخل و قطر معادل آن به ترتیب برابر با  $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^3$  و  $0.1 \text{ m}$  است. به‌طور کلی مخروط‌های کاج  $40-70 \text{ mm}$  ارتفاع و  $30-50 \text{ mm}$  عرض دارند و مهمترین ویژگی آنها سطح ویژه بالا و افت فشار کم است (۱۳). سطح در دسترس مخروط کاج

با نسبت حجمی مساوی، پوشش داده شدند.

– راه اندازی و بهره‌برداری بیوفیلتر

بیوفیلتر از جنس استیل به ارتفاع ۱۰۰ cm و قطر داخلی ۲۶ cm ساخته شد. ارتفاع بستر به دو قسمت ۱۹/۴۶۸ L محاسبه شد. تقسیم گردید و حجم کاری راکتور ۱۹/۴۶۸ L محاسبه شد. برای جلوگیری از تداخل بین قطعات، گرفتگی بستر و افزایش توزیع مناسب گاز بین لایه‌ها، یک توری استیل در پایین هر بخش قرار داده شد و یک فضای آزاد ۱۰ cm در نظر گرفته شد. جهت تزریق نوترینت و نمونه‌برداری از بخارات تولوئن، دو شیر در بالای هر بخش بستر قرار گرفت. در پایین ستون، یک قسمت مخروطی با دو شیر قطع و وصل برای تزریق جریان هوای ورودی به بیوفیلتر و جمع‌آوری شیرابه ایجاد شد. به منظور توزیع صحیح بخارات تولوئن ورودی به بیوفیلتر، یک توری فلزی پوشیده شده با ماسه نخودی به ارتفاع ۱۰ cm در پایین ستون بیوفیلتر قرار داده شد (شکل ۱). جریان هوا توسط کمپرسور تأمین و برای تولید بخارات خالص تولوئن پس از عبور از دو قسمت (رطوبت‌ساز و محفظه حاوی تولوئن مایع با خلوص ۹۹ درصد) وارد محفظه اختلاط شد. در نهایت خروجی محفظه اختلاط پس از تعیین غلظت و دبی مشخص از تولوئن توسط روماتر، به بیوفیلتر تزریق شد. رطوبت نسبی بستر از طریق رطوبت‌ساز و مواد مغذی تأمین و در محدوده ۴۰-۵۰ درصد نگهداری شد. به منظور تأمین مواد مغذی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها، محلول مواد مغذی با دبی ۴/۵ mL/s در ۸ بازه زمانی ۱۵ s روزانه به بستر تزریق شد. ترکیب این محلول در هر لیتر آب مقطر شامل، ۰/۱۱ g  $K_2HPO_4$ ، ۰/۰۶۷ g  $MgSO_4$ ، ۰/۵۴ g  $NH_4Cl$ ، ۰/۰۴ g  $KH_2PO_4$ ، ۰/۰۳ mg  $MnSO_4$ ، ۰/۲۵ mg  $FeCl_3$ ، ۰/۰۳۶ g  $CaCl_2$  و ۰/۰۳ mg  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ، ۰/۰۴ mg  $ZnSO_4$  و ۲/۵ g  $C_6H_{12}O_6$  بود.

همانگ با درصد رطوبت متغیر است، به طوری که به ترتیب در رطوبت بالا و پایین، بافت الیاف آن منقبض و منبسط می‌شود (۲۰) که این ویژگی منحصر بفرد باعث باز و بسته شدن مخروط کاج می‌گردد. این خصوصیات می‌تواند تا حدودی مشکلات ناشی از رشد بیومس و افزایش افت فشار را در بیوفیلتر حل کند.

بنابراین هدف از این مطالعه طراحی و ارزیابی عملکرد بیوفیلتر مبتنی بر بستر مخروط کاج و کمپوست در حذف بخارات تولوئن از جریان هوای آلوده است.

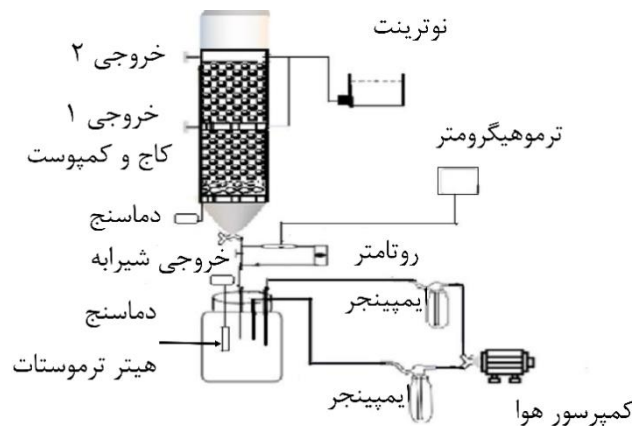
## مواد و روش‌ها

– میکروارگانیسم‌ها

در این مطالعه از لجن فعال یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری برای تلقیح میکروبی بیوفیلتر استفاده شد. ابتدا در یک راکتور ناپیوسته مجهز به سیستم هوادهی، ۱ L لجن فعال با ۳ L فاضلاب خام مخلوط گردید. به منظور سازگاری میکروارگانیسم‌ها با تولوئن، طی یک ماه به سیستم مذکور مقادیر متفاوتی از تولوئن در محدوده ۱۰-۱ mL و تناوب روزانه افزوده و مطابق با رشد میکروبی، میزان سازگاری ارزیابی گردید.

– بستر

به منظور آماده‌سازی بستر، ابتدا مخروط‌های کاج به مدت ۱۴ روز داخل مخزن هوادهی حاوی لجن خوگیری شده قرار گرفتند تا بیوفیلیم تشکیل گردد. سپس مخروط‌های کاج در هر بخش از بستر بیوفیلتر قرار گرفتند و با مخلوطی از ورمی‌کمپوست باغی (رطوبت ۳۱/۸ درصد، وزن خشک کربن آلی ۳۳/۱ درصد و pH=۷) و لجن فعال (MLVSS=۱۴۰۰۰ mg/L، MLSS=۲۰۰۰۰ mg/L، pH=۷)



شکل ۱- شماتیک بیوفیلتر در مقیاس آزمایشگاهی

پس از آماده‌سازی راکتور، ابتدا بیوفیلتر با جریان هوای حاوی  $2/4 \text{ g/m}^3$  تولوئن در  $1/76 \text{ min EBRT}$  و سرعت جریان  $11 \text{ m}^3/\text{min}$  راه‌اندازی شد. سپس عملکرد آن در ۳ فاز اصلی، در غلظت‌های  $2/62$ ،  $3/72$  و  $5/16 \text{ g/m}^3$  و در سه سرعت جریان ۸، ۱۱ و  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  که به ترتیب معادل

عملیاتی مختلف در جدول ۱ آورده شده است. لازم بذکر است  $1/3$ ،  $1/77$  و  $2/43 \text{ min}$  است، بررسی شد. شرایط عملیاتی مختلف در جدول ۱ آورده شده است. لازم بذکر است در  $1/3$ ،  $1/77$  و  $2/43 \text{ min}$  EBRTs مختلف پس از رسیدن به کارایی حذف پایدار، کارایی راکتور جهت اطمینان از تکرار پذیری نتایج، تا ۲۰ زمان ماند تکرار گردید.

جدول ۱- شرایط عملیاتی بیوفیلتر

(min) EBRT	غلظت تولوئن ورودی		دبی هوای ورودی ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	فازهای عملیات
	ppm	$\text{g/m}^3$		
1/76	792	2/4	11	راه‌اندازی
1/3	$831 \pm 9/37$	$2/62 \pm 0/06$	8	1
	$1164 \pm 2/24$	$3/72 \pm 0/02$		
	$1690 \pm 0/04$	$5/16 \pm 0/03$		
1/77	$831 \pm 9/37$	$2/62 \pm 0/06$	11	2
	$1164 \pm 2/24$	$3/72 \pm 0/02$		
	$1690 \pm 0/04$	$5/16 \pm 0/03$		
2/43	$831 \pm 9/37$	$2/62 \pm 0/06$	15	3
	$1164 \pm 2/24$	$3/72 \pm 0/02$		
	$1690 \pm 0/04$	$5/16 \pm 0/03$		

که در آن:  $Q$  ( $m^3/h$ ) میزان جریان هوا،  $V$  ( $m^3$ ) حجم بستر پر شده و  $C_{in}$  و  $C_{out}$  به ترتیب غلظت تولوئن ورودی و خروجی ( $g/m^3$ ) است.

– نمونه برداری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

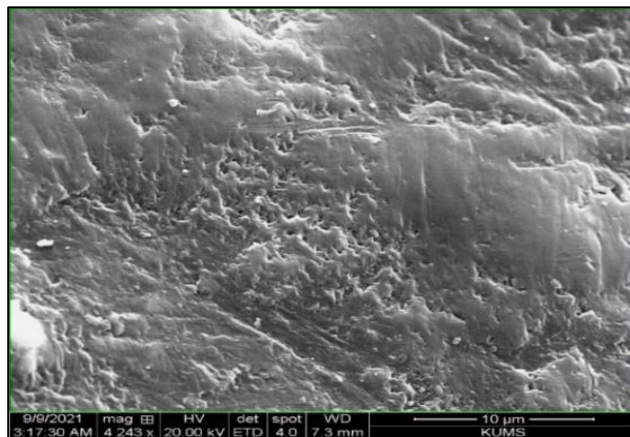
غلظت تولوئن گازی با دستگاه کوچک کالیبره شده توسط کروماتوگرافی گازی با دتکتور FID و با در نظر گرفتن ضریب تصحیح ۲/۶۴ اندازه‌گیری شد. نمونه‌گیری در فواصل دو ساعته در طول روز تا رسیدن به راندمان حذف پایدار (رسیدن نوسان کارایی بیوفیلتر به  $\pm 5\%$  درصد اختلاف از مقدار میانگین کارایی) انجام گردید. سپس داده‌ها توسط نرم افزار SPSS نسخه ۱۶ و آزمون‌های ناپارامتری کروسکیال والیس (Kruskal-Wallis) و ویل کاکسون (Wilcoxon) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### یافته‌ها

– راه‌اندازی و سازگاری

در این مطالعه برای رسیدن به راندمان حذف پایدار، تشکیل بیومس و سازگاری میکروارگانیسم‌ها با تولوئن، مرحله راه‌اندازی و سازگاری بیوفیلتر طی ۱۵ روز انجام شد. در ساعات ابتدایی فاز راه‌اندازی بدلیل عدم تشکیل کامل بیوفیلیم، نوساناتی در میزان تولوئن خروجی مشاهده گردید و پس از گذشت ۵۱ ساعت کارایی حذف افزایش یافت و به میزان پایدار ۱۰۰ درصد رسید. مقایسه تصاویر SEM مخروط کاج قبل و بعد از سازگاری در شکل ۲ آورده شده است و تشکیل مناسب بیوفیلیم را تایید می‌نماید.

(الف)



شکل ۲- SEM سطح مخروط کاج: (الف) قبل از سازگاری و (ب) پس از سازگاری

– بررسی مورفولوژیکی بستر توسط میکروسکوپ الکترونی

روبشی (*Scanning Electron Microscope (SEM)*)

به منظور تایید تشکیل بیوفیلیم در بستر، نمونه‌ای از مخروط کاج جدا و با بافر فسفات ۰/۰۵ M تهیه شده از  $K_2HPO_4$  ۰/۳۸۵ g و  $KH_2PO_4$  ۰/۳۸ g در ۱۰۰ mL آب مقطر شسته شد. سپس با استفاده از محلول گلو تار آلدئید ۳ درصد در بافر فسفات به مدت ۲۴ h تثبیت گردید. در ادامه نمونه با استفاده از محلول‌های اتانول با غلظت‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد آبیگری شد (۲۱). در نهایت، نمونه با لایه‌ای از طلا پوشانده و با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آنالیز شد.

– ارزیابی عملکرد بیوفیلتر

عملکرد بیوفیلتر توسط پارامترهای میزان بارگذاری ورودی (Inlet Loading Rate (ILR)، ظرفیت حذف (Elimination Capacity (EC)، کارایی حذف و زمان ماند بستر خالی (Empty Bed Residence Time (EBRT)) تعیین می‌شود. این پارامترها توسط معادلات ۱ تا ۴ تعریف شده‌اند:

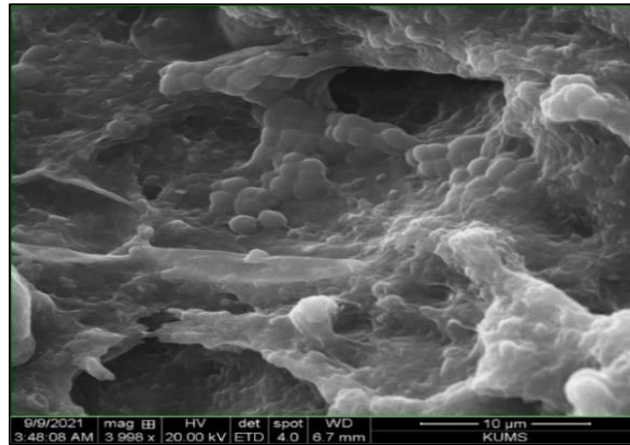
$$ILR = \frac{QC_{in}}{V} \quad (g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}) \quad (1)$$

$$EC = \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{V} \quad (g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}) \quad (2)$$

$$RE = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

$$EBRT = \frac{V}{Q} \quad (min) \quad (4)$$

(ب)

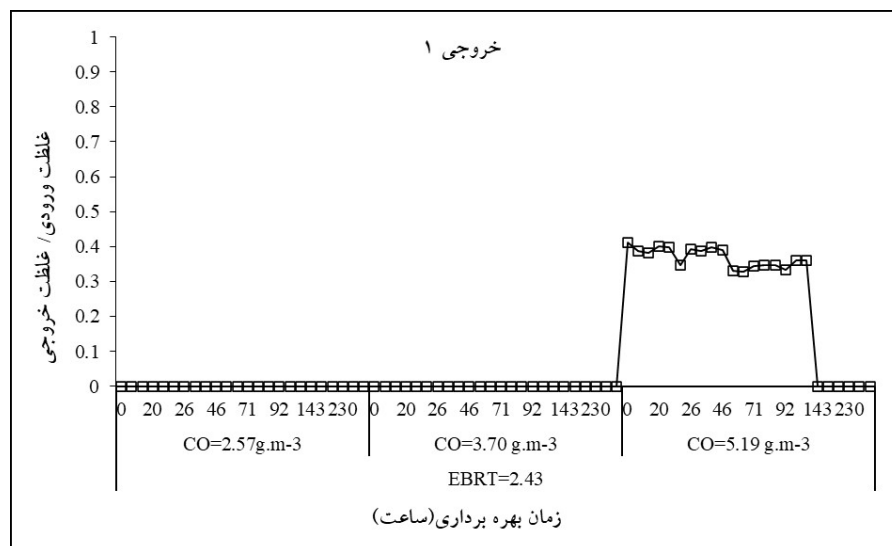


ادامه شکل ۲- SEM سطح مخروط کاج: (الف) قبل از سازگاری و (ب) پس از سازگاری

اثر سرعت جریان گاز و زمان ماند بر کارایی حذف بیوفیلتر روند تغییرات نسبت غلظت تولوئن خروجی بر غلظت تولوئن ورودی ( $C/C_0$ ) در EBRTs مختلف در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج، در خروجی ۱ در سرعت جریان  $8 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $2/43 \text{ min}$  و غلظت‌های  $2/57 \text{ g/m}^3$  و  $3/7 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف ۱۰۰ درصد و در غلظت  $5/19 \text{ g/m}^3$  پس از نوساناتی به ۱۰۰ درصد رسید (نمودار ۱-الف). با افزایش سرعت جریان به  $11 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $1/77 \text{ min}$  در غلظت  $2/6 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف ۱۰۰ درصد و با افزایش غلظت به  $3/7$  و  $5/14 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف کاهش یافت و به ۳۵ درصد رسید (نمودار ۱-ب) که  $C/C_0$  معادل  $0/65$  بود. همچنین با افزایش سرعت جریان به  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $1/3 \text{ min}$ ، کارایی حذف در غلظت  $2/62 \text{ g/m}^3$  برابر با ۹۵ درصد و در دو غلظت  $3/7$  و  $5/15 \text{ g/m}^3$  پس از نوساناتی به ۴۵ درصد رسید که  $C/C_0$  معادل  $0/55$  بود (نمودار ۱-ج).

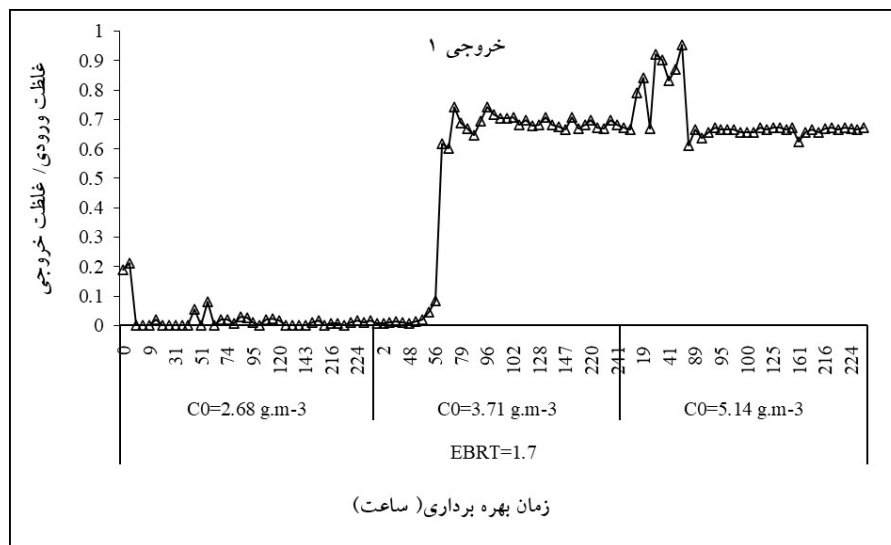
اثر سرعت جریان گاز و زمان ماند بر کارایی حذف بیوفیلتر روند تغییرات نسبت غلظت تولوئن خروجی بر غلظت تولوئن ورودی ( $C/C_0$ ) در EBRTs مختلف در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج، در خروجی ۱ در سرعت جریان  $8 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $2/43 \text{ min}$  و غلظت‌های  $2/57 \text{ g/m}^3$  و  $3/7 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف ۱۰۰ درصد و در غلظت  $5/19 \text{ g/m}^3$  پس از نوساناتی به ۱۰۰ درصد رسید (نمودار ۱-الف). با افزایش سرعت جریان به  $11 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $1/77 \text{ min}$  در غلظت  $2/6 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف ۱۰۰ درصد و با افزایش غلظت به  $3/7$  و  $5/14 \text{ g/m}^3$  کارایی حذف کاهش یافت و به ۳۵ درصد رسید (نمودار ۱-ب) که  $C/C_0$  معادل  $0/65$  بود. همچنین با افزایش سرعت جریان به  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  معادل EBRT  $1/3 \text{ min}$ ، کارایی حذف در غلظت  $2/62 \text{ g/m}^3$  برابر با ۹۵ درصد و در دو غلظت  $3/7$  و  $5/15 \text{ g/m}^3$  پس از نوساناتی به ۴۵ درصد رسید که  $C/C_0$  معادل  $0/55$  بود (نمودار ۱-ج).

(الف)

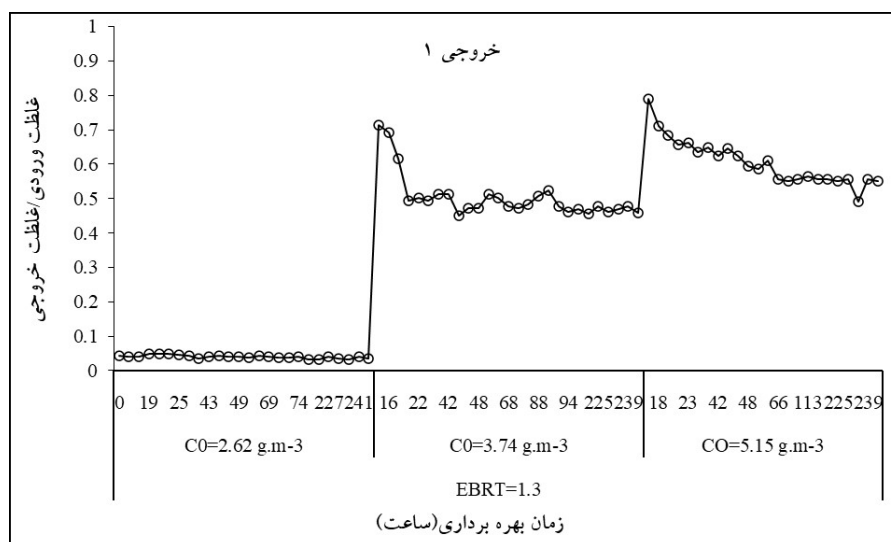
نمودار ۱- نسبت  $C/C_0$  در EBRTs و غلظت‌های مختلف در خروجی ۱



(ب)



(ج)

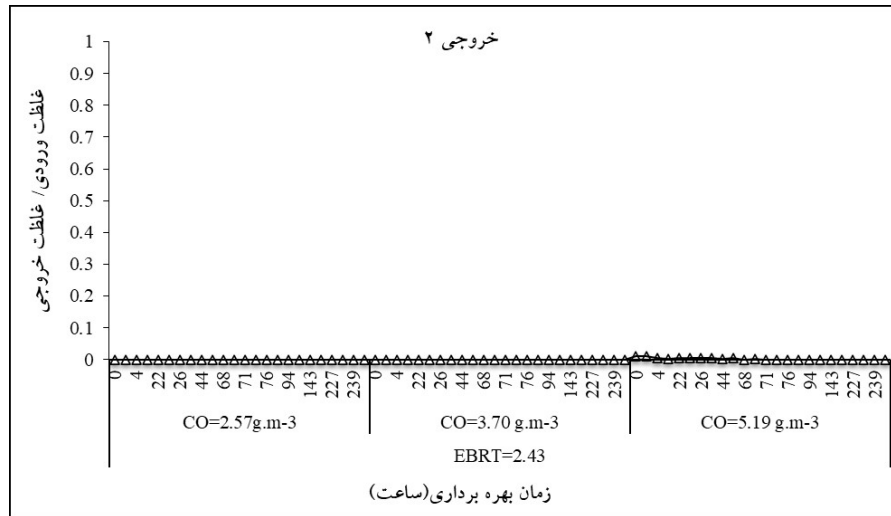


### ادامه نمودار ۱- نسبت $C/C_0$ در EBRTs و غلظت‌های مختلف در خروجی ۱

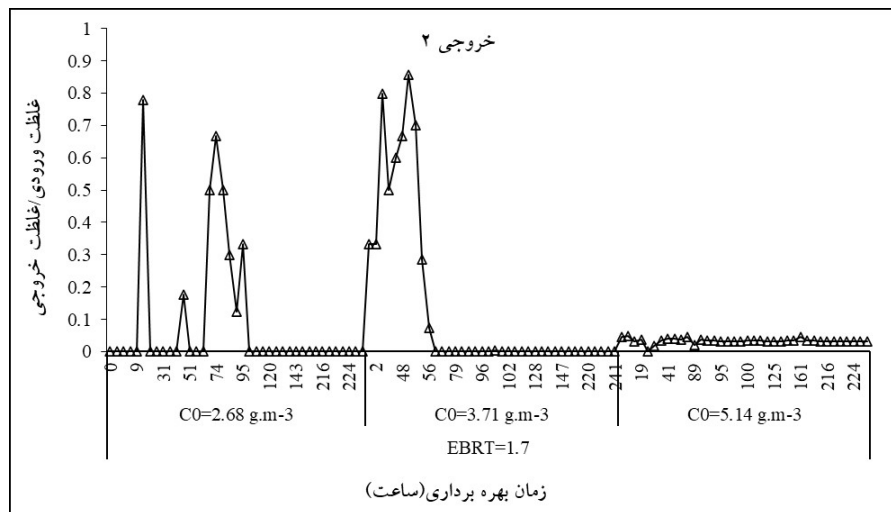
غلظت  $5/19 \text{ g/m}^3$  در نهایت کارایی حذف ۹۵ درصد بدست آمد (نمودار ۲-ب). در بالاترین سرعت جریان یا کمترین EBRT در هر سه غلظت، کارایی حذف به ۹۰ درصد رسید (نمودار ۲-ج).

در خروجی ۲ در سرعت جریان ورودی  $8 \text{ m}^3/\text{min}$  در سه غلظت ورودی، کارایی حذف ۱۰۰ درصد مشاهده گردید (نمودار ۲-الف). در سرعت جریان  $11 \text{ m}^3/\text{min}$  و در غلظت‌های  $2/62$  و  $3/7 \text{ g/m}^3$ ، بعد از نوساناتی کارایی حذف ۱۰۰ درصد و در

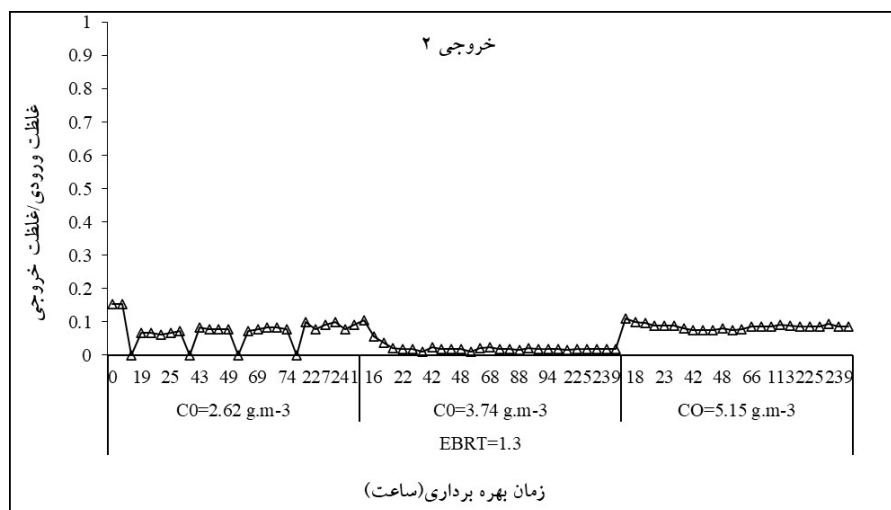
(الف)



(ب)



(ج)



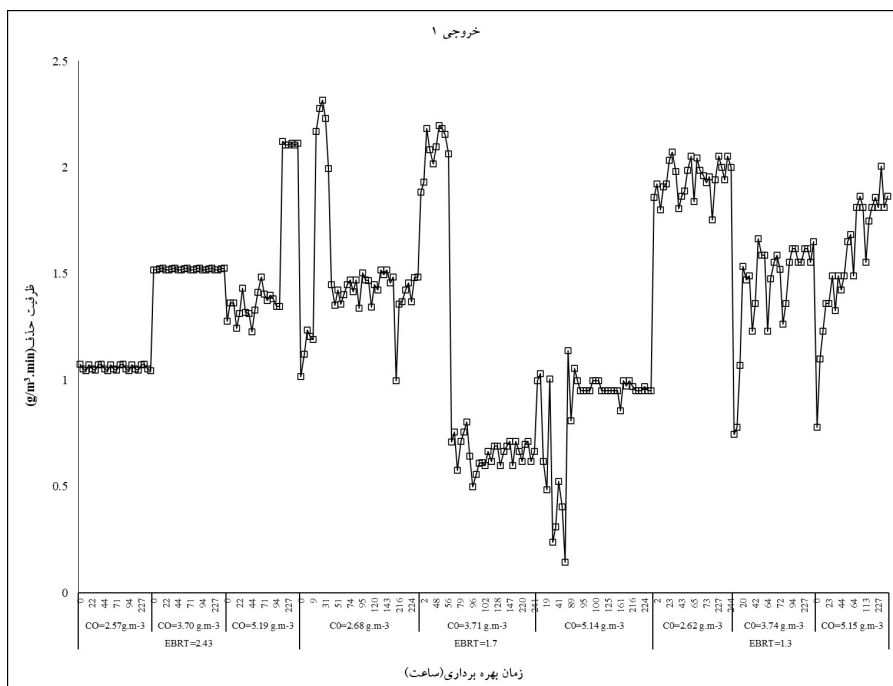
نمودار ۲- نسبت  $C/C_0$  در EBRTs و غلظت‌های مختلف در خروجی ۲



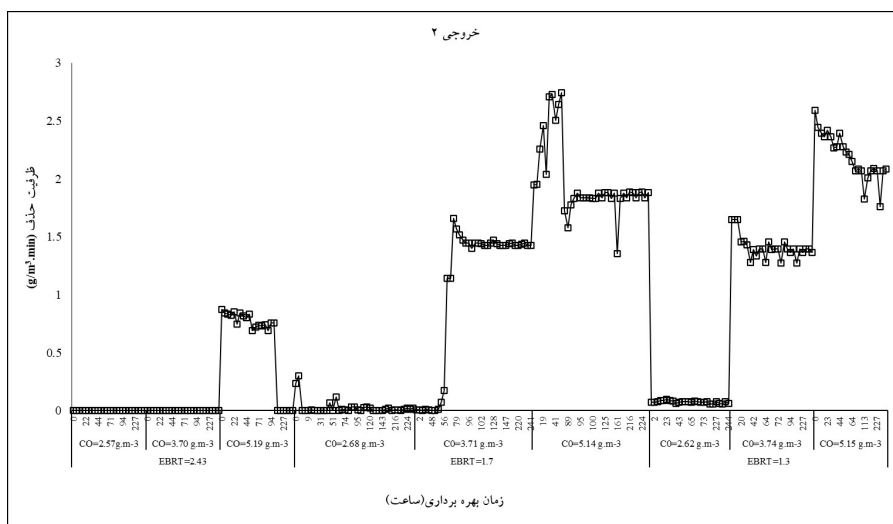
معدل  $2/316 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$  برابر  $1/7 \text{ min EBRT}$ ، بدست آمد (نمودار ۳-الف). همچنین  $EC_{\text{max}}$  در خروجی ۲ بیوفیلتر در زمان ماند  $1/7 \text{ min}$  و در غلظت  $164/4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$  برابر  $2/74 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$  معادل  $5/16 \text{ g/m}^3$  محاسبه شد (نمودار ۳-ب).

ظرفیت حذف بیوفیلتر در غلظت‌ها و زمان‌های ماند مختلف به منظور درک بهتر کارایی بستر بیوفیلتر،  $EC$  در غلظت‌های مختلف تولوئن و  $EBRTs$  متفاوت تعیین گردید. نمودار ۳ روند تغییرات  $EC$  را در خروجی ۱ و ۲ بیوفیلتر نشان می‌دهد.  $EC_{\text{max}}$  در خروجی ۱ بیوفیلتر در غلظت  $2/62 \text{ g/m}^3$  و در

(الف)



(ب)



نمودار ۳- تغییرات  $EC$  در خروجی ۱ (الف) و ۲ (ب)

نتایج SPSS برای حذف تولوئن در غلظت‌ها و زمان‌های ماند مختلف

نتایج آزمون Kruskal-Wallis برای مقایسه گروه‌های غلظت براساس کارایی حذف و EC نشان داد، کمترین میانگین رتبه (پایین‌ترین) کارایی حذف در خروجی ۲، غلظت  $5/15 \text{ g/m}^3$  و  $1/3 \text{ min}$  EBRT برابر  $33/83$  و کمترین میانگین رتبه (پایین‌ترین) EC نیز در خروجی ۲، غلظت  $2/57 \text{ g/m}^3$  و  $2/43 \text{ min}$  EBRT برابر  $29/33$  بدست آمد (جدول ۲). از

طرفی مقایسه گروه‌های EBRT براساس کارایی حذف و EC نشان داد بیشترین میانگین رتبه (بالا‌ترین) کارایی حذف در خروجی ۱ و  $2/43 \text{ min}$  EBRT برابر  $236/17$  و بیشترین میانگین رتبه (بالا‌ترین) EC در خروجی ۲ و  $1/3 \text{ min}$  EBRT،  $226/92$  بود (جدول ۲). همچنین میانگین کارایی حذف در کل گروه‌های غلظت و EBRT به ترتیب برابر  $97/91 \pm 1/1$  درصد و  $97/99 \pm 0/56$  درصد و ضریب تغییرات آن نیز برابر  $4/68$  محاسبه شد.

جدول ۲- مقایسه گروه‌های غلظت و EBRT براساس کارایی حذف و EC

متغیر	میانگین رتبه RE	میانگین رتبه EC	غلظت ( $\text{g/m}^3$ )	میانگین رتبه RE	میانگین رتبه EC	EBRT (min)
خروجی ۱	۲۶۶	۱۱۶/۷۵	۲/۵۷	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
	۲۶۶	۲۱۳/۵۰	۳/۷	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
	۱۷۶/۱۵	۱۹۱/۹۵	۵/۱۹	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
	۲۳۲/۲۶	۱۸۴/۶۴	۲/۶۸	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
	۸۵/۰۵	۱۰۳/۴۱	۳/۷۱	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
	۵۲/۲۰	۷۱/۶۴	۵/۱۴	۲۳۶/۱۷	۱۷۴/۰۷	۲/۴۳
خروجی ۲	۱۸۹/۲۳	۲۶۸/۲۵	۲/۶۲	۱۳۱/۴۸	۲۲۴/۳۶	۱/۳
	۱۱۵/۳۷	۱۹۵/۶۵	۳/۷۴	۱۳۱/۴۸	۲۲۴/۳۶	۱/۳
	۸۶/۹۲	۲۰۹/۱۰	۵/۱۵	۱۳۱/۴۸	۲۲۴/۳۶	۱/۳
	۲۳۷	۲۹/۳۳	۲/۵۷	۲۲۱/۸۱	۱۰۰/۸۳	۲/۴۳
	۲۳۷	۹۷	۳/۷	۲۲۱/۸۱	۱۰۰/۸۳	۲/۴۳
	۱۹۱/۴۲	۱۷۶/۱۵	۵/۱۹	۲۲۱/۸۱	۱۰۰/۸۳	۲/۴۳
خروجی ۲	۲۱۳/۱۴	۸۲/۳۸	۲/۶۸	۱۶۴/۰۲	۱۶۵/۶۵	۱/۷۷
	۲۰۴/۰۶	۱۶۴/۷۸	۳/۷۱	۱۶۴/۰۲	۱۶۵/۶۵	۱/۷۷
	۷۲/۹۷	۲۴۲/۸۹	۵/۱۴	۱۶۴/۰۲	۱۶۵/۶۵	۱/۷۷
	۱۶۷/۲۵	۱۴۴/۶۰	۲/۶۲	۱۰۵/۵۶	۲۲۶/۹۲	۱/۳
	۱۰۹/۹۳	۲۴۹/۶۷	۳/۷۴	۱۰۵/۵۶	۲۲۶/۹۲	۱/۳
	۳۳/۸۳	۲۹۰/۵۰	۵/۱۵	۱۰۵/۵۶	۲۲۶/۹۲	۱/۳

بیشتر بود. در سایر EBRTs و غلظت‌ها، میانگین رتبه منفی از میانگین رتبه مثبت بیشتر بود که نشان داد نسبت غلظت خروجی اول به ورودی اولیه از نسبت غلظت خروجی دوم به ورودی دوم کوچک‌تر و در نتیجه کارایی حذف بخش اول بالاتر است (جدول ۳).

مطابق با نتایج آزمون Wilcoxon به‌منظور مقایسه اختلاف  $C/C_0$  در دو بخش بیوفیلتر، در EBRT ۲/۴۳ min و غلظت  $5/19 \text{ g/m}^3$ ، میانگین رتبه مثبت برابر ۱۶ از میانگین رتبه منفی برابر ۸، بیشتر شد که نشان داد نسبت غلظت خروجی اول به ورودی اولیه از نسبت غلظت خروجی دوم به ورودی دوم

جدول ۳- مقایسه ارزیابی عملکرد دو بخش بستر

متغیر	غلظت ( $\text{g/m}^3$ )	EBRT (min)	میانگین رتبه مثبت	میانگین رتبه منفی
	۲/۵۷	۲/۴۳	۰	۲۴
	۳/۷	۲/۴۳	۰	۲۴
	۵/۱۹	۲/۴۳	۱۶	۸
	۲/۶۸	۱/۷۷	۰	۳۹
	۳/۷۱	۱/۷۷	۸	۲۹
	۵/۱۴	۱/۷۷	۰	۳۸
	۲/۶۲	۱/۳	۰	۲۶
	۳/۷۴	۱/۳	۰	۲۷
	۵/۱۵	۱/۳	۰	۲۴

$$C_{out1}/C_{in1} - C_{out2}/C_{in2}$$

سازگاری خوب و فعالیت بیولوژیکی بالای بستر بود. این مسئله نشان می‌دهد که حذف تولون عمدتاً به دلیل تجزیه زیستی در اثر سازگاری مناسب بیومس به تغذیه پیوسته با تولون بوده است (۴). مشابه مطالعه حاضر، Singh و همکاران جهت حذف تولون با بیوفیلتر ذغال چوب، مدت زمان فاز راه‌اندازی را ۲۰ روز گزارش نمودند و در این مطالعه کارایی حذف به ۹۹ درصد رسید (۲۴).

یکی از پارامترهای هیدرودینامیکی مهم در بیوفیلتر، سرعت جریان گاز ورودی است. این پارامتر در واقع مقدار آلاینده در واحد زمان را اندازه‌گیری می‌کند. در این مطالعه نیز افزایش سرعت جریان گاز منجر به کاهش زمان تماس بین تولون و

## بحث

از نظر عملی، اهمیت سازگاری و راه‌اندازی مناسب بیوفیلتر در دستیابی به کارایی حذف بالای ۹۰ درصد، تایید شده است (۴). مطابق مطالعات، زمان مورد نیاز برای سازگاری بیومس معمولاً بسته به غلظت تولون، EBRT و منبع تلقیح بین ۲۵-۱۵ روز متفاوت است (۱۶، ۲۲، ۲۳). در این مطالعه با توجه به اهداف تعریف شده، نوع جمعیت میکروبی موجود در بیوفیلتر شناسایی نشد و برای اطمینان از تشکیل بیوفیلم مناسب از آنالیز SEM استفاده گردید. مطابق آنالیز SEM فاز راه‌اندازی منجر به توسعه یک جمعیت میکروبی فعال در بستر بیوفیلتر شد. به‌علاوه الگوی حذف تولون در این فاز نشان دهنده

میکروارگانیسیم‌ها شده و در نتیجه کم شدن EBRT، موجب کاهش کارایی حذف شد. از سوی دیگر افزایش جریان گاز موجب جزءبندی تولوئن در بیوفیلیم و افزایش EC گردید. در تحقیقات Rene و همکاران نیز این نتیجه مشاهده شد و آنها کارایی حذف ۹۴/۵ درصد را در غلظت تولوئن ورودی  $0.115 \text{ g/m}^3$  و جریان  $0.24 \text{ m}^3/\text{h}$  با بیوفیلتر کمپوست گزارش کردند (۲۲). همچنین Natarajan و همکاران توانستند ۷۸ درصد تولوئن را در غلظت ورودی  $1 \text{ g/m}^3$  و جریان  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$  توسط بیوفیلتر پوست درخت خرما حذف کنند (۱۷). از طرفی مطالعه Singh و همکاران نشان داد که با کاهش EBRT از ۵۸/۸ به ۱۱/۷۶ s، کارایی حذف از ۹۹ به ۸۰ درصد کاهش یافت (۲۴).

به‌طور کلی در این پژوهش در هر مرحله از آزمایش‌ها با افزایش غلظت، نوساناتی در کارایی حذف مشاهده شد که با گذشت زمان کاهش یافت و به مقدار پایداری رسید. می‌توان گفت کاهش کارایی حذف در غلظت بالای آلاینده ورودی به دلیل ایجاد اثر مهار سوبستراست که موجب مهار فعالیت میکروبی می‌گردد. به‌علاوه، غلظت ورودی بالا منجر به کمبود اکسیژن در دسترس میکروارگانیسیم‌ها نیز خواهد شد (۲۵). Rene و همکاران نتایج مشابه با مطالعه حاضر را گزارش دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش غلظت تولوئن از ۰/۰۹ به  $1/4 \text{ g/m}^3$ ، کارایی حذف از ۹۲ درصد به ۶۳ درصد کاهش یافت که می‌تواند به دلیل تماس ناکافی بین گاز و بیوفیلیم و همچنین اثر مهارکنندگی سوبسترا در غلظت بالا باشد (۲۶). همچنین در مطالعه Dixit و همکاران، کارایی حذف در بیوفیلتر کمپوست و خرده چوب، بین ۶۰ تا ۹۹ درصد گزارش شد که به غلظت تولوئن ورودی و EBRT وابسته بود (۲۷). نتایج مطالعه Kumar و همکاران نیز با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. آنها نشان دادند در بیوفیلتر کمپوست و کربن فعال، با افزایش غلظت تولوئن از  $16/4$  به  $46/2 \text{ g/m}^3$ ، کارایی حذف از بالای ۹۵ درصد به کمتر از ۸۹ درصد رسید (۴). نتایج EC در مطالعه حاضر نشان داد که در همه فازهای

آزمایش در هر دو خروجی بیوفیلتر، میانگین EC کل بستر با افزایش غلظت تولوئن و کاهش EBRT، افزایش یافت. مطالعات گذشته مقادیر مختلف  $EC_{\text{max}}$  را در حذف تولوئن در بیوفیلترهای مختلف گزارش نموده‌اند و نتایج آنها تفاوت‌هایی را با مطالعه حاضر نشان داد.  $EC_{\text{max}}$  در مطالعات Chen (۲۸)، Maestre Singh (۲۹) و Estévez و همکاران (۳۰) به ترتیب برابر  $77 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ ،  $71/6$  و  $113/6$ ، از طرفی Kumar (۲۴) و همکاران (۴) به ترتیب  $872/5$  و  $6665 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$  گزارش کردند. تفاوت در مقادیر  $EC_{\text{max}}$  را می‌توان ناشی از تفاوت در بستر و شرایط عملیاتی متفاوت از جمله میزان غلظت آلاینده ورودی، میزان بارگذاری ورودی، شرایط عملیاتی و سرعت جریان گاز ورودی دانست (۳۱، ۳۲). نتایج جدول ۲ نشان داد در خروجی ۲ با افزایش غلظت، EC افزایش یافت اما در خروجی ۱ این روند مشاهده نشد. علت این پیچیدگی در رفتار بیوفیلتر به دلیل غلظت ورودی بالاتر و نوسان در کارایی حذف بخش اول بود. از طرفی در EBRT بیشتر، کارایی حذف بالاتر بود به طوری که بالاترین میانگین رتبه کارایی حذف در EBRT  $2/43 \text{ min}$  بدست آمد. همچنین در کلیه EBRTs با افزایش غلظت، کارایی حذف کاهش یافت. در EBRT بیشتر اثر غلظت بر کارایی حذف کمتر بود، به طوری که بین غلظت اول و دوم از لحاظ میانگین رتبه تفاوتی وجود نداشت ( $p < 0/0001$ ). مقایسه کارایی حذف و EC در غلظت‌ها و EBRTs مختلف نشان داد که کارایی حذف و EC در خروجی ۱ و ۲ اختلاف معنی‌داری داشتند ( $p < 0/0001$ ). مطابق مطالعه حاضر، Rene و همکاران حداکثر کارایی حذف تولوئن ۷۰ درصد را در EBRT  $2/45 \text{ min}$  گزارش کردند و نشان دادند اثر پارامترهای اصلی جریان گاز و غلظت بر روی کارایی حذف و EC تولوئن معنی‌دار بوده است. علت این امر را می‌توان در میزان جریان بالای گاز دانست که موجب کاهش زمان به دام افتادن آلاینده در بیوفیلتر و زمان تماس بین آلاینده و میکروارگانیسیم می‌گردد که متعاقب آن قابلیت تجزیه‌زیستی بستر و کارایی حذف نیز کاهش می‌یابد (۲۲).

## نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد بیوفیلتر با بستر مخروط کاج و کمپوست برای حذف تولوئن مورد بررسی قرار گرفت. در بیوفیلتر مذکور در محدوده غلظت (۲/۶۲، ۳/۷۲ و ۵/۱۶ g/m<sup>3</sup>) و زمان (۱/۳، ۱/۷۷ و ۲/۴۳ min)، با کاهش EBRT، EC افزایش و کارایی حذف کاهش یافت، بطوری که بیشترین مقدار EC در خروجی ۲ معادل ۱۶۴/۴ g/m<sup>3</sup>.h و بیشترین کارایی حذف در اکثر فازها در خروجی ۲ معادل ۱۰۰ درصد مشاهده شد. براساس تجزیه و تحلیل های آماری، پارامتر اصلی در عملکرد بیوفیلتر، EBRT بود و پارامترهای دیگر مانند غلظت تاثیر کمی داشتند. همچنین EC و کارایی حذف بیوفیلتر در مقایسه با مطالعات مشابه به ترتیب ۳/۷۶ و ۱/۶۷ برابر بیشتر بود. از مهمترین مزایای این بیوفیلتر می توان به نداشتن هزینه، دردسترس بودن مخروط کاج، سازگار بودن با محیط زیست در صورت دفع نهایی به محیط و عدم گرفتگی طی مدت زمان بهره برداری اشاره کرد.

## ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده ها و داده سازی را در این مقاله رعایت کرده اند.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل پایان نامه با عنوان "بررسی کارایی بیوفیلتر بر پایه بستر مخروط کاج در حذف بخارات تولوئن از جریان هوای آلوده" در مقطع کارشناسی ارشد، در سال ۹۸ و کد ۹۷۵۲۰ است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی کرمانشاه اجرا شده است.

مطالعات دیگر نیز نتایج مشابهی را نشان دادند. مطالعه Dixit و همکاران در تصفیه بخارات تولوئن و n-پروپانول نشان داد که عملکرد راکتور با افزایش EBRT افزایش پیدا می کند (۲۷). مطابق جدول ۳، مقایسه نسبت غلظت های خروجی اول به ورودی اولیه با نسبت غلظت های خروجی دوم به ورودی دوم در غلظت ها و EBRTs مختلف، نشان داد به استثنای EBRT ۲/۴۳ min و غلظت ۵/۱۶ g/m<sup>3</sup>، در سایر فازها ارتباط معنی داری بین نسبت های غلظت وجود داشت (p < ۰/۰۰۰۱). همچنین کارایی حذف تولوئن در بخش اول نسبت به بخش دوم بیشتر بود. دلیل بیشتر بودن کارایی حذف بخش اول، افزایش غلظت تولوئن ورودی و ایجاد نیروی انتشاری بیشتر به داخل بیوفیلیم، حضور نوترینت بیشتر در این لایه بدلیل ریزش آن از لایه بالاتر، وجود لایه ماسه نخودی به عنوان بستر و رطوبت بالاتر در لایه اول بود. نتایج مطالعه حاضر با مطالعه Rene و همکاران مشابهت داشت. آنها نشان دادند که کارایی حذف در بخش پایینی بستر بیوفیلتر بیشتر از بخش بالایی آن بود. تقریباً ۶۰ درصد از تولوئن در ۲۰ cm اول حذف شد، درحالی که ۳۵ cm بالایی تنها ۲۰ تا ۲۵ درصد تولوئن را حذف کرد. این موضوع به علت غلظت بالای جمعیت میکروبی و رطوبت بالاتر در بخش پایینی بستر گزارش شد (۲۲). در مطالعه حاضر براساس میانگین و ضریب تغییرات کارایی حذف، EBRT اثرگذارترین پارامتر در فرایند بیوفیلتراسیون شناسایی شد. مشابه این نتیجه در مطالعه Gallastegui و همکاران در حذف تولوئن با بیوفیلتر کودآلی مشاهده شد که نشان دادند EBRT مهمترین پارامتر در افزایش کارایی است (۳۳). در مطالعه حاضر اثر دما مورد بررسی قرار نگرفت لذا پیشنهاد می شود اثر دماهای مختلف هوای ورودی بر کارایی حذف، مورد ارزیابی قرار گیرد.

relevance to public health. Toxicology and Industrial Health. 2008;24(5-6):263-398.

2. Agteren MHv, Keuning S, Janssen DB. Handbook on biodegradation and biological treatment of

## References

1. Wilbur S, Wohlers D, Paikoff S, Keith L, Faroon O. ATSDR evaluation of health effects of benzene and

- hazardous organic compounds. 2nd ed. Dordrecht: Academic Press; 1998.
3. Pierce CH, Dills RL, Morgan MS, Vicini P, Kalman DA. Biological monitoring of controlled toluene exposure. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1998;71(7):433-44.
  4. Kumar M, Giri BS, Kim K-H, Singh RP, Rene ER, López ME, et al. Performance of a biofilter with compost and activated carbon based packing material for gas-phase toluene removal under extremely high loading rates. *Bioresource Technology*. 2019;285:121317.
  5. Echeverria D, Fine L, Langolf G, Schork T, Sampaio C. Acute behavioural comparisons of toluene and ethanol in human subjects. *Occupational and Environmental Medicine*. 1991;48(11):750-61.
  6. WHO. Early detection of occupational diseases. Geneva: World Health Organization; 1986. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/37912>.
  7. Malhautier L, Khammar N, Bayle S, Fanlo J-L. Biofiltration of volatile organic compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005;68(1):16-22.
  8. Rene ER, López ME, Veiga MC, Kennes C. Artificial neural network modelling for waste: gas and wastewater treatment applications. In: Igelnik B, editor. *Computational Modeling and Simulation of Intellect: Current State and Future Perspectives*. USA: IGI Global; 2011. p. 224-63.
  9. López ME, Rene ER, Veiga MC, Kennes C. Biogas technologies and cleaning techniques. In: Lichtfouse E, Schwarzbauer J, Robert D, editors. *Environmental chemistry for a sustainable world: Springer Link*; 2012. p. 347-77.
  10. Babu B, Raghuvanshi S. Simulation Studies on Transient Model for Biofilter operated in Periodic Mode. *Journal on Engineering and Technology*. 2006;1(4):72-76.
  11. Mathur AK, Majumder C. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;152(3):1027-36.
  12. Delhoménie M-C, Heitz M. Biofiltration of air: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005;25(1-2):53-72.
  13. Mitin A, Nikolajkina N, Pushnov A. Aerodynamic resistance of a biofilter with a packing of pine cones. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2015;23(2):138-46.
  14. Lee S-h, Li C, Heber AJ, Ni J, Huang H. Biofiltration of a mixture of ethylene, ammonia, n-butanol, and acetone gases. *Bioresource technology*. 2013;127:366-77.
  15. Amin MM, Rahimi A, Bina B, Heidari M, Mohammadi Moghadam F. Performance evaluation of a scoria-compost biofilter treating xylene vapors. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1):1-10.
  16. Singh R, Agnihotri S, Upadhyay S. Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media. *Bioresource Technology*. 2006;97(18):2296-301.
  17. Natarajan R, Al-Sinani J, Viswanathan S, Manivasagan R. Biodegradation of ethyl benzene and xylene contaminated air in an up flow mixed culture biofilter. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017;119:309-15.
  18. Malakar S, Saha PD, Baskaran D, Rajamanickam R. Microbial biofilter for toluene removal: Performance evaluation, transient operation and theoretical prediction of elimination capacity. *Sustainable Environment Research*. 2018;28(3):121-27.

19. Zamir SM, Halladj R, Nasernejad B. Removal of toluene vapors using a fungal biofilter under intermittent loading. *Process Safety and Environmental Protection*. 2011;89(1):8-14.
20. Nezarati RM, Eifert MB, Cosgriff-Hernandez E. Effects of humidity and solution viscosity on electrospun fiber morphology. *Tissue Engineering Part C: Methods*. 2013;19(10):810-19.
21. Figueroa M, Mosquera-Corral A, Campos J, Méndez R. Treatment of saline wastewater in SBR aerobic granular reactors. *Water Science and Technology*. 2008;58(2):479-85.
22. Rene ER, Sergienko N, Goswami T, López ME, Kumar G, Saratale GD, et al. Effects of concentration and gas flow rate on the removal of gas-phase toluene and xylene mixture in a compost biofilter. *Bioresource Technology*. 2018;248(Pt B):28-35.
23. Zamir M, Halladj R, Sadraei M, Nasernejad B. Biofiltration of gas-phase hexane and toluene mixture under intermittent loading conditions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2012;90(4):326-32.
24. Singh K, Singh R, Rai B, Upadhyay S. Biofiltration of toluene using wood charcoal as the biofilter media. *Bioresource Technology*. 2010;101(11):3947-51.
25. Detchanamurthy S, Gostomski PA. Biofiltration for treating VOCs: an overview. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2012;11(3):231-41.
26. Rene ER, Murthy D, Swaminathan T. Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours. *Process Biochemistry*. 2005;40(8):2771-79.
27. Dixit R, Deshmukh S, Gadhe A, Kannade G, Lokhande S, Pandey R, et al. Treatment of mixtures of toluene and n-propanol vapours in a compost-woodchip-based biofilter. *Environmental Technology*. 2012;33(7):751-60.
28. Chen X, Qian W, Kong L, Xiong Y, Tian S. Performance of a suspended biofilter as a new bioreactor for removal of toluene. *Biochemical Engineering Journal*. 2015;98(Complete):56-62.
29. Maestre JP, Gamisans X, Gabriel D, Lafuente J. Fungal biofilters for toluene biofiltration: evaluation of the performance with four packing materials under different operating conditions. *Chemosphere*. 2007;67(4):684-92.
30. Estévez E, Veiga MC, Kennes C. Biofiltration of waste gases with the fungi *Exophiala oligosperma* and *Paecilomyces variotii*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005;67(4):563-68.
31. Luengas AT, Hort C, Platel V, Elias A, Barona A, Moynault L. Removal of traces of toluene and p-xylene in indoor air using biofiltration and a hybrid system (biofiltration+ adsorption). *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(11):10674-84.
32. Mohammad BT, Rene ER, Veiga MC, Kennes C. Performance of a thermophilic gas-phase biofilter treating high BTEX loads under steady-and transient-state operation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017;119(C):289-98.
33. Prenafeta-Boldú FX, Guivernau M, Gallastegui G, Viñas M, de Hoog GS, Elías A. Fungal/bacterial interactions during the biodegradation of TEX hydrocarbons (toluene, ethylbenzene and p-xylene) in gas biofilters operated under xerophilic conditions. *FEMS Microbiology Ecology*. 2012;80(3):722-34.





Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Gaseous toluene removal by pine-cone/compost biofilter: setup, performance, and optimization

Zohreh Naderi<sup>1</sup>, Hiwa Hossaini<sup>1</sup>, Meghdad Pirsaeheb<sup>1</sup>, Akbar Barzegar<sup>2</sup>, Sara Kianpour<sup>1,\*</sup>

1- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

2- Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 12 October 2022  
**Revised:** 21 November 2022  
**Accepted:** 23 November 2022  
**Published:** 20 December 2022

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Toluene is one of the most important volatile organic compounds that threaten human health and introduce many environmental problems. Therefore, the present study aims to determine the performance of a biofilter based on pine cones/compost to remove toluene vapors from polluted air streams.

**Materials and Methods:** In this research, a biofilter with a volume of 19.468 L was designed and built. The biofilter bed consisted of two parts 26 cm in height and packed with a mixture of compost and pine cones in 1:1 volumetric ratio. After inoculating the bed with sludge from a municipal wastewater treatment plant and making it compatible with toluene, the performance of the biofilter in different parts of the bed was investigated at the inlet toluene concentrations of 2.5-5.5 g/m<sup>3</sup> and Empty Bed Retention Times (EBRTs) of 1.3, 1.7, and 2.43 min. Also, the results were analyzed statistically.

**Results:** At EBRT of 2.43 min and different inlet toluene concentrations of 2.5-5.5 g/m<sup>3</sup>, the removal efficiency reached 100 percent. Also, the removal efficiency decreased with the reduction of EBRT. The results showed that removal efficiency was higher in the first part of the biofilter bed relate to the second part. At an inlet toluene concentration of 2.62 g/m<sup>3</sup> and EBRT of 1.7 min, the maximum elimination capacity (EC<sub>max</sub>) of 2.74 g/m<sup>3</sup>.min was obtained.

**Conclusion:** In all experimental conditions the outlet concentration of pine-cone/compost biofilter was below the WHO standard (260 µg/m<sup>3</sup>). Also, the high elimination capacity of biofilter verified its capability toward toluene removal from polluted gas streams.

**Keywords:** Biodegradation, Pine-cones, Volatile organic compounds, Compost

**\*Corresponding Author:**  
kianpoursara7@gmail.com

Please cite this article as: Naderi Z, Hossaini H, Pirsaeheb M, Barzegar A, Kianpour S. Gaseous toluene removal by pine-cone/compost biofilter: setup, performance, and optimization. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2022;15(3):493-508.

