

Biological Removal of Hydrogen Sulfide by a Biofilter with a Bed of Polyurethane Foam and Palm Fiber

Vajihe Hasanzadeh^{1,2},
Vali Alipour^{1,3},
Babak Goodarzi^{1,4},
Omid Rahmanian^{1,3},
Kavoos Dindarloo^{1,5},
Mohsen Heidari^{1,3}

¹ Social Determinants in Health Promotion Research Center, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

² MSc in Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

³ Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

⁴ Instructor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran

(Received July 2, 2016; Accepted October 30, 2016)

Abstract

Background and purpose: The emission of hydrogen sulfide (a malodorous and toxic pollutant) into the atmosphere is considered a public health concern due to its potential hazardous effects on human health. Therefore, the removal of hydrogen sulfide from polluted air streams is of paramount importance. This study aimed to evaluate the role of a polyurethane foam/palm fiber-based biofilter in the removal of hydrogen sulfide.

Materials and methods: Air stream containing H₂S was introduced into the biofilter at a flowrate of 7 L/min and an empty bed retention time (EBRT) of 47 seconds. The inlet and outlet concentrations of H₂S were measured. Moreover, the amount of sulfate and pH in bed, leachate from the biofilter and pressure drop along the biofilter height were monitored.

Results: In this study, the biofilter provided 100% removal efficiency for inlet H₂S concentration of 288.0 mg/m³ at EBRT of 47 seconds. The maximum elimination capacity (EC_{max}) of the biofilter was 24.1 g/m³.h at a loading rate of 28.0 g/m³.h, corresponding to a removal efficiency of 86.1%. As the elimination capacity of H₂S increased the sulfate content of packing bed increased to 10.8 mg/g bed and the pH reduced to <2.1. The pressure drop along the biofilter column remained <5 mm throughout the operational period.

Conclusion: The polyurethane foam/palm fiber mixture could be considered as a potential biofilter carrier, with low-pressure drop, to treat air streams containing H₂S.

Keywords: biofiltration, hydrogen sulfide, pressure drop, polyurethane foam/palm fiber

حذف زیستی سولفید هیدروژن توسط بیوفیلتری با بستر فوم پلی‌اورتان و فیبر نخل

وجیهه حسن زاده^{۲،۱}

ولی علی پور^{۳،۱}

بابک گودرزی^{۴،۱}

امید رحمانیان^{۳،۱}

کاووس دیندارلو^{۵،۱}

محسن حیدری^{۳،۱}

چکیده

سابقه و هدف: انتشار سولفید هیدروژن (یک گاز بدبو و سمی) به اتمسفر به دلیل تأثیرات خطرناک بالقوه بر سلامت انسان، یک نگرانی در زمینه سلامت عمومی است؛ بنابراین، حذف سولفید هیدروژن از جریان هوای آلوده لازم است. در این مطالعه، عملکرد بیوفیلتری با بستر مخلوط فوم پلی‌اورتان و فیبر نخل در حذف سولفید هیدروژن ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها: جریان هوای حاوی سولفید هیدروژن با دبی برابر ۶/۶ L/min و زمان ماند بستر خالی (EBRT) برابر ۴۷ ثانیه وارد بیوفیلتر شد. غلظت ورودی و خروجی سولفید هیدروژن به روش یدومتری سنجش گردید. افزون بر این، مقدار سولفات و pH بستر و شیرابه خروجی از بیوفیلتر و افت فشار در امتداد ارتفاع بیوفیلتر نیز پایش شدند.

یافته‌ها: بیوفیلتر مورد مطالعه، بازده حذف ۱۰۰ درصد برای غلظت سولفید هیدروژن ورودی ۲۸۸/۰ mg/m³ در EBRT برابر ۴۷ ثانیه داشت. حداکثر ظرفیت حذف (EC_{max}) بیوفیلتر برابر ۲۴/۱ g/m³.h در بار ورودی ۲۸/۰ g/m³.h به دست آمد (بازده حذف برابر ۸۶/۱ درصد). با افزایش ظرفیت حذف بیوفیلتر، محتوای سولفات بستر تا ۱۰/۸ mg به ازای هر گرم بستر افزایش و pH بستر به کمتر از ۲/۱ کاهش یافت. افت فشار بیوفیلتر در طی دوره بهره‌برداری، کمتر از ۵ mm بود.

استنتاج: نگاه کلی به نتایج این تحقیق، نشان داد که مخلوطی از فوم پلی‌اورتان و فیبر نخل می‌تواند به‌عنوان یک بستر بالقوه بیوفیلتر (با افت فشار کم) برای تصفیه جریان‌های هوای حاوی سولفید هیدروژن در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: افت فشار، بیوفیلتراسیون، سولفید هیدروژن، فوم پلی‌اورتان / فیبر نخل

مقدمه

بوی مزاحم مربوط به صنعتی شدن، مشکلی است مقرررات سخت‌گیرانه در ارتباط با انتشار بو شده است که سبب جلب توجه مقامات دولتی در پیاده‌سازی (۱). انتشار گاز بد بوی سولفید هیدروژن به دلیل تأثیرات

مؤلف مسئول: محسن حیدری - بندرعباس: دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت Email: Moheidari84@gmail.com

۱. مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴. مربی، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی در ارتقای سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۲ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۵/۵/۳۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۸/۹

سیستم بیوفیلتراسیون به دلیل کارایی بالا، سازگار بودن با محیط زیست، اقتصادی بودن و نیاز کم به انرژی، یکی از متداولترین فرآیندهای زیستی مورد استفاده برای تصفیه سولفید هیدروژن است (۸).

بستر بیوفیلتر، فاکتور اصلی مؤثر بر پایداری عملیاتی بلندمدت بیوفیلتر و نیز هزینه‌های آن است؛ بنابراین انتخاب ماده بستر مناسب، گام مهمی در عملکرد موفق بیوفیلتراسیون است (۹). بستر بیوفیلتر می‌تواند از ماده آلی مانند خرده چوب، کمپوست و کود گیاهی یا ماده بی‌اثر و یا مخلوطی از آن‌ها تشکیل شود. مواد بی‌اثر، موادی غیر آلی تجزیه‌ناپذیر زیستی هستند که می‌توانند طبیعی (مانند سنگ آتش فشان‌ی و اسکوریا) یا مصنوعی (مانند فوم پلی‌اورتان، زئولیت و پلی‌استایرن) باشند (۲). بسترهای آلی به‌طور معمول ترکیب شیمیایی متعادل، ظرفیت نگهداشت آب نسبتاً بالا و دانسیته میکروبی بالایی دارند (۱۰، ۱۱)؛ اما آن‌ها در اثر تجزیه زیستی و آبدهی پیاپی بستر، به مرور زمان فشرده می‌شوند و افت فشار بالایی ایجاد می‌کنند (۱۲). از سوی دیگر، استفاده از مواد بی‌اثر تجزیه‌ناپذیر زیستی با منافع درشت به‌عنوان بستر بیوفیلتر، امکان توزیع بهتر گاز در داخل راکتور را نسبت به بستر آلی فراهم می‌کند و مانع ایجاد افت فشار بالا می‌شود (۱۳)؛ بنابراین، استفاده مخلوطی از مواد آلی و بی‌اثر می‌تواند گزینه مناسبی برای کارایی مناسب سیستم بیوفیلتر همراه با پایداری ساختار بستر باشد.

تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن با بسترهای گوناگون انجام شده است (۲، ۸، ۶-۱). محققان گزارش داده‌اند که بیوفیلترهایی با بستر مخلوط کمپوست و کود (۱۴)، پوست درخت کاج (۱۵) و مخلوط کربن فعال، پشم سنگ و کمپوست (۱۶)، سولفید هیدروژن را با ظرفیت‌های حذف در رنج $0.4-28 \text{ gS m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ همراه با افت فشارهایی در رنج $1-47 \text{ mm H}_2\text{O/m filter}$ حذف می‌کردند. تحقیقات

بالقوه خطرناک آن بر سلامت انسان، از دیدگاه سلامت عمومی نگران‌کننده است. سولفید هیدروژن افزون بر بوی نامطبوع، پتانسیل خوردگی و سمیت بسیار بالایی دارد. این گاز از رنج وسیعی از منابع از جمله: پالایشگاه، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، صنایع پردازش غذا و تولید کاغذ و چرم منتشر می‌شود (۲، ۳). غلظت‌های بالای سولفید هیدروژن (100 ppm) می‌تواند موجب انسداد ریوی و افزایش خطر بیماری‌های قلبی شود. این گاز در غلظت‌های $300-500 \text{ ppm}$ سبب ادم ریوی و در غلظت‌های بالاتر از $600-800 \text{ ppm}$ سبب مرگ می‌شود (۱). سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (US Environmental Protection Agency: USEPA) سطح رهنمودی برای تماس حاد (Acute Exposure Guideline Levels: AEGL-2)، با سولفید هیدروژن در زمان تماس ۸ ساعته را برابر 17 ppm اعلام کرده است (۴). افزون بر این، طبق استاندارد سازمان ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (Occupational Safety and Health Administration: OSHA)، میزان حداکثر غلظتی که کارگران می‌توانند به‌طور دائم با سولفید هیدروژن به مدت ۱۰ دقیقه بدون تأثیرات بهداشتی سوء در تماس باشند، برابر 50 ppm است (۵). به‌طور معمول، غلظت سولفید هیدروژن در اطراف تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری بدون سیستم کنترل آلودگی هوا از این مقدار فراتر می‌رود (۶).

با توجه به مشکلات مرتبط با انتشار سولفید هیدروژن، انتشارات صنعتی این گاز باید کاهش یابد. به‌طور معمول برای حذف سولفید هیدروژن از جریان گاز آلوده، از روش‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده می‌شود. این روش‌ها به مواد شیمیایی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بالا نیاز دارند. برای غلبه بر این مشکلات، فرآیندهای زیستی جایگزین مناسبی برای سیستم‌های فیزیکوشیمیایی هستند (۲، ۷). از بین فرآیندهای زیستی،

جدول شماره ۱: مشخصات مواد بستر مورد استفاده در این مطالعه

ماده	دانسیته (Kg/m ³)	تخلخل (درصد)	ظرفیت نگهداشت آب (Kg water/Kg bed)	pH
فیبر نخل	۱۷	۷۱	۱/۶	۵/۳
فوم پلی‌اورتان	۱۱	۵۵	۴/۹	۶/۹

قطعات فوم پلی‌اورتان (با اندازه ۱×۱×۱ cm) و فیبر نخل به نسبت ۳ به ۱ بود. مشخصات این مواد در جدول شماره ۱ ارائه شده است. قبل از قراردادن این مواد در داخل بیوفیلتر، قطعات فوم به مدت ۱۰ روز در داخل مخلوطی از مواد نوترینت و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب قرار داده شد. قبل از قراردادن قطعات فوم در داخل لجن، مقداری از این ماده در یک راکتور قرار داده شد. سپس یک محلول نوترینت حاوی مواد مغذی و تیوسولفات سدیم (به‌عنوان منبع گوگرد احیاشده) به آن اضافه شد و هوادهی لجن صورت گرفت. محلول نوترینت حاوی $1/2 \text{ g Na}_2\text{HPO}_4$ ، $1/8 \text{ g KH}_2\text{PO}_4$ ، $0/1 \text{ g MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، $0/5 \text{ g NH}_4\text{Cl}$ ، $0/3 \text{ g CaCl}_2$ ، $0/2 \text{ g MnSO}_4$ ، $0/2 \text{ g FeCl}_3$ و 4 g NaHCO_3 بود (۲۰). همه ترکیبات محلول نوترینت خلوص بیش از ۹۹ درصد داشتند و از شرکت Merck (ساخت کشور آلمان) تهیه شدند. درنهایت، فوم‌های آماده به نسبت مناسب با فیبر نخل مخلوط و در داخل ستون بیوفیلتر قرار داده شدند.

سیستم بیوفیلتر

شماتیکی از سیستم بیوفیلتر مورد استفاده در این مطالعه در تصویر شماره ۱ ارائه شده است. بیوفیلتر مورد استفاده از ستونی با قطر ۱۰/۵ cm تشکیل شد. این ستون توسط صفحات منفذدار به سه طبقه تقسیم گردید. ارتفاع بستر در هر طبقه ۲۰ cm و کل ارتفاع مواد بستر در داخل بیوفیلتر برابر ۶۰ cm بود (حجم ۵/۲ L). در بخش میانی هر طبقه، یک منفذ به قطر ۱ اینچ قرار داده شد تا بتوان از مواد بستر نمونه‌برداری کرد. افزون بر این، برای نمونه‌برداری هوا و سنجش افت فشار تعداد چهار منفذ به فواصل ۲۰ cm در طول راکتور قرار داده شد تا بتوان تغییرات غلظت سولفید هیدروژن را در طول راکتور پایش کرد.

نشان داده‌اند که فیبرهای گیاهی به‌ویژه فیبر نارگیل، می‌توانند به‌عنوان بستری مناسب برای بیوفیلتراسیون آلاینده‌های هوا استفاده شوند (۱۷). Filho و همکاران از فیبر نارگیل برای بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن استفاده کردند و حداکثر ظرفیت حذف برابر $68/8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ را در EBRT برابر ۴۹ ثانیه و افت فشار 56 mm water گزارش کردند (۱۸).

تاکنون مطالعه‌ای بر روی فیبر نخل به‌عنوان بستر بیوفیلتر انجام نشده است. فیبر نخل، ماده‌ای آلی با دانسیته کم و با ظرفیت نگه‌داشت آب بالا می‌باشد (جدول شماره ۱). با توجه به وفور فیبر نخل در مناطق گرمسیری جنوب ایران و پتانسیل تولید مواد بوزا به‌خصوص سولفید هیدروژن در منابع مرتبط با صنعت نفت و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در این مناطق، ارزیابی این ماده به‌عنوان بستر بیوفیلتر ضروری بود. فوم پلی‌اورتان ماده‌ای سبک با تخلخل مناسب و بی‌اثر است که به‌دلیل ساختار پایدار، افت فشار کمی در سیستم ایجاد می‌کند و از سوی دیگر، تحت تأثیر شرایط اسیدی که ممکن است به‌دنبال بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن رخ دهد، قرار نمی‌گیرد (۱۹). با توجه به اهمیت نوع بستر در کارایی و شرایط بهره‌برداری از سیستم‌های بیوفیلتراسیون، هدف از این مطالعه ارزیابی پتانسیل مخلوط پلی‌اورتان/ فیبر نخل برای نخستین بار به‌عنوان بستر بیوفیلتر برای تصفیه هوای آلوده به سولفید هیدروژن بود.

مواد و روش‌ها

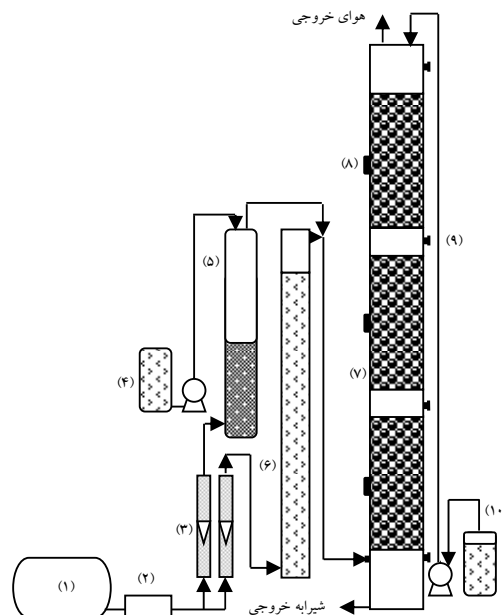
مواد بستر و آماده‌سازی

مواد مورد استفاده در بستر بیوفیلتر، مخلوطی از

این راکتور حاوی اسید کلریدریک (خلوص ۳۷ درصد، ساخت شرکت Merck، کشور آلمان) بود و با وارد شدن محلول Na_2S با نرخ مشخص به محتویات محفظه، سولفید هیدروژن تولید می‌گردید ($\text{Na}_2\text{S} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{NaCl}$). سپس جریان مرطوب و جریان حاوی سولفید هیدروژن مخلوط شده و از بخش پایینی ستون راکتور وارد آن می‌شدند.

روش‌های آنالیز

به‌طور کلی در این مطالعه در طی ۳۴ روز بهره‌برداری از بیوفیلتر، تعداد ۴۴ نمونه از ورودی و ۴۴ نمونه از خروجی بیوفیلتر برای سنجش غلظت سولفید هیدروژن آنالیز شدند. به‌جز نمونه‌های متعدد برداشت‌شده در روزهای ابتدایی، نمونه‌برداری‌های روزانه به‌صورت دوبار تکرار صورت گرفت و مقادیر متوسط آن‌ها ارائه شدند. افزون بر این، برای تعیین پروفیل غلظت سولفید هیدروژن در طول راکتور، تعداد ۱۲ نمونه از منافذ میانی راکتور برداشت گردید. غلظت سولفید هیدروژن در فاز گازی براساس EPA Method 11 سنجش شد (۲۱). برای این کار، نمونه‌های هوا از نقاط مختلف بیوفیلتر توسط پمپ نمونه‌بردار (SKC) با دبی $1/3 \text{ L/min}$ به مدت ۵ دقیقه از میان ۳ ایمپینجر شیشه‌ای ۳۰ میلی‌لیتری (هرکدام حاوی ۱۵ ml محلول سولفات کادمیوم (CdSO_4) (خلوص ۹۸ درصد، ساخت شرکت Merck، کشور آلمان) عبور داده می‌شد. سولفید هیدروژن موجود در هوا با سولفات کادمیوم واکنش داده و سولفید کادمیوم (CdS) تولید می‌شد. یک ایمپینجر حاوی پروکسید هیدروژن (H_2O_2) (خلوص ۳۵ درصد، ساخت شرکت Merck، کشور آلمان) نیز قبل از ایمپینجرهای اصلی قرار می‌گرفت تا از مزاحمت SO_2 در سنجش سولفید هیدروژن جلوگیری شود.



تصویر شماره ۱: شماتیکی از سیستم بیوفیلتر مورد استفاده در این مطالعه: (۱) کمپرسور هوا، (۲) ستون کربن فعال، (۳) روتامتر، (۴) محلول Na_2S ، (۵) راکتور حاوی HCl ، (۶) رطوبت ساز، (۷) ستون بیوفیلتر، (۸) منفذ نمونه‌برداری بستر، (۹) منفذ نمونه‌برداری هوا و (۱۰) محلول نوترینت

هوای فشرده به‌وسیله یک کمپرسور ۵۰ لیتری (ساخت شرکت کدخدایی، کشور ایران) به‌صورت پیوسته تأمین می‌شد. فشار هوای خروجی از کمپرسور به‌وسیله رگلاتور تنظیم شده و سپس هوا از ستون کربن فعال عبور داده می‌شد تا ذرات معلق و ناخالصی‌های آن حذف شود. هوای تمیزشده به دو بخش تقسیم شده و دبی هر بخش توسط روتامتر (ساخت شرکت Platon، کشور انگلستان) تنظیم می‌شد. روتامترها به‌صورت دوره‌ای با استفاده از وسایل کالیبراسیون از جمله بورت حباب صابون و گازمتر تر کالیبره می‌شدند. بخشی از هوا از داخل ستون رطوبت‌ساز عبور داده می‌شد تا محتوای رطوبت هوا افزایش یابد. بخش دیگری از هوا نیز، از یک راکتور تولید سولفید هیدروژن عبور داده می‌شد.

مواد بستر برای تعیین مقدار pH و محتوای سولفات وجود نداشت؛ بنابراین، در روزهای دهم و آخرین روز بهره‌برداری از سیستم، ۱ g از مواد بستر از هر طبقه برداشت می‌شد و ۱۰ ml آب مقطر به آن اضافه می‌گردید. سپس سوسپانسیون تولیدی به مدت ۳ دقیقه ورتکس می‌شد. pH و غلظت سولفات سوسپانسیون به روش‌های یادشده سنجش می‌شد. درنهایت، با توجه به حجم آب مقطر و وزن نمونه، محتوای سولفات مواد بستر تعیین می‌گردید (۲۳).

شرایط بهره‌برداری

در طی بهره‌برداری از بیوفیلتر، هوای آلوده به سولفید هیدروژن و با رطوبت بیش از ۹۰ درصد با دبی برابر ۶/۶ L/min (EBRT برابر ۴۷ ثانیه) وارد سیستم می‌شد. به‌منظور حفظ رطوبت بستر، تأمین مواد مغذی میکروارگانیسم‌ها و خروج سولفات تجمع یافته بر روی بستر، روزانه ۱ لیتر محلول نوترینت با نرخ ۱۰۰ ml/min (به مدت ۱۰ دقیقه) به ستون بیوفیلتر تزریق می‌شد. در طی دوره بهره‌برداری از بیوفیلتر، دمای محیط در محدوده ۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود و تفاوت دمای داخل راکتور با محیط اطراف ۱± درجه سانتی‌گراد بود.

پارامترهای بهره‌برداری سیستم بیوفیلتر مورد مطالعه شامل زمان ماند بستر خالی (EBRT برحسب ثانیه)، بار ورودی (LR برحسب $g/m^3 \cdot h$)، ظرفیت حذف (EC) برحسب $g/m^3 \cdot h$ و بازده حذف (RE برحسب درصد) ارزیابی شدند. این پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند (۷):

$$EBRT=Q/V \quad (۱)$$

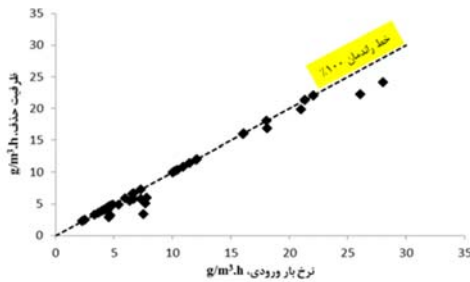
$$ILR=QC_{in}/V \quad (۲)$$

$$EC=Q(C_{in}-C_{out})/V \quad (۳)$$

$$RE=(C_{in}-C_{out})/C_{in} \times 100 \quad (۴)$$

درنهایت، محتویات ایمپنجرها به ارلن تخلیه می‌شد و ۵۰ ml یدین ۰/۰۱ نرمال (استوک ۰/۲ نرمال، ساخت شرکت Chemlab، کشور بلژیک) به ارلن و ۲ ml معرف نشاسته ۱ درصد به مخلوط اضافه گردید. درپایان، مخلوط به‌دست آمده با تیوسولفات ۰/۰۱ نرمال (خلوص ۹۹/۵ درصد، ساخت شرکت Merck، کشور آلمان) تیترو می‌شد. روزانه یک نمونه کنترل نیز آزمایش می‌شد. برای این نمونه کنترل، همه مراحل نمونه اصلی انجام می‌گرفت و تنها از ۴۵ ml سولفات کادمیوم خام استفاده می‌شد. میزان تغییرات محتوای یدین نمونه‌های کنترل در طول دوره تحقیق، کمتر از ۵ درصد بود که با EPA Method 11 مطابقت داشت (۲۱). سنجش سولفید هیدروژن به‌صورت دوباره تکرار صورت گرفت و اعداد متوسط ارائه شده‌اند. برای پایش افت فشار گاز در امتداد ستون بیوفیلتر، از یک مانومتر آب U شکل استفاده شد. بستر بیوفیلتر روزانه با استفاده از ۱ L محلول نوترینت در مدت زمان ۱۰ دقیقه آبدهی می‌شد. ۳۰ دقیقه بعد از آبدهی، شیرابه تولیدی در بخش انتهایی ستون بیوفیلتر تخلیه و بلافاصله pH آن با استفاده از pH متر مدل Amtast (USA) آنالیز می‌گردید. قبل از سنجش، pH متر با استفاده از بافرهای ۴ و ۷ کالیبره می‌شد. همچنین، غلظت سولفات شیرابه با استفاده از اسپکتروفتومتر (SP-1900 UV-vis) مورد آنالیز قرار گرفت. ابتدا به ۵۰ ml نمونه اصلی یا نمونه‌های رقیق‌شده، ۱ اسپاتول کلریدباریوم اضافه می‌گردید و سوسپانسیون به‌دست آمده به مدت ۱ دقیقه هم زده می‌شد. سپس، میزان جذب نور سوسپانسیون به‌دست آمده در طول موج ۴۲۰ nm سنجش می‌شد.

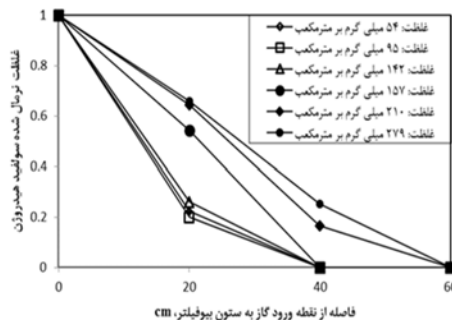
قبل از شروع آزمایش‌ها، منحنی کالیبراسیون برای محلول‌های حاوی ۵ تا ۴۰ mg/L سولفات ترسیم گردید. قبل از هر دوره آزمایش نمونه‌ها، حداقل یک نمونه استاندارد با دستگاه آنالیز می‌شد (APHA Method 4500-SO₄²⁻-E) (۲۲). به‌دلیل محدودیت مقدار مواد بستر، امکان نمونه‌برداری پیاپی از



تصویر شماره ۳: تغییرات ظرفیت حذف سولفید هیدروژن به صورت تابعی از بار ورودی (دبی هوا: ۶/۶ L/min، EBRT: ۴۷ ثانیه، دمای محیط: ۲۵±۲ درجه سانتی گراد)

۱۰۰ درصد کاهش یابد. در نهایت، بازده حذف برای غلظت‌های ورودی تا 366 mg/m^3 بیش از ۸۵ درصد باقی ماند.

در تصویر شماره ۳، تغییرات ظرفیت حذف سولفید هیدروژن به صورت تابعی از بار ورودی ارائه شده است. مطابق این تصویر، در بارهای ورودی تا $22/1 \text{ g/m}^3.h$ میزان ظرفیت حذف سولفید هیدروژن تقریباً در تمام شرایط (به جز برای ظرفیت‌های حذف به دست آمده در روزهای ابتدایی) به صورت خطی (بازده حذف ۱۰۰ درصد) افزایش یافت. با وجود این، در غلظت‌های بالاتر مقادیر ظرفیت حذف از خط بازده ۱۰۰ درصد فاصله گرفت. پروفیل غلظت سولفید هیدروژن در امتداد طول ستون بیوفیلتر در تصویر شماره ۴ نشان داده شده است.

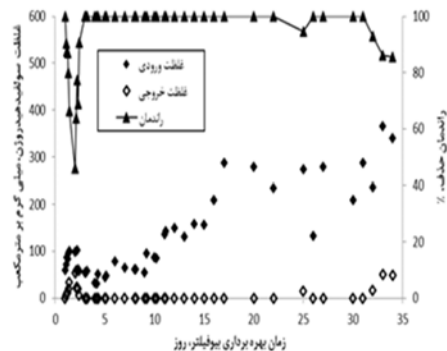


تصویر شماره ۴: پروفیل غلظت در امتداد طول ستون بیوفیلتر در غلظت‌های ورودی مختلف سولفید هیدروژن (دبی هوا: ۶/۶ L/min، EBRT: ۴۷ ثانیه، دمای محیط: ۲۵±۲ درجه سانتی گراد)

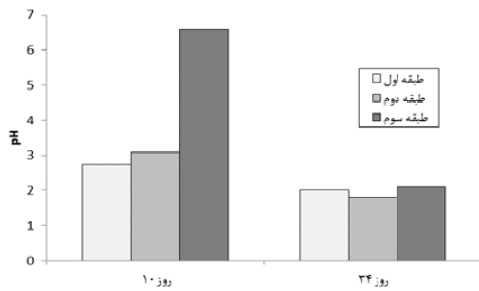
در این روابط Q میزان جریان هوا (m^3/h)، V حجم بستر (m^3) و C_{in} و C_{out} غلظت‌های ورودی و خروجی سولفید هیدروژن به بیوفیلتر (g/m^3) هستند.

یافته‌ها

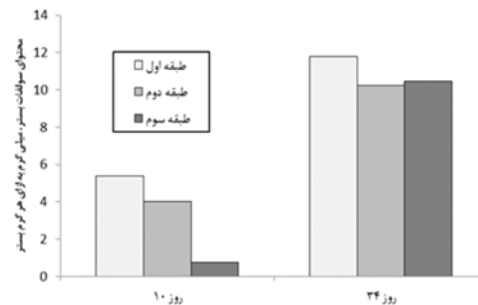
در این مطالعه، کارایی یک سیستم بیوفیلتر با بستر مخلوط پلی‌اورتان و فیبر نخل در حذف سولفید هیدروژن، از نقطه نظر پارامترهایی مانند بازده حذف و ظرفیت حذف ارزیابی شد. در تصویر شماره ۲ تغییرات غلظت ورودی، غلظت خروجی و بازده حذف سولفید هیدروژن در طی بهره‌برداری بیوفیلتر ارائه شده است. در طی این مطالعه، غلظت ورودی سولفید هیدروژن در رنج ۳۰ تا 366 mg/m^3 بود. در ساعات اولیه بهره‌برداری از بیوفیلتر، سولفید هیدروژن به طور کامل حذف شد؛ اما به مرور زمان میزان غلظت سولفید هیدروژن در خروجی بیوفیلتر افزایش یافت. در روز سوم، دوباره بازده حذف سولفید هیدروژن به ۱۰۰ درصد افزایش یافت و حذف کامل سولفید هیدروژن تا غلظت $288/0 \text{ mg/m}^3$ این ماده در EBRT برابر ۴۷ ثانیه به دست آمد. گفتنی است که در روز بیست و سوم، نوترینت به سیستم تزریق نگردید و سبب شد که بازده در روز بیست و پنجم به کمتر از



تصویر شماره ۵: تغییرات غلظت ورودی و خروجی و بازده حذف سولفید هیدروژن در دوره بهره‌برداری بیوفیلتر (دبی هوا: ۶/۶ L/min، EBRT: ۴۷ ثانیه، دمای محیط: ۲۵±۲ درجه سانتی گراد)



تصویر شماره ۷: تغییرات pH بستر در طبقات مختلف بیوفیلتر (میزان آبدهی روزانه: ۱ L)



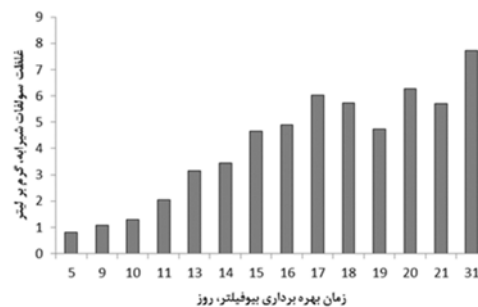
تصویر شماره ۵: محتوای سولفات مواد بستر در طبقات مختلف بیوفیلتر (میزان آبدهی روزانه: ۱ L)

بحث

همان‌طور که پیش از این بیان شد، در طی دوره بهره‌برداری، هوای آلوده به سولفید هیدروژن با دبی برابر ۶/۶ L/min (زمان ماند بستر خالی (EBRT) برابر ۴۷ ثانیه) وارد بیوفیلتر گردید. غلظت سولفید هیدروژن در نخستین ساعت بهره‌برداری، برابر $59/8 \text{ mg/m}^3$ بود. در ساعات ابتدایی بهره‌برداری از بیوفیلتر، غلظت سولفید هیدروژن به صورت پیاپی سنجش شد و در ۲ ساعت اول بهره‌برداری از بیوفیلتر، حذف کامل سولفید هیدروژن رخ داد. به دنبال آن، سولفید هیدروژن در جریان خروجی از سیستم شناسایی شد و بازده در ابتدای روز دوم به ۴۵ درصد کاهش یافت. حذف کامل سولفید هیدروژن در ساعات ابتدای بهره‌برداری از بیوفیلتر می‌تواند به دلیل جذب سطحی آلاینده بر روی سطح بستر همراه با جذب توسط رطوبت بستر باشد. آلاینده در جذب سطحی تغییر ماهیت نمی‌دهد و تنها از محیط گاز یا مایع وارد محیط جامد می‌شود؛ بنابراین پس از گذشت زمان، سطح ماده جاذب اشباع می‌گردد و شرایط تعادل به وجود می‌آید. در شرایط تعادل، میزان جذب و واجذب ماده آلاینده برابر می‌گردد و عملاً حذف رخ نمی‌دهد (۲۴). به طور معمول، بسترهای مورد استفاده در سیستم‌های بیوفیلتراسیون

همان‌طور که در این تصویر مشخص است، در غلظت‌های کم سولفید هیدروژن، بخش عمده سولفید هیدروژن حذف شده و با افزایش غلظت، سهم طبقات فوقانی نیز در حذف آلاینده افزایش یافته است.

از آنجا که به دنبال حذف زیستی سولفید هیدروژن، سولفات تولید می‌شود، تغییرات محتوای سولفات بستر و شیرابه خروجی از بیوفیلتر نیز بررسی شد. در تصاویر ۵ و ۶ به ترتیب تغییرات سولفات بستر بیوفیلتر و شیرابه خروجی از آن نشان داده شده است. افزایش محتوای سولفات بستر، کاهش pH را در پی داشت؛ به طوری که مقدار pH مواد بستر در روز سی و چهارم (پس از بهره‌برداری با بار بالا) نسبت به روز دهم به طور قابل توجهی کاهش یافت (تصویر شماره ۷).



تصویر شماره ۶: غلظت سولفات شیرابه در روزهای مختلف بهره‌برداری از بیوفیلتر (میزان آبدهی روزانه: ۱ L)

پایدار به میزان ۱۰۰ درصد حذف کند. با وجود این، در غلظت‌های بالاتر سولفید هیدروژن در خروجی بیوفیلتر شناسایی شد؛ به طوری که در غلظت $366/0 \text{ mg/m}^3$ بازده تا $86/1$ درصد کاهش یافت. عملکرد بیوفیلتر از نقطه نظر ظرفیت حذف سولفید هیدروژن، به خوبی در تصویر شماره ۳ قابل توصیف است. تغییرات ظرفیت حذف آلاینده‌های گازی با بار ورودی، معمولاً دو ناحیه دارد که شامل ناحیه محدود از لحاظ نفوذ مولکولی (Diffusion Limitation Regime: DLR) و ناحیه محدود از لحاظ واکنش (Reaction Limitation Regime: RLR) می‌باشد (۲۶). ناحیه محدود از لحاظ نفوذ مولکولی در بارهای ورودی کم آلاینده ایجاد می‌شود. در این ناحیه، افزایش در غلظت ورودی آلاینده گازی، نرخ انتقال آن را از فاز گازی به بیوفیلیم افزایش می‌دهد و میکروارگانیسم‌های بیشتری به طور فعال در فرآیند تجزیه زیستی شرکت می‌کنند. در این شرایط با افزایش بار ورودی آلاینده، ظرفیت حذف به صورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به تصویر شماره ۳، برای بارهای ورودی تا $22/1$ ، میزان ظرفیت حذف سولفید هیدروژن موازی با خط بازده ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. در چنین شرایطی، مرحله کنترل کننده حذف سولفید هیدروژن در بیوفیلتر، میزان نفوذ آن از فاز گازی به بیوفیلیم بود. ناحیه محدود از لحاظ واکنش زمانی ایجاد می‌شود که غلظت آلاینده گازی به اندازه‌ای زیاد باشد که نفوذ آن از فاز گازی به بیوفیلیم، از واکنش درجه صفر پیروی کند و پدیده نفوذ مرحله، کنترل کننده سرعت حذف آلاینده نباشد. تحت این شرایط، بیوفیلیم کاملاً با ماده آلاینده اشباع خواهد شد و فعالیت متابولیکی

ظرفیت جذب سطحی پایینی دارند. Filho و همکاران گزارش کردند که در غلظت 230 ppm سولفید هیدروژن در EBRT برابر ۴۹ ثانیه، زمان برای اشباع ظرفیت جذب سطحی فوم پلی‌اورتان و فیبر نارگیل، برابر ۱ ساعت و برای تفاله نیشکر، برابر ۲ ساعت بود (۱۸). افزون بر این، Roshani و همکاران نیز گزارش کردند که در بستری حاوی $4/22 \text{ L}$ آب (محاسبه براساس کل جرم بستر و درصد رطوبت آن) در EBRT برابر ۱ دقیقه، زمان مورد نیاز برای اشباع رطوبت آب با سولفید هیدروژن تنها ۳ ثانیه بوده است (۱۰)؛ بنابراین، اثر پدیده‌های جذب سطحی بستر و جذب توسط رطوبت بستر در بهره‌برداری بلندمدت سیستم بیوفیلتراسیون و حذف مداوم آلاینده‌های گازی، بسیار جزئی است (۲۵). در روز سوم، بازده حذف سولفید هیدروژن در غلظت $54/4 \text{ mg/m}^3$ دوباره به ۱۰۰ درصد افزایش یافت. این وضعیت بیانگر غالب شدن میکروارگانیسم‌های تجزیه کننده سولفید هیدروژن پس از دوره تلقیح است. به طور کلی، تا روز سی و دوم با ثابت بودن دبی هوا، غلظت سولفید هیدروژن به صورت مرحله‌ای افزایش یافت؛ به طوری که متوسط غلظت ورودی در روزهای ۱-۱۰ برابر $67/9 \text{ mg/m}^3$ ، در روزهای ۱۱-۱۵ برابر $145/7 \text{ mg/m}^3$ و در روزهای ۱۶-۳۲ برابر $243/1 \text{ mg/m}^3$ بود. این وضعیت از ایجاد شوک غلظت جلوگیری می‌کرد و سبب می‌شد میکروارگانیسم‌ها با شرایط غلظت بالای سولفید هیدروژن سازگار شوند. چنین رویکردی همراه با شرایط مناسب مواد بستر، سبب شد حذف کامل سولفید هیدروژن تا غلظت‌های بیش از 250 mg/m^3 حفظ شود. به طور کلی، بیوفیلتر مورد مطالعه می‌توانست سولفید هیدروژن را در غلظت‌های تا 288 mg/m^3 در EBRT برابر ۴۷ ثانیه به طور

جدول شماره ۲: کارایی و افت فشار در سیستم‌های بیوفیلتراسیون با بسترهای گوناگون برای تصفیه هوای آلوده به سولفید هیدروژن

منبع	افت فشار (mm water)	بازده حذف (درصد)	حداکثر ظرفیت (g/m ³ .h)	EBRT (s)	ماده بستر
۱	۸	۹۰	۴۲	۳۵	Expanded Schist
۷	<۱	۹۵	۲۴/۷	۶۳	Expanded Schist+UP20
۱۰	۱۸	۱۰۰	۲۳/۵	۶۰	قطعات PVC+کمیوست+لجن فعال
۲۳	۴۳/۵	۱۰۰	۷/۴	۴۸/۶	کود حیوانی+کمیوست
۲۹	۸	۹۷	۵۲/۳	۳۰	لجن فعال خشک+کربن فعال
۳۰	۴۰	۱۰۰	۲۷/۸	۴۰	کربن فعال
این مطالعه	<۵	۱۰۰	۲۲/۱	۴۷	فیبر نخل / فوم پلی‌اورتان
		۸۶	۲۴/۱		

ایجادشده در داخل ستون بیوفیلتر ارائه شده است. مطابق این جدول، کارایی سیستم بیوفیلتر با بستری سبک، ارزان و در دسترس؛ یعنی مخلوط فوم پلی‌اورتان/ فیبر نخل، در حذف سولفید هیدروژن و بدون کنترل pH در محدوده سیستم‌های دیگر بود. کارایی مناسب سیستم مورد مطالعه همراه با افت فشار کم بود؛ در حالی که بیوفیلترهایی با بستر آلی، افت فشار بالایی هنگام بهره‌برداری داشتند. گفتنی است که با وجود کارایی بالای بیوفیلترهایی با بستر کربن فعال، استفاده از چنین بستری در سیستم‌های صنعتی به دلیل هزینه بالا محدود است (۲).

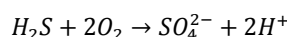
دینامیک‌های حذف ماده آلاینده در امتداد ارتفاع بستر، به وسیله سنجش غلظت در نقاط مختلف ستون بیوفیلتر بررسی شدند. همان‌طور که در تصویر شماره ۱ مشاهده می‌شود، در بیوفیلتر مورد مطالعه حرکت گاز به صورت جریان متقابل است؛ یعنی اینکه گاز ورودی از قسمت پایین سیستم وارد راکتور می‌شود و حرکت محلول نوترینت از بالا به پایین است؛ بنابراین، بالاترین غلظت سولفید هیدروژن در طبقه پایین رخ می‌داد. همان‌طور که در تصویر شماره ۴ مشاهده می‌شود، در غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ mg/m³ طبقه اول توانست حدود ۸۰ درصد از آلاینده ورودی را حذف کند. طبقه دوم نیز مابقی آن

سلول‌ها در بیوفیلتر مرحله محدودکننده سرعت خواهد بود (۲۷). در این ناحیه با افزایش بار ورودی، ظرفیت حذف آلاینده از خط بازده ۱۰۰ درصد منحرف می‌شود و حذف کامل آلاینده رخ نمی‌دهد. در این ناحیه حداکثر ظرفیت حذف آلاینده می‌آید. در این مطالعه، حداکثر ظرفیت حذف برابر ۲۴/۱ g/m³.h و برای بار ورودی برابر ۲۸/۰ g/m³.h به دست آمد (بازده حذف ۸۶/۱ درصد). گفتنی است که افزایش بیشتر بار ورودی، ممکن بود سبب افزایش ظرفیت حذف شود؛ اما بازده حذف نیز متعاقب آن کاهش می‌یافت. در طی دوره بهره‌برداری از بیوفیلتر، افزون بر حصول بازده بالا برای رنج وسیعی از غلظت سولفید هیدروژن، افت فشار همواره کمتر از ۵ ml آب بود. مهم‌ترین دلیل برای افت فشار کم بیوفیلتر مورد مطالعه، استفاده از بستر بی‌اثر تجزیه‌ناپذیر زیستی؛ یعنی فوم پلی‌اورتان بود. این مقدار افت فشار بسیار کم، از لحاظ بهره‌برداری و اقتصادی بسیار مهم است. افت فشار بالا مستلزم انرژی بالا برای عبور گاز از میان بستر می‌باشد و تبعاتی مانند کانالیزه شدن بستر و ایجاد اتصال کوتاه در پی دارد (۲۸). در جدول شماره ۲، کارایی سیستم‌های بیوفیلتر با بسترهای گوناگون در حذف سولفید هیدروژن، همراه با افت فشار

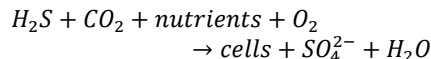
با بستر پشم سنگ و کمپوست، مطالعه کرده‌اند. روزانه 500 ml محلول نوترینت به سیستم مورد نظر تزریق شد و زمانی که ظرفیت حذف سولفید هیدروژن در آن برابر $38/5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ بود، غلظت سولفات تا 40000 mg/l افزایش یافت (۱۶). در تصویر شماره ۴، محتوای سولفات مواد بستر در طبقات مختلف بیوفیلتر ارائه شده است. تا روز دهم، بخش عمده سولفید هیدروژن ورودی (حدود ۶۰ درصد) در طبقه اول و مابقی آن در طبقات دوم و سوم حذف می‌شد. در این روز محتوای سولفات در طبقات اول، دوم و سوم به ترتیب $5/4$ ، $4/0$ و $0/8$ میلی‌گرم به ازای هر گرم بستر بود. با وجود این، با افزایش غلظت سولفید هیدروژن ورودی به سیستم و افزایش ظرفیت حذف طبقه اول و نیز افزایش نقش طبقات فوقانی، انتظار می‌رفت که محتوای سولفات در کل بستر بیوفیلتر افزایش یابد. همان‌طور که در تصویر شماره ۴ نشان داده شده است، محتوای سولفات در روز سی و چهارم در طبقات اول، دوم و سوم به ترتیب به $11/8$ ، $10/2$ و $10/5$ میلی‌گرم به ازای هر گرم بستر افزایش یافت؛ بنابراین، تغییرات غلظت سولفات شیرابه خروجی از بیوفیلتر می‌تواند تا حدودی بیانگر میزان حذف سولفید هیدروژن باشد. این موضوع نشان می‌دهد که سولفید هیدروژن به صورت زیستی حذف شده است.

نوترینت مورد استفاده در این مطالعه، pH خنثی داشت. با وجود این، pH شیرابه خروجی بیوفیلتر در روزهای اولیه در حدود ۷ بود و به مرور زمان با افزایش بار ورودی به $2/8$ کاهش یافت. کاهش pH محلول نوترینت می‌تواند به دلیل حضور سولفات بر روی مواد بستر باشد. بخشی از سولفات تولیدی هنگام بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن، به صورت اسیدسولفوریک در محلول نوترینت حل می‌شود؛ بنابراین، pH شیرابه کاهش می‌یابد.

را حذف کرد. این وضعیت می‌تواند به دلیل حضور منبع انرژی (سولفید هیدروژن) بیشتر در طبقه اول بستر بیوفیلتر توجیه گردد که سبب واکنش متابولیک بیشتر می‌شود. با افزایش غلظت، مقادیر بیشتری از سولفید هیدروژن به طبقات فوقانی نفوذ کرد و به مرور نقش این طبقات نیز در حذف این آلاینده افزایش یافت. در شرایط هوایی، شیموتروف‌ها با استفاده از اکسیژن مولکولی (به‌عنوان گیرنده الکترون) سولفید هیدروژن را اکسید می‌کنند. در این شرایط H_2S دهنده الکترون است (۳۱). محصول اصلی این واکنش سولفات می‌باشد:



در اکسیداسیون اتوتروفیک هوایی سولفید هیدروژن، واکنش زیر رخ خواهد داد (۳۱):



بنابراین، سولفات یکی از محصولات اصلی بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن در شرایط هوایی است. سولفات تولیدی بر روی مواد بستر ذخیره می‌شود و بخشی از آن توسط مایع نوترینت به صورت شیرابه از بیوفیلتر خارج می‌گردد. همان‌طور که پیش از این گفته شد، در این مطالعه روزانه ۱ L مایع نوترینت به مدت ۱۰ دقیقه با نرخ 100 ml/min به سیستم تزریق می‌شد و به دنبال آن، به طور متوسط 900 ml شیرابه تولیدی جمع‌آوری می‌گردید (یعنی 100 ml تبخیر آب از سطح بستر). همان‌طور که در تصویر شماره ۴ نشان داده شده است، در طی بهره‌برداری بیوفیلتر، غلظت سولفات شیرابه تا 7729 mg/l افزایش یافته است. Galera و همکاران درباره حذف همزمان سولفید هیدروژن، آمونیاک و تولوئن در یک بیوفیلتر

pH بستر نیز کاهش یافت (pH طبقه اول و دوم به ترتیب برابر ۲/۷ و ۳/۱). با وجود این، به دلیل نفوذ مقدار ناچیزی سولفید هیدروژن به طبقه سوم، pH بستر در این طبقه تقریباً برابر با pH محلول نوترینت بود. با وجود این، به دلیل نفوذ سولفید هیدروژن به طبقه سوم در بارهای ورودی بالا و حذف این ماده در آن بخش، pH نیز در روز سی و چهارم کاهش یافت (pH در رنج ۱/۸-۲/۱). به طور کلی، کاهش pH شیرابه و بستر بیوفیلتر و افزایش غلظت سولفات در شیرابه و محتوای سولفات بستر، بیانگر حذف زیستی سولفید هیدروژن در بیوفیلتر مورد مطالعه است.

نتایج این مطالعه نشان داد که بیوفیلتر با بستر فوم پلی‌اورتان/ فیبر نخل، با وجود نبود کنترل pH و تجمع سولفات بر روی مواد بستر، کارایی مناسبی در حذف سولفید هیدروژن داشت. در پایان، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مخلوطی از فوم پلی‌اورتان و فیبر نخل، می‌تواند به عنوان یک بستر مناسب بیوفیلتر با افت فشار کم برای تصفیه هوای آلوده به سولفید هیدروژن در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد با شماره طرح تحقیقاتی ۹۵۰۳ است. بدین وسیله، از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان تقدیر و تشکر می‌گردد.

بر این اساس می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش کارایی بیوفیلتر و حذف مقادیر بیشتری از سولفید هیدروژن، مقدار pH شیرابه نیز کاهش یابد. به طور کلی، انواعی از میکروارگانیسم‌ها مانند: اسیدیتوباسیلوس تیواکسیدانس (*Acidithiobacillus thiooxidans*)، تیوباسیلوس تیواکسیدانس (*Thiobacillus thiooxidans*) و تیوباسیلوس تیوپاروس (*Thiobacillus thioparus*) می‌توانند سولفید هیدروژن را حذف کنند. برخی از گروه‌های باکتریایی در محیط اسیدی نیز به خوبی رشد و فعالیت می‌کنند. تیوباسیلوس تیواکسیدانس می‌تواند در pH برابر ۰/۵ نیز تکثیر یابد و همچنین تیوباسیلوس اسیدیتوباسیلوس می‌تواند در pH بسیار کم در حد ۰/۲ رشد کند (۸)؛ یعنی اینکه در بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن، اسیدی‌شدن محیط برخلاف بسیاری از سیستم‌های زیستی نه تنها کارایی را کاهش نمی‌دهد؛ بلکه ممکن است سبب افزایش کارایی نیز شود. Aroca و همکاران گزارش کردند که بیوفیلتری تلقیح‌شده با تیوباسیلوس تیوپاروس، می‌تواند سولفید هیدروژن را به میزان $15 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ در pH بین ۵/۵ تا ۷ حذف کند؛ در حالی که با کاهش pH و غالب‌شدن اسیدیتوباسیلوس تیواکسیدانس در pH بین ۱/۸ تا ۲/۵، ظرفیت حذف سولفید هیدروژن به $393 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ افزایش یافت (۳۲).

روند تغییرات pH در امتداد بستر بیوفیلتر نیز بیانگر حاکم‌شدن شرایط اسیدی در بیوفیلتراسیون سولفید هیدروژن است. تا روز دهم، با توجه به اینکه طبقات اول و دوم کل سولفید هیدروژن ورودی را حذف می‌کردند،

References

- Hernandez ACR, Susa MSR, Andres Y, Dumont E. Steady- and transient-state H_2S biofiltration using expanded schist as packing material. N Biotechnol.

- 2013; 30(2): 210-218.
2. Ben Jaber M, Couvert A, Amrane A, Rouxel F, Le Cloirec P, Dumont E. Biofiltration of H₂S in air-Experimental comparisons of original packing materials and modeling. *Biochem Eng J*. 2016; 112: 153-160.
 3. Yousefi Z, Seyedi Rad M. Quantitative and qualitative study of urban septage in east of Mazandaran and administrative approaches. *J Mazand Univ Med Sci* 2013; 23(102): 61-71 (Persian).
 4. ATSDR. Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide/Carbonyl Sulfide. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2015.
 5. Osha.gov, OSHA Annotated PELs, (2016) Available from: <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-2.html>. Accessed September 6, 2016.
 6. Rabbani KA, Charles W, Kayaalp A, Cord-Ruwisch R, Ho G. Pilot-scale biofilter for the simultaneous removal of hydrogen sulphide and ammonia at a wastewater treatment plant. *Biochem Eng J* 2016; 107: 1-10.
 7. Ben Jaber M, Couvert A, Amrane A, Rouxel F, Le Cloirec P, Dumont E. Biofiltration of high concentration of H₂S in waste air under extreme acidic conditions. *N Biotechnol* 2016; 33(1): 136-143.
 8. Charnnok B, Suksaraj T, Boonswang P, Chaiprapat S. Oxidation of hydrogen sulfide in biogas using dissolved oxygen in the extreme acidic biofiltration operation. *Bioresour Technol* .2013; 131: 492-499.
 9. Hernández J, Prado ÓJ, Almarcha M, Lafuente J, Gabriel D. Development and application of a hybrid inert/organic packing material for the biofiltration of composting off-gases mimics. *J Hazard Mater*. 2010; 178(1-3): 665-672.
 10. Roshani B, Torkian A, Aslani H, Dehghanzadeh R. Bed mixing and leachate recycling strategies to overcome pressure drop buildup in the biofiltration of hydrogen sulfide. *Bioresour Technol* .2012; 109: 26-30.
 11. Lee S, Li C, Heber AJ, Ni J, Huang H. Biofiltration of a mixture of ethylene, ammonia, n-butanol, and acetone gases. *Bioresour Technol* 2013; 127: 366-377.
 12. 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. *Biotechnol Bioproc Eng* .2011; 16: 1009-1018.
 13. Prado ÓJ, Veiga MC, Kennes C. Treatment of gas-phase methanol in conventional biofilters packed with lava rock. *Water Res* .2005; 39(11): 2385-2393.
 14. Elias A, Barona A, Arreguy A, Rios J, Aranguiz I, Penas J. Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis. *Process Biochem* 2002; 37(8): 813-820.
 15. Dumont E, Andrès Y, Le Cloirec P, Gaudin F. Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration. *Biochem Eng J* .2008; 42(2): 120-127.
 16. Galera MM, Cho E, Tuuguu E, Park SJ, Lee C, Chung WJ. Effects of pollutant concentration ratio on the simultaneous removal of NH₃, H₂S and toluene gases using rock wool-compost biofilter. *J Hazard Mater* .2008; 152(2): 624-631.
 17. Baquerizo G, Maestre JP, Machado VC, Gamisans X, Gabriel D. Long-term

- ammonia removal in a coconut fiber-packed biofilter: Analysis of N fractionation and reactor performance under steady-state and transient conditions. *Water Res.* 2009; 43(8): 2293-2301.
18. Filho JLRP, Sader LT, Damianovic MHRZ, Foresti E, Silva EL. Performance evaluation of packing materials in the removal of hydrogen sulphide in gas-phase biofilters: polyurethane foam, sugarcane bagasse, and coconut fibre. *Chem Eng J* 2010; 158(3): 441-450.
 19. Amarsanaa A, Shin WS, Choi JH, Choi SJ. Biofiltration of gaseous toluene using adsorbent containing polyurethane foam media. *Environ Eng Res.* 2006; 11(1): 1-3.
 20. Chaiprapat S, Mardthing R, Kantachote D, Karnchanawong S. Removal of hydrogen sulfide by complete aerobic oxidation in acidic biofiltration. *Process Biochem* 2011; 46(1): 344-352.
 21. EPA. Determination of Hydrogen Sulfide Content of Fuel Gas Streams in Petroleum Refineries. California, Air Resources Board. 1999.
 22. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th ed. Washington DC. APHA, AWWA, WEF. 2005.
 23. Morgan-Sagastume JM, Noyola A. Hydrogen sulfide removal by compost biofiltration: effect of mixing the filter media on operational factors. *Bioresour Technol.* 2006; 97(13): 1546-1553.
 24. Nourmoradi H, Avazpour M, Ghasemian N, Heidari M, Moradnejadi K, Khodarahmi F, et al. Surfactant modified montmorillonite as a low cost adsorbent for 4-chlorophenol: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *J Taiwan Inst Chem E.* 2016; 59: 244-251.
 25. Oh DI, Song J, Hwang SJ, Kim JY. Effects of adsorptive properties of biofilter packing materials on toluene removal. *J Hazard Mater.* 2009; 170(1): 144-150.
 26. López ME, Rene ER, Malhautier L, Rocher J, Bayle S, Veiga MC, et al. One-stage biotrickling filter for the removal of a mixture of volatile pollutants from air: Performance and microbial community analysis. *Bioresour Technol* 2013; 138: 245-252.
 27. Amin MM, Rahimi A, Bina B, Heidari M, Mohammadi Moghadam F. Performance evaluation of a scoria-compost biofilter treating xylene vapors. *J Environ Health Sci Eng.* 2014; 12(1): 1-10.
 28. Estrada JM, Quijano G, Lebrero R, Muñoz R. Step-feed biofiltration: a low cost alternative configuration for off-gas treatment. *Water Res.* 2013; 47(13): 4312-4321.
 29. Mehdinia SM, Latif PA, Taghipour H. A comparative evaluation of dried activated sludge and mixed dried activated sludge with rice husk silica to remove hydrogen sulfide. *Iran J Environ Health Sci Eng* 2013; 10(22): 1-7.
 30. Yan-Ling Ma YL, Yang BL, Jing-Lian Zhao JL. Removal of H₂S by Thiobacillus denitrificans immobilized on different matrices. *Bioresour Technol.* 2006; 97 (16): 2041-2046.
 31. Kim JH, Rene ER, Park HS. Biological oxidation of hydrogen sulfide under steady and transient state conditions in an immobilized cell biofilter. *Bioresour Technol.* 2008; 99(3): 583-588.
 32. Aroca G, Urrutia H, Núñez D, Oyarzún P,

Arancibia A, Guerrero K. Comparison on the removal of hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioparus*

and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Electron J Biotechnol*. 2007; 10(4): 514-520.