

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 66-77

Industrial Acidic Wastewater Treatment by Sulfate Reducing Microorganisms

N. Panahi Osalou¹, L. Taghavi^{2*}, A. H. Hassani³, M. Dehghani⁴

1. PhD. Student, Dept. of Environmental Pollution, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) Taghavi_lobat@yahoo.com and l.taghavi@srbiau.ac.ir
3. Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. Assoc. Prof., Dept. of Environmental Science and Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

(Received April 15, 2022 Accepted Feb. 19, 2023)

To cite this article:

Panahi Osalou, N., Taghavi, L., Hassani, A. H., Dehghani, M. 2023. "Industrial acidic wastewater treatment by sulfate reducing microorganisms" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 66-77.
Doi: 10.22093/wwj.2022.337775.3251. (In Persian)

Abstract

The effluents of polymerization plants are acidic due to the use of sulfuric acid as flocculation agent and their wastewater contains high amounts of sulfate ions. In wastewater industry, several physical, chemical and biological treatment methods are used. The main purpose of this study is to examine the feasibility of anaerobic biological treatment of sulfate in industrial effluents by using sulfate-reducing bacteria. The research method is quantitative, and experiments and data collection from 2017-2020. The main variables of this research are temperature, effluent pH and the population of microorganisms. Experiments at two temperature levels of 25 and 60 °C and two different pHs, 7.5 and 8.5, were performed and four series of experiments were done. The results showed that by increasing the temperature of the solution from 25° to 60 °C at a concentration of 50 mg/L sulfate ion and a pH of 7.5, microorganisms showed 17.6% better performance. Also, the performance of microorganisms in anaerobic biological treatment at concentration of 50 mg/L of sulfate ion was 45.3% minimum and 49.9% at maximum. Comparison of experimental results at two different pHs of 7.5 and 8.5, indicates that at the same temperatures of 25 and 65°C, with increasing pH, the performance of microorganisms has improved by 16.4%. The efficiency of wastewater treatment increases 19.6% by changing pH from 7.5 to 8.5. Results showed that the correlation between temperature and sulfate ion concentration follows the 1st degree equation. Also, the weak pH environment provides suitable conditions for the removal of ions in the effluents, and the correlation between increasing the pH of the solution and decreasing the concentration of sulfate ions is a 2nd degree equation. Study showed that temperature and pH are the two effective factors in the process of biological treatment of effluents.

Keywords: Biological Treatment, Anaerobic Treatment, Sulfate Reducing Bacteria, Acidic Effluent, Industrial Wastewater.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۷۷-۶۶

استفاده از میکروارگانسیم‌های احیاکننده یون‌های سولفات در تصفیه پساب اسیدی صنعتی

نفیسه پناهی اوصالو^۱، لعبت تقوی^{۲*}، امیر حسام حسنی^۳، محسن دهقانی^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه آلودگی محیط‌زیست، واحد قشم،
دانشگاه آزاد اسلامی قشم، ایران

۲- دانشیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست،
واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) Taghavi_lobat@yahoo.com و l.taghavi@srbiau.ac.ir

۳- استاد، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست،
واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، واحد بندرعباس،
دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۱/۲۶ پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۳۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

پناهی اوصالو، ن.، تقوی، ل.، حسنی، ا. ح.، دهقانی، م.، ۱۴۰۲. "استفاده از میکروارگانسیم‌های احیاکننده یون‌های سولفات در تصفیه پساب اسیدی صنعتی" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۷۷-۶۶. Doi: 10.22093/wwj.2022.337775.3251

چکیده

پساب‌های واحدهای پلیمری به دلیل استفاده از اسید سولفوریک برای لخته‌سازی، ماهیت اسیدی داشته و حاوی مقدار زیادی یون سولفات هستند. در صنعت از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای تصفیه پساب‌های اسیدی استفاده می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، امکان‌سنجی تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی یون‌های سولفات از پساب‌های صنعتی با استفاده از باکتری‌های احیاکننده سولفات بود. روش این پژوهش کمی بود و تحلیل داده با استفاده از روش‌های آمار استنباطی انجام شد. قلمرو زمانی این پژوهش در طول سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ بود. متغیرهای اصلی پژوهش شامل دما، pH اولیه و ثانویه پساب و جمعیت میکروارگانسیم بود. آزمایش‌ها در دو سطح دمایی ۲۵ و ۶۰ درجه سلسیوس و دو pH مختلف ۷/۵ و ۸/۵ انجام شد. چهار سری آزمایش برحسب دما و pH طراحی و انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش دمای محلول از ۲۵ به ۶۰ درجه سلسیوس در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر یون سولفات و pH معادل ۷/۵، میکروارگانسیم‌های غیرهوازی احیاکننده یون‌های سولفات معادل ۱۷/۶ درصد از خود نشان دادند. همچنین کارایی میکروارگانسیم‌ها در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر یون سولفات، حداقل ۴۵/۳ درصد و حداکثر ۴۹/۹ درصد بود. مقایسه نتایج آزمایشات در دو pH مختلف ۷/۵ و ۸/۵ حاکی از آن بود که در دمای یکسان ۲۵ و ۶۵ درجه سلسیوس، با افزایش pH، عملکرد میکروارگانسیم‌ها به میزان ۱۶/۴ درصد بهبود یافت. میزان کارایی تصفیه پساب با افزایش یک واحد pH به میزان ۱۹/۶ درصد افزایش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد هم‌بستگی دما و غلظت یون سولفات از معادله درجه اول (خطی) تبعیت می‌کند. همچنین pH قلبی ضعیف، شرایط محیطی مناسبی برای حذف یون‌های معدنی پساب‌ها فراهم می‌کند و هم‌بستگی افزایش pH محلول و کاهش غلظت یون سولفات از نوع معادله درجه دوم بوده است. این پژوهش نشان داد که دما و pH دو عامل اصلی و تأثیرگذار در فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی یون‌های سولفات در پساب‌های صنعتی به‌شمار آمده و کنترل این دو پارامتر، نقش مؤثری در بهینه‌سازی فرایند تصفیه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تصفیه زیستی، تصفیه غیرهوازی، باکتری‌های احیاکننده سولفات، پساب اسیدی، پساب صنعتی



۱- مقدمه

هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش‌های غشایی کارایی زیادی دارند، اما به دلیل گرفتگی منافذ غشا و هزینه‌های برق مصرفی برای پمپ کردن پساب، مقرون به صرفه نیست. روش‌های شیمیایی نیز علاوه بر تولید میزان زیادی از لجن و افزودن مواد ناخواسته مشکلاتی مانند هزینه زیاد را دارند. از جمله نگرانی‌های مطرح در روش تصفیه بیولوژیکی متصاعد شدن گاز سولفید هیدروژن در نتیجه احیای بیولوژیکی سولفات است (Akbari et al., 2016, Torabian et al., 2019).

پساب‌های واحدهای پلیمری که از اسید سولفوریک برای لخته‌سازی^۱ استفاده می‌کنند، اسیدی بوده و حاوی مقدار زیادی یون سولفات هستند. به همین دلیل امکان مخلوط کردن آن با سایر پساب‌های صنعتی وجود نداشته و باید قبل از اختلاط پساب‌ها، نسبت به تصفیه آن اقدام کرد. به کارگیری روش‌های غیرهوازی میکروارگانسیم‌های احیاکننده یون‌های سولفات به این منظور استفاده خواهد شد. این باکتری‌ها در مسیرهای آب، بلااستفاده و در انتهای خطوط انتقال آب^۲ رشد می‌یابند. در شرایط عادی حضور این میکروارگانسیم‌ها نامطلوب تلقی می‌شود، چون لوله‌های فلزی در مجاورت این میکروارگانسیم‌ها دچار خوردگی می‌شوند، اما این باکتری‌ها به عنوان عوامل احیاکننده یون سولفات نقش مؤثری در کاهش بار یونی پساب‌ها می‌توانند ایفا کنند. تصفیه هوازی پساب‌های صنعتی روشی رایج و مورد استفاده متداول اما پرهزینه است، بنابراین کاهش هزینه‌های تصفیه و افزایش کارایی سیستم‌های تصفیه پساب با استفاده از روش‌های نوین مانند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی، اهمیت فراوانی دارد که موضوع اصلی این پژوهش در نظر گرفته شد (Girardi, 2014, Metcalf et al., 2013).

آزمایش‌های تراییان و همکاران نشان داد در راکتورهای ناپیوسته در تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فنل سولفونیک اسید، عمل انطباق میکروارگانسیم‌ها در مدت ۱۲ تا ۱۴ روز انجام می‌شود (Torabian et al., 2019).

همچنین تراییان و همکاران در پژوهش دیگری نشان دادند که راکتور ناپیوسته در حذف غلظت‌های متفاوت پساب اسیدی

بعد از انقلاب صنعتی قرن هجدهم و پیشرفت‌های فناورانه قرن نوزدهم و گسترش فعالیت‌های صنعتی در نیمه اول قرن بیستم، محیط زیست دستخوش تغییرات اساسی توسط انسان شده است. هم‌زمان با این تغییرات فعالیت‌های حفاظت از محیط زیست نیز گسترش یافته است. روش‌های تصفیه پساب در ابتدا به منزله پاسخ به نگرانی در مورد بهداشت عمومی و شرایط نامساعد ناشی از دفع پساب در محیط زیست به وجود آمدند. تا انتهای قرن بیستم اهداف تصفیه پساب مبتنی بر مسائل محیط‌زیستی و زیبا شناختی بود. تصفیه پساب صنعتی به دلیل ویژگی‌های آلاینده‌های آن، اهمیت بیشتری دارد. (Arhami Dolat Abad and Ganjidoust, 2020)

سولفات به عنوان یک آلاینده شیمیایی غیرسمی در نظر گرفته می‌شود که اگر غلظت آن فراتر از حد استاندارد شود، می‌تواند اثرات بهداشتی نامطلوبی بر گروه‌های حساس مانند کودکان و نوزادان ایجاد کند. پساب اسیدی صنایع غنی از سولفات و فلزاتی مانند کادمیوم، مس، نیکل، آهن، سرب و روی است. همچنین صنایعی مانند پالایشگاه‌های نفت، پتروشیمی، به دلیل استفاده از سولفات در فرایند فراوری، مقدار زیادی سولفات دارند. غلظت یون‌های سولفات در پساب صنایع می‌تواند از ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشتر شود. تخلیه پساب غنی از یون سولفات به محیط به دلیل احیای سولفات به سولفید هیدروژن، می‌تواند باعث خوردگی لوله‌های فلزی و آلودگی هوا شود. سولفات در محیط‌های آبی طی فرایند هیدرولیز به اسید سولفوریک تبدیل می‌شود که عاملی سمی برای موجودات آبی است (Metcalf et al., 2018, Shariffard et al., 2021).

فرایندهایی مانند اسمز معکوس^۱، فناوری غشایی^۲، الکترودیالیز^۳، روش احیای بیولوژیکی^۴ یون‌های سولفات توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات^۵، روش‌های شیمیایی مانند استفاده از آهک و نمک‌های باریوم و روش الکتروشیمی برای تصفیه سولفات از پساب پیشنهاد شده‌اند (Metcalf et al., 2018, Ong, 2019).

¹ Reverse Osmosis (RO)

² Membrane Technology

³ Electrodialysis

⁴ Biological Reduction

⁵ Sulfate Reducing Bacteria (SRB)

⁶ Coagulation

⁷ Deadlines



یک طرف با افزایش زمان واکنش بی‌هوازی، به دلیل غلبه میکروارگانیسم‌های حذف‌کننده سولفات بر سایر گونه‌ها می‌توان کارایی حذف سولفات را افزایش داد و از طرف دیگر با کنترل دقیق حجم لجن مازاد (عمر لجن) در کارایی حذف اثر مثبت گذاشت (Torabian et al., 2021).

یاکولوا و همکاران در سال ۲۰۱۹، پژوهش حذف بیولوژیکی سولفات از فاضلاب توسط راکتور ناپیوسته متوالی با جریان پیوسته را انجام دادند. راکتور استفاده شده شامل دو قسمت پیش واکنش و منطقه اصلی واکنش بود. پژوهش در سه مرحله با زمان‌های ماند هیدرولیکی و میزان جریان‌های مختلف انجام شد و نتایج نشان داد که کارایی فرایند حذف یون‌های سولفات در مراحل مختلف به ترتیب ۳۸/۵، ۵۲/۱، ۵۵/۹ درصد بوده است (Iakovleva et al., 2019).

ادامه تصفیه پساب‌های صنعتی به روش‌های کنونی موجب افزایش پسماند فرایند تصفیه (لجن)، کاهش کارایی سیستم‌های تصفیه، افزایش هزینه‌های نگهداری و راهبری سیستم‌های تصفیه پساب شده است. بنابراین لزوم توجه به سایر روش‌های تصفیه و بررسی امکان تصفیه پساب به روش‌های غیرمتداول مانند (تصفیه غیرهوازی) ضروری و اجتناب‌ناپذیر است و این پژوهش درصدد بررسی امکان استفاده از روش بیولوژیکی غیرهوازی به‌عنوان روشی مؤثر و با کارایی زیاد برای تحقق این امر بود.

نوآوری این پژوهش، استفاده از این میکروارگانیسم‌ها برای کاهش غلظت یون‌های معدنی مانند یون‌های سولفات در پساب خروجی از صنایع بود. نمونه اولیه برای رشد و تکثیر این باکتری‌ها، از نقاط راکد مسیر آب خنک‌کننده زیرزمینی^۱ استخراج شد و سپس در آزمایشگاه بیولوژیکی پرورش یافت. هدف اصلی این پژوهش امکان‌سنجی تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی یون‌های سولفات از پساب‌های صنعتی بررسی شده، بود. شناسایی کمی و کیفی پساب صنعتی بررسی شده و شناسایی روش‌های تصفیه پساب‌های اسیدی و تهیه و تکثیر میکروارگانیسم‌های مناسب برای انجام آزمایش‌ها از سایر اهداف این پژوهش بود.

۲- مواد و روش‌ها (روش پژوهش)

روش پژوهش، کمی و موردی بود. تحلیل داده با استفاده از

محتوی سولفات (فنل سولفونیک اسید) تا غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر قابلیت استفاده مناسبی دارد (Torabian et al., 2019).

بذرافشان و همکاران در بررسی امکان حذف یون‌های سولفات از محلول‌های آبی، با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی مؤلفه‌های غلظت یون سولفات، pH محلول و زمان مواجهه را از متغیرهای اصلی مؤثر بر حذف سولفات اعلام کردند (Bazrafshan et al., 2020).

شریفی‌فرد و همکاران در پژوهشی نشان دادند که استفاده از باکتری‌های احیاکننده سولفات و احیای یون‌های سولفات به یون‌های سولفیدی از طریق آن، یک روش مؤثر برای تصفیه پساب صنعتی به شمار می‌رود و فرایندهای بیولوژیکی مبتنی بر SRB به دلیل کم‌هزینه بودن و حذف مؤثر ترکیبات آلی و فلزی (حتی در غلظت‌های کم) پساب‌های صنعتی، جذابیت بیشتری در مقایسه با فرایند شیمیایی دارند (Shariffard et al., 2021).

بذرافشان و همکاران همچنین گزارش کردند که کاربرد SBR برای حذف مواد مغذی در فاضلاب با غلظت مواد ورودی ۱۵۰ mg/L یون سولفات بررسی کرده و کارایی حذف یون‌های سولفات در حدود ۶۹/۷ درصد را به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که SBR توانایی حذف غلظت زیادی از یون سولفات را در دماهای کمتر از ۲۵ °C دارد (Bazrafshan et al., 2020).

شاکر خطیبی و همکاران در سال ۲۰۱۶، کارایی راکتور ناپیوسته متوالی در تصفیه پساب را بررسی کردند و نشان دادند کارایی حذف یون‌های سولفات در شرایط بهینه شده دمایی معادل ۵۵ درصد بوده که با افزایش میزان اقامت توده میکروارگانیسمی تا ۲۰ روز، کارایی ۶۰ تا ۹۱ درصد افزایش می‌یابد (Shakerkhatibi et al., 2016).

ترابیان و همکاران در سال ۲۰۲۱، بررسی اثر زمان بی‌هوازی و عمر لجن بر حذف بیولوژیکی سولفات در راکتورهای ناپیوسته با عملیات متوالی را بررسی کردند. کارایی حذف سولفات در راکتور شاهد و راکتور دوم با زمان واکنش بی‌هوازی ۳، ۲ و ۴/۵ ساعت در طی دوره‌های ۲ ماهه به ترتیب برابر با ۱۶، ۲۶، ۶۴ و ۷۹ درصد به دست آمده بود. از طرف دیگر افزایش عمر لجن از ۵ به ۱۰ روز در راکتور با زمان واکنش بی‌هوازی ۴/۵ ساعت، باعث کاهش کارایی حذف یون‌های سولفات از ۷۹ به ۵۴ درصد شده و بررسی نتایج حاصله از عملکرد راکتورها نشان داد که از

^۱Underground Cooling Water



برای انجام آزمایش‌ها با اضافه کردن مداوم در ادامه با تأمین شرایط محیطی لازم برای رشد میکروارگانسیم‌ها، جمعیت میکروبی افزایش یافته و زمینه برای ورود خوراک محتوی یون‌های سولفات آماده شد. سپس با کاهش خوراک میکروارگانسیم‌ها و افزایش غلظت یون‌های سولفات در محیط، تحمل‌پذیری میکروارگانسیم‌ها تقویت شده و نیز با قطع خوراک آنها، این میکروارگانسیم‌ها شروع به استفاده از یون‌های سولفات به‌عنوان منبع غذایی کردند.

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی مانند دما و pH از تجهیزات بیان شده در جدول ۱ استفاده شد.

سایر تجهیزات و مواد استفاده شده در این پژوهش به شرح جدول ۲ بود.

طراحی آزمایش‌ها از روش فاکتوریل کامل دو متغیر در دو سطح بالا و پایین استفاده شد و به‌منظور تعیین اختلاف بین میانگین اعداد با حداقل سه تکرار برای هر آزمایش، پس از آنالیز واریانس از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵ استفاده شد. در تمام مراحل، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS ۱۳ انجام شد.

در این پژوهش، از کشت به روش Hungate در ویال‌های crimped seal شده و دمای ۴۰ درجه سلسیوس و با تنظیم اتمسفر بی‌هوازی استفاده شد. برای ساخت محیط کشت Hungate، ۰/۳ گرم دی پتاسیم سولفات، ۰/۳ گرم مونیو پتاسیم فسفات، ۱ گرم آمونیوم کلراید، ۱ گرم سدیم کلراید، ۳ گرم سدیم سولفات، ۰/۱ گرم پتاسیم کلراید، ۰/۱ گرم کلسیم کلراید، ۲ گرم منیزیم کلراید، ۰/۱ گرم عصاره مخمر در ارنل استرلیزه شده با هم مخلوط و در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ دقیقه اتوکلاو شد. بعد از خنک شدن محیط کشت، ۰/۱ گرم سدیم سولفید و ۰/۱ گرم سدیم هیدروژن کربنات با فیلتر به محیط اضافه و محیط کشت در شرایط بی‌هوازی درون ویال سرمی استریل تقسیم شد. پس از تقسیم محیط کشت آماده شده در ویال‌های سرمی ۱۰ میلی‌لیتری، نمونه با نسبت ۲۵ درصد محیط کشت، با سرنگ کشت داده شد. در محیط کشت پس از ۳ هفته، رشد به صورت سیاه شدن رسوب محیط کشت در ویال‌های سرمی مشاهده شد. باکتری‌ها در مدت زمان رشد خود، گاز سولفید هیدروژن تولید می‌کردند و تولید سولفید هیدروژن پس از ۲۱ روز شدت یافت (Krieg, 2021).

روش‌های آمار استنباطی انجام شد. قلمرو زمانی پژوهش، برای جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات موردنیاز پژوهش از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ بود.

قلمرو مکانی پژوهش، واحد تصفیه پساب شرکت پتروشیمی تبریز (تولیدکننده محصولات پتروشیمی و پلیمری) و قلمرو موضوعی تصفیه پساب‌های اسیدی با استفاده از روش بیولوژیکی غیرهوازی بود. در این پژوهش برای گردآوری داده‌ها، از دو روش کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شد. ابزار گردآوری داده‌ها، مشاهده نمونه‌ها و اندازه‌گیری و آزمون نمونه‌ها بر اساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و آزمون پساب بود.

شرایط بی‌هوازی از طریق ایجاد جریان آرام^۱ پساب (عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰) به درون بستر بافل‌دار بسته حاوی میکروارگانسیم‌ها SRB انجام شده است (Jeanthon et al., 2020). در این پژوهش، اثر میکروارگانسیم‌های احیاکننده سولفات به‌عنوان "متغیر مستقل" و تصفیه غیرهوازی پساب صنعتی به‌عنوان "متغیر وابسته" بود و تغییرات دما و pH نمونه‌ها هم به‌عنوان "متغیر میانجی" در نتیجه پژوهش و متغیر وابسته تأثیرگذار هستند.

مراحل اجرای پژوهش به شرح زیر بود:

- شناسایی روش‌های بیولوژیکی موجود برای کنترل غلظت یون‌های معدنی و سولفات از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و ادبیات و سوابق پژوهشی
- تهیه نمونه میکروارگانسیم از منبع اصلی (مسیر آب خنک‌کننده زیرزمینی)
- تکثیر و کنترل جمعیت میکروارگانسیم تولیدی به روش Hungate (Krieg, 2021).

- طراحی آزمایش‌ها و ارائه طرح آزمایش به روش فاکتوریل

- انجام آزمایش‌ها و تعیین شرایط بهینه دمایی و غلظتی و pH برای حداکثرسازی کارایی فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی

در مرحله اول پس از شناسایی روش‌های بیولوژیکی موجود برای کنترل غلظت یون‌های معدنی و سولفات، اقدام به کشت نمونه‌های میکروارگانسیم‌ها کرده و میکروارگانسیم مناسب استفاده شده مانند باکتری‌های احیاکننده سولفات از محیط کشت شده، استخراج شد. کشت نمونه‌ها برای تأمین میکروارگانسیم موردنیاز

¹ Laminar



جدول ۱- تجهیزات استفاده شده در اندازه‌گیری متغیرهای پژوهش

Table 1. Research variable's measurement method

Variable	Equipment name	Variation domain	Measurement precision
Temperature (°C)	KIMO	25-60 °C	0.1 °C
pH	TESTO	7.5 – 8.5	0.1
Sulfate ions concentration	Volumetric titration	50-200 mg/ml	1.0 mg/ml

جدول ۲- تجهیزات و مواد استفاده شده در پژوهش

Table 2. Research equipment/chemicals/materials list

Equipment/chemicals/materials	Description
Jar test	Velp Scientifica FC6 model (6 cell)
pH meter	TESTO
Thermometer	KIMO K type
Glass containers	100 ml capacity for microorganisms treatment
Acid resistance plastic containers	1000 ml as bio reactors
Decanter	Wastewater/sludge separator
SRB vials	Taken from dead end underground cooling water ring
Hot plate	100 °C Max
Mixer	Magnetic type AzmaTeb
pH meter	Merck
Di ammonium phosphate	Microorganism feeding
Styrene monomer (99.5% Conc.)	Synthetic organic wastewater
Sulphuric acid (98% Conc.)	Sulfate ions synthetic source



Fig. 1. Sulfate reducing bacteria vials

شکل ۱- ویال‌های کشت باکتری‌های احیا کننده سولفات

ابتدای پژوهش ۲۴ نمونه (۲۴ ویال ۱۰ میلی‌لیتری) از نقاط بدون استفاده و کم‌استفاده چرخه آب خنک‌کننده زیرزمینی، نمونه‌های آبی تهیه شد و به مدت ۶ روز در دمای محیط و درون لوله آزمایش در آزمایشگاه نگهداری شد. با تیمار جمعیت میکروارگانیزمی با اوره و فسفر جمعیت میکروارگانیزم درون لوله‌های آزمایش به صورت

شکل ۱ ویال‌های کشت باکتری نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

یکی از منابع غنی میکروارگانیزم‌های احیا کننده یون‌های سولفات، در نقاط کم‌استفاده چرخه‌های آب خنک‌کننده است. بنابراین در



روش تاگوجی انجام شد. طراحی آزمایش‌ها حاکی از آن بود که دو سطح دمایی و دو سطح pH برای روایی و پایایی آزمایش‌ها، کفایت لازم را دارد. سطوح اشاره شده در جدول ۳ آمده است:

جدول ۳- سطوح متغیرهای پژوهش بر اساس طراحی آزمایشات

Table 3. Research variables experimental design

Variable	Levels	Values	Unit
Temperature	2	25 & 60	°C
pH	2	7.5 & 8.5	-

- آزمایش شماره 001 SA

این آزمایش در دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس، میزان pH در حدود $7/5 \pm 0/2$ و میزان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت ورودی یون سولفات انجام شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها در دستگاه Jar test و در دو نوبت انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که تکرار آزمایش‌ها، موجب تغییر معنی‌داری در نتایج نمی‌شود. آزمایش با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت یون سولفات آغاز شد و روزانه در دو نوبت به میزان ۵ میلی‌لیتر در گرم، بر غلظت یون سولفات در محلول اضافه شد که این کار به مدت ۳۰ روز ادامه یافت. در طول آزمایش جمعیت میکروارگانسیمی در محدوده غلظتی $5000 \text{ mg/ml} \pm 1/1$ ثابت نگه داشته شد. غلظت یون سولفات در محلول در بازه‌های زمانی ۳ روزه اندازه‌گیری شد که نتایج آن به شرح شکل ۴ است.

در آزمایش SA 001، میزان غلظت تجمعی مورد انتظار در

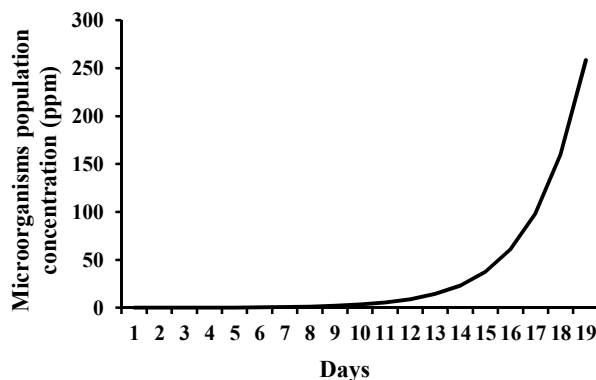


Fig. 2. Microorganism population growing profile

شکل ۲- نمودار افزایش غلظت جمعیت میکروارگانسیمی

برای استفاده در آزمایش‌ها

تابع‌نمایی افزایش یافته و مطابق شکل ۲ افزایش یافت. مطابق نتایج آزمایش میزان رشد غلظت میکروارگانسیم‌ها بعد از ۱۹ روز به کمتر از ۱۰ درصد غلظت نهایی افت کرد. بنابراین تیمار میکروارگانسیم‌ها در ۱۹ روز متوقف شد و ویال‌های آزمایش‌های اصلی تهیه شدند.

در شکل ۳ نمونه‌های آزمایشگاهی در حال اختلاط در دستگاه Jar test و تست اسیدیته (pH) و کنترل دمایی نشان داده شده است.

پس از آماده شدن جمعیت میکروارگانسیم‌ها برای انجام آزمایش‌ها و تعیین متغیرهای کنترلی پژوهش شامل دما، غلظت یون‌های سولفات و pH ماتریس پساب، طراحی آزمایش‌ها به

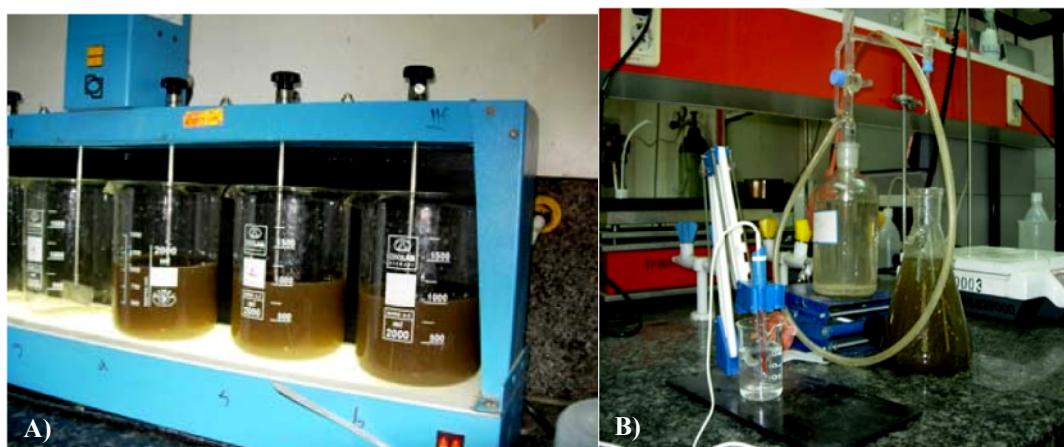


Fig. 3. Tests samples in laboratory Jar test Facilities, A) pH and B) temperature control

شکل ۳- نمونه‌های آزمایشگاهی در حال اختلاط در دستگاه Jar test (A، تست اسیدیته (pH) و B) کنترل دمایی



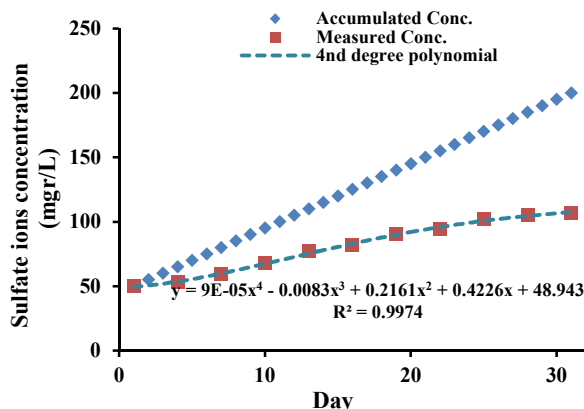


Fig. 5. Sulfate Ions accumulated & measured concentration in SA 002 test

شکل ۵- تغییرات غلظت تجمعی و اندازه‌گیری شده یون‌های سولفات در محلول آزمایش شماره SA 002

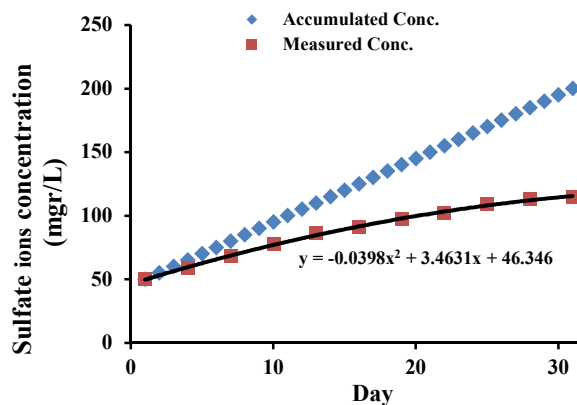


Fig. 4. Sulfate ions accumulated & measured concentration in SA 001 test

شکل ۴- تغییرات غلظت تجمعی و اندازه‌گیری شده یون‌های سولفات در محلول آزمایش شماره SA 001

همان گونه که ملاحظه می‌شود، در آزمایش SA 002 نیز، میزان غلظت تجمعی مورد انتظار در محلول روزانه ۵ میلی‌گرم در لیتر طی مدت ۳۰ روز افزایش یافت، اما به دلیل عملکرد میکروارگانیسم‌ها، غلظت اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی ۳ روز یک بار، کاهش معنی‌داری با غلظت تجمعی داشت که حاکی از احیا شدن یون‌های سولفات محلول توسط میکروارگانیسم‌ها بود. بر اساس محاسبات نرم‌افزار اکسل، امکان شبیه‌سازی تغییرات غلظت یون‌های سولفات با سطح اطمینان ۹۹ درصد از طریق معادله چند جمله‌ای درجه چهارم (مطابق شکل ۵) مدل‌سازی شده است.

آزمایش شماره SA 003

دو آزمایش قبلی (SA 001 و SA 002) با pH معادل ۷/۵ انجام شد. برای بررسی تأثیر تغییرات pH بر نتایج آزمایش‌ها، دو آزمایش بعدی با pH معادل ۸/۵ انجام شد. آزمایش SA 003 در دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس، میزان pH در حدود $7/5 \pm 0/2$ و میزان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت ورودی یون سولفات انجام شد. در این آزمایش نیز به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها در دستگاه Jar test و در دو نوبت انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که تکرار آزمایش‌ها، موجب تغییر معنی‌داری در نتایج نمی‌شود. آزمایش با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت یون سولفات آغاز شد و روزانه در دو نوبت به میزان ۵ میلی‌لیتر در گرم، بر غلظت یون سولفات در محلول اضافه شد که این کار به مدت ۳۰ روز ادامه

محلول روزانه ۵ میلی‌گرم در لیتر و تا ۳۰ روز افزایش یافت، اما به دلیل عملکرد میکروارگانیسم‌های غیرهوازی احیا کننده یون‌های سولفات، غلظت اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی ۳ روز یک بار، کاهش معنی‌داری با غلظت تجمعی داشت که حاکی از احیا شدن یون‌های سولفات محلول توسط میکروارگانیسم‌ها بود. بر اساس محاسبات نرم‌افزار اکسل، امکان شبیه‌سازی تغییرات غلظت یون‌های سولفات با سطح اطمینان ۹۵ درصد از طریق معادله چند جمله‌ای درجه دوم (مطابق شکل ۴) امکان‌پذیر است.

آزمایش شماره SA 002

این آزمایش در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، میزان pH در حدود $7/5 \pm 0/2$ و میزان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت ورودی یون سولفات انجام شد. در این آزمایش نیز به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها در دستگاه Jar test و در دو نوبت انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که تکرار آزمایش‌ها، موجب تغییر معنی‌داری در نتایج نمی‌شود. آزمایش با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت یون سولفات آغاز شد و روزانه در دو نوبت به میزان ۵ میلی‌لیتر در گرم، بر غلظت یون سولفات در محلول اضافه شد که این کار به مدت ۳۰ روز ادامه یافت. در طول آزمایش جمعیت میکروارگانیسمی در محدوده غلظتی $5000 \text{ mg/ml} \pm 1/1$ ثابت نگه داشته شد. غلظت یون سولفات در محلول در بازه‌های زمانی ۳ روزه اندازه‌گیری شد که نتایج آن به صورت شکل ۵ است.



آزمایش با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت یون سولفات آغاز شد و روزانه در دو نوبت به میزان ۵ میلی‌لیتر در گرم، بر غلظت یون سولفات در محلول اضافه شد که این کار به مدت ۳۰ روز ادامه یافت. در طول آزمایش جمعیت میکروارگانسیمی در محدوده غلظتی $5000 \text{ mg/ml} \pm 1\%$ ثابت نگه داشته شد. غلظت یون سولفات در محلول در بازه‌های زمانی ۳ روزه اندازه‌گیری شد که نتایج آن به صورت شکل ۷ است.

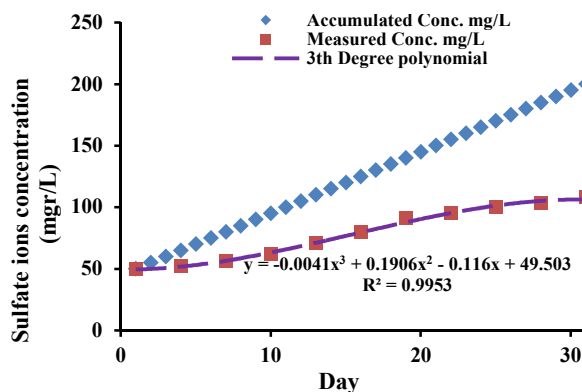


Fig. 7. Sulfate ions accumulated & measured concentration in SA 004 test

شکل ۷- تغییرات غلظت تجمعی و اندازه‌گیری شده یون‌های سولفات در محلول آزمایش شماره SA 004

همان گونه که ملاحظه می‌شود، در آزمایش SA 004 نیز، میزان غلظت تجمعی مورد انتظار در محلول روزانه ۵ میلی‌گرم در لیتر طی مدت ۳۰ روز افزایش یافت، اما به دلیل عملکرد میکروارگانسیم‌ها، غلظت اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی ۳ روز یک بار، کاهش معنی‌داری با غلظت تجمعی داشت. تغییرات غلظت یون‌های سولفات در محلول مورد آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار اکسل، با سطح اطمینان ۹۵ درصد توسط معادله چند جمله‌ای درجه سوم (مطابق شکل ۷) مدل‌سازی شده است.

در جدول ۴ مقدار دما و pH در چهار آزمایش اعلام شده، نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌های این پژوهش در دو pH و میزان کارایی کاهش غلظت یون سولفات در pH های مختلف به شرح جدول ۵ است.

یافت. در طول آزمایش جمعیت میکروارگانسیمی در محدوده غلظتی $5000 \text{ mg/ml} \pm 1\%$ ثابت نگه داشته شد. غلظت یون سولفات در محلول در بازه‌های زمانی ۳ روزه اندازه‌گیری شد که نتایج آن به شرح شکل ۶ است.

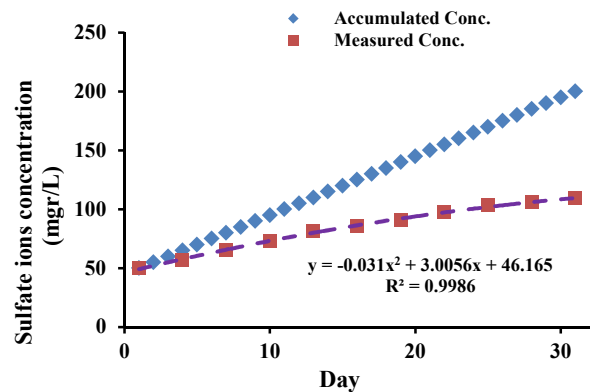


Fig. 6. Sulfate ions accumulated & measured concentration in SA 003 test

شکل ۶- تغییرات غلظت تجمعی و اندازه‌گیری شده یون‌های سولفات در محلول آزمایش شماره SA 003

همان گونه که ملاحظه می‌شود، در آزمایش SA 003 نیز، میزان غلظت تجمعی مورد انتظار در محلول روزانه ۵ میلی‌گرم در لیتر طی مدت ۳۰ روز افزایش یافت، اما به دلیل عملکرد میکروارگانسیم‌ها و احیای یون‌های سولفات موجود در محلول، غلظت اندازه‌گیری شد در بازه‌های زمانی ۳ روز یک بار، کاهش معنی‌داری با غلظت تجمعی داشت. تغییرات غلظت یون‌های سولفات در محلول مورد آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار اکسل، با سطح اطمینان ۹۵ درصد توسط معادله چند جمله‌ای درجه دوم (مطابق شکل ۶) مدل‌سازی شده است.

- آزمایش شماره SA 004

این آزمایش در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، میزان pH در حدود $8/5 \pm 0/2$ و میزان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت ورودی یون سولفات انجام شد. در این آزمایش نیز به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها در دستگاه Jar test و در دو نوبت انجام شد تا از تکرارپذیر بودن آزمایش‌ها اطمینان حاصل شود.



محیط قلیایی ضعیف pH معادل ۸/۵ را تأیید می‌کند (Torabian et al., 2019).

نتایج این پژوهش با پژوهش ترابیان و همکاران در سال ۲۰۲۱ در خصوص بررسی اثر زمان تصفیه غیرهوازی بر حذف بیولوژیکی سولفات در راکتورهای ناپیوسته نیز مطابقت داشته است و کارایی حذف سولفات در حدود ۳ درصد بیشتر از آزمایش قبلی این پژوهشگران بوده است. همچنین کاهش کارایی فرایند تصفیه و حذف یون‌های سولفات از ۷۹ درصد به ۵۴ درصد در پژوهش اخیر نیز صحنه‌گذاری شده و مشخص می‌شود باکتری‌های گرمادوست احیاکننده سولفات در دمای بیشتر تا ۶۰ درجه سلسیوس عملکرد بهتری در محیط قلیایی از خود نشان داده‌اند (Torabian et al., 2021).

نتایج این پژوهش با پژوهش اکبری و همکاران در سال ۲۰۱۶ در بررسی میزان کارایی راکتور ناپیوسته متوالی در حذف بیولوژیکی یون‌های سولفات نیز هم‌راستا بوده و ۱۵/۶ درصد کارایی بهتری در فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی یون‌های سولفات ثبت کرده است (Akbari et al., 2016).

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف استفاده از میکروارگانیسم‌های غیرهوازی به عنوان احیاکننده یون‌های سولفات در فرایند پساب صنعتی انجام شد. در این راستا با استفاده از ادبیات پژوهش و بررسی پیشینه، آزمایش‌ها در دو سطح دمایی ۲۵ و ۶۰ درجه سلسیوس انجام شد. همچنین بر اساس مستندات بررسی‌های قبلی، مقرر شد آزمایش‌ها در دو pH مختلف ۷/۵ و ۸/۵ انجام شود. تأثیر تغییرات دما و pH در کارایی فرایند تصفیه پساب‌های اسیدی واحدهای پلیمری با استفاده از میکروارگانیسم‌های غیرهوازی احیاکننده سولفات، ارزیابی شد. بر اساس متغیرهای فوق، ۴ سری آزمایش برحسب دما، pH و غلظت مختلف انجام شد. در حالت کلی نتایج این پژوهش نشان داد افزایش دما منجر به بهبود کارایی فرایند تصفیه شده و این تأثیر در محیط قلیایی ضعیف (pH معادل ۸/۵) بیشتر است.

مقایسه یافته‌های این پژوهش با پژوهش کاووسی و همکاران در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد دستیابی به عملکرد تصفیه بیش از ۷۵

جدول ۴- مقدار متغیرهای پژوهش در آزمایش‌ها

Table 4. Research variables values in tests

Test No.	Temperature (°C)	pH
SA 001	25	7.5
SA 002	60	8.5
SA 003	25	7.5
SA 004	60	8.5

جدول ۵- کارایی کاهش غلظت یون سولفات در pH های مختلف

Table 5. Treatment system efficiency in various pH

Treatment system efficiency	pH	
	7.5	8.5
25 °C	53.2% Max	65.3 % Max
60 °C	61.7 % Max	76.1 % Max

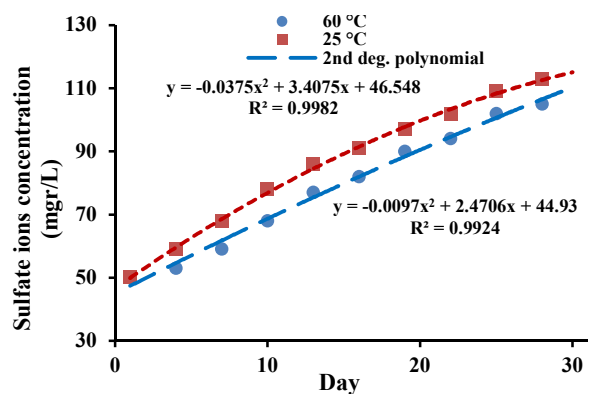


Fig. 8. Sulfate ions concentration comparison in different temperatures (pH=7.5)

شکل ۸- مقایسه تغییرات غلظت اندازه‌گیری شده یون‌های سولفات در محلول برحسب دماهای مختلف در pH معادل ۷/۵

نتایج چهار آزمایش اخیر حاکی از آن بود که با افزایش دمای محلول از ۲۵ به ۶۰ درجه سلسیوس در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر یون سولفات و pH معادل ۷/۵ میکروارگانیسم‌های غیرهوازی احیاکننده یون‌های سولفات در حدود ۱۳/۸ درصد عملکرد بهتری از خود نشان دادند. نتایج مقایسه عملکرد میکروارگانیسم‌ها در دو دمای مختلف در شکل ۸ آمده است.

یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش ترابیان و همکاران در سال ۲۰۱۹ نیز هم‌راستا است. آنها نشان داده بودند که pH قلیایی ضعیف، شرایط محیطی مناسبی برای حذف یون‌های معدنی پساب‌ها فراهم می‌کند و نتایج آن کارایی بهتر سیستم تصفیه در



قابل دستیابی در تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی پساب محتوی یون‌های سولفات در حدود ۷۶ درصد بود و با توجه به وضعیت عملکردی فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی، در صورت نیاز به دست‌یابی به کارایی بیش از ۷۶ درصد لازم است استفاده از سایر روش‌های تصفیه، مانند الکتروکواگولاسیون (لخته‌سازی الکتریکی) نیز مورد توجه قرار گیرد.

البته با توجه به دامنه این پژوهش، لازم است علاوه بر دما و pH پارامترهای مهمی مانند زمان اقامت، غلظت‌های مختلف پساب، غلظت‌های مختلف جمعیت میکروارگانسیمی نیز بررسی شوند تا شرایط بهینه عملکرد سیستم تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی بر اساس بهینه‌سازی تمامی عوامل موثر بر فرایند شناسایی و تنظیم شود.

با توجه به اینکه پساب واحدهای پلیمری در عمل ناخالصی‌های آلی و معدنی متنوعی دارند، یکی از محدودیت‌های این پژوهش استفاده از پساب سنتز شده برای انجام آزمایش‌ها بود و امکان بررسی نقش ناخالصی‌های آلی موجود در پساب مانند هیدروکربن‌های آلی مایع و جامد و عوامل مداخله‌گر مانند اسیدها و بازهای معدنی در فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی فراهم نشد.

۵- قدردانی

نویسندگان، از تمامی پاسخ‌دهندگان که با اختصاص وقت ارزشمند خود، داوطلبانه و دلسوزانه در این پژوهش مشارکت کردند قدردانی می‌کنند. همچنین به این وسیله از پیشنهادات و نظرات سازنده داوران محترم مجله به منظور بهبود محتوای فنی پژوهش و پشتیبانی مدیر اجرایی و عوامل محترم مجله و آزمایشگاه‌های شرکت پتروشیمی تیریز قدردانی به عمل می‌آید.

درصد توسط فرایند غیرهوازی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و pH معادل ۸/۵ امکان‌پذیر است (Kavosi et al., 2022).

همچنین مطابق نتایج پژوهش بذرافشان و همکاران در سال ۲۰۲۰ در حذف بیولوژیکی سولفات از پساب با استفاده از راکتور ناپیوسته متوالی، درصدهای حذف یون‌های سولفات در کمترین بازدهی راکتور در حدود ۳۸/۵ و در بیشترین بازدهی در حدود ۵۵/۹ درصد بوده است و این در حالی است که نتایج این تحقیق نشان داد با استفاده از تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی پساب محتوی یون‌های سولفات، حداقل کارایی فرایند تصفیه در شرایط دمای ۲۵ درجه سلسیوس و pH معادل ۷ در حدود ۵۳/۲ درصد و در شرایط بهینه شده (دمای ۶۰ درجه سلسیوس و pH معادل ۸) در حدود ۷۶/۱ درصد بوده است (Bazrafshan et al., 2020).

همچنین این پژوهش مانند نتایج پژوهش خواجه و رضایی در سال ۲۰۲۲ نشان داد علاوه بر زمان مواجهه و غلظت یون سولفات، میزان pH ماتریس پساب نیز از مولفه‌های اصلی تأثیرگذار در فرایند تصفیه پساب حاوی یون‌های سولفات است (Khajeh and Rezaee, 2022).

نتایج پژوهش حاجی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ در خصوص هم‌بستگی تغییرات pH و میزان حذف یون‌های سولفات پساب نیز این امر را تصدیق می‌کند و نیز هم‌بستگی مثبت pH و کاهش غلظت یون سولفات پساب را نشان داده است (Hajizadeh et al., 2017).

نتایج این پژوهش نشان داد که دما و pH دو عامل اصلی و تأثیرگذار در فرایند تصفیه بیولوژیکی غیرهوازی یون‌های سولفات در پساب‌های صنعتی به شمار می‌روند و کنترل مقدار این دو پارامتر در شرایط صنعتی نقش مؤثری در بهینه‌سازی فرایند تصفیه خواهد داشت. همچنین در شرایط بهینه دمایی و pH، حداکثر کارایی

References

- Arhami Dolat Abad, A. & Ganjidoust, H. 2020. Sulfate removal from water using activated red mud: kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(2), 439-456. (In Persian)
- Amirsadat, K., Sharififard, H. & Lashanizadegan, A. 2021. Nitrate removal from municipal effluent in the adsorption process on activated carbon of orange peel modified with chitosan and iron particles. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(7), 2493-2508. (In Persian)





- Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A. & Mahvi, A. H. 2020. Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process—a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13, 1-16.
- Girardi, A. 2014. Wastewater treatment and reuse in the oil & petrochem industry—a case study. *Engineering Conferences International ECI Digital Archives*, 1-31.
- Shakerkhatibi, M., Akbari, Z., Mosaferi, M., Derafshi, S., Chavoshbashi, M., Fatehifar, E., et al. 2016. Evaluation of operating performance of ABS wastewater treatment system. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(2), 31-40. (In Persian)
- Hajizadeh, Y., Teiri, H., Nazmara, Sh. & Rezaei, M. 2017. Biological removal of copper and sulfate from synthetic wastewater by using sulfate-reducing bacteria in anaerobic fluid bed reactor (AFBR). *Journal of Health*, 8(1), 54-64. (In Persian)
- Iakovleva, E., Salonen, J., & Sitarz, M. 2019. Industrial products and wastes as adsorbents for sulphate and chloride removal from synthetic alkaline solution. *Chemical Engineering Journal*, 259, 364-371.
- Kavosi, M., Gazvini, M., Sharma, R. & Kim, M. 2022. A review on mechanical-based microalgae harvesting methods for biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106348.
- Krieg, N. R. & Parte, A. 2021. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: The Bacteroidetes, Acidobacteria, and Fibrobacteres*. Springer. 14, 114-119.
- Khajeh, F. & Rezaee, A. 2022. Electrochemical sulfate removal from aqueous solution using sandwich panel carbon cloth electrode by steel mesh. Laboratory study. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences (JRUMS)*, 19(14), 383-396. (In Persian)
- Jeanthon, C., Reysenbach, A. L. & Prieur, D. 2020. Thermodesulfobacterium, a thermophilic, chemolithoautotrophic, sulfate-reducing bacterium isolation. *International Journal System and Evolutionary Microbiology*, 52, 765-772.
- Metcalf, L., Eddy, H. P. & Tchobanoglous, G. 2018. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, McGraw-Hill, Pub. New York, USA.
- Metcalf, L., Eddy, H. P., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R. & Borton, F. 2013. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th Ed., McGraw-Hill Pub., New York, USA.
- Ong, S. K. 2019. Wastewater Engineering. In: Kutz, M. ed. *Handbook of Environmental Engineering*. 351-373.
- Torabian, A., Abtahi, S., Amin, M. & Momeni, S. 2021. Treatment of low-strength industrial wastewater using anaerobic baffled reactor. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 7(3), 229-240.
- Torabian, A., Abtahi, S. M., Amin, M. M. & Momeni, S. A. 2019. Operation of an anaerobic baffled reactor for Sulfate removal of Amirkabir industrial estate wastewater. *Journal of Water and Wastewater*, 21(2), 19-26. (In Persian)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

