

# بررسی عملکرد صافی زیستی چکنده به منظور حذف اتیل بنزن از جریان هوای آلوده

معصومه شائیان، صباحه باریک بین، سید محمد مهدی دستغیب\*<sup>+</sup>، علی ضیاءالدینی

پژوهشکده بیوتکنولوژی و محیط زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، صندوق پستی ۱۳۷-۱۴۶۶۵، تهران، ایران

**چکیده:** در این پژوهش حذف اتیل بنزن از جریان هوای آلوده در یک صافی زیستی چکنده در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. پرکن‌های پلاستیکی پال رینگ به عنوان پایه نگهدارنده برای تثبیت میکروارگانیسم‌ها و تشکیل فیلم زیستی میکروبی در نظر گرفته شد و از مخلوط شیرابه کمپوست و آب آلوده به اتیل بنزن در یک منطقه صنعتی برای تلقیح صافی زیستی چکنده استفاده شد. حجم مفید صافی زیستی ۴/۷ لیتر و زمان اقامت گاز یک دقیقه در نظر گرفته شد. فاز عملیاتی ۹۵ روز به طول انجامید که در طول آن شدت جریان هوای ورودی ثابت بود (۴/۷ لیتر بر دقیقه) و غلظت اتیل بنزن در هوای ورودی از ۰/۵ تا ۲/۵ گرم بر متر مکعب افزایش یافت. در پایان فاز عملیاتی، بیشینه‌ی ظرفیت حذف صافی زیستی چکنده برابر با ۱۳۳ گرم بر متر مکعب در ساعت با بازدهی حذف ۹۳ درصد به دست آمد. نتیجه‌ها بیانگر عملکرد مطلوب صافی زیستی چکنده برای حذف اتیل بنزن از فاز گازی است که نویدبخش کاربرد عملیاتی آن در صنایع گوناگون است.

**واژه‌های کلیدی:** صافی زیستی چکنده؛ اتیل بنزن، پال رینگ؛ فیلم زیستی میکروبی؛ کمپوست.

**KEYWORDS:** Biotrickling filter; Ethylbenzene; Pall ring; Biofilm; Compost.

## مقدمه

استانداردهای زیست محیطی هدایت می‌کنند [۴]. روش‌های متداول فیزیکی و شیمیایی مانند سوزاندن و جذب سطحی، به هزینه‌های بالا و تجهیزهای پیچیده نیاز دارند و آلاینده را از فاز دیگر منتقل نموده و پسماند خطرناک دیگری تولید می‌کنند. در برابر، شیوه‌های تصفیه زیستی از نظر اقتصادی به صرفه بوده و آلاینده را حذف نموده و به مواد بی ضرری چون کربن دی اکسید و آب تبدیل می‌کنند [۵، ۶].

فرایند صاف کردن با صافی یکی از مؤثرترین روش‌های تصفیه زیستی است. صافی زیستی راکتوری است که از پرکن‌های آلی یا غیرآلی پر شده

آلودگی هوا، تهدیدی مهم برای محیط زیست و سلامت انسان‌ها به شمار می‌آید و کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ترکیب‌های آلی فرار (VOCs)<sup>(۱)</sup> یکی از انواع آلاینده‌های هوا می‌باشند که از صنایع گوناگون مانند پتروشیمی، غذایی، رنگ و کاغذ به هوا نشر می‌یابند. این ترکیب‌ها افزون بر ایجاد بوی بد، سمیت ایجاد می‌کنند و حذف آن‌ها از جریان‌های آلوده گازی ضروری است [۳-۱]. قوانین زیست محیطی سختگیرانه که توسط سازمان‌های دولتی وضع می‌شوند، صنایع آلوده کننده هوا را به سمت استفاده از سامانه‌ها و فرایندهای مناسب تصفیه هوا مطابق با

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail: dastgheibsmm@ripi.ir

(۱) Volatile organic compounds

(۲) Packing

جدول ۱- ویژگی‌های محلول مواد مغذی.

غلظت (g/L)	مواد
۱	نیترات آمونیوم
۱	پتاسیم دی هیدروژن فسفات
۱	دی پتاسیم هیدروژن فسفات
۰/۰۲	کلسیم کلراید ۲ آبه
۰/۲	منیزیم سولفات ۷ آبه
۰/۰۵	کلرور فریک

فیلم زیستی میکروبی است جلوگیری می‌کند، همینطور به علت دارا بودن سطح ویژه زیاد سبب افزایش انتقال جرم آلاینده به فیلم مایع می‌شوند [۷، ۱۴]. هدف از پژوهش حاضر بررسی عملکرد صافی زیستی چکنده تلقیح شده با میکروفولور بومی به منظور حذف آلاینده اتیل بنزن از جریان گازی آلوده است. اثر افزایش غلظت آلاینده بر ظرفیت حذف به منظور دستیابی به بیشینه ظرفیت حذف سامانه مورد بررسی قرار گرفت.

### بخش تجربی

#### مواد

کلیه مواد مورد استفاده از درجه آنالیتیکال (درصد خلوص بالای ۹۹٪) و از شرکت مرک آلمان تهیه شد. محلول مواد مغذی مورد نیاز میکرورگانیزم‌ها دارای انواع درشت مغذی‌ها، ریزمغذی‌ها و بافرها بود. ترکیب درصد مواد، مطابق محیط کشت پایه معدنی Bushnell Hass در نظر گرفته شد. جدول ۱ غلظت مواد در محلول را نشان می‌دهد. غلظت مواد مغذی در محلول با افزایش غلظت اتیل بنزن ورودی افزایش می‌یافت به طوری که نسبت جرمی کربن به نیتروژن همواره حدود ۲۰ در نظر گرفته شد. از پال رینگ‌های پلاستیکی با قطر داخلی ۱۵ میلی‌متر، تخلخل اولیه ۹۱٪ و سطح ویژه ۱۸۸ مترمربع بر مترمکعب به عنوان پایه نگهدارنده برای تشکیل فیلم زیستی میکروبی استفاده شد که نسبت قطر ستون به پرکن ۸ بود. طبق پژوهش [۱۵] به منظور توزیع یکنواخت و مناسب مایع در صافی‌های زیستی چکنده، نسبت قطر ستون صافی زیستی به قطر پرکن باید حداقل ۸ باشد.

و میکروارگانیزم‌ها روی سطح پرکن‌ها رشد می‌کنند و فیلم زیستی را تشکیل می‌دهند. مواد آلاینده با عبور هوا از بستر متخلخل از فاز گاز به فیلم زیستی میکروبی منتقل شده و توسط فرایند اکسایش زیستی حذف می‌شوند [۷، ۴]. در صافی‌های زیستی سنتی از پرکن‌هایی مانند خاک، کمپوست، کود گیاهی و تراشه چوب استفاده می‌شود. این بسترها غنی از مواد مغذی بوده و ارزان هستند از مشکل‌های راهبردی صافی‌های زیستی می‌توان به اشغال فضای زیاد توسط آنها، فشرده شدن بستر، افت فشار بالا، طول عمر کوتاه (۲ تا ۵ سال) و گرفتگی بستر اشاره کرد [۸، ۴]. به کارگیری پرکن‌های خنثی در صافی‌های زیستی چکنده<sup>(۱)</sup>، بستری مقاوم به فشرده‌گی ایجاد می‌کند و این امکان را می‌دهد که بتوان صافی‌هایی زیستی با ارتفاع بلندتر در فضایی کوچک‌تر ساخت. این سامانه‌ها در مقایسه با صافی‌های زیستی سنتی از طول عمر بالاتر و افت فشار کمتری برخوردارند. در صافی‌های زیستی چکنده مواد مغذی با گردش فاز مایع در اختیار میکروارگانیزم‌ها قرار می‌گیرد و این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان پارامترهایی چون دما، رطوبت و pH را به سادگی کنترل نمود [۹]. در صافی‌های زیستی چکنده به راحتی می‌توان به بیشینه ظرفیت حذف<sup>(۲)</sup> ۱۰۰ گرم بر متر مکعب در ساعت دست یافت، در حالی که این رقم در صافی‌های زیستی سنتی به‌طور معمول کم‌تر است [۱۰].

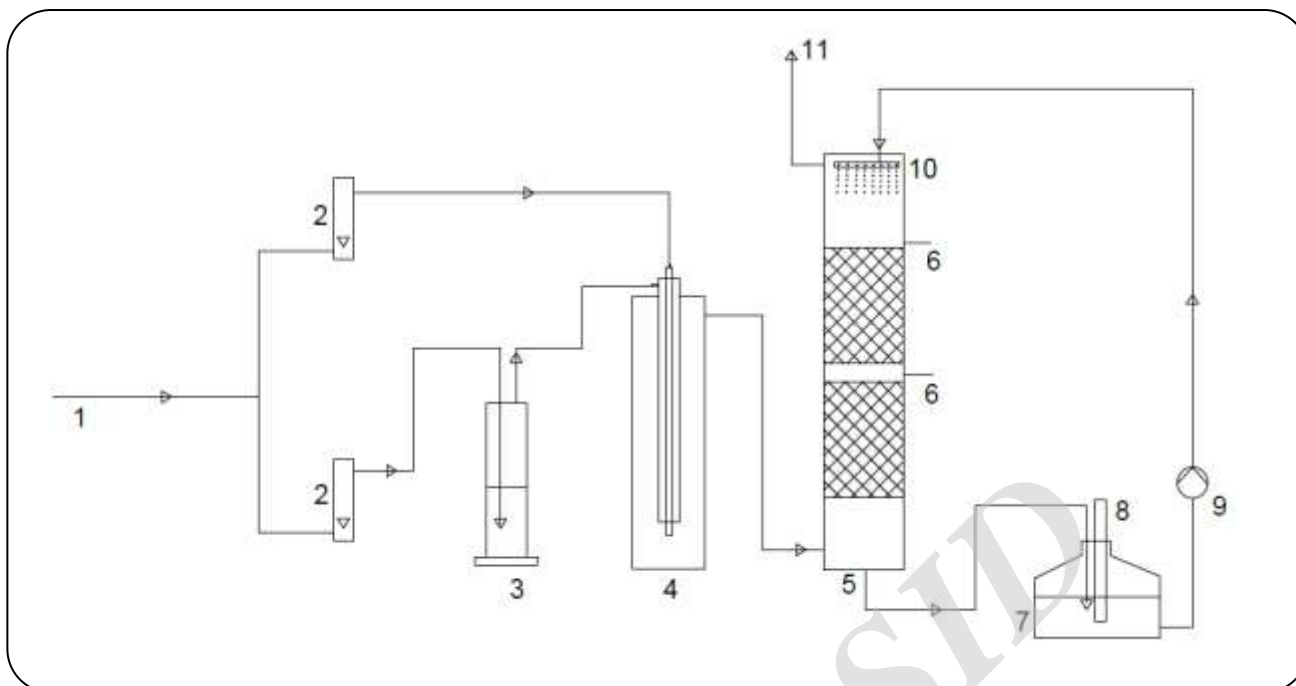
اتیل بنزن یکی از ترکیب‌های آلی فرار می‌باشد که به طور معمول در فراورده‌های نفتی چون بنزین یافت می‌شود و به عنوان ماده واسط یا حلال در صنایع پتروشیمی نیز به کار می‌رود و توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در فهرست آلاینده‌های اولویت‌دار طبقه‌بندی شده است. این آلاینده تأثیرهای شدیدی بر سامانه عصبی مرکزی داشته و همچنین، عوارض جانبی جدی چون مشکل‌های تنفسی، سرطان و اختلال‌های کبد و کلیه برای سلامتی انسان ایجاد می‌نماید [۱۱]. در سال‌های گذشته تلاش‌های چشمگیری در رابطه با حذف اتیل بنزن مایع از پساب و خاک با استفاده از روش‌های گوناگون صورت گرفته است [۱۲، ۱۳]. در حالی که گزارش‌های اندکی در مورد حذف اتیل بنزن از جریان‌های گازی آلوده در دسترس است [۱۱، ۵، ۱].

پرکن‌های پال رینگ<sup>(۳)</sup> از جمله پرکن‌های مورد استفاده در صافی‌های زیستی چکنده هستند. این نوع پرکن‌ها به دلیل تخلخل بسیار زیاد، از گرفتگی سریع بستر که ناشی از رشد

(۱) Biotrickling filter

(۲) Maximum elimination capacity

(۳) Pall ring



شکل ۱- نمای شمایی سامانه صافی زیستی چکنده: ۱. هوای ورودی، ۲. روتامتر شیردار، ۳. محفظه دارای اتیل بنزن، ۴. محفظه اختلاط، ۵. صافی زیستی چکنده، ۶. شیر نمونه‌گیری از گاز، ۷. مخزن مایع، ۸. هیتر، ۹. پمپ پرستالتیک، ۱۰. دوش توزیع مایع، ۱۱. هوای خروجی

صافی زیستی یک فضای ۵ سانتی‌متری برای نمونه‌گیری گاز و توزیع دوباره فاز گازی در نظر گرفته شد. گاز آلوده به اتیل بنزن از مخلوط کردن دو جریان گازی تهیه شد، به این ترتیب که یک جریان هوا با شدت کم از محفظه دارای اتیل بنزن مایع عبور داده می‌شد و سپس با جریان هوای غیرآلوده در یک محفظه اختلاط در هم می‌آمیخت. تغییرهای غلظت اتیل بنزن ورودی با تغییر نسبت شدت جریان‌های هوای ورودی تنظیم می‌شد. جریان در سامانه به صورت ناهمسو در نظر گرفته شد به گونه‌ای که فاز گاز از قسمت پایین و مایع از بالا وارد ستون می‌شدند. یک مخزن ۵ لیتری برای تأمین مواد مغذی مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها در نظر گرفته شد. از یک دوش از جنس پلکسی‌گلاس در قسمت بالای ستون صافی زیستی چکنده به منظور پاشش فاز مایع به صورت قطره‌ای استفاده شد. مایع توسط یک پمپ پرستالتیک با شدت جریان ۱۰۰ میلی لیتر در دقیقه به صورت پیوسته به بالای ستون صافی زیستی پمپ شده و از قسمت پایینی ستون خارج و به مخزن مواد مغذی هدایت می‌شد، و سپس دوباره به گردش در می‌آمد. برای تنظیم دمای مایع از یک بخاری گرم‌کن با قابلیت تنظیم دما استفاده شد که دمای مایع را روی ۳۲ درجه سلسیوس کنترل می‌کرد. pH مایع همواره بین ۶-۷ کنترل می‌شد.

برای تلقیح صافی زیستی چکنده از مخلوط شیرابه کمپوست و آب زیر زمینی آلوده به اتیل بنزن در یک منطقه صنعتی استفاده شد. برای آماده سازی پرکن‌ها از یک ظرف ۲۰ لیتری دربسته با سامانه گردش محیط کشت استفاده شد. پس از افزودن دو لیتر محیط کشت به همراه شیرابه کمپوست و آب آلوده حاوی اتیل بنزن (به عنوان تنها منبع کربن)، سامانه در دمای ۳۲ درجه سلسیوس گرماگذاری و محیط کشت به صورت قطره‌ای روی پرکن‌ها پاشش شد. پس از گذشت ده روز و دیدن تغییر رنگ سطح، پرکن‌ها به ستون صافی زیستی چکنده منتقل شدند.

#### دستگاه‌ها

صافی زیستی چکنده مورد استفاده در این پژوهش از جنس پلکسی‌گلاس، به شکل استوانه و با ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر، قطر ۱۲ سانتی‌متر و حجم مفید ۴/۷ لیتر ساخته شد. شکل ۱ مطابق شکل، پرکن‌ها در دو بخش مجزا از ستون قرار گرفتند که ارتفاع؛ هر بخش ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. از صفحه‌های مشبک از جنس پلکسی‌گلاس به منظور نگهداری پرکن‌ها و همچنین توزیع گاز استفاده شد. در بالای هر بخش از

## روش‌ها

به منظور اندازه‌گیری اختلاف فشار دو سر ستون صافی زیستی چکنده از یک مانومتر استفاده شد. برای سنجش غلظت اتیل بنزن در فاز گاز دستگاه TVOC detector ساخت شرکت Ionscience به کار برده شد. از دستگاه CO<sub>2</sub> analyzer ساخت شرکت Kimo برای اندازه‌گیری کربن دی اکسید در جریان گازی استفاده شد. عملکرد راکتورهای زیستی برای کنترل آلودگی هوا به طور عمومی با پارامترهای بازدهی حذف<sup>(۱)</sup>، یا ظرفیت حذف آلاینده<sup>(۲)</sup> که تابعی از بار آلودگی<sup>(۳)</sup> و یا زمان اقامت بستر خالی<sup>(۴)</sup> می‌باشد، بیان می‌شود. این جمله‌ها در این قسمت توضیح داده شده است [۹، ۱۰]:

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

$$\text{Pollutant Elimination Capacity} = \frac{(C_{in} - C_{out})}{V} \times Q \quad (\text{g/m}^3\text{h}) \quad (2)$$

$$\text{Empty Bed Retention Time} = \text{EBRT} = \frac{V}{Q} \quad (\text{min}) \quad (3)$$

$$\text{Pollutant Loading} = \frac{C_{in}}{V} \times Q \quad (\text{g/m}^3\text{h}) \quad (4)$$

$C_{in}$  و  $C_{out}$ : غلظت ورودی و خروجی آلاینده ( $\text{g/m}^3$ )

$V$ : حجم ستون فیلتر زیستی (قسمت پر شده با پرکن‌ها)، ( $\text{m}^3$ )

$Q$ : شدت جریان هوا ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

غلظت گاز معمولا به صورت جرمی (جرم به واحد حجم) بیان می‌شود، به منظور تبدیل غلظت حجمی ( $\text{ppm}_v$ ) به غلظت جرمی گاز از معادله حالت گازهای ایده آل استفاده می‌شود [۱۶]:

$$\text{Concentration (g/m)} = \frac{\text{Concentration (ppmv)}}{24776} \times \frac{\text{Molecular weight of pollutant (g/mol)}}{24776} \quad (5)$$

در محاسبه زمان اقامت،  $V$  حجم خالی بستر است. البته زمان ماند واقعی گاز به دلیل تخلخل بستر، وجود آب و زیست توده، کم‌تر از این میزان خواهد بود.

## نتیجه‌ها و بحث

عملکرد صافی زیستی چکنده در حذف گاز آلوده به اتیل بنزن طی ۹۵ روز مورد مطالعه قرار گرفت. دوره راه اندازی<sup>(۵)</sup> حدود ۳۰ روز به طول انجامید که طی این دوره غلظت اتیل بنزن در حدود ۰٫۵ گرم بر متر مکعب تنظیم شد. هدف از این مرحله رشد میکروارگانیسم‌ها و تشکیل فیلم زیستی میکروبی می‌باشد. بیش‌تر صافی‌های زیستی چکنده با بار ورودی پایین راه اندازی می‌شوند و سپس با رشد زیست‌توده، آلاینده به طور کامل حذف می‌شود و راکتور به حالت پایدار می‌رسد. پس از دوره راه اندازی، بار ورودی به تدریج افزایش داده می‌شود تا سامانه آمادگی تصفیه بارهای ورودی بالاتر را پیدا نماید [۱۴]. در این پژوهش، آزمایش‌ها با افزایش تدریجی غلظت تا حدود ۲٫۵ گرم بر مترمکعب و شدت جریان گاز ۴٫۷ لیتر بر دقیقه و زمان اقامت حدود یک دقیقه انجام شد.

غلظت اتیل بنزن در جریان گاز ورودی و خروجی به همراه بازدهی حذف اتیل بنزن در روزهای گوناگون کاری در شکل ۲ نشان داده شده است. اولین روز پس از دوره راه اندازی به عنوان روز یکم در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲ در ۲۰ روز ابتدایی، افت بازدهی به طرز چشمگیری در چند روز دیده می‌شود که این کاهش بازدهی ناشی از اتمام مواد مغذی مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها بود. در ادامه کار با سریع‌تر تجدید نمودن محلول مواد مغذی این مشکل رفع شد. همچنین، عامل دیگری که باعث کاهش چشمگیر بازدهی می‌شود، افزایش شدید غلظت ورودی آلاینده است. این مورد در روز ۵۲ام دیده می‌شود که بازدهی حذف تا حدود ۵۰٪ افت کرده و پس از گذشت چند روز دوباره به بازدهی مطلوب حدود ۹۰٪ می‌رسد.

در شکل ۳ اثر بارگذاری جرمی اتیل بنزن در جریان هوای ورودی بر ظرفیت حذف صافی زیستی چکنده نشان داده شده است. ظرفیت حذف (در شرایط پایدار) و بارگذاری ورودی تا حدود بار ورودی ۹۰ گرم بر مترمکعب در ساعت (بار ورودی بحرانی) رابطه‌ای خطی دارند و به تقریب تمام اتیل بنزن ورودی توسط میکروارگانیسم‌ها حذف می‌شود. در مقادیر بالاتر از بار بحرانی ظرفیت حذف با سرعت کم‌تری افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت (بیشینه ظرفیت حذف) برسد. بیشینه ظرفیت حذف اتیل بنزن در صافی زیستی چکنده ۱۳۳ گرم بر مترمکعب در ساعت با بازدهی حذف ۹۳ درصد به دست آمد که در مقایسه با کارهای همانند چشمگیر است. جدول ۲ نتیجه‌های مقایسه

(۱) Removal efficiency

(۲) Pollutant elimination capacity

(۳) Pollutant loading

(۴) Empty bed retention time

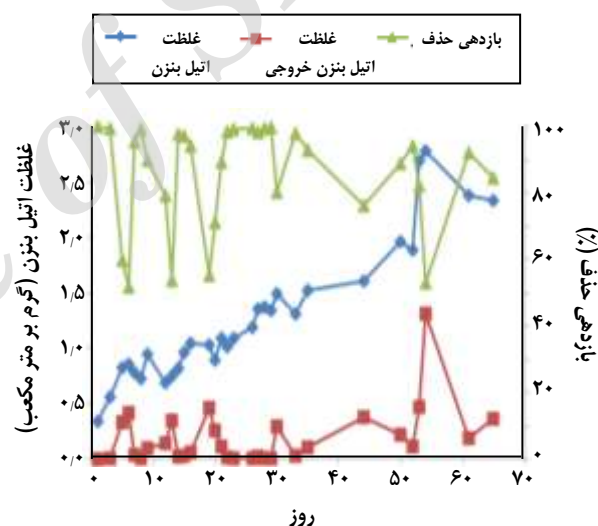
(۵) Start-up

جدول ۲- مقایسه ظرفیت حذف اتیل بنزن در صافی زیستی سنتی و صافی زیستی چکنده در این پژوهش با پژوهش‌های قبلی.

مرجع	EBRT (S)	ظرفیت حذف (g/m <sup>3</sup> h)	بار ورودی (g/m <sup>3</sup> h)	حجم مفید (لیتر)	نوع پرکن	مایه تلقیح
[۱۱]	۴۰	۴۷٫۹۵	۶۴٫۸	۳٫۱۱	پلی اورتان فوم	لجن فعال
		۸۲٫۲۱	۱۳۰٫۵			
		۱۰۲٫۰۶	۱۸۹			
[۱]	۶۰	۴۵	۱۲۷	۰٫۱۱۹	پرلیت گرانوله	مخلوط میکروبی به دست آمده از سایت آلوده
[۵]	۱۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۱٫۱۸	کود گیاهی	لجن فعال
[۶]	۲۳۰	۱۷۰	۱۸۶	۴٫۵	خاک اره و کمپوست	لجن فعال هوازی
	۱۰۰	۱۱۶	۱۴۶			
پژوهش حاضر	۶۰	۱۳۳	۱۴۳	۴٫۷	پال رینگ	مخلوط میکروبی حاصل از شیرابه کمپوست و آب زیرزمینی آلوده به اتیل بنزن

به عمل آمد. مطابق شکل ۴، میزان حذف اتیل بنزن در بخش پایینی ستون که در نزدیکی ورودی گاز آلوده به صافی زیستی است، بیش تر می‌باشد. در نزدیکی ورودی، آلایندگی بیشتر در دسترس میکروارگانیسم‌ها بوده و در نتیجه رشد زیست توده و میزان حذف آلایندگی بیشتر است [۷]. با افزایش غلظت آلایندگی، منبع کربن بیشتر در اختیار میکروارگانیسم‌های بخش بالایی ستون قرار گرفته و تجزیه زیستی اتیل بنزن به شکل همگن‌تری نسبت به ارتفاع انجام می‌شود [۸]. برای نمونه، در غلظت‌های ۰٫۵۵۷ و ۱٫۸۹ گرم بر متر مکعب به ترتیب ۹۹ و ۶۶ درصد از آلایندگی در بخش پایینی ستون حذف می‌شود.

در شکل ۵ تغییرهای نرخ تولید کربن دی‌اکسید نسبت به ظرفیت حذف اتیل بنزن نشان داده شده است. در محاسبه نرخ تولید کربن دی‌اکسید، غلظت کربن دی‌اکسید هوای ورودی به طور میانگین ۱٫۰۶۶ گرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شد که از غلظت کربن دی‌اکسید خروجی کسر شد. تولید کربن دی‌اکسید شاخصی برای تخریب زیستی آلایندگی اتیل بنزن می‌باشد. مطابق شکل ۵ با افزایش ظرفیت حذف اتیل بنزن، کربن دی‌اکسید بیشتری تولید می‌شود که این روند مؤید این است که حذف آلایندگی توسط تجزیه زیستی صورت گرفته و ناشی از جذب فیزیکی نمی‌باشد [۱]. شیب برازش خطی، بیانگر میزان کربن دی‌اکسید تولید شده نسبت به اتیل بنزن مصرفی توسط جمعیت میکروبی بوده و عرض از مبدا آن ناشی از متابولیسم درون سلولی می‌باشد [۱۷].



شکل ۲- غلظت اتیل بنزن در جریان گاز ورودی و خروجی و بازدهی حذف در روزهای گوناگون کاری.

پژوهش حاضر را با دیگر پژوهش‌ها که از صافی زیستی چکنده و یا صافی‌های زیستی سنتی برای حذف اتیل بنزن استفاده شده است، نشان می‌دهد.

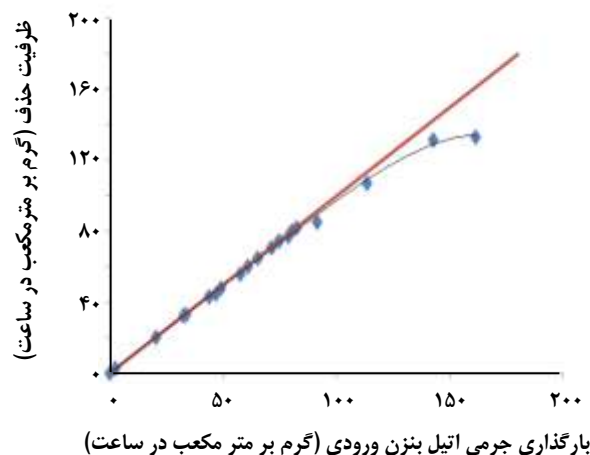
شکل ۴ نمودار غلظت بی‌بعد اتیل بنزن را نسبت به ارتفاع بستر نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱، ستون صافی زیستی چکنده شامل دو بخش است که هر یک به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری (خروجی از بخش پایینی ستون) و ۵۰ سانتی‌متری (خروجی از بخش بالایی ستون) نمونه‌گیری

گرفتگی صافی‌های زیستی چکنده که در نتیجه رشد بیش از اندازه زیست توده ایجاد می‌شود، یکی از مشکل‌های راهبری این سامانه‌ها می‌باشد. شیوه‌های گوناگونی به منظور کنترل زیست توده تولید شده در صافی‌های زیستی چکنده پیشنهاد شده است که در برخی روش‌ها زیست توده اضافی از سامانه خارج می‌شود و در برخی دیگر رشد میکروبی محدود می‌شود. افت فشار دو سر ستون، پارامتر مناسبی برای کنترل زیست توده تولید شده در صافی زیستی است. به ازای هر متر از پرکن، افت فشار سامانه نباید از یک سانتی‌متر آب تجاوز کند [۱۶]. زمانی که افت فشار به بیش از حد مجاز می‌رسید، با استفاده از روش هوا زدن، زیست توده اضافی از ستون خارج می‌شد. در این روش، ستون از آب پر شده و هوا با سرعت بالا به ستون وارد می‌شد به صورتی که پرکن‌ها به حالت شناور قرار می‌گرفت [۱۸]. بدین ترتیب زیست توده اضافه از فضای بین پرکن‌ها و از داخل آن‌ها خارج می‌شد. شکل ۶ تصویر پرکنی که بر روی آن جمعیت میکروبی رشد کرده است را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت آلاینده، رشد میکروارگانیسم‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و لازم است سامانه نسبت به زمان، دفعه‌های بیشتری شستشو داده شود. برای مثال، در بازه‌ی غلظت‌های بالا شستشو به صورت هفته‌ای یک یا دو بار مورد نیاز است در حالی که در بازه‌ی غلظت‌های پایین شستشو به صورت ماهیانه کفایت می‌کند.

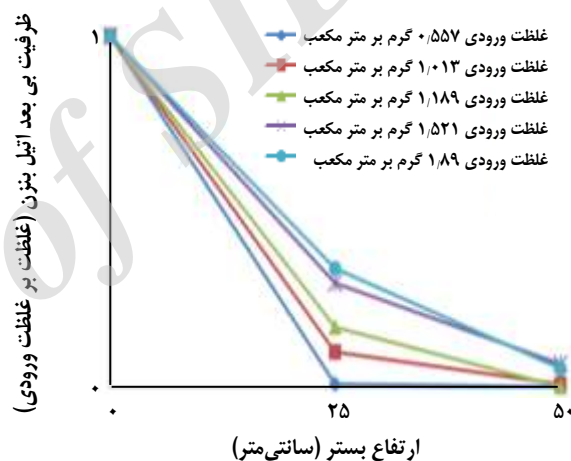
### نتیجه‌گیری

حذف آلاینده اتیل بنزن در فاز گازی در صافی زیستی چکنده تلقیح شده با مخلوط میکروارگانیسم‌های بومی و دارای پرکن پال رینگ، طی ۹۵ روز کاری مورد مطالعه قرار گرفت که نتیجه‌ها بیانگر عملکرد مناسب این سیستم بود. هوای آلوده به اتیل بنزن در غلظت‌های بالا (۲/۵ گرم بر متر مکعب) با بازدهی حذف بالای ۹۰ درصد تصفیه شد. بیشینه ظرفیت حذف صافی زیستی، ۱۳۳ گرم بر متر مکعب در ساعت به دست آمد که در مقایسه با کارهای همانند، دلخواه می‌باشد.

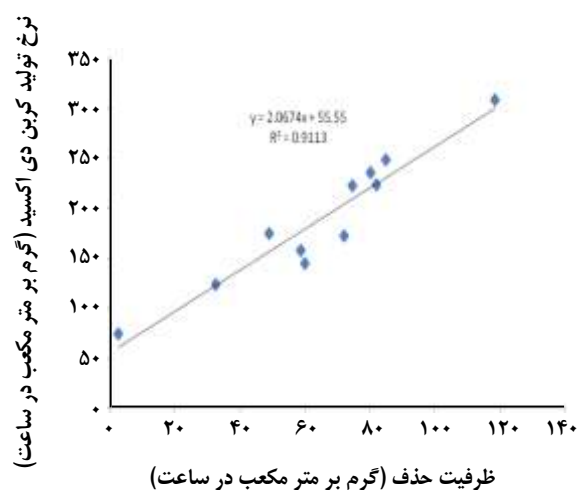
یکی از مشکل‌های جدی سامانه‌های صافی زیستی در مسیر صنعتی شدن، گرفتگی ستون و افت فشار دو سر آن در اثر رشد میکروارگانیسم‌ها در غلظت بالای آلاینده است. استفاده از پرکن پال رینگ در این گونه سامانه‌ها از مشکل‌های تراکم و گرفتگی می‌کاهد و به کارگیری آن در صافی‌های زیستی چکنده توصیه می‌شود. در این پژوهش، برای جلوگیری از گرفتگی و کاهش افت فشار،



شکل ۳- اثر بارگذاری جرمی اتیل بنزن ورودی بر ظرفیت حذف.



شکل ۴- غلظت بی‌بعد اتیل بنزن نسبت به ارتفاع ستون.



شکل ۵- نرخ تولید کربن دی‌اکسید نسبت به ظرفیت حذف اتیل بنزن.

سامانه با روش دمیدن هوا در آب شستشو داده شد که روشی مؤثر برای جداسازی فیلم زیستی بود و می‌تواند راهکاری مناسب در سامانه‌های صنعتی پیوسته باشد.



شکل ۶ - تشکیل فیلم زیستی میکروبی در سطح پرکن پال رینگ.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

## مراجع

- [1] Hinojosa-Reyes, M., Rodríguez-González V., Arriaga S., [Enhancing Ethylbenzene Vapors Degradation in a Hybrid System Based on Photocatalytic Oxidation UV/TiO<sub>2</sub>-In and a Biofiltration Process](#), *Journal of Hazardous Materials*, **209**: 365-371 (2012).
- [2] Ravi R., Philip L., Swaminathan T., [Comparison of Biological Reactors \(Biofilter, Biotrickling Filter and Modified RBC\) for Treating Dichloromethane Vapors](#), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **85**(5): 634-639 (2010).
- [۳] صالح احمدی، ر.، حلاج، ر.، ضمیر، س.م.، مدل سازی فرایند حذف هگزان در فیلتر زیستی قارچی با دمای متغیر و بارگذاری پیوسته و ناپیوسته، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۳۱: ۸۳ تا ۹۵ (۱۳۹۱).
- [4] Mudliar S., Giri B., Padoley K., Satpute D., Dixit R., Bhatt P., Pandey R., Juwarkar A., Vaidya A., [Bioreactors for Treatment of VOCs and Odours—A Review](#), *Journal of Environmental Management*, **91**(5): 1039-105 (2010).
- [5] Álvarez-Hornos F., Gabaldon C., Soria M., Martin M., Marzal P., Peña-roja J.M., [Biofiltration of Ethylbenzene Vapours: Influence of the Packing Material](#), *Bioresource Technology*, **99**(2): 269-276 (2008).
- [6] Gallastegui G., Barona A., Rojo N., Gurtubay L., Elias A., [Comparative Response of Two Organic Biofilters Treating Ethylbenzene and Toluene After Prolonged Exposure](#), *Process Safety and Environmental Protection*, **91**(1): 112-122 (2013).
- [7] Kennes C., Veiga M.C., "Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy", John Wiley & Sons (2013).
- [8] Namini M., Heydarian S.M., Bonakdarpour B., Farjah A., [Removal of H<sub>2</sub>S from Synthetic Waste Gas Streams Using a Biotrickling Filter](#), *Iranian Journal Chemical Engineering*, **5**: 40-51 (2008).

- [9] Iranpour R., Cox H., Deshusses M., Schroeder E., [Literature Review of Air Pollution Control Biofilters and Biotrickling Filters for Odor and Volatile Organic Compound Removal](#), *Environmental Progress*, **24**(3): 254-267 (2005).
- [10] Kennes C., Rene E.R., Veiga M.C., [Bioprocesses for Air Pollution Control](#), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **84**(10): 1419-1436 (2009).
- [11] Wang L., Rong C., Cheng Y., Huang J., Yang H., zeng G., Lu L., He S., [Enhanced Removal of Ethylbenzene from Gas Streams in Biotrickling Filters by Tween-20 and Zn \(II\)](#), *Journal of Environmental Sciences*, **26**(12): 2500-2507 (2014).
- [12] Mohamed M., Ouki S.K., [Kinetic and Removal Mechanisms of Ethylbenzene from Contaminated Solutions by Chitin and Chitosan](#). *Water, Air, & Soil Pollution*, **220**(1): 131-140 (2011).
- [13] Santos V.P., Bakker J.J.W., Krevutzer M.T., Kapteinjn F., Gascon J., [Transport Limitations During Phase Transfer Catalyzed Ethyl-Benzene Oxidation: Facts and Fictions of Halide Catalysis](#), *ACS Catalysis*, **2**(7): 1421-1424 (2012).
- [14] Tranfo G., "Benzene and its Derivatives: New Uses and Impacts on Environment and Human Health". Nova Science Publishers Incorporated (2012).
- [15] Mpanias C.J., Baltzis B.C., [An Experimental and Modeling Study on the Removal of Mono-Chlorobenzene Vapor in Biotrickling Filters](#), *Biotechnology and Bioengineering*, **59**(3): 328-343 (1998).
- [16] Deshusses M.A., Cox H.H.J., "Biotrickling Filters for Air Pollution Control, in *Encyclopedia of Environmental Microbiology*", John Wiley & Sons, Inc (2003).
- [17] 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).
- [18] Kennes C., Veiga M.C., [Inert Filter Media for the Biofiltration of Waste Gases-Characteristics and Biomass Control](#), *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **1**(3): 201-214 (2002).