

## بررسی عملکرد راکتور زیستی چکنده تلقیح شده با باکتری رالستونیا یوتروفا برای حذف بخار تولوئن

عباس علی نژاد، سید مرتضی ضمیر\*<sup>+</sup>، سید عباس شجاع الساداتی

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

**چکیده:** از بین روش‌های گوناگونی که برای حذف مواد آلی فرار از هوای صنایع آلاینده محیط زیست وجود دارد، روش‌های زیستی به دلیل صرفه اقتصادی، کارایی بالا برای غلظت‌های کم و بدون تولید پسماند ثانویه مورد توجه هستند. استفاده از راکتورهای زیستی چکنده یکی از شناخته شده‌ترین روش‌های زیستی برای حذف ترکیب‌های آلی فرار از هوا به شمار می‌رود. بررسی پایداری عملکرد راکتورهای زیستی چکنده در طول زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو، در این پژوهش، عملکرد یک راکتور زیستی چکنده پر شده با بستری از نسبت حجمی ۱ به ۱ از پال‌رینگ و پومیس و تلقیح شده با باکتری رالستونیا یوتروفا برای حذف بخار تولوئن از هوا به مدت ۱۰۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در زمان‌های اقامت ۹۰ و ۴۵ ثانیه و در غلظت‌های ورودی ۴-۰/۵ گرم بر مترمکعب انجام شدند. بیشینه ظرفیت حذف تولوئن در این راکتور زیستی به ۲۸۰ گرم بر مترمکعب بر ساعت رسید (بازده حذف بالای ۹۰٪). به ازای هر مول تولوئن مصرف شده، ۳/۳ مول کربن دی‌اکسید توسط باکتری‌ها تولید شد که به وسیله‌ی آن، با توجه به فرمول میکروب و تولید هیدروکلریک اسید در طول فرایند تصفیه، معادله‌ی واکنش زیستی حذف تولوئن به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** تولوئن؛ راکتور زیستی چکنده؛ رالستونیا یوتروفا؛ ترکیب آلی فرار؛ آلودگی هوا.

**KEYWORDS:** Toluene; Biotrickling filter; *Ralstonia eutropha*; Volatile organic compound; Air pollution.

### مقدمه

بخار بالاتر از ۰/۱ میلی‌متر جیوه دارند را ترکیب آلی فرار تعریف می‌کند. در استرالیا، به هر ترکیب شیمیایی بر پایه‌ی زنجیره یا حلقه کربن که دارای هیدروژن هم هستند و فشار بخاری بیش از ۲ میلی‌متر جیوه در ۲۵ °C دارد، VOC گفته می‌شود. در اروپا ترکیب‌های شیمیایی بر پایه کربن که فشار بخار بیش از ۰/۷۴ میلی‌متر جیوه در ۲۰ °C دارند، ترکیب‌های آلی فرار نامیده می‌شوند [۲].

از آغاز قرن بیستم میلادی، انتشار آلاینده‌ها در جو به صورت مداوم افزایش یافته است. ۷٪ از کل آلاینده‌ها را ترکیب‌های آلی فرار (VOCs)<sup>(۱)</sup> تشکیل می‌دهند. اما با وجود این سهم اندک، مشکل‌های زیادی برای انسان و محیط زیست به وجود آورده‌اند [۱]. تعریف‌های متفاوتی برای ترکیب‌های آلی فرار وجود دارد. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، ترکیب‌هایی بر پایه کربن که فشار

+E-mail: zamir@modares.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

(۱) Volatile Organic Compounds

## بخش تجربی

### مواد شیمیایی

همه نمک‌های معدنی از شرکت مرک تهیه شد. تولوئن به‌عنوان ترکیب آلی فرار با خلوص ۹۵٪ از شرکت مجلی (ایران) خریداری شد.

### ریزاندامگان

باکتری *R. eutropha* (PTCC1615) از مجموعه میکروبی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران خریداری شد.

### دستگاه راکتور زیستی چکنده

نمایی از دستگاه راکتور زیستی چکنده ساخته‌شده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

هوای لازم توسط پمپ هوا (هایلا، ACO-۵۵۰۵) تأمین شد. جریان هوا پس از عبور از یک جریان‌سنج هوا (دایر، SSV-۱۴-RMA - آمریکا) به مخزن دارای آلاینده (پ) وارد شد تا هوای آلوده ساخته شود. جریان دیگری از هوا نیز از یک جریان‌سنج هوا عبور کرده و دو جریان در یک ظرف شیشه‌ای (ت) باهم مخلوط شدند. جریان به دست آمده از اختلاط از پایین وارد راکتور زیستی چکنده شده و از بالای آن (د) هوای تصفیه‌شده از سامانه خارج شد. ستون راکتور زیستی چکنده (ث)، شامل استوانه‌ای از جنس شیشه‌ی دوجداره به ارتفاع ۱ متر و قطر داخلی ۶/۶ سانتی متر است. حجم مفید ستون ۱ لیتر بود. روی بدنه‌ی ستون، سه محل برای نمونه‌گیری (ج) از داخل راکتور تعبیه شده است. به‌منظور خوراک‌دهی از پمپ پرستالتیک (هایدولف ۵۱۰۱- آلمان) استفاده شد. برای داشتن محیطی همگن از ماده مغذی از همزن مغناطیسی (پویا الکترونیک - ایران) استفاده شد.

آکنه‌ها در این سامانه، مخلوطی از پال‌رینگ فلزی و پوک‌ی معدنی با نسبت حجمی ۱ به ۱ که ابعاد هرکدام از آن‌ها حدود ۲/۵ سانتی متر بود، در نظر گرفته شدند. پال‌رینگ فلزی از شرکت پنتان شیمی (ایران) تهیه شد.

pH مایع چکنده با استفاده از سود دو نرمال به‌صورت روزانه در بازه‌ی ۶/۵ تا ۷ تنظیم می‌شد. برای جلوگیری از کمبود مواد مغذی و تجمع متابولیت‌های بازدارنده در راکتور زیستی، محلول مغذی موجود در مخزن مایع چکنده هر ۱۰ روز با محلول مغذی تازه، تعویض می‌شد.

امروزه روش‌های سنتی کنترل و حذف آلاینده‌ها از جریان‌های گازی مانند سوزاندن، جذب سطحی و جذب، به دلیل به‌صرفه نبودن و از بین رفتن آلاینده در برخی از این روش‌ها، به تدریج جای خود را به روش‌های زیستی می‌دهند. روش‌های زیستی، جریان ثانویه‌ای از آلاینده تولید نمی‌کنند، بلکه آن را از بین می‌برند و برای شدت جریان‌های زیاد و غلظت‌های کم از آلاینده، تنها روش‌های به‌صرفه هستند [۱]. تخریب زیستی، شامل ۳ مرحله جذب، نفوذ و واکنش زیستی است. میزان حذف و اکسید شدن آلاینده‌ها به زیست‌تخریب‌پذیری، واکنش‌پذیری و حلالیت آلاینده در لایه زیستی<sup>(۱)</sup> بستگی دارد. راکتورهای زیستی چکنده به دلایلی مانند پایداری عملیاتی بیشتر، دوام بیشتر و کنترل بهتر متغیرهای عملیاتی مانند دما و pH نسبت به سایر فرایندهای زیستی مانند صافی‌های زیستی یا گازشوی‌های زیستی بیش‌تر موردتوجه هستند [۳،۴].

زمان اقامت گاز، شدت جریان مایع چکنده و غلظت آلاینده در هوای ورودی، از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملکرد راکتورهای زیستی چکنده هستند. بررسی پایداری عملیاتی راکتورهای زیستی چکنده در طول زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهشی برای حذف تولوئن در یک راکتور زیستی چکنده، ظرفیت حذف (EC) سامانه برابر با ۲۳۴ گرم بر مترمکعب بر ساعت به دست آمد [۵]. در پژوهش دیگری ظرفیت حذف متوسط یک راکتور زیستی چکنده برای حذف تولوئن، ۱۵۶ گرم بر مترمکعب بر ساعت به دست آمد [۶].

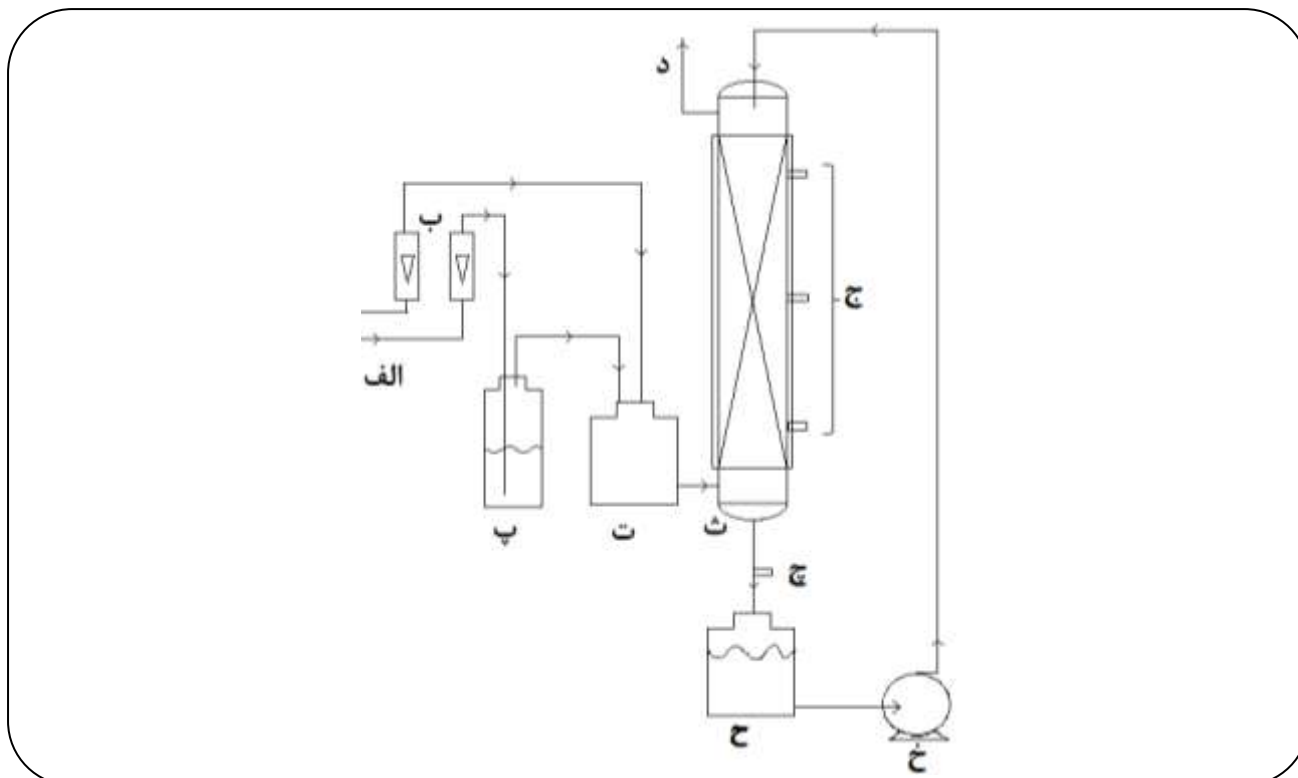
تولوئن از مهم‌ترین ترکیب‌های آلی فرار است که به‌تنهایی حدود ۳٪ از کل ترکیب‌های آلی فرار غیر متانی را که وارد جو می‌شوند، تشکیل می‌دهد، به همین دلیل مطالعه حذف آن دارای اهمیت است. در صنعت از تولوئن به‌عنوان ماده اولیه برای تولید زایلن و بنزن و همچنین به‌عنوان حلال در صنایع رنگ و رزین و دیگر صنایع پلیمری استفاده‌ی زیادی می‌شود [۷ - ۹].

از باکتری *Ralstonia eutropha*<sup>(۲)</sup> قبلاً در تصفیه پساب استفاده شده است [۱۰، ۱۱]. اما در راکتورهای زیستی فاز گاز برای تصفیه هوا بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

هدف از انجام این پژوهش، بررسی عملکرد یک راکتور زیستی چکنده تلقیح شده با باکتری *Ralstonia eutropha* برای حذف بخار تولوئن است. تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از این باکتری برای حذف تولوئن در راکتورهای زیستی فاز گاز ارائه نشده است.

(۱) Biofilm

(۲) *Ralstonia eutropha*



شکل ۱- نمایی از راکتور زیستی چکنده مورد استفاده. الف: ورودی هوا از پمپ هوا، ب: جریان سنج‌های هوا، پ: مخزن آلاینده، ت: ظرف اختلاط هوا و آلاینده، ج: محل‌های نمونه‌گیری از ستون چ: محل نمونه‌گیری از مایع، ح: مخزن محلول مغذی، خ: پمپ پرستالتیک، د: خروجی هوای تصفیه‌شده

وارد مخزن مایع شد تا در ستون به گردش درآید [۱۲]. در این مرحله غلظت گلوکز به صفر کاهش داده شد تا ریزاندامگان‌ها از تولوئن به‌عنوان تنها منبع کربن استفاده کنند.

در تمام این دوره، تولوئن با غلظت  $0.4$  گرم بر مترمکعب تا  $1$  گرم بر متر مکعب وارد ستون می‌شد. این افزایش غلظت به‌صورت تدریجی انجام شد تا ریزاندامگان‌ها به اندازه مناسب روی آکنه‌ها و در نزدیکی روزنه‌های عبور هوا رشد کنند. شدت جریان هوای ورودی در این دوره، روی  $1/3$  لیتر بر دقیقه ثابت نگه‌داشته شد تا زمان اقامت  $90$  ثانیه تأمین شود. کل این دوره حدود  $20$  روز به طول انجامید که در روزهای گوناگون در طی آن نمونه‌گیری از فاز گاز انجام می‌شد تا میزان حذف آلاینده‌ها کنترل شود.

#### آزمایش‌ها

عملکرد راکتور زیستی چکنده طی  $96$  روز مورد بررسی قرار گرفت. پس از روز بیستم و سازگار شدن باکتری‌ها با تولوئن

#### دوره آغاز و پایداری

ابتدا باکتری به سه ارلن  $500$  دارای محیط کشت اختصاصی تلقیح شد و سپس گرمخانه‌گذاری به مدت  $24$  ساعت در  $30^\circ\text{C}$  و  $130$  دور در دقیقه در گرمخانه لرزان (وایس کیوب-کره جنوبی) انجام شد. باکتری‌های رشد کرده در کنار شعله به مخزن مایع راکتور زیستی چکنده منتقل شدند و به کمک پمپ در سامانه به گردش درآمدند تا عمل تثبیت باکتری روی آکنه‌ها و سازگاری<sup>(۱)</sup> آن با تولوئن شروع شود. محیط کشت اختصاصی باکتری شامل (گرم بر لیتر): گلوکز،  $3$ : پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات،  $1$ : عصاره مخمر،  $2$ : پیتون،  $2$ : دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات،  $1$ : آمونیوم سولفات،  $1$ : منیزیم سولفات،  $0.005$  بود.

پس از یک هفته،  $800$  سی‌سی محلول مغذی که شامل (گرم بر لیتر): پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات  $4/5$ ؛ آمونیوم کلرید،  $2$ ؛ دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات،  $0/5$ ؛ منیزیم سولفات،  $0/1$ ؛  $1$  میلی‌لیتر محلول ویتامین و  $1$  میلی‌لیتر محلول فلزهای معدنی بود،

(۱) Adaptation

$$EBRT = \frac{V_t}{Q} \quad (1)$$

بارگذاری جرمی عبارت است از جرم آلاینده عبوری از راکتور زیستی چکنده در واحد حجم از آکنه‌های بستر در واحد زمان. به دلیل ثابت بودن شدت جریان در داخل هر راکتور زیستی چکنده، شدت بارگذاری جرمی نیز در طول بستر با کاسته شدن از مقدار آلاینده‌های در حال عبور کاهش می‌یابد.

$$IL = \frac{QC_{G_i}}{V_f} \quad (2)$$

بازدهی حذف و ظرفیت حذف برای توصیف میزان کارکرد راکتور زیستی چکنده به کار برده می‌شوند. بازدهی حذف عبارت از درصدی از آلاینده‌ها است که به وسیله‌ی راکتور زیستی چکنده از فاز گاز خارج می‌شوند. این عبارت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$RE = \frac{C_{G_i} - C_{G_o}}{C_{G_i}} \times 100 \quad (3)$$

ظرفیت حذف عبارت است از نرخ جرمی آلاینده‌های تخریب شده بر واحد حجم آکنه‌های بستر راکتور زیستی چکنده. ظرفیت حذف کلی هر راکتور زیستی چکنده را می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد:

$$EC = \frac{(C_{G_i} - C_{G_o}) \times Q}{V_f} \quad (4)$$

ظرفیت حذف به ما اجازه می‌دهد تا نتیجه‌های دو راکتور زیستی را باهم مقایسه کنیم، زیرا حجم و دبی جریان گذرنده در این عبارت طبق تعریف خاصی نرمال می‌شوند. ظرفیت حذف همواره کم‌تر و یا بیش‌ترین برابر با شدت بارگذاری جرمی است.

سطح تجزیه‌ی زیستی و معدنی سازی آلاینده در یک راکتور زیستی چکنده به طور معمول به وسیله نرخ تولید کربن دی‌اکسید ارزیابی می‌شود. با استفاده از فرمول زیر می‌توان نرخ تولید کربن دی‌اکسید را محاسبه کرد:

$$P_{CO_2} = \frac{Q \times (CO_{r,out} - CO_{r,in})}{V} \quad (5)$$

(رسیدن بازده حذف به بیش از ۹۰٪ و ثابت ماندن آن)، بررسی عملکرد راکتور زیستی در شرایط گوناگون آغاز شد. در ابتدای این دوره، غلظت تولوئن در ورودی به ۳ گرم بر مترمکعب افزایش داده شد. در روز پنجاه و پنجم، زمان اقامت به ۴۵ ثانیه کاهش داده شد و غلظت تولوئن در ورودی به مدت ۴۰ روز بین ۲/۵ تا ۴ گرم بر مترمکعب کنترل شد. در روز ۸۴ شدت جریان مایع چکنده به ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه افزایش داده شد.

### روش‌های اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری غلظت تولوئن در گازهای ورودی و خروجی از دستگاه کروماتوگرافی گازی (فیلیپس، ۴۴۱۰-PU-انگلستان) مجهز به یک ستون موئینه (BP۵، ۰/۲۵ میلی متر، ۲۵ متر) و آشکارساز یون‌سازی شعله<sup>(۱)</sup> استفاده شد. در این دستگاه از نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده شد. دماهای ستون، تزریق کننده و آشکارساز به ترتیب ۱۲۰°C، ۲۵۰°C و ۲۸۰°C بودند. شدت جریان نیتروژن، هیدروژن و هوای استفاده شده به ترتیب ۳۰، ۳۰ و ۳۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. برای تهیه نمونه از یک سرنگ گازی به حجم کل ۵ میلی‌لیتر (همیلتون، آمریکا) استفاده شد. حجم تزریق ۰/۲۵ میلی‌لیتر بود.

برای برقراری موازنه کربن و مشخص کردن میزان مصرف تولوئن توسط ریزاندامگان‌ها، میزان کربن دی‌اکسید در گاز ورودی و خروجی به راکتور زیستی به وسیله یک دستگاه کروماتوگرافی گازی (طیف گستر مدل TG ۲۵۵۲ - ایران) مجهز به یک ستون پر شده پوراپاک کیو<sup>(۲)</sup> و آشکارساز هدایت گرمایی<sup>(۳)</sup> اندازه‌گیری شد. در این دستگاه از هیدروژن به عنوان گاز حامل استفاده شد. دماهای ستون، تزریق کننده و آشکارساز به ترتیب برابر با ۴۰°C، ۴۰°C و ۱۰۰°C بودند. شدت جریان عبوری از آشکارساز برابر با ۱۰۰ میلی آمپر بود. حجم تزریق برای این کار، ۱ میلی‌لیتر بود.

برای به واکاوی عنصری باکتری موجود در راکتور زیستی، از دستگاه آنالیز عنصری CHNS-O (پرکلین المر ۲۴۰۰ - آمریکا) استفاده شد.

### روابط و اصطلاح‌های مورد نیاز

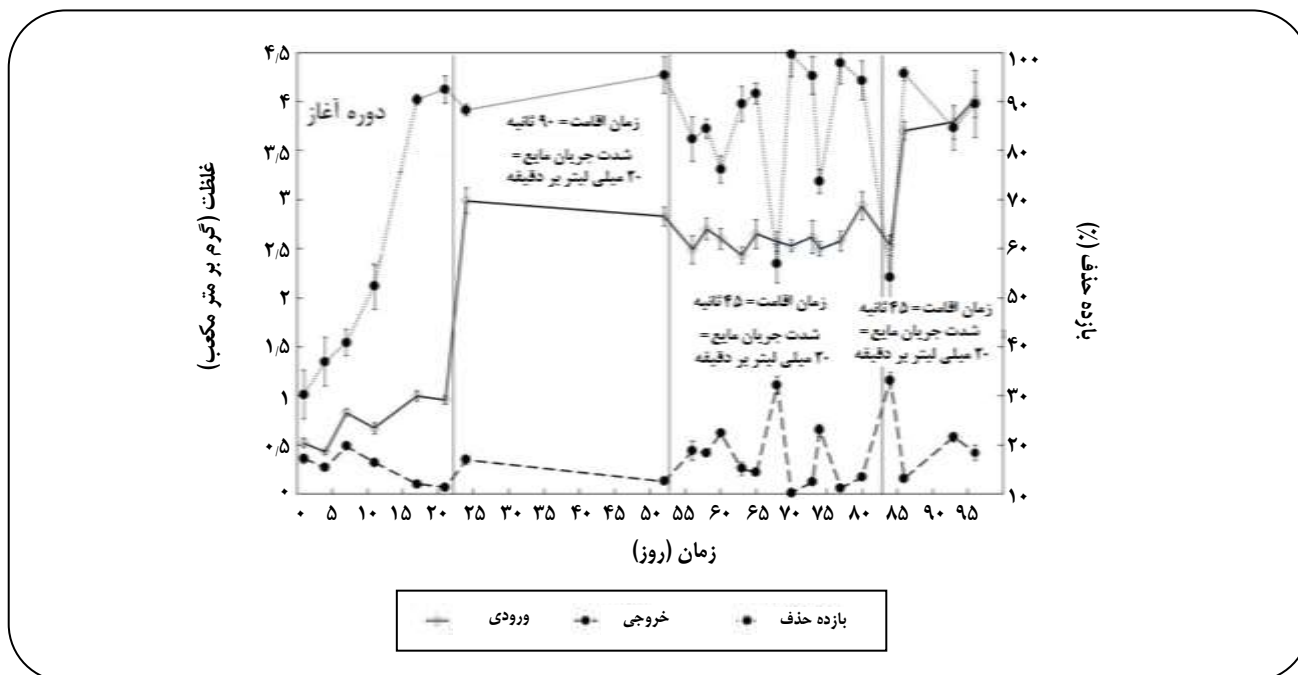
زمان اقامت در بستر خالی<sup>(۴)</sup> از تقسیم حجم ظاهری بستر بر شدت جریان هوا به دست می‌آید.

(۱) Flame Ionization Detector (FID)

(۲) Porapak Q

(۳) Thermal Conductivity Detector (TCD)

(۴) Empty Bed Residence Time



شکل ۲- عملکرد راکتور زیستی چکنده در حذف تولوئن.

## نتیجه‌ها و بحث

### عملکرد راکتور زیستی

افزایش یافت تا اینکه در روز ۶۵ به ۹۱٪ رسید و تا پایان این دوره یعنی روز ۸۳ بالای ۹۰٪ باقی ماند.

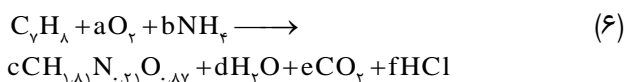
در روزهای ۶۸ و ۷۴، یعنی روزهایی که سطح مایع چکنده در مخزن بسیار پایین آمده بود، بازدهی حذف هم کاهش شدیدی را از خود نشان داد و به حدود ۵۰٪ رسید. این کاهش بازدهی حذف می‌تواند به کمبود مواد مغذی و تجمع متابولیت‌های سمی در مایع ربط داده شود؛ از طرف دیگر با تعویض مایع چکنده در روزهای ۷۰ و ۷۷، بیش‌ترین بازدهی حذف، یعنی ۹۷٪ و ۱۰۰٪ به دست آمد. این نتیجه می‌تواند اثباتی برای کمبود مواد مغذی و تجمع متابولیت‌های سمی در سامانه در اثر کم شدن سطح مایع باشد، که با تعویض مایع چکنده، بازدهی حذف راکتور زیستی دوباره به حالت عادی بازگشت.

سپس شدت جریان مایع چکنده از ۲۰ به ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه افزایش داده شد. با انجام این کار در روز ۸۴ به دلیل رشد بیش‌ازحد توده‌ی زیستی در سامانه، پدیده طغیان روی داد، که منجر به افزایش غلظت تولوئن در هوای خروجی به ۱٫۲ گرم بر مترمکعب و کاهش بازدهی حذف تا ۵۴٪ شد. بنابراین سامانه نخست کلاً خاموش شد و به‌صورت مکانیکی، آکنه‌های داخل ستون کمی حرکت داده شد تا راه برای خروج مایع باز شود. پس از انجام این کار و شروع به کار مجدد سامانه، مشاهده شد که بازدهی حذف دوباره طی ۱۰ روز و به‌آرامی به ۹۰٪ افزایش یافت.

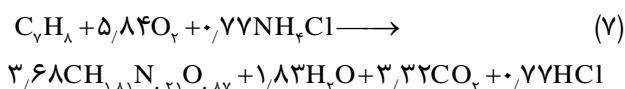
شکل ۲، تغییرهای غلظت ورودی و خروجی تولوئن و تغییرهای بازدهی حذف سامانه را در طول زمان نشان می‌دهد. در دوره‌ی آغاز، برای سازگار شدن ریزاندامگان‌ها با تولوئن، راکتور زیستی با غلظت ورودی ۰٫۴ گرم بر مترمکعب شروع به کار کرد و طی ۱۵ روز غلظت ورودی به ۱ گرم بر مترمکعب افزایش داده شد. همان‌گونه که در نمودار دیده می‌شود، بازده حذف سامانه در ابتدا بسیار پایین و حدود ۳۰٪ بود که از روز هفدهم به بعد به بیش از ۹۰٪ رسید و ثابت باقی ماند که نشان از سازگار شدن ریزاندامگان‌ها با تولوئن داشت.

پس‌ازاین مرحله، در روز بیستم، برای ورود به آزمایش‌های حالت پایدار، غلظت ورودی تولوئن به ۳ گرم بر مترمکعب افزایش داده شد. در نتیجه این افزایش غلظت، بازده حذف از ۹۳٪ به ۸۸٪ کاهش یافت. در روز ۵۲، بازدهی حذف ۹۵٪ بود. در ادامه این دوره، در روز ۵۳، زمان اقامت هوا در راکتور زیستی از ۹۰ ثانیه به ۴۵ ثانیه کاهش داده شد، درحالی‌که غلظت ورودی به تقریب ثابت و برابر با ۲٫۷ گرم بر مترمکعب بود. در نتیجه‌ی این کار، غلظت تولوئن خروجی از حالت پایدار خارج شد و بازدهی حذف از بالای ۹۰٪ در دوره پیش به ۷۶٪ کاهش پیدا کرد. سپس بازدهی حذف

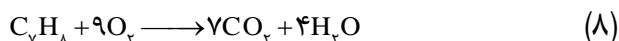
در راکتورهای زیستی چکنده به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول کلی توده‌ی زیستی که با استفاده از واکاوای عنصری به دست آمد،  $CH_{1.81}N_{0.21}O_{0.87}$  است. با توجه به استفاده از آمونیوم کلرید به عنوان منبع نیتروژن در طول فرایند تصفیه هیدروکلریک اسید تولید می‌شود، بنابراین واکنش کلی تجزیه زیستی یک مول تولوئن را می‌توان به شکل زیر نوشت:



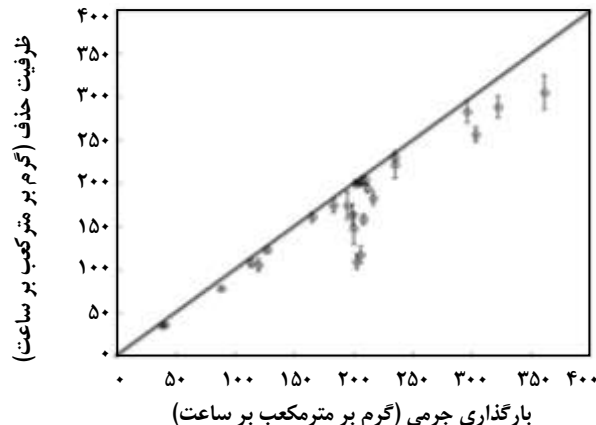
برای تعیین ضریب‌های استوکیومتری، ابتدا باید تعداد مول‌های کربن دی‌اکسید تولید شده به ازای تجزیه یک مول تولوئن یعنی ضریب  $e$ ، به دست بیاید. برای این کار باید نمودار نرخ تولید دی‌اکسید کربن بر حسب ظرفیت حذف رسم شود. شکل ۴، نمودار رسم شده برای این کار را نشان می‌دهد. با توجه به شیب خط، به ازای تجزیه هر گرم تولوئن،  $1/59$  گرم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود، بنابراین با یک موازنه ساده، به ازای تجزیه هر مول تولوئن،  $3/32$  مول دی‌اکسید کربن تولید می‌شود؛ بنابراین ضریب  $e$  برابر با  $3/32$  به دست آمد و بقیه ضریب‌ها با توجه به آن محاسبه می‌شوند. معادله نهایی تجزیه زیستی تولوئن به شکل زیر درمی‌آید.



عرض از مبدأ معادله‌ی خط به دست آمده از شکل ۴، به سوخت‌وساز درونی سلول مربوط می‌شود. با توجه به معادله (۸) به ازای اکسید شدن شیمیایی هر مول تولوئن،  $7$  مول کربن دی‌اکسید تولید می‌شود. درحالی‌که کربن دی‌اکسید تولید شده در تجزیه زیستی تولوئن، کم‌تر از  $50\%$  این مقدار است. تولید کربن دی‌اکسید بسیار کم‌تر نسبت به روش‌های شیمیایی یکی از برتری‌های روش تجزیه زیستی است که تا به حال کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.



در پژوهش انجام شده توسط درادو<sup>(۱)</sup> و همکاران تولید  $3/7$  مول دی‌اکسید کربن به ازای مصرف هر مول تولوئن، گزارش شده است که به تقریب با مقدار به دست آمده در این پژوهش برابر است [۱۶]. در پژوهش انجام شده توسط آلوارز<sup>(۲)</sup> و همکاران، به ازای مصرف هر مول تولوئن،  $5/4$  مول کربن دی‌اکسید تولید شد [۱۷].



شکل ۳- اثر بارگذاری جرمی تولوئن بر ظرفیت حذف.

در مجموع در تمام این دوره و در حالت‌های گوناگون، بازده حذف سامانه، بالای  $90\%$  بود که با توجه به مقدار بارگذاری‌ها، بازده حذف بالایی است.

شکل ۳، اثر بارگذاری ورودی تولوئن بر ظرفیت حذف زیستی در شرایط پایدار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، ظرفیت حذف بیشینه تولوئن در دمای محیط، برابر با  $280$  گرم بر مترمکعب بر ساعت به دست آمد. یادآوری این نکته دارای اهمیت است که بارگذاری‌های بالای  $200$  گرم بر مترمکعب بر ساعت در زمان اقامت  $45$  ثانیه انجام شدند. بیشینه ظرفیت حذف این راکتور زیستی در مقایسه با بسیاری از سامانه‌هایی که تاکنون برای حذف تولوئن مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به‌طور چشمگیری بیش‌تر است، که این نشان از توانایی زیاد باکتری *R. putrofa*، برای حذف تولوئن دارد. در جدول ۱، نتیجه‌های چند نمونه از پژوهش‌های انجام شده برای بررسی عملکرد راکتورهای زیستی چکنده برای حذف بخار تولوئن در حالت پایدار برای مقایسه با پژوهش فعلی ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، در پژوهش‌هایی که از لجن فعال برای تلقیح کردن راکتور زیستی استفاده شده است، در مقایسه با راکتورهای زیستی که با گونه‌های میکروبی خالص تلقیح شدند، سرانجام راکتور زیستی به بیشینه ظرفیت حذف کم‌تری رسید. ظرفیت حذف برخی پژوهش‌های اشاره شده در جدول ۱، تقریباً با نتیجه به دست آمده از این پژوهش یکسان هستند.

### مشخصه سازی معادله واکنش زیستی حذف تولوئن

تعیین ضریب‌های استوکیومتری واکنش زیستی حذف تولوئن

(۱) Dorado

(۲) Alvarez

جدول ۱- نتیجه‌های تعدادی از پژوهش‌های انجام شده برای حذف تولوئن در بیوراکتور چکنده.

مرجع	IL (گرم بر مترمکعب بر ساعت)	EC <sub>max</sub> (گرم بر مترمکعب بر ساعت)	EBRT (ثانیه)	تلقیح	نوع آکنه
[۱۳]	۱۲۰	۹۰	۳۰	لجن فعال	فوم پلی یورتان
[۵]	۲۵۰	۲۴۳	۳۲	بورخولدریا <sup>(۱)</sup>	سرامیک
[۱۴]	۱۰۰	۷۰	۳۶	لجن فعال	پلی پروپیلن و پال رینگ
[۱۵]	۲۷۵	۲۷۳	۱۳۳	باسیلوس سرئوس اس <sup>(۲)</sup>	غربال مولکولی
این پژوهش	۳۰۰	۲۸۰	۴۵	رالستونیا یوتروفا	پال رینگ و پومیس

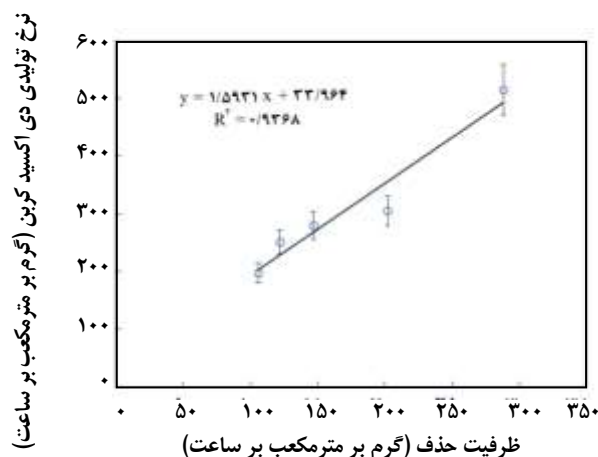
(۱) *Burkholderia* ; (۲) *Bacillus cereus* S1

### نتیجه‌گیری

باکتری *R. یوتروفا*، به‌خوبی قادر به حذف تولوئن از فاز گاز در یک راکتور زیستی چکنده است. بازده حذف راکتور زیستی تا غلظت ۷/۵ گرم بر مترمکعب در زمان اقامت ۹۰ ثانیه و تا غلظت ۳/۵ گرم بر مترمکعب در زمان اقامت ۴۵ ثانیه، بیش‌تر از ۹۰٪ به دست آمد. مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده در روش زیستی نسبت به اکسایش شیمیایی تولوئن، ۵۰٪ کم‌تر بود.

### فهرست نمادها

EBRT	زمان اقامت در بستر خالی (ثانیه)
V <sub>f</sub>	حجم راکتور زیستی چکنده (مترمکعب)
Q	شدت جریان حجمی هوا (مترمکعب بر ثانیه)
C <sub>G<sub>i</sub></sub>	غلظت آلاینده در گاز ورودی (گرم بر مترمکعب)
C <sub>G<sub>o</sub></sub>	غلظت آلاینده در گاز خروجی (گرم بر مترمکعب)
P <sub>CO<sub>۲</sub></sub>	نرخ تولید دی‌اکسید کربن برحسب، g/m <sup>3</sup> h
CO <sub>2,out</sub>	غلظت دی‌اکسید کربن در گاز خروجی، g/m <sup>3</sup>
CO <sub>2,in</sub>	غلظت دی‌اکسید کربن در گاز ورودی، g/m <sup>3</sup>
RT	زمان اقامت هوا (ثانیه)
LRR	نرخ مایع چکنده (میلی لیتر بر دقیقه)
IL	بارگذاری (گرم بر مترمکعب بر ساعت)
RE	بازده حذف (%)
EC	ظرفیت حذف (گرم بر مترمکعب بر ساعت)



شکل ۴- نرخ تولید کربن دی‌اکسید در ظرفیت‌های گوناگون حذف تولوئن.

در پژوهش دیگری که توسط *آلوارز و همکاران* انجام شد، تولید ۴/۷ مول کربن دی‌اکسید به ازای مصرف هر مول از تولوئن گزارش شد [۱۸]. در هر سه پژوهش ارائه‌شده در این قسمت از صافی زیستی برای تصفیه تولوئن استفاده شده بود. در صافی‌های زیستی از مواد آلی به عنوان بستر استفاده می‌شود و به طور معمول تلقیحی به آن‌ها انجام نمی‌شود، جمعیت میکروبی صافی‌های زیستی گوناگون با یکدیگر متفاوت است و عملیات تصفیه توسط ترکیبی از گونه‌های گوناگون میکروبی انجام می‌شود، به همین دلیل عددهای گوناگونی برای تولید دی‌اکسید کربن در آن‌ها گزارش می‌شود. همچنین نمونه‌گیری میکروبی انجام شده از راکتور زیستی و کشت آن روی آگار مغذی پس از نزدیک به یک‌صد روز کار، جمعیت بسیار اندکی از یک نوع باکتری احتمالی دیگر را زیر میکروسکوپ نشان داد که در مقایسه با *ریزوتروفا* بسیار کم‌تر بود. بنابراین می‌توان سامانه را در دوره کاری خود به طور قطع دارای یک جمعیت غالب از *ریزوتروفا* دانست.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

## مراجع

- [1] Delhoménie M.C., Heitz M., [Biofiltration of Air: A Review](#), *Critical Reviews in Biotechnology*, **25**: 53–72 (2005).
- [2] Muñoz R., Villaverde S., Guieysse B., Revah S., [Two-Phase Partitioning Bioreactors for Treatment of Volatile Organic Compounds](#), *Biotechnology Advances*, **25**: 410–422 (2007).
- [3] Mudliar S., Giri B., Padoley K., Satpute D., Dixit R., Bhatt P., [Bioreactors for Treatment of VOCs and Odours - A Review](#), *Journal of Environmental Management*, **91**: 1039–1054 (2010).
- [4] Muñoz R., Daugulis A.J., Hernández M., Quijano G., [Recent Advances in Two-Phase Partitioning Bioreactors for the Treatment of Volatile Organic Compounds](#), *Biotechnology Advances*, **30**: 1707–1720 (2012).
- [5] Sun D., Li J., Xu M., An T., Sun G., Guo J., [Toluene Removal Efficiency, Process Robustness, and Bacterial Diversity of a Biotrickling Filter Inoculated with \*Burkholderia sp. Strain T3\*](#), *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **18**: 125–134 (2013).
- [6] Sun D., Li J., An T., Xu M., Sun G., Guo J., [Evaluation of the Performance of Structured Mixed Packing and Inert Packing Materials in Toluene Biotrickle-Filtration](#), *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **16**: 1009–1018 (2011).
- [7] Rene E.R., Kar S., Krishnan J., Pakshirajan K., López M.E., Murthy D.V.S., Swaminathan T., [Start-up, Performance and Optimization of a Compost Biofilter Treating Gas-Phase Mixture of Benzene and Toluene](#), *Bioresource Technology*, **190**: 529–535 (2015).
- [8] Balasubramanian P., Philip L., Murty Bhallamudi S., [Biotrickling Filtration of Complex Pharmaceutical VOC Emissions Along with Chloroform.](#), *Bioresource Technology*, **114**: 149–159 (2012).
- [9] Iranmanesh E., Halladj R., Zamir S.M., [Microkinetic Analysis of n -Hexane Biodegradation by an Isolated Fungal Consortium from a Biofilter: Influence of Temperature and Toluene Presence](#), *Clean-Soil, Air, Water*, **43**: 104–111 (2015).
- [10] Habibi A., Vahabzadeh F., [Degradation of Formaldehyde in Packed-Bed Bioreactor by Kissiris-Immobilized \*Ralstonia eutropha\*](#), *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **18**: 455–464 (2013).
- [11] Habibi A., Vahabzadeh F., [Degradation of Formaldehyde at High Concentrations by Phenol-Adapted \*Ralstonia eutropha\* Closely Related to Pink-Pigmented Facultative Methylotrophs](#), *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **48**: 279–292 (2012).
- [12] Zamir S.M., Babatabar S., Shojaosadati S.A., [Styrene Vapor Biodegradation in Single- and Two-Liquid Phase Biotrickling Filters Using \*Ralstonia eutropha\*](#), *Chemical Engineering Journal*, **268**: 21–27 (2015).



- [13] Yang C., Yu G., Zeng G., Yang H., Chen F., Jin C., [Performance of Biotrickling Filters Packed with Structured or Cubic Polyurethane Sponges for VOC Removal](#), *Journal of Environmental Science*, **23**: 1325–1333 (2011).
- [14] Cox H.J., Deshusses M.A., [Co-Treatment of H<sub>2</sub>S and Toluene in a Biotrickling Filter](#), *Chemical Engineering Journal*, **87**: 101–110 (2002).
- [15] He Z., Zhou L., Li G., Zeng X., An T., Sheng G., Fu J., Bai Z., [Comparative Study of the Eliminating of Waste Gas Containing Toluene in Twin Biotrickling Filters Packed with Molecular Sieve and Polyurethane Foam](#), *Journal of Hazardous Materials*, **167**: 275–81 (2009).
- [16] Dorado A.D., Baeza J., Lafuente J., Gabriel D., Gamisans X., [Biomass Accumulation in a Biofilter Treating Toluene at High Loads – Part 1: Experimental Performance from Inoculation to Clogging](#), *Chemical Engineering Journal*, **209**: 661–669 (2012).
- [17] Álvarez-Hornos F.J., Gabaldón C., Martínez-Soria V., Marzal P., Peña-roja J.-M., [Mathematical Modeling of the Biofiltration of Ethyl Acetate and Toluene and Their Mixture](#), *Biochemical Engineering Journal*, **43**: 169–177 (2009).
- [18] Mart V., Álvarez-hornos F.J., Gabaldón C., Marzal P., [Biofiltration of Toluene in the Absence and the Presence of Eethyl Acetate under Continuous and Intermittent Loading](#), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **653**: 643–653 (2008).