

## بررسی تجربی حذف زیستی هیدروژن سولفید از گاز دفنگاه شهر شیراز

حدیجه عبادی، جعفر جوانمردی\*<sup>+</sup>، پیام پرواسی، علی اکبر روستا

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

**چکیده:** آلودگی محیط زیست و انتشار گازهای سمی از مهم‌ترین معضله‌های بشر در این سده است. از جمله گازهای آلوده‌ای که با دارا بودن درصد بالای متان می‌تواند به عنوان منبعی وافر از انرژی استفاده شود، گاز دفنگاه است. یکی از روش‌های ساده و کم‌هزینه برای حذف آلاینده‌هایی مانند هیدروژن سولفید که گازی به شدت سمی و خورنده است، تصفیه زیستی می‌باشد. در این روش با عبور گاز آلوده از میان بستری دارای میکروارگانیسم، تصفیه صورت می‌گیرد. در این پژوهش نیز به منظور بررسی کارایی صافی زیستی در حذف آلاینده هیدروژن سولفید از گاز دفنگاه شهر شیراز، ستون صافی زیستی از جنس پلگسی گلاس با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ متر طراحی و ساخته شد. این ستون با بستر طبیعی دارای ورمی‌کمپوست تولید شده در دفنگاه و گوش ماهی پر شد. سپس باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس که پیش‌تر در محیط آزمایشگاه کشت داده شده بود روی سطح پرکن‌ها تثبیت شد. کارایی این صافی زیستی با غلظت (ppm) ۳۰ و شدت جریان حجمی گوناگون از گاز دفنگاه در شرایط دمایی محیط و فشار اتمسفری بررسی شد. با توجه آزمایش‌ها دیده می‌شود که در زمان ماند ۲ دقیقه به بازده بالای ۸۰ درصد رسید که در این شرایط غلظت سولفید هیدروژن خروجی دلخواه است. البته در آزمایش‌ها بازدهی حذف دستگاه برای غلظت (ppm) ۳۰ در شدت جریان ۲ لیتر بر دقیقه، ۹۰ درصد نیز به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** گاز دفنگاه؛ هیدروژن سولفید؛ صافی زیستی؛ آلودگی.

**KEYWORDS:** Land-fill gas; Hydrogen sulfide; Biofilter; Pollution.

### مقدمه

انسان‌ها از دوره‌ی چادرنشینی به زندگی کشاورزی رها کردن زباله‌ها در محیط زندگی انسان تبدیل به مشکلی در حال رشد شد. بنابراین با افزایش جمعیت شهرها فضای کافی برای دفع زباله‌ها کاهش یافت و جوامع به فکر توسعه سامانه‌های دفع دور ریزها افتادند. بدین ترتیب دفنگاه<sup>(۱)</sup> که ساختاری با طراحی دقیق، در زیر زمین یا روی خاک، برای جداسازی زباله و ضایعات از محیط اطراف می‌باشد، ساخته شد [۱-۳].

پیش از انقلاب صنعتی، زباله‌ها به‌طور عمده شامل خاکستر، چوب، استخوان، لاشه حیوان‌ها و ضایعات سبزی‌ها بود. این مواد در خاک دفن می‌شدند و به عنوان کمپوست<sup>(۱)</sup> عمل کرده و به تقویت خاک کمک می‌کرده‌اند. در گذشته هر آنچه که قابل استفاده دوباره بوده به کار گرفته می‌شد، جمعیت انسان‌ها کم بود و مردم در گروه‌های متمرکز کوچک زندگی می‌کردند، بنابراین تولید زباله مسئله مهمی محسوب نمی‌شد. ولی با تحول زندگی

\*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: javanmardi@stuech.ac.ir

(۱) Compost

(۲) Landfill

و روش‌های زیستی است. با توجه به هزینه‌های بالای عملیاتی و روش‌های فیزیکی - شیمیایی و مزیت ارزان‌تر بودن نصب ماشین آلات و پایین بودن هزینه‌های راهبردی در روش‌های زیستی [۹، ۱۰]، این روش برای بررسی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. تصفیه زیستی را می‌توان به اکسیداسیون کاتالیستی در دمای پایین تشبیه کرد که نیاز به سوخت و مواد شیمیایی ندارد. کاتالیست (آنزیم‌های میکروبی) به طور مداوم توسط میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شود و تصفیه زیستی هیچ ماده آلوده کننده ثانویه مثل  $CO$ ،  $NO_x$  یا ضایعات خطرناک تولید نمی‌کند [۱۱]. روش‌های تصفیه زیستی به سه سامانه گازشوی زیستی<sup>(۱)</sup>، صافی زیستی چکنده<sup>(۲)</sup> و صافی زیستی<sup>(۳)</sup> تقسیم می‌شوند.

در میان سه سامانه موجود در روش‌های زیستی، صافی زیستی به خاطر سادگی و کم هزینه بودن نسبت به دو سامانه دیگر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]. این روش برای مواردی که غلظت مواد آلاینده کم باشد و همچنین اجزاء آلوده کننده نیز زیست تخریب پذیر باشند روشی ایده ال است [۹]. بیش‌تر صافی‌های زیستی دارای طراحی جریان رو به بالا هستند و شامل ستونی استوانه‌ای از مواد پکینگ می باشند [۱۲]. یک صافی زیستی در اصل بیوراکتوری سه فازی است که از بستر صافی با تخلخل بالا، ظرفیت بافری زیاد، توانایی داشتن مواد مغذی، و خاصیت نگهداری رطوبت، ساخته شده است. جریان گازی آلوده به صورت پیوسته به صافی زیستی تغذیه می شود [۱۳]. به طور معمول جریان گاز به صورتی است که می توان آن را به صورت جریان آرام فرض کرد. زمانی که جریان گاز از روی پکینگ ها عبور می‌کند آلاینده ها از گاز به آب درون فیلم زیستی منتقل می‌شوند. آلاینده ها به عمق فیلم زیستی نفوذ می‌کنند و میکروارگانیسم‌های درون فیلم زیستی آلاینده‌ها را جذب و آن‌ها را تجزیه می کنند [۱۴]. با توجه به موردهای یاد شده و با توجه به سادگی نصب، راهبری، کنترل، تعمیر و نگهداری و انعطاف پذیری و کم خرج بودن سامانه صافی زیستی این روش از ارزش ویژه ای برخوردار است و از نقطه نظر اقتصادی نیز به دلیل پایین بودن سرمایه گذاری ثابت و هزینه های جاری بر دیگر روش ها ارجحیت دارد [۱۰]. تاکنون بیش‌ترین استفاده‌ای که از صافی‌های زیستی شده برای حذف ناخالصی از هوا بوده و برای استفاده از صافی زیستی در فرایند تصفیه گاز دفنگاه به صورت صنعتی، نخست باید پارامترهای طراحی آن طوری بهینه شوند



شکل ۱- دفنگاه جدید [۶].

در گذشته مقررات خاصی در مورد مکان دفن زباله‌ها وضع نشده بود و دفنگاه‌ها مکان‌هایی بدبو و بدون پوشش بودند که معضلات زیست محیطی فراوانی ایجاد می‌کردند. امروزه در بسیاری از دفنگاه‌ها از سامانه مانیتورینگ برای تشخیص آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود [۴، ۵]. یکی از این دفنگاه‌های جدید در شکل ۱ دیده می‌شود. همچنین در جدول ۱ نمونه‌ای از ترکیب گاز دفنگاه نیز آورده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود متان بخش اصلی گاز دفنگاه را تشکیل می‌دهد. این گاز به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به هوا از میان فضاهای خالی و محدود زباله‌ها و خاک پوشاننده دفنگاه عبور کرده و به اتمسفر تخلیه می‌شود. هر تن گاز متان منتشر شده در هوا به اندازه ۱۲ تن کربن دی‌اکسید در طول یک دوره زمانی ۱۰۰ ساله، بر گرمایش آب و هوای جهانی اثر می‌گذارد [۸]. با توجه به شرایط بالا استفاده بهینه از انرژی موجود در گاز دفنگاه ضروری به نظر می‌رسد. ولی مشکل اساسی در استفاده از گاز دفنگاه وجود آلاینده‌هایی مانند هیدروژن سولفید است. افزون بر بوی نامطبوع، هیدروژن سولفید گازی به شدت سمی است. همچنین وجود  $H_2S$  برای تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده می‌تواند خورنده باشد و هزینه‌ی ساخت دستگاه‌هایی که در برابر خوردگی مقاوم باشند نیز زیاد است. بنابراین حذف این آلاینده که سنگین‌تر از هواست، از گاز دفنگاه ضروری به نظر می‌رسد. مهم‌ترین روش‌های حذف این آلاینده روش‌های فیزیکی - شیمیایی

(۱) Bioscrubber

(۲) Bitrickling filter

(۳) Biofilter

جدول ۱- نمونه‌ای از ترکیب گاز دفنگاه [۷].

اجزاء	درصد حجمی (بر مبنای حجم خشک)
متان	۴۷٫۵
دی اکسیدکربن	۴۷
نیتروژن	۳٫۷
اکسیژن	۰٫۸
هیدروکربن‌های پارافینی	۰٫۱
هیدروکربن‌های آروماتیک و حلقوی	۰٫۲
هیدروژن	۰٫۱
هیدروژن سولفید	۰٫۰۱
مونواکسیدکربن	۰٫۱
ترکیب‌های کم مقدار	۰٫۵

مناسب است. *Shareefdeen* و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۲ میلادی نتیجه‌های به دست آمده از صافی زیستی تجاری که در کانادا به کار گرفته شده بود را ارائه دادند. این صافی زیستی جریان هوای آلوده به چندین ترکیب بودار شامل دی متیل سولفید، آمونیاک، متان تیول، هیدروژن سولفید و اتیل آمین را تصفیه می‌کرد. در این مطالعه، نتیجه‌های به دست آمده از صافی زیستی نصب شده در تلمبه خانه پساب شهری در کانادا، مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌ها نشان داد که برای غلظت‌های ورودی کم‌تر از ۱۲ ppm، حدود ۲۰ ثانیه زمان اقامت برای حذف کامل  $H_2S$  از جریان هوا کافی است. پس از آن در سال ۲۰۱۰ میلادی نیز *Shareefdeen* و همکاران [۱۸] محیط جدیدی را برای صافی زیستی در تلمبه خانه مربوط به شهرداری در امارات متحده عربی، برای حذف  $H_2S$  بررسی کردند. با استفاده از این بستر جدید بیش از ۹۹٪ بازدهی حذف هیدروژن سولفید به دست آمد که نشان می‌دهد سامانه جدید در حذف هیدروژن سولفید کارساز بوده است. *Oyarzun* و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۳ میلادی، سامانه صافی زیستی را در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از پیت به عنوان نگهدارنده برای باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس برای تصفیه جریان‌های گازی شامل غلظت‌های بالای  $H_2S$ ، به کار گرفتند و بیش‌ترین ظرفیت حذف به دست آمده در آزمایش‌های آن‌ها ۵۵ گرم به ازای

که بیش‌ترین درصد حذف هیدروژن سولفید و کم‌ترین افت فشار به دست آید.

مطالعه در مورد حذف زیستی ترکیب‌های غیرآلی فرار به طور گسترده انجام شده است. اکثر مطالعه‌ها روی  $H_2S$  و دیگر سولفورها یا ترکیب‌های دارای نیتروژن مثل سولفیدها، مرکاپتان‌ها، متان تیول و یا آمونیاک می‌باشد [۱۱]. *Chung* و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۶ با ساخت یک صافی زیستی در مقیاس آزمایشگاهی، حذف  $H_2S$  توسط باکتری *سدوموناس پوتیلیا* را بررسی کردند و به میانگین بازدهی حذف بالاتر از ۹۰ درصد  $H_2S$  دست یافتند. همچنین *Chung* و همکاران صافی زیستی ساخته شده را با باکتری‌های تیوباسیلوس تیوپاروس<sup>(۱)</sup> و تیوباسیلوس نولوس<sup>(۲)</sup> نیز برای حذف هیدروژن سولفید، مورد آزمایش قرار دادند. سرانجام مشخص شد که ظرفیت حذف  $H_2S$  توسط باکتری تیوباسیلوس نولوس از باکتری‌های دیگر بیش‌تر است. در سال ۲۰۰۰ میلادی، *Cho* و همکاران [۱۶] حذف هیدروژن سولفید را در صافی زیستی با مقیاس آزمایشگاهی و استفاده از گداخته آتشفشانی متخلخل به عنوان حامل باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس<sup>(۳)</sup> مطالعه کردند. با مقدارهایی که برای ظرفیت حذف  $H_2S$  توسط گداخته‌های آتشفشانی به دست آمد نتیجه گرفته شد که این ماده برای حامل میکروارگانیسم‌ها در تصفیه زیستی

(۱) *Thiobacillus thioeparus*

(۲) *Thiobacillus novellus*

(۳) *Thiobacillus thiooxidans*

مدنظر قرار گرفته کارایی صافی زیستی در فشار اتمسفری است که باعث می شود تصفیه گاز دفنگاه توسط صافی زیستی در محل دفنگاه نیز امکان پذیر باشد. شکل ۲ طرح شمای پایلوت صافی زیستی را نشان می دهد.

صافی زیستی ساخته شده لوله ای استوانه ای از جنس پلگسی گلاس با قطر داخلی ۱۴ سانتیمتر و ارتفاع کل ۲ متر می باشد. ستون صافی زیستی به ۴ قسمت اصلی تقسیم شده که ارتفاع هر قسمت ۴۵ سانتیمتر است. ارتفاع ۱۶ سانتیمتر از هر بخش با بستر طبیعی دارای ورمی کمپوست تولید شده در دفنگاه و گوش ماهی پر شده است. مطابق شکل ۲ ورود گاز از قسمت پایین صافی زیستی می باشد. بین کمپرسور و ورودی گاز به صافی زیستی شیر سوزنی قرار داده شد تا کنترل شدت جریان گاز ورودی راحت تر باشد. به فاصله ۱۰ سانتیمتر از بالای بستر در هر بخش صافی زیستی سوراخی برای نمونه گیری تعبیه شده است، به گونه ای که در صورت نیاز به افزودن باکتری به دستگاه نیز می توان از آن استفاده کرد. با توجه به ابعاد ستون صافی زیستی حجم بستر ۱۱٫۳ لیتر است.

#### میکروارگانسیم

با توجه به ماهیت گاز مورد تصفیه و ترکیب آن که دارای متان است استفاده از محیطهایی که دارای مخلوط میکروارگانسیمها هستند را به تقریب ناممکن می سازد. چون تعیین این که در بستر چه میکروارگانسیمهایی وجود دارد کار بسیار مشکلی است و در نتیجه نمی توان از محیطهای آماده مثل لجن فعال یا پساب صنایع که دارای مخلوطی از میکروارگانسیمها هستند استفاده کرد. به دلیل وجود متان در گاز دفنگاه، توجه به این مسئله که میکروارگانسیم موجود در بستر گاز متان را مصرف نکند بسیار دارای اهمیت است. به همین دلیل در صافی زیستی آزمایشگاهی، میکروارگانسمی انتخاب شد که منبع کربن خود را از مواد غیرآلی مانند کربن دی اکسید تأمین کند و متان موجود در گاز مورد تصفیه (گاز دفنگاه) را که کربن آلی دارد استفاده نکند. این نوع باکتریها در اصطلاح اتوتروف<sup>(۳)</sup> نامیده می شوند که هم نیتروژن و هم کربن مورد نیاز خود را از منابع غیرآلی مثل کربن دی اکسید، آمونیاک یا نیتروژن اتمسفری به دست می آورند. با توجه به توضیح ارائه شده باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس که هم در ایران موجود است و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است انتخاب و از مرکز

هر مترمکعب پکینگ در هر ساعت بود. *Noyola* و *Sagastume* [۲۰] در سال ۲۰۰۶ میلادی، تأثیر مخلوط کردن و بهم زدن محیط بستر صافی زیست (کمپوست) بر بازدهی حذف  $H_2S$  را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها عملکرد فاکتورهای عملیاتی مهم مانند رطوبت محیط صافی زیستی، افت فشار و تجمع سولفات را با توجه به مخلوط کردن محیط بستر، ارزیابی کردند. نتیجه های بررسیها نشان داد که عملیات مخلوط کردن بستر مناسب می باشد البته هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی مورد نیاز برای اجرای مخلوط کردن بستر در صافی های زیستی مقیاس کامل باید مورد توجه قرار گیرد. *Lee* و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۶ میلادی، تأثیر فاکتورهایی مانند غلظت ورودی و سرعت را بر بازدهی حذف  $H_2S$  توسط یک نژاد باکتری که توانایی تحمل غلظت های بالای سولفات (که در فرایند تصفیه زیستی تولید می شود) و شرایط pH اسیدی را دارد، بررسی کردند. آن ها سه گونه از باکتری *اسیدیتیوباسیلوس تیواکسیدانس*<sup>(۱)</sup> را مورد مطالعه قرار دادند و دریافته اند که گونه ای از این باکتری با کد AZ11 بیشترین تحمل در برابر سولفات را دارد. *Hossain* و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۹ میلادی سولفورزایی زیست بی هواری گاز طبیعی را با استفاده از باکتری تیوباسیلوس دینیتریفیکانس در یک راکتور زیستی سه فازی بستر سیال شده، انجام دادند و پارامترهای عملیاتی مانند زمان، pH و شدت جریان گاز را برای بیشترین رشد باکتری برای بیشترین بازدهی حذف  $H_2S$  از گاز طبیعی، بهینه کردند. نتیجه های آن ها نشان داد که بیشترین میزان حذف  $H_2S$  برابر با ۹۰٫۸۹٪ است.

با توجه به بررسی کارهای گذشته دیده می شود که در آن ها فرایند ساخت گاز خوراک به صورت تزریق  $H_2S$  به هوا است. اما برتری اصلی پژوهش حاضر این است که از گاز دفنگاه بدون هیچ تغییری استفاده شده است. در نتیجه در این حالت به دلیل میزان کم اکسیژن در گاز دفنگاه بجای فرآوردهی سولفات که اثر خوردگی دارد فرآوردهی گوگرد جامد تولید می شود.

#### تجهیزهای آزمایشگاهی و روش انجام

برای بررسی حذف  $H_2S$  از گاز دفنگاه شیراز از یک پایلوت صافی زیستی استفاده شد. هدف اصلی در انجام آزمایشها این بود که بتوان از اطلاعات به دست آمده، در طراحی صافی زیستی با مقیاس واقعی استفاده کرد. یکی از مسائل مهمی که در آزمایشها

(۱) *Acidithiobacillus thiooxidans*

(۳) Autotroph

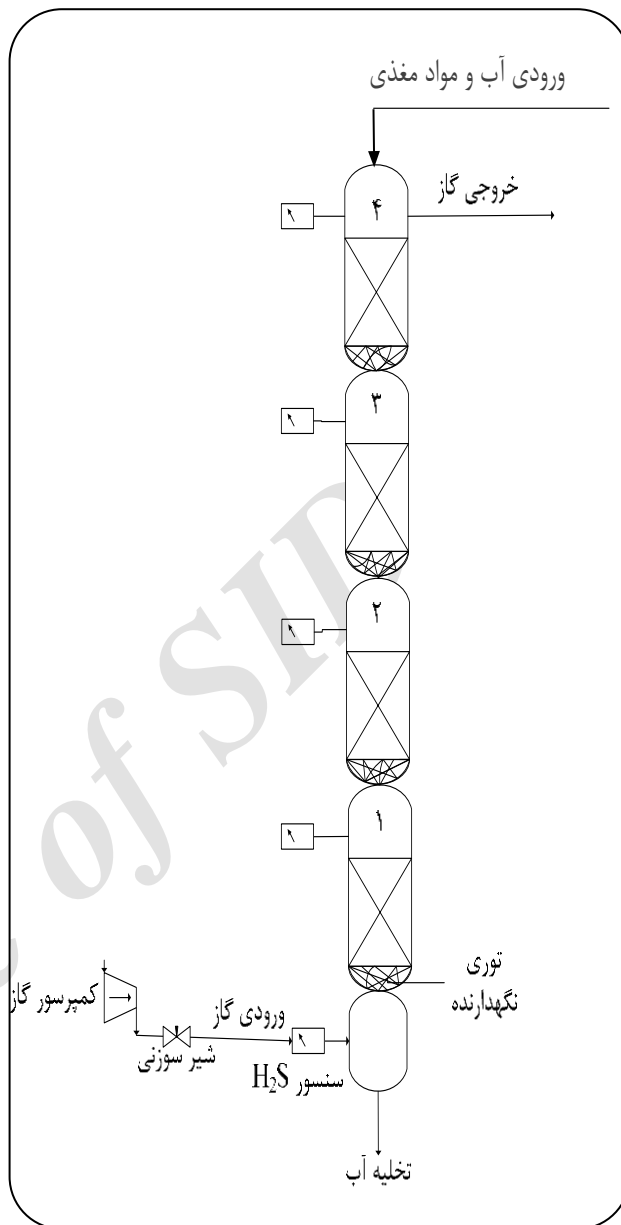
محیط کشت، باید ۹۹۶ میلی لیتر محیط کشت اصلی را با ۳ میلی لیتر محلول ویتامین و ۱ میلی لیتر محلول نمک فلزهای مخلوط کرد. برای رشد باکتری، مقدار کمی از باکتری به محیط کشت که پیش‌تر سترون شده است افزوده می‌شود و به مدت ۵ روز در دمای ۳۰ درجه سلسیوس توسط دستگاه شیکر انکوباتور به هم زده می‌شود تا باکتری به غلظت مناسب برسد. سپس محلول دارای باکتری را به برج جذب منتقل کرده و زمان کافی داده می‌شود تا باکتری روی سطح پرکن‌ها تثبیت شوند.

باکتری انتخاب شده انرژی خود را از اکسیداسیون ترکیب‌های گوگرد به دست می‌آورد. فراورده‌ی معمول اکسیداسیون، سولفات است. ولی در شرایطی که میزان اکسیژن در گاز کم باشد (گاز دفن‌گاه)، به جای سولفات که اثر خوردگی دارد گوگرد جامد تولید می‌شود که بدون هیچ نوع فراورش ثانویه ای قابل دستیابی است. مکانیسم واکنشی که طی آن باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس هیدروژن سولفید را با مقدارهای کم اکسیژن اکسید می‌کند به صورت زیر است:



### گاز مورد مطالعه

گاز آلوده‌ای که برای تصفیه زیستی از آلاینده هیدروژن سولفید انتخاب شده گاز دفن‌گاه شهر شیراز می‌باشد که در دو زمان متفاوت و به فاصله زمانی ۵ ماه، از محل دفن زباله‌های شهر شیراز واقع در برمشور نمونه برداری شد. برای نمونه برداری از کمپرسور گاز که تا فشار ۱۶ bar را تحمل می‌کند، استفاده شده است. پس از آن، ترکیب گاز با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی VARIAN مدل CP 3800 که ستون آن Varian capillary column با مدل CP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و قطر داخلی ۰/۳۲ میلی‌متر بود و سنسور هیدروژن سولفید Dräger مدل X-am 7000 تعیین شد که نتیجه آن در جدول ۳ آمده است. دستگاه کروماتوگرافی گازی یاد شده در وضعیت استاندارد، می‌تواند تا سه تزریق کننده و سه آشکارساز را به صورت همزمان تطبیق دهد. این کروماتوگرافی گازی برای ترکیب گاز طبیعی برسنجی شده است، در نتیجه به سادگی می‌تواند مقدار گاز متان موجود در گاز دفن‌گاه را نشان دهد. در مورد حسگر هیدروژن سولفید می‌توان گفت افزون بر اندازه‌گیری غلظت H<sub>2</sub>S بر حسب (ppm)، غلظت کربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید را نیز به ترتیب بر حسب درصد حجمی و (ppm)



شکل ۲- طرح شمایی پابلوت صافی زیستی.

کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران تهیه شد. باکتری به صورت کشت زنده ی جامد از مرکز کلکسیون دریافت و با محیط کشت اختصاصی باکتری که در ادامه توضیح داده می‌شود رشد داده شد.

اجزای تشکیل دهنده محیط کشت اختصاصی باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس در جدول ۲ نشان داده شده است. محیط کشت از اختلاط سه محلول (محیط کشت اصلی، محلول ویتامین و محلول نمک فلزها) به دست می‌آید. برای تولید ۱۰۰۰ میلی لیتر

جدول ۲- اجزا تشکیل دهنده محیط کشت اختصاصی باکتری تیوباسیلوس تیوپاروس.

Main medium		Vitamins mixture		Trace metals	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (g)	۲	Thiamine-HCl.2 H <sub>2</sub> O (mg)	۱۰	Na <sub>2</sub> - EDTA (g)	۵۰
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (g)	۲	Nicotinic acid (mg)	۲۰	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (g)	۱۱
NH <sub>4</sub> Cl (g)	۰٫۴	Pyridoxine-HCl (mg)	۲۰	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O (g)	۷٫۳۴
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (g)	۰٫۴	p-Aminobenzoic acid (mg)	۱۰	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O (g)	۲٫۵
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (g)	۰٫۲	Riboflavin (mg)	۲۰	CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (g)	۰٫۵
Vitamin solution (ml)	۳	Ca-pantothenate (mg)	۲۰	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O (g)	۰٫۵
Trace metals solution (ml)	۱	Biotin (mg)	۱	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (g)	۵٫۰
Bromocresol purple sol. (ml)	۲	Vitamin B12 (mg)	۱	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O (g)	۲٫۰
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O (g)	۵	Distilled water (ml)	۱۰۰۰	NaOH (ml)	۱۱٫۰
Distilled water (ml)	۱۰۰۰			Distilled water (ml)	۱۰۰۰

جدول ۳- ترکیب گاز دفنگاه شهر شیراز.

مقدار (درصد حجمی)	مواد
۵۰٫۸	متان
۳۸	کربن دی اکسید
۰٫۰۰۲۵۲ (۳۰ ppm)	هیدروژن سولفید
۰٫۰۰۳۳۰ (۳۲ ppm)	کربن مونواکسید
۱٫۵	اکسیژن

هم باکتری‌ها با شرایط جدید (بستر) سازش پیدا کنند. پس از گذشت زمان مناسب به تدریج مقدار شدت جریان افزایش داده شد و در هر شدت جریان، غلظت هیدروژن سولفید در بخش‌های گوناگون ستون صافی زیستی اندازه‌گیری شد و تغییر غلظت خروجی با تغییر شدت جریان دیده شد.

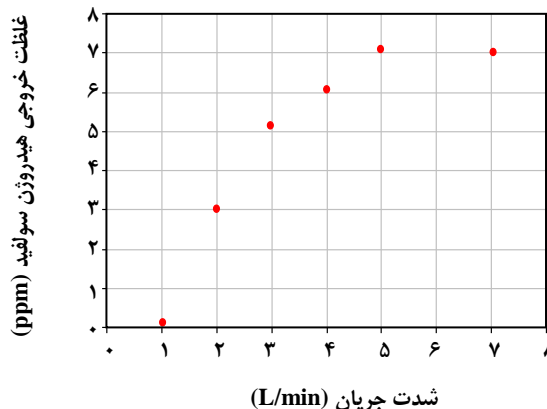
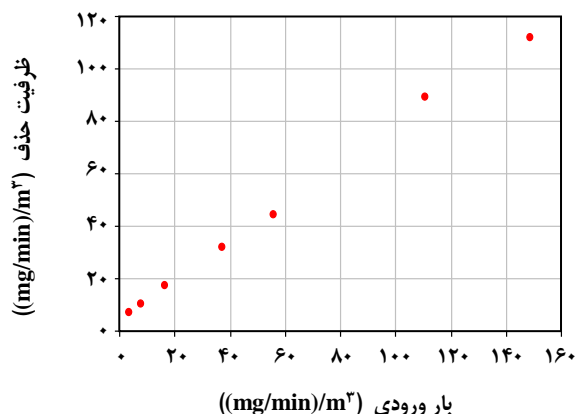
### بحث و نتیجه‌ها

همان‌گونه که در روش انجام آزمایش گفته شد، برای شروع کار ستون صافی زیستی، گاز با شدت جریان کم وارد ستون شد و سپس شدت جریان در غلظت ورودی هیدروژن سولفید ثابت (۳۰ ppm) به تدریج افزایش یافت و با افزایش شدت جریان گاز ورودی تغییرهای غلظت هیدروژن سولفید در خروجی بررسی شد. تغییرها غلظت خروجی گاز H<sub>2</sub>S بر حسب شدت جریان

تعیین می‌کند. همچنین برای اندازه‌گیری دما در محیط کشت باکتری و بستر عبور گاز از حسگر دمای pt-100 استفاده شد و برای اندازه‌گیری pH محیط کشت باکتری از دستگاه pH متر ۳۵۱۰ شرکت JENWAY استفاده شده است.

### روش انجام آزمایش

در ابتدا و برای شروع آزمایش‌ها، در هر بخش از ستون صافی زیستی مقدار ۱۵۰ میلی لیتر محیط کشت دارای باکتری رشد یافته، به بستر اشباع از رطوبت، تزریق شد و زمان کافی داده شد تا باکتری‌ها روی سطح ستر طبیعی دارای ورمی کمپوست و گوش- ماهی تثبیت شوند. آزمایش‌ها با شدت جریان کم گاز آلوده ورودی آغاز شد. سپس به مدت چند ساعت دستگاه با شدت جریان کم برابر ۰٫۵ لیتر بر دقیقه کار کرد تا هم شرایط پایدار شود و



شکل ۴- تغییرات ظرفیت حذف بر حسب بار ورودی گاز H<sub>2</sub>S در غلظت ورودی ۳۰ ppm. میزان عدم قطعیت با سطح اطمینان ۹۵٪ برابر است با: U<sub>c</sub>(pH) = ± 0.01، U<sub>c</sub>(T) = ± 0.1 K و U<sub>c</sub>(concentration) = ± 0.5 ppm.

ظرفیت حذف بر حسب بار ورودی را در غلظت ورودی هیدروژن سولفید ۳۰ ppm نشان می‌دهد.

در ادامه چگونگی تغییر بازدهی حذف در غلظت‌های خروجی گوناگون در شکل ۵ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش بار ورودی هیدروژن سولفید به ازای واحد حجم بستر، بازدهی حذف کاهش یافته که دلیل آن کاهش زمان تماس با افزایش شدت جریان بوده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که صافی زیستی در شدت جریان‌های متفاوت گاز ورودی به خوبی توانایی حذف هیدروژن سولفید را داشته است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است در شدت جریان‌های بالای گاز ورودی بازدهی کاهش زیادی داشته که بیانگر این است که با توجه به غلظت کم ورودی نباید شدت جریان افزایش زیادی داشته باشد.

همچنین در شکل ۵ دیده می‌شود که در بار ورودی ۷/۳۸ mg/m<sup>3</sup>/min بازدهی حذف ۹۰ درصد به دست آمده است. در این نقطه غلظت هیدروژن سولفید از ۳۰ ppm به کم‌تر از مقدار حد استاندارد H<sub>2</sub>S در خطوط لوله گاز که ۴ ppm است، نیز می‌رسد. در پایان تغییرهای بازدهی حذف هیدروژن سولفید نسبت به زمان اقامت گاز درون ستون صافی زیستی، در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که با افزایش زمان اقامت گاز

شکل ۳- تغییرهای غلظت خروجی گاز H<sub>2</sub>S بر حسب شدت جریان گاز ورودی حاوی H<sub>2</sub>S با غلظت ثابت ۳۰ ppm. میزان عدم قطعیت<sup>(۱)</sup> با سطح اطمینان<sup>(۲)</sup> ۹۵٪ برابر است با: U<sub>c</sub>(pH) = ± 0.01، U<sub>c</sub>(T) = ± 0.1 K و U<sub>c</sub>(concentration) = ± 0.5 ppm.

در شکل ۳ آورده شده است. براساس نمودار ارایه شده با افزایش شدت جریان ورودی، غلظت خروجی افزایش یافته که این نتیجه به دلیل کاهش زمان تماس گاز با بستر است. با توجه به ابعاد ستون صافی زیستی که در بخش تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام ارایه شد و اندازه گیری شدت جریان و غلظت خروجی و ورودی هیدروژن سولفید می‌توان پارامترهای عملیاتی مانند بار ورودی (L)<sup>(۳)</sup>، ظرفیت حذف (EC)<sup>(۴)</sup> و بازدهی حذف (R%)<sup>(۵)</sup> را به ترتیب مطابق معادله های (۲) تا (۴) محاسبه کرد و در نتیجه تغییر این پارامترها را با غلظت خروجی هیدروژن سولفید بررسی نمود.

$$L = \frac{QC_i}{V} \quad (2)$$

$$EC = \frac{Q(C_i - C_e)}{V} \quad (3)$$

$$R\% = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (4)$$

در معادله های بالا L بار ورودی (mg/m<sup>3</sup>/min)، EC ظرفیت حذف (mg/m<sup>3</sup>)، R% بازدهی حذف، C<sub>i</sub> غلظت ورودی آلاینده (mg/m<sup>3</sup>)، C<sub>e</sub> غلظت خروجی آلاینده (mg/m<sup>3</sup>)، Q شدت جریان گاز (lit/min) و V حجم صافی زیستی (lit) است. شکل ۴ تغییر

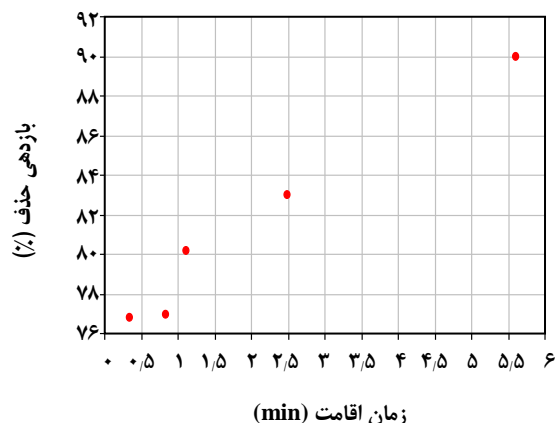
(۱) Uncertainty

(۲) Level of confidence

(۵) Elimination capacity

(۳) Input load

(۴) Removal efficiency



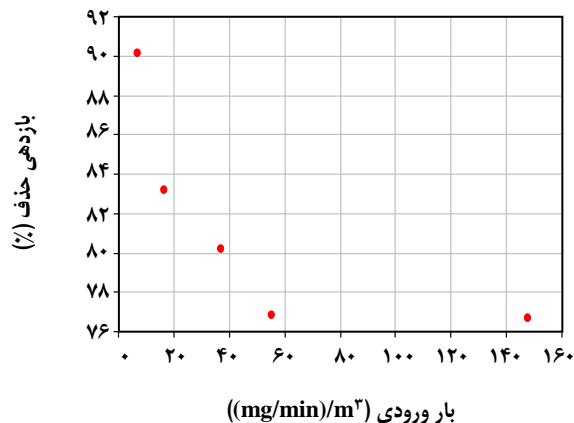
شکل ۶ - تغییر بازدهی حذف بر حسب زمان اقامت در غلظت ورودی  $30 \text{ ppm}$ . میزان عدم قطعیت با سطح اطمینان  $95\%$  برابر است با:  $Uc(\text{pH}) = \pm 0.01$ ,  $Uc(T) = \pm 0.1 \text{ K}$  و  $Uc(\text{concentration}) = \pm 0.5 \text{ ppm}$ .

در سامانه طراحی شده، از بستر طبیعی و کم هزینه‌ی ورمی کمپوست استفاده شده است که در محل دفن‌گاه تولید می‌شود و بدین ترتیب از نظر در دسترس بودن تجهیزات و مواد به کار گرفته شده، در ساخت دستگاه و همچنین اقتصادی بودن صافی زیستی ساخته شده، قابل قبول است. با توجه به این که کشت زنده‌ی جامد (استوک) اولیه باکتری خریداری شده موجود است بنابراین استفاده از آن در مقیاس صنعتی امکان پذیر است.

### قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت های مالی شرکت گاز استان فارس و دانشگاه صنعتی شیراز صمیمانه تشکر می نمایند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۸



شکل ۵ - تغییر بازدهی حذف بر حسب بار ورودی گاز  $\text{H}_2\text{S}$  در غلظت ورودی  $30 \text{ ppm}$ . میزان عدم قطعیت با سطح اطمینان  $95\%$  برابر است با:  $Uc(\text{pH}) = \pm 0.01$ ,  $Uc(T) = \pm 0.1 \text{ K}$  و  $Uc(\text{concentration}) = \pm 0.5 \text{ ppm}$ .

درون صافی زیستی، بازدهی حذف هیدروژن سولفید افزایش یافته است.

### نتیجه‌گیری

نتیجه‌های به‌دست آمده نشان دهنده توانایی صافی زیستی طراحی و ساخته شده در این مطالعه و باکتری انتخاب شده در حذف  $\text{H}_2\text{S}$  از گاز دفن‌گاه است. بر اساس نتیجه‌های به‌دست آمده در غلظت هیدروژن سولفید ورودی  $30 \text{ ppm}$  (غلظت موجود در نمونه گاز دفن‌گاه) و شدت جریان  $2$  لیتر بر دقیقه می‌توان بازدهی حذف مناسب  $90\%$  درصد را به‌دست آورد. در این نقطه غلظت هیدروژن سولفید از  $30 \text{ ppm}$  به  $3 \text{ ppm}$  می‌رسد که کم‌تر از مقدار حد استاندارد  $\text{H}_2\text{S}$  در خطوط لوله گاز است. با افزایش شدت جریان، این بازدهی کاهش داشته که به دلیل کاهش زمان اقامت است ولی همچنان بازدهی حذف بالای  $80\%$  درصد بوده است.

### مراجع

- [1] Panzaa, D., Belgiorno, V., [Hydrogen Sulphide Removal from Landfill Gas](#), Process Safety and Environmental Protection, **88**(6): 420-424 (2010).
- [2] Kalapala S., “[Removal of Hydrogen Sulfide from Landfill Gas Using a Solar Regenerable Adsorbent](#), Master Thesis of Science”, Youngstown State University, (2014).



- [3] Rasi S., Läntelä J., Rintala J., **Upgrading Landfill Gas using a High Pressure Water Absorption Process**, *Feul*, **115**: 539-543 (2014).
- [۴] سوفسطائی، ع.، "فناوری استخراج بیوگاز و بررسی پتانسیل استحصال بیوانرژی از حوزه های دفن زباله شهر اصفهان"، همایش ملی بیوانرژی، تهران، (۱۳۸۹).
- [5] Zagozewski R., Judd-Henrey I., Nilson S., Bharadwaj L., **Perspectives on Past and Present Waste Disposal Practices: A Community-Based Participatory Research Project in Three Saskatchewan First Nations Communities**, *Environ Health Insights*, **5**: 9-20 (2011).
- [6] Andrews J., [http://www.nodumpconecuhcounty.com/what\\_is\\_a\\_landfill.html](http://www.nodumpconecuhcounty.com/what_is_a_landfill.html)
- [7] Zietsman J., Ehsanul Bari M., Rand A.J., Gokhale B., Lord D., Kumar S., **Feasibility of Landfill Gas as a Liquefied Natural Gas Fuel Source for Refuse Trucks**, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **58**(5): 613-619 (2008).
- [۸] مجرد، گل محمد؛ فاتحی فر، اسماعیل؛ ساعدی، سعید؛ حذف زیستی هیدروژن سولفید در راکتور ایرلیفت بیوفیلمی سوسپانسیونی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی، (۲) ۳۰: ۱ الی ۹ (۱۳۹۰).
- [۹] الیاسی، س؛ "بررسی رفع آلودگی هوای صنعت به روش بیوفیلتر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، (۱۳۷۶).
- [10] Berenjian A., Chan N., Jafarizadeh Malmiri H., **Volatile Organic Compounds Removal Methods: A Review**, *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, **8**(4): 220-229 (2012).
- [۱۱] سیفی، ع.؛ "حذف سولفید هیدروژن با روش بیوفیلتراسیون"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۷).
- [12] Maredia, S., A Comparison of Biofilters, **Biotrickling Filters and Membrane Bioreactors for Degrading Volatile Organic Compounds**, MMG 445 Basic Biotechnol, eJournal (2015)
- [13] Syed M., Soreanu G., **Removal of Hydrogen Sulfide from Gas Streams Using Biological Processes - A Review**, *Canadian Biosystems Engineering*, **48**(2): 1-14 (2006).
- [14] Deviny J.S., Ramesh J., **A Phenomenological Review of Biofilter Models**, *Chemical Engineering Journal*, **113**: 187-196 (2005).
- [15] Chung Y.C., Huang C., **Microbial Oxidation of Hydrogen Sulfide with Biofilter**, *Journal of Environmental Science and Health*, **31**(6): 1263-1278 (1996).
- [16] CHO K.S., Ryu H.W., **Biological Deodorization of Hydrogen Sulfide Using Porous Lava as a Carrier of Thiobacillus Thiooxidans**, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **90**(1): 25-31 (2000).
- [17] Shareefdeen Z., Hener B., **Biofiltration of Nuisance Sulfur Gaseous Odors from a Meat Rendering Plant**, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **77**: 1296-1299 (2002).
- [18] Shareefdeen Z., Aidan A., **Hydrogen Sulphide Removal Using a Novel Biofilter Media**, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **62**: 13-16 (2010).

- [19] Oyarzun P., Arancibia F., [Biofiltration of High Concentration of Hydrogen Sulphide Using Thiobacillus Thioparus](#), *Process Biochemistry*, **39**: 165-170 (2003).
- [20] Morgan-Sagastume J.M., Noyola A., [Hydrogen Sulfide Removal by Compost Biofiltration: Effect of Mixing the Filter Media on Operational Factors](#), *Bioresource Technology*, **97**: 1546–1553 (2006).
- [21] Lee E.Y., Lee N.Y., [Removal of Hydrogen Sulfide by Sulfate-Resistant Acidithiobacillus thiooxidans AZ11](#), *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **101**(4): 309-314 (2006).
- [22] Hossain M.Sk., Das M., [Biodesulphurization of Natural Gas in a Three Phase Fluidized-Bed Bioreactor using Thiobacillus denitrificans](#), *NISCAIR Online Periodicals Repository*, **90**: 5-9 (2009).

Archive of SID