

اثر نرخ بارگذاری آلی بر پارامترهای راهبری و ظرفیت بیوفیلتراسیون^۱

تولون و زایلین از جریان گازهای آلوده‌ی صنایع نفت و پتروشیمی

ایوب ترکیان (دانشیار)

مرکز تحقیقات آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

رضا دهقانزاده ریحانی (استادیار)

دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز

در دهه‌های اخیر، روش‌های زیست‌شناختی به‌عنوان گزینه‌ی جدیدی برای تصفیه‌ی جریان گازهای آلوده‌ی حاوی ترکیبات آلی فرار^۲ (VOC) مطرح شده‌اند. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، اثر نرخ بارگذاری آلی بر کارایی سیستم بیوفیلتراسیون (زیست‌پالایش) به صورت جداگانه در پالایش تولون و زایلین مورد بررسی قرار گرفت. بستر مورد استفاده مخلوطی از کمیوست مواد زائد جامد شهری و تراشه‌ی چوب به نسبت حجمی ۸۰ به ۲۰ و با تخلخل ۵۴٪ بود که به مدت یک هفته با افزودن مواد مغذی، و مرطوب نگه‌داشتن آن آماده‌سازی و سپس در داخل واکنشگر (راکتور) قرار داده شد. در دوره‌ی راه‌اندازی و سازگارسازی، با حفظ دمای واکنشگر در محدوده‌ی $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ، گاز آلوده حاوی تولون یا زایلین به ترتیب در غلظت‌های ۷۰ و ۲۰ ppm به سیستم وارد شد. در این مرحله، با افزایش غلظت ورودی آلاینده‌ها، رشد ریزاندامگان^۳ باعث گرفتگی بستر و ایجاد افت فشار بیش از حد شد، که این مشکل با زیر و رو کردن محتویات بستر بر طرف شد. پس از مرحله‌ی سازگاری اولیه، با ثابت نگه‌داشتن زمان ماند در ۶۰ ثانیه و دامنه‌ی رطوبت در ۶۰-۷۰٪، بارگذاری افزایش داده شد. بر اساس نتایج حاصله، با توجه به عدم انشباع ظرفیت حذف، بارگذاری‌های ۱۱۰ و $150\text{-gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ برای تولون و زایلین قابل اعمال است. در عین حال با توجه به ملاحظات حفظ محدوده‌ی افت فشار در زیر 1000 Pa/m برای راهبری بهینه، نرخ بارگذاری 78 ± 8 و $123 \pm 14\text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ برای تولون و زایلین به دست آمد. ظرفیت حذف پایدار بیوفیلتر در این شرایط برای تولون و زایلین به ترتیب 73 ± 4 و $123 \pm 14\text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ و کارایی حذف 94 ± 6 و 91 ± 8 ٪ است.

مقدمه

در سال‌های اخیر مقررات زیست‌محیطی شدیدتری برای ترکیبات آلی فرار منتشره از صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، رنگ‌سازی، ذوب فلزات، الکترونیک، چوب و کاغذ، چاپ و غیره تدوین شده است. علت این امر سمیت حاد، اثرات سوء بر سلامتی انسان و همچنین نقش این مواد در افزایش غلظت ازن اتمسفری است.

روش‌های فیزیکی (جذب سطحی و میعان) و شیمیایی (جذب، سوزاندن و اکسایش) مختلفی برای تصفیه‌ی گازهای حاوی VOC به کار گرفته شده، اما این روش‌ها برای جریان‌های گاز آلوده پادبی زیاد و غلظت پایین مقرون به صرفه نیستند. با توجه به هزینه‌ی مواد مصرفی، بهره‌برداری پیچیده و زائدات ثانوی ناشی از این فرایندها، در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ی برای بسافتن فناوری‌های مناسب‌تر شروع شد که روش‌های زیست‌شناختی از کارآمدترین آنها هستند. سه نوع از این سیستم‌ها در صنایع کاربرد دارند: بیوفیلتر، صافی چکنده، و گازشوی^۴ زیست‌شناختی. در بیوفیلتر که رایج‌ترین نوع سیستم‌های تصفیه‌ی زیست‌شناختی است،

آلاینده‌های موجود در گاز آلوده در حین عبور از بستر طبیعی (کمیوست) یا مصنوعی (پلاستیک) به وسیله‌ی ریزاندامگان تجزیه می‌شود. فناوری بیوفیلتراسیون زائدات ثانوی کم‌تری تولید می‌کند و هزینه‌ی راهبری آن برای آلاینده‌های با قابلیت تجزیه‌ی زیست‌شناختی مناسب و غلظت‌های تا 1 gm^{-3} کم‌تر است.^۱ در ابتدا بیوفیلترها برای حذف بو و ترکیبات معدنی، نظیر H_2S ، از هوا به کار برده می‌شدند، اما مطالعات اخیر نشان داده که می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای کنترل ترکیبات آلی فرار، و مشخصاً بنزن، تولون، اتیل بنزن، و زایلین (BTEX) نیز استفاده شوند.^۲

تاکنون تحقیقات متعددی در مورد پارامترهای مؤثر در کارایی بیوفیلتراسیون برای حذف تولون و زایلین صورت گرفته است. کنز در مطالعه‌ی بیوفیلتراسیون TEX با بستر پرلیت ظرفیت حذف $70\text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ (کارایی حذف نزدیک ۱۰۰٪) را با زمان ماند ۵۷ s به دست آورد.^۳ ایومیزر نیز برای بستری از مخلوط کود خاک برگ و لجن، کارایی حذف بالای ۹۰٪ را با بارگذاری حدود $26\text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ گزارش کرده است.^۴ یافته‌های استراوس برای بستر کود کاج،

نمونه برداری از جریان گاز در ابتدای هر بخش از بیوفیلتر قرار دارد. برای نگهداری مواد بستر و توزیع مجدد جریان هوا از صفحه‌ی گالوانیزه‌ی مشبک با قطر منفذ ۲ میلی‌متر در انتهای هر قسمت استفاده شد. منبع تأمین هوا کمپرسوری است که هوای خروجی از آن پس از فیلتر شدن به دو جریان تقسیم می‌شود. یک جریان وارد برج رطوبت ساز حاوی المنت حرارتی ۲۰۰۰ وات ترموستات دار می‌شود تا دما و رطوبت هوای ورودی به بیوفیلتر را تنظیم کند، و جریان دیگر وارد محفظه‌ی حاوی VOC می‌شود تا غلظت مورد نظر را در جریان هوای ورودی تنظیم کند. برای تنظیم دبی جریان هوا از دبی‌سنج (Omega, FL-۲۰۱۶) استفاده شده است.

مواد بستر

مخلوطی از کمپوست زائدات جامد شهری و تراشه‌ی چوب (۲۰/۵cm) را به نسبت ۸۰:۲۰ به کار گرفته شد. پس از افزودن مواد مغذی و CaCO_3 به عنوان ثابت نگه‌دارنده‌ی pH به میزان ۱۵g/Lbed، مواد بستر به مدت یک هفته آب پاشی و زیر و رو شد تا توده‌ی میکروبی با محیط جدید سازگار شود.^[۷] مواد مغذی برای رشد میکروب‌ها با ترکیب $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$:۱/۵، K_2HPO_4 :۰/۲۵، NaCl :۰/۲۵، NH_4NO_3 :۰/۲۶، KH_2PO_4 :۰/۵۴ و ۱ میلی‌لیتر عناصر کمیاب با pH معادل ۷/۶ به محیط بستر اضافه شد.

روش‌های آنالیز

غلظت تولوئن و زایلین در نمونه‌های گازی با استفاده از دستگاه رنگ‌نگار گازی (Shimadzu GC-۱۴A) مجهز به آشکارساز FID مورد آنالیز قرار گرفت. نمونه‌های گازی پس از جمع‌آوری در کیسه‌های Tedlar به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از سرنگ گازی 200 ± 0.02 (VICI Ltd.) در شرایط دمایی: آشکارساز ۲۶۰، تزریق ۲۵۰، و ستون (SE-۳۰) 250°C به دستگاه تزریق شد. برای تهیه‌ی استانداردها مقادیر معلوم از VOC‌های مورد استفاده به داخل کیسه‌های با حجم مشخص تزریق شد. رطوبت و pH بستر با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد.^[۸] پایش آفت فشار در بیوفیلترها با استفاده از یک فشارسنج شیشه‌ی آبی صورت گرفت.

نتایج و بحث

راه‌اندازی

در شروع کارکرد بیوفیلتر، مدت زمان کوتاهی برای سازگار کردن ریزاندامگان با شرایط محیطی لازم است. دبی گاز آلوده یا غلظت

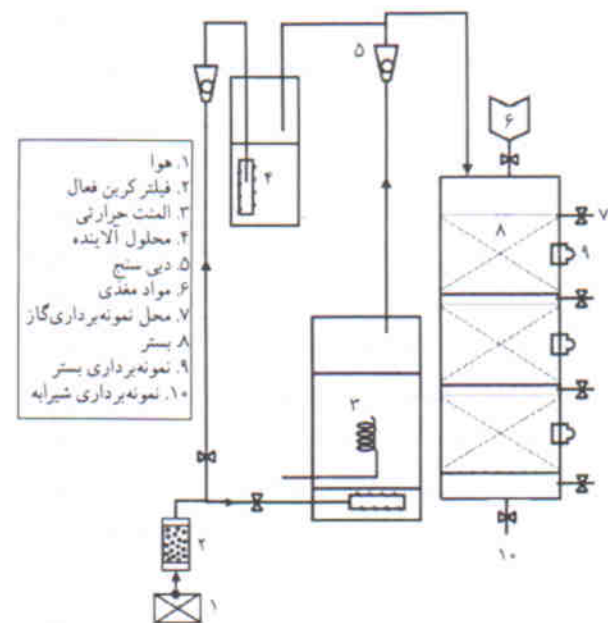
کارایی حذف بیش از ۹۰٪ تولوئن را در بارگذاری $42 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ و زمان ماند ۱۹s نشان می‌دهد.^[۶] در تحقیقات فوق و موارد مشابه سیستم بیشتر در مقادیر بارگذاری کم‌تر از $50 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ بهره‌برداری شده است. در تحقیقاتی هم که در بارگذاری‌های بالا صورت گرفته، روش تلقیح چهار نوع فلور میکروبی به کار گرفته شده است.

در کشور ما به علت گستردگی صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، استفاده از روش‌های سازگار با واقعیات و توانمندی‌های بومی برای کنترل انتشارات آلاینده‌های اتمسفری آنها از اهمیت خاصی برخوردار است بنابراین در این مطالعه اثرات نرخ‌های بارگذاری بالای تولوئن و زایلین و تأثیر آن بر عملکرد و بهره‌برداری پایدار سیستم بررسی خواهد شد. همچنین در این مطالعه از کمپوست زباله‌های شهری، که به راحتی در تمامی نقاط کشور قابل دسترسی است، استفاده شده است تا نتایج حاصله امکان طراحی و راهبری بهینه‌ی این سیستم را منطبق با واقعیات کشور فراهم سازد.

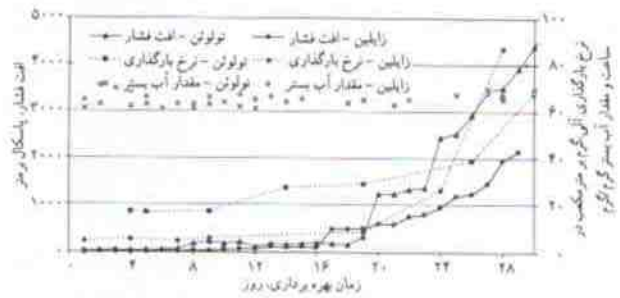
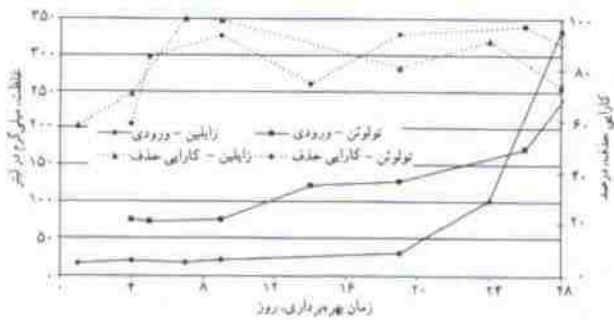
مواد و روش‌ها

بیوفیلتر

در شکل ۱ شمایی از بیوفیلتر مورد استفاده در این مطالعه آورده شده است. قطر داخلی این بیوفیلتر ۸cm است و از سه بخش جداگانه‌ی هم اندازه با ارتفاع ۴۷cm تشکیل شده است. در روی هر بخش درجه‌ی به قطر ۴cm برای دسترسی به مواد بستر، و نیز درجه‌ی کوچک برای قراردادن دماسنج تعبیه شده است. یک شیر ۰/۵ اینچ برای



شکل ۱. نمودار جریان بیوفیلتراسیون.



شکل ۲. روند تغییرات افت فشار بستر و کارایی حذف بیوفیلتر در دوره‌ی راه‌اندازی.

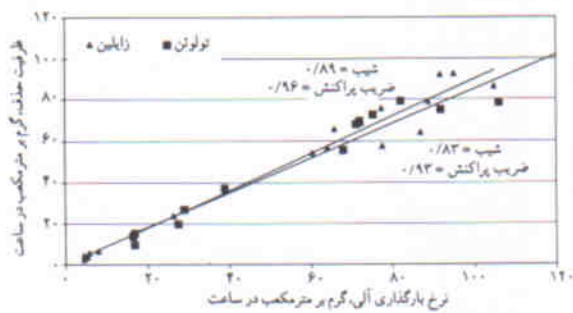
افزایش نهاده و در اثر کاهش میزان تخلخل افت فشار افزایش یافته است. برای بیوفیلتر تولون و زایلین این افت به ترتیب تا حداکثر ۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر جیوه در روز ۳۰ رسیده که ارقام نرمال شده در واحد ارتفاع (فشار بر متر ستون) در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به تفاوت بارگذاری اعمال شده بر بیوفیلتر تولون و رشد بیش از انتظار ریزاندامگان، مشاهده‌ی افت فشار بالا قابل انتظار بود. با توجه به عدم امکان راهبری در این شرایط محتویات بستر بیوفیلترها زیر و رو شدند، و در نتیجه افت فشار به‌طور قابل توجهی پایین آمده و سیستم‌ها مجدداً راه‌اندازی شدند. مخلوط کردن بستر باعث بهبود شرایط بهره‌برداری (کاهش کانال‌سازی، عدم خشکی بستر یا گرفتگی و همگن کردن ذرات بستر) و محیطی (آب، اکسیژن، مواد مغذی و توزیع مجدد بیوفیلیم) می‌شود و در نتیجه به بهبود کارکرد بیوفیلتر می‌انجامد.^[۱۲] بعد از اختلاط مجدد، مقدار آب موجود در بستر نیز از طریق روش ذکر شده در محدوده‌ی ۶۰-۷۰٪ ثابت نگه داشته شد. با این اقدامات روند افزایش افت فشار بسیار کند شد و با پایین ماندن افت فشار امکان بهره‌برداری پایدار از سیستم‌ها فراهم شد.

کارایی حذف

میزان حذف آلاینده‌ها در سیستم‌های کنترل و پالایش تعیین‌کننده‌ی میزان تبعیت واحدهای آلوده‌کننده از استانداردهای زیست محیطی است، که برای تولون و زایلین ۵۰ ppm تعیین شده است. بر این اساس پس از سازگاری بیوفیلیم با شرایط محیطی افزایش تدریجی غلظت ورودی آلاینده به بسترها، عملکرد و اکتشگر حفظ شد که نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کارایی حذف تولون و زایلین در زمان‌های مختلف بین حدود ۷۵٪ تا ۱۰۰٪ در نوسان است. غلظت تولون ورودی در طول آزمایشات حدوداً بین ۵۰ تا ۶۰ ppm بوده است که در مقابل آن غلظت تولون خروجی به‌جز در مواقع افزایش غلظت به میزان کمتر از ۵۰ ppm بوده

آلاینده به تدریج افزایش داده شده و پارامترهای عملیاتی و کارایی بیوفیلتر حفظ شد تا شرایط مناسب فراهم آید. این مدت زمان ممکن است بسته به ویژگی‌های بستر، غلظت و نوع آلاینده‌ی ورودی و شیوه‌ی راهبری از ۱۰ روز^[۱۱] تا ۲ الی ۳ هفته^[۱۰] و حتی ۵ ماه^[۱۲] متغیر باشد. در این مرحله به‌منظور ایجاد سازگاری اولیه‌ی بستر، جریان گاز آلوده با زمان ماند ۶۰s و به ترتیب غلظت‌های ورودی ۵۰ و ۲۰ ppm و بارگذاری ۱۷ و $4 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ برای تولون و زایلین شروع شد. مقدار آب بستر با تنظیم رطوبت هوای ورودی (افزایش یا کاهش درجه‌ی حرارت آب) و افزودن دستی آب در فواصل مشخص در محدوده‌ی ۶۰-۷۰٪ حفظ شد. نتایج حاصله در شکل ۲ نشان داده شده است.

غلظت ورودی آلاینده یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد بیوفیلتر است که نرمال شده‌ی آن بر حسب بارگذاری بر واحد حجم یا سطح بیوفیلتر بیان می‌شود. غلظت بالاتر باعث افزایش نرخ انتقال آلاینده از فاز گازی به فاز مایع سطح بیوفیلیم و انتشار در داخل محیط بیوفیلیم می‌شود. در عین حال، غلظت بیش از حد بعضی از آلاینده‌های دیرپا و با قابلیت تجزیه‌ی زیست‌شناختی کم، همچون ترکیبات حلقوی، می‌تواند بر فعالیت سوخت و سازی ریزاندامگان اثرات بازدارنده ایجاد کند.^[۱۳] بر این اساس، در این مرحله با افزایش تدریجی غلظت آلاینده‌ها، توان سوخت و سازی ریزاندامگان توسعه‌ی لازم را پیدا کرد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، با افزایش غلظت کارایی حذف نیز به تدریج افزایش یافته و در کمتر از ۵ روز به بالای ۹۰٪ برای تولون و نزدیک ۱۰۰٪ برای زایلین رسید. در ادامه نوساناتی در کارایی مشاهده شد که می‌تواند علل مختلفی، از جمله افزایش تدریجی افت فشار در اثر رشد بیش از حد ریزاندامگان برای آن برشمرده ولی در مقایسه با شروع راه‌اندازی، کارایی حذف همواره بالای ۹۰٪ برای تولون و ۷۰٪ برای زایلین باقی ماند که نشانگر سازگاری تدریجی بیوفیلیم با آلاینده‌های ورودی است. با افزایش بارگذاری و رشد ریزاندامگان گرفتگی بسترها رو به

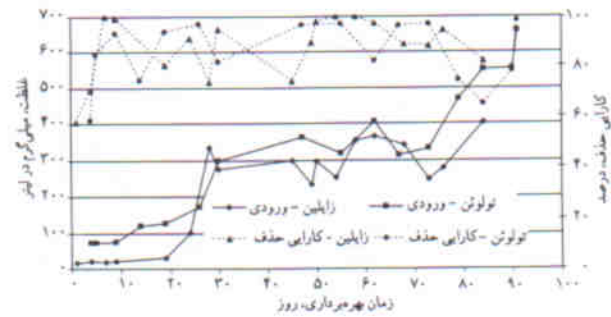


شکل ۴. روند ظرفیت حذف بیوفیلتر در شرایط بارگذاری مختلف در طول مطالعه.

ضریب همبستگی خطی نشان می‌دهد که این افزایش پراکنش تأثیر عمده‌ای در کارایی ندارد. شیب رابطه‌ی خطی برای تولون بیشتر از زایلین است که نشانگر بالاتر بودن قابلیت تصفیه‌ی زیست‌شناختی این ماده است که این امر در یافته‌های تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است.^[۱۵] بر اساس این روند می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به عدم اشباع ظرفیت حذف، امکان سازگاری در شرایط جدید وجود داشته و بارگذاری‌های ۱۱۰ و $150 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ برای تولون و زایلین قابل اعمال است. یافته‌های قبلی نشان می‌دهد که حذف زایلین توسط بیوفیلتر در بارگذاری‌های بالاتر از $175 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ از نوع واکنش درجه صفر بوده و مستقل از غلظت ورودی است.^[۱۶] برای تولون ارتباط خطی ظرفیت حذف و نرخ بارگذاری آلی تا حدود $10 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$ گزارش شده است.^[۱۵]

افت فشار

افت فشار ستون یکی از پارامترهای مهم بهره‌برداری بیوفیلترهاست، که تأثیر عمده‌ی در هزینه‌ی راهبری داشته و می‌تواند همچون کارایی حذف به‌عنوان شاخص بهره‌برداری برای پیشگیری از خروج سیستم از حالت پایدار مورد استفاده قرار گیرد. روند تغییرات افت فشار به‌طور مداوم در طول مدت مطالعه حفظ شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد کاهش کارایی مشاهده شده در بارگذاری‌های بالا با بررسی ظرفیت حذف به‌عنوان عامل بازدارنده و مشکل‌آفرین منتفی شد. در عین حال، افت فشار غیرقابل قبول در بستر حتی در شرایط افزایش کارایی حذف به حد مطلوب و سازگاری ریزاندامگان و عملکرد بهینه‌ی ظرفیت حذف می‌تواند باعث اختلال در راهبری بیوفیلتر باشد. به‌عبارت دیگر رویکرد پارامترهای کارایی حذف و ظرفیت حذف توجه به جنبه‌های فنی، و در رابطه با افت فشار جنبه‌ی اقتصادی موضوع است. نتایج نشان می‌دهد که در دوره‌ی راه‌اندازی در ۴ هفته‌ی اول و در دوره‌ی پایدار پس از آن، با افزایش بارگذاری بیش از میزان خاصی



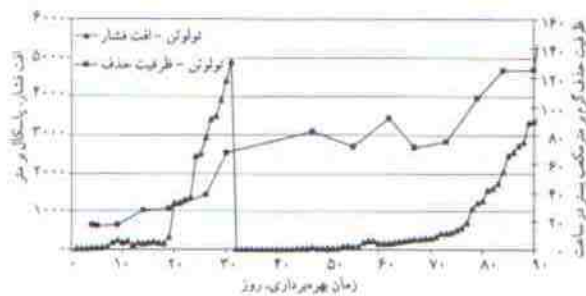
شکل ۳. تغییرات کارایی حذف تولون و زایلین در شرایط مختلف بارگذاری.

است. برای زایلین نیز برای غلظت‌های ورودی بین ۲۰ تا 400 ppm غلظت خروجی کمتر از 50 ppm مشاهده شد.

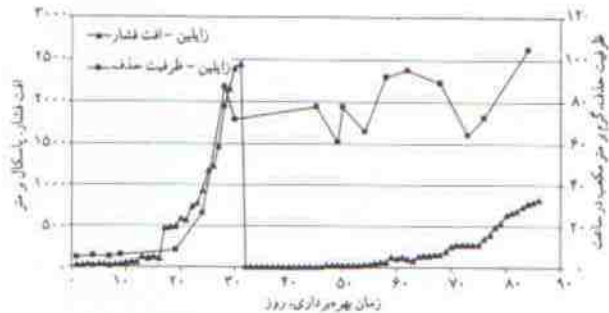
در هر مرحله از افزایش غلظت ورودی و با تأخیر زمانی محدود، افت کارایی بیشتری در مقایسه با نوسانات عادی مشاهده می‌شود که در سازگاری با شرایط جدید، دامنه‌ی نوسانات کاهش می‌یابد و روند افزایشی کارایی نمایان می‌شود. به‌عنوان مثال با افزایش غلظت تولون و زایلین به حدود 300 ppm در روز ۲۸، کارایی حذف به ترتیب به ۸۶٪ و ۷۲٪ کاهش می‌یابد. مدت زمان سازگاری با شرایط جدید و بازگشت کارایی حذف به حالت عادی نیز برای تولون کمتر از زایلین است. با افزایش مجدد غلظت در روز ۷۲ این روند کاهش کارایی تکرار می‌شود ولی با توجه به افزایش بیشتر در مقایسه با روز ۲۸، میزان افت نیز بیشتر است که برای تولون به ۶۵٪ می‌رسد. با توجه به مقررات زیست‌محیطی ممکن است این میزان حذف در صورت استمرار برای سیستم‌های کنترل قابل قبول نباشد، ولی به‌طور مقطعی مشکلی ایجاد نمی‌نماید. مدت زمان مشاهده‌ی کارایی حذف پایین تابع میزان نزدیکی شرایط سیستم‌ها به ظرفیت حذف قابل دستیابی توسط واحد حجم یا سطح بیوفیلتر در حالت پایدار است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

ظرفیت حذف

با افزایش غلظت ورودی آلاینده‌ها، کارایی حذف در بدترین حالت تا میزان ۶۵٪ کاهش یافت. پیدایش و تداوم روند کاهش کارایی حذف را می‌توان نشانی از وقوع شرایط نامساعد برای ریزاندامگان و عدم کارکرد بهینه‌ی آنها دانست. به‌منظور پیشگیری از راهبری سیستم‌ها در شرایط غیر پایدار، شاخص ظرفیت حذف باید حفظ شود. روند تغییرات ظرفیت حذف به‌عنوان تابع بارگذاری در شکل ۴ آورده شده است. خطی بودن این روند برای هر دو آلاینده نشانگر عدم نزدیک شدن به ظرفیت اشباع حذف برای بیوفیلترهاست. پراکندگی داده‌ها تا حدی در بارگذاری‌های بالاتر بیشتر است ولی بالا بودن



شکل ۵. تغییرات افت فشار و ظرفیت حذف بیوفیلتر در طول مدت مطالعه.



تصفیه به عنوان گزینه‌ی بهتری برای حذف ترکیبات آلی فرّار از جریان گازهای آلوده‌ی صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی نشان داد که سیستم بیوفیلتراسیون قادر به تصفیه‌ی آلاینده‌های تولون و زایلین تا حد قابل قبول سازمان‌های زیست محیطی مبنی بر تأمین غلظت خروجی ۵۰ ppm است. بستر مورد استفاده مخلوطی از کمپوست مواد زائد جامد شهری و تراشه‌ی چوب به نسبت حجمی ۲:۸ و با تخلخل ۵۴٪ بود که در دمای $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ، زمان ماند ۶۰ ثانیه، و دامنه‌ی رطوبت ۷۰-۶۰٪ راهبری شد. نتایج نشان داد که با توجه به عدم اشباع ظرفیت حذف، بارگذاری‌های ۱۱۰ و $150 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ برای تولون و زایلین قابل اعمال است. ولی افت فشار بیش از حد امکان راهبری پایدار واکنشگر را فراهم نمی‌سازد. براین اساس در صورت حفظ افت فشار در زیر 1000 pa/m ، نرخ بارگذاری 78 ± 8 و $80 \pm 14 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ برای تولون و زایلین قابل دستیابی است. ظرفیت حذف پایدار بیوفیلتر در این شرایط برای تولون و زایلین به ترتیب 73 ± 4 و $73 \pm 14 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ و کارایی حذف 94 ± 6 و 91 ± 8 ٪ بود.

به ظرفیت حذف به عنوان پارامتر کارایی آسیمی وارد نمی‌شود ولی افت فشار به عنوان پارامتر راهبری به حدی می‌رسد که توقف سیستم را ایجاد می‌کند. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۵ می‌توان محدوده‌ی افت فشار زیر 1000 pa/m را برای راهبری بهینه پیشنهاد کرد. بدین ترتیب محدوده‌ی زمانی مورد نظر برای تولون و زایلین روزهای ۷۳-۴۷ و ۸۶-۴۵ است که متناظر با نرخ بارگذاری 78 ± 8 و $80 \pm 14 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ است. در این میزان افت فشار ممکن است حداکثر ظرفیت قابل حذف توسط سیستم تحقق نیابد ولی در ملاحظات عملی، راهبری در این دامنه را ایجاد می‌کند. در این دامنه افت فشار با توجه به داده‌های موجود در دامنه‌ی زمانی فوق، ظرفیت حذف پایدار بیوفیلتر در شرایط این مطالعه برای تولون و زایلین به ترتیب 73 ± 4 و $73 \pm 14 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ به دست آمد.

نتیجه‌گیری

با تشدید مقررات زیست محیطی ترکیبات آلی فرّار و افزایش هزینه‌ی مواد خام و همچنین ضرورت کنترل تولید آلاینده‌های ثانوی با روش‌های تصفیه‌ی فیزیکی-شیمیایی، روش‌های زیست‌شناختی

پانویس

1. biofiltration
2. volatile organic compounds
3. microorganism
4. scrubber
5. chromatograph

منابع

1. Deviny J.S., Deshusses M.A., and Webster T.S., "Biofiltration for air pollution control", CRC press (1999).
2. Cox H.J., and Deshusses M.A., "Innovative experimental setup for the parallel operation of multiple bench scale biotrickling filters for waste air treatment", *Environ. Technol.*, **21**, pp. 427-435 (2000).
3. Morales, M., Revah, S. and Auria, R., "Start-Up and the effect

- of gaseous ammonia additions on a biofilter for the elimination of toluene vapors", *Biotechnol. & Bioeng.*, **60** (4), pp. 483-491 (1998).
4. Kennes C., Cox H. H. J., Doddema H.J. and Harder W., "Design and performance of biofilters for the removal of alkylbenzene vapors", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **66** (3), pp. 300-304 (1996).
5. Abumaizer R.J., Smith E.H., and Kocher W., "Analytical model of dual - media biofilter for removal of organic air pollutants", *ASCE J. Envr. Eng.*, **123** (6), pp. 606-614 (1997).
6. Strauss, J.M., Du plessis C.A. and Riedle K.H.J., "Empirical model for biofiltration of toluene", *ASCE J. Envr.Eng.*, **126** (7), pp. 644-648 (2000).
7. Nguyen, H.D., Sato, C., Wu, J. and Douglass, R.W., "Modeling biofiltration of gas streams containing TEX

- components" *ASCE J. Envr. Eng.*, **123** (6), pp. 615-621 (1997).
8. APHA "Standard methods for the examination of water and wastewater", 17th edition (1985).
 9. Williams, T.O., and Miller, F.C., "Biofilters and facility operations", *Biocycle*, **33** (11), pp. 75-79 (1992).
 10. Mateau, Y. and Ramsay, B., "Active compost biofiltration of toluene", *Biodegradation*, **8** (3), pp. 135-141 (1997).
 11. Ottengraf, S.P. P., and Van Den Oever, A.H.C., "Kinetics of organic Compound removal from waste gases with a biological filter", *Biotechnol. & Bioengr.*, **25**, pp. 3089-3102 (2000).
 12. Wang, J.Z., Summers, R.J. and Miltner, R.J., "Biofiltration performance. Prt I. Relationship to biomass", *J. Am. Water Works Associ.* **87** (12), pp. 64-70 (1995).
 13. Leson, G. and Winer, A.M., "Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions", *J. Air & Waste Management Assoc.*, **41** (8), pp. 1045-1054 (1991).
 14. Auria R., Frere G., Acuna M.E., and Revah S., "Influence of mixing and water addition of the removal rate of toluene vapors in a biofilter", *Biotechnol. & Bioengr.*, **68** (4), pp. 448-445 (2000).
 15. Wu g., Conti B. and Leroux A., "A high performance biofilter for VOC emission control" *J. of the Air & Waste Manag. Assoc.*, **49**, pp. 185-191 (1999).
 16. Jorio, H., Bibeau, L., Viel, G. and Hetiz, M., "Effects of gas flow rate and inlet concentration of xylene vapors biofiltration performance", *Chem.Eng. J.*, **76** (3), pp. 209-221 (2000).