فصلنامه علمی-پژوهشی
بهداشت در عرصه
دوره ۱۳ شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۳۱ تا ۴۱
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf

ارزیابی فرآیند ترکیبی تصفیه بیولوژیکی هوازی و جذب با نانو سیلیس: مطالعه موردی شیرابه سراوان استان گیلان

داریوش نقی پور[۱]، سید داود اشرفی[۱]، زهرا شهیدی مقدم[۲]، محمد امین تقوی[۳]، کامران تقوی*[۱]

[۱] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گیلان، رشت، ایران.

[۲] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

[۳] گروه فیزیولوژی و حرکت‌شناسی زیستی، دانشگاه سایمون فریزر، برنابی، کانادا.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: تصفیه شیرابه محل دفن پسماند به‌دلیل غلظت بالای ترکیبات آلی و معدنی مقاوم، نیازمند به‌کارگیری فرآیندهای ترکیبی است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد سیستم ترکیبی بیولوژیکی هوازی و جذب با نانوسیلیس در تصفیه شیرابه پسماند سراوان انجام شد.

مواد و روش‌ها: نمونه‌های شیرابه پس از تعیین مشخصات فیزیکوشیمیایی، به مدت ۲۵ روز در راکتور هوازی آزمایشگاهی تحت تصفیه قرار گرفتند. پساب خروجی، جهت حذف تکمیلی آلاینده‌ها، با جاذب نانو سیلیس تماس داده شد و اثر پارامترهای عملیاتی شامل زمان تماس، pH و غلظت جاذب بر راندمان حذف آلاینده‌ها بررسی گردید. موازین اخلاقی درانجام این پژوهش، رعایت گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که شیرابه خام با قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی متوسط رو به بالا، مناسب برای تصفیه بیولوژیکی است. فرآیند بیولوژیکی هوازی منجر به کاهش ۷۳ درصد BOD_5، ۶۰ درصد COD و ۵۷ درصد TSS شد؛ اما راندمان حذف فلزات سنگین در این مرحله محدود بود. در مرحله جذب تکمیلی با نانوسیلیس، راندمان حذف BOD_5، COD و TSS تحت شرایط بهینه زمان تماس ۴۵ دقیقه، pH برابر ۴ و دوز جاذب ۱ g/l به ترتیب به ۸۹، ۸۷ و ۸۷ درصد افزایش یافت. در خصوص حذف فلزات سنگین، به کارگیری نانوسیلیس در زمان تماس ۷۵ دقیقه، دوز ثابت ۰/۴ g/l و pH در محدوده ۷-۱۰ منجر به دستیابی به حداکثر راندمان حذف فلزات از پساب بیولوژیکی گردید.

نتیجه‌گیری: تکمیل فرآیند بیولوژیکی هوازی با جاذب نانو سیلیس در صورت تنظیم دقیق متغیرهای عملیاتی براساس نوع آلاینده هدف می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد و قابل توسعه برای تصفیه شیرابه با قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: شیرابه محل دفن پسماند؛ بارآلی؛ تصفیه بیولوژیکی هوازی؛ جاذب نانوسیلیس.

Please cite this article as: Naghipour D, Ashrafi SD, Shahidi Moghadam Z, Taghavi MA, Taghavi K. Performance evaluation of an integrated aerobic biological treatment and nanosilica adsorption process: A case study of Saravan landfill leachate, Gilan province, Iran. Journal of Health in the Field 2025; 13(4):31-41. https://doi.org/10.22037/jhf.v13i4.51510

*نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گیلان، رشت، ایران.

Email: k.taghavi@gums.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

مقدمه

افزایش سریع روند صنعتی‌شدن و شهرنشینی، الگوی تولید پسماند را در کشورهای با اقتصاد توسعه یافته و در حال توسعه به طور چشمگیری تغییر داده است. برآوردها نشان می‌دهد که تولید جهانی پسماند جامد شهری (MSW) تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت؛ به طوری که مقدار آن از ۲/۰۱ میلیارد تن در سال ۲۰۱۶ به ۳/۴۰ میلیارد تن خواهد رسید [۱]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه روش‌های متنوع دفع پسماند طی دهه‌های اخیر، دفن پسماند همچنان رایج‌ترین و گسترده‌ترین روش دفع مواد زائد جامد در بسیاری از کشورها به شمار می‌رود. اعتقاد بر این است که تا ۹۵ درصد از کل MSW جمع‌آوری شده در سراسر جهان در محل‌های دفن پسماند دفع می‌شود [۲]. تأسیسات دفن پسماند در زمین، همواره با مخاطرات محیط‌زیستی همراه هستند؛ چرا که دفع پسماندهای خطرناک در درون یا بر سطح زمین، به طور اجتناب‌ناپذیری منجر به رهاسازی ترکیبات زیان‌آور در محیط می‌شود. برهمکنش پیچیده فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی همراه با نفوذ آب باران و رطوبت بالا در محل‌های دفن پسماند، منجر به تشکیل شیرابه محل دفن می‌شود؛ مخلوطی سمی که تحت تأثیر عوامل محیطی به ویژه بارندگی، آلاینده‌ها را آزاد کرده و موجب آلودگی خاک‌های اطراف، آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌گردد و بدین ترتیب محیط زیست را در معرض خطر قرار می‌دهد [۳]. آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، نمک‌های معدنی، ترکیبات آلی، ترکیبات نیتروژنی، پلاستیک‌ها، ترکیبات زنوبیوتیک (Xenobiotic Compounds: XCs) مانند آفت‌کش‌ها، داروها و محصولات مراقبت شخصی (Pharmaceuticals and Personal Care Products: PPCPs)، ترکیبات مختل‌کننده غدد درون ریز (Endocrine Disrupting Compounds: EDCs)، اسیدهای آلی و دیگر مواد، همگی در شیرابه‌ای که به محیط نفوذ می‌کند، وجود دارند [۲،۴]. تعیین ماهیت ترکیبات آلی منحصر به فرد در شیرابه به صورت تجربی دشوار است. آلاینده‌های آلی موجود در شیرابه با استفاده از پارامترهای کلی جهانی نظیر کل کربن آلی (TOC) [۵]، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی پنج روزه (BOD_5) [۶] و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) [۷] مورد شناسایی و تعیین ویژگی قرار می‌گیرند. مشخصات شیرابه بسته به عواملی مانند تغییرات اقلیمی، دما، میزان بارش، ترکیب پسماند، میزان رطوبت مواد جامد دفن‌شده و سن محل دفن متفاوت است [۸،۹].

شیرابه محل دفن پسماند را می‌توان بر اساس سن محل دفن به سه دسته جوان (کمتر از ۵ سال)، متوسط (۵ تا ۱۰ سال) و قدیمی (بیش از ۱۰ سال) تقسیم‌بندی کرد [۱۰]. در محل‌های دفن جوان، شیرابه دارای مقادیر بالای COD (بیش از ۱۰،۰۰۰ mg/L) و نسبت بالای BOD_5 به COD (بین ۰/۵ تا ۱) است. در مقابل، شیرابه حاصل از محل‌های دفن قدیمی با مقادیر نسبتاً پایین‌تر COD (کمتر از ۴۰۰۰) و نسبت پایین BOD_5 به COD (کمتر از ۰/۱) شناخته می‌شود [۱۰]. به دلیل وجود سطوح بالای آمونیاک، فلزات سنگین و برخی از مواد آلی، شیرابه محل دفن پسماند می‌تواند اثرات سمی مضری بر اکوسیستم و انسان داشته باشد. برخی از فلزات سنگین متداول موجود در شیرابه شامل فلزات روی (Zn)، نیکل (Ni)، سرب (Pb)، مس (Cu)، کروم (Cr) و کادمیوم (Cd) و متالوئیدهایی مانند آرسنیک (As)، سلنیوم (Se)، جیوه (Hg)، منگنز (Mn) و کبالت (Co) هستند که فقط در غلظت‌های بسیار کم وجود دارند. اما ماهیت غیر زیست تجزیه‌پذیر و محلول فلزات سنگین باعث می‌شود که آنها برای مدت طولانی در شیرابه باقی بمانند [۱۱] و در نتیجه تحت بزرگنمایی زیستی قرار گیرند. بنابراین، شیرابه به عنوان مایعی در نظر گرفته می‌شود که دارای اثرات بالقوه اکوتوکسیک با فشار بر اجزای اکوسیستم است. به دلیل نوسانات قابل‌توجه در کیفیت و کمیت شیرابه، تصفیه آن به یکی از مسائل مهم در مدیریت محل‌های دفن پسماند تبدیل شده است و در حال حاضر، بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه شیرابه یکی از چالش‌های اساسی در حوزه مدیریت پسماند به شمار می‌رود [۲،۱۱].

تاکنون از روش‌های گوناگونی برای تصفیه شیرابه استفاده شده است که هر یک دارای میزان موفقیت متفاوتی بوده‌اند [۱۱]. روش‌های مرسوم شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند که به طور گسترده برای تصفیه شیرابه به کار رفته‌اند [۱۲]. معمولاً تصفیه بیولوژیکی با فرآیندهای هوازی و بی‌هوازی به عنوان مناسب‌ترین فناوری برای شیرابه محل دفن پسماند در نظر گرفته شده است. با این حال، تصفیه بیولوژیکی شیرابه حاصل از محل‌های قدیمی دفن پسماند به دلیل سمیت موادی همچون هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) و بی‌فنیل‌های پلی کلرینه (Polychlorinated Biphenyls: PCBs)، وجود مواد آلی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی مانند اسیدهای هیومیک یا سورفاکتانت‌ها، بار بالای آمونیاک آزاد و اسید نیتروس، ترکیبات آلی زیست‌ستیز و فلزات سنگین محدود می‌شود. فرآیندهای تلفیقی شیمیایی– فیزیکی– بیولوژیکی (به هر ترتیب) اشکالات فرآیندهای واحد را بهبود بخشیده و کارایی تصفیه کلی را افزایش می‌دهند [۱۳].

در میان روش‌های شیمیایی، تکنیک‌هایی مانند اسمز معکوس (RO) [۱۴] و انعقاد–لخته‌سازی (C/F) [۱۵]، و همچنین فرآیندهای الکتروشیمیایی نظیر الکتروفنتون (EF)، الکترواکسیداسیون (EO) و الکتروکوآگولاسیون (EC) [۱۶–۱۸]، عملکرد مؤثری از خود نشان داده‌اند. روش‌های فیزیکی مانند جذب سطحی و فیلتراسیون نیز از جمله گزینه‌های رایج برای کاهش آلاینده‌های موجود در شیرابه هستند [۱۹]. جذب سطحی، که یکی از قدیمی‌ترین و پایدارترین فرآیندها محسوب می‌شود، همواره به طور گسترده در مدیریت و بهره‌برداری از سامانه‌های

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

مختلف تصفیه فاضلاب به‌کار گرفته شده است. این روش با جذب ناخالصی‌ها و آلاینده‌ها بر روی سطوح خارجی یا داخلی جاذب‌ها، قادر است طیف وسیعی از آلاینده‌ها را از جریان فاضلاب حذف کند. برای این منظور، از دو نوع جاذب استفاده می‌شود: جاذب‌های طبیعی و جاذب‌های مصنوعی. از مهم‌ترین و پرکاربردترین این مواد می‌توان به مواد پایه کربنی، مواد فلزی، دندریمرها (Dendrimers) و مواد کامپوزیتی اشاره کرد. با وجود پیشرفت‌های مستمر فناوری در زمینه تصفیه فاضلاب، روش جذب سطحی همچنان به دلیل اثربخشی بالا، سادگی اجرا و هزینه نسبتاً پایین، از محبوبیت و تقاضای زیادی برخوردار است [۲۰].

اخیراً استفاده از نانوذرات (Nanoparticles: NPs) به عنوان جاذب، به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، تعداد زیاد سایت‌های فعال جذب، کوتاه بودن مسیر نفوذ درون ذرات و امکان تنظیم اندازه منافذ و شیمی سطح، به طور چشمگیری توسعه یافته است [۲۱]. مکانیسم جذب در نانو ذرات تحت تأثیر عواملی نظیر اتصال به سایت‌های سطحی، جذب انتخابی مغناطیسی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و به کارگیری لیگاندهای اصلاح شده قرار دارد. بر اساس گزارش Hua و همکاران (۲۰۱۲) [۲۲]، انواع مختلف نانو ذرات فلزی برای حذف فلزات سنگین نظیر As، Pb، Hg، Cu، Cd، Cr و Ni مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعه‌ای نشان می‌دهد که نانو ذرات در مقایسه با جاذب‌های متداولی مانند کربن فعال، عملکرد رقابتی و کارایی بالاتری دارند [۲۳] و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آنها زمینه‌ساز توسعه فناوری‌ها و کاربردهای نوین شده است [۲۴]. در این میان، نانومواد سیلیکا به دلیل تنوع بالای کاربرد، از جمله در کاتالیز پیشرفته، سامانه‌های انتقال دارو و حوزه‌های پزشکی، پاکسازی محیط زیست و تصفیه فاضلاب، جایگاه ویژه‌ای دارند [۲۵]. این مواد به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین نانو مواد شناخته می‌شوند و تقاضا برای آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که میزان مصرف آنها در سال ۲۰۱۶ به حدود ۲/۸ میلیون تن متریک رسید و نرخ رشد سالانه‌ای در حدود ۵/۶ درصد را نشان می‌دهد [۲۶،۲۷]. مطالعات مختلفی نقش حیاتی سیلیکا و نانومواد مبتنی بر آن را در فرآیندهای تصفیه آب و حذف آلاینده‌ها گزارش کرده‌اند [۲۸]. نانوسیلیکا می‌تواند به عنوان جاذب برای حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی شیرابه مؤثر باشد، همانند مطالعه‌ای توسط Taghavi و همکاران (۲۰۲۱) [۲۹] که نانوسیلیکا را برای حذف فلزات سنگین به کار بردند و مطالعه Pavithra و Shanthakumar (۲۰۱۷) [۳۰] که از نانوذرات سیلیکا برای حذف COD، BOD_5 و رنگ شیرابه استفاده کردند. مرورهای اخیر نیز نشان داده‌اند [۳۱] که جاذب‌ها، به ویژه نانوسیلیکا، نقش مؤثری در تصفیه شیرابه دارند؛ اما ترکیب این جاذب‌ها با فرآیند بیولوژیکی هوازی به عنوان یک سیستم یکپارچه هنوز به طور کامل بررسی نشده است. این شکاف دانشی، ضرورت انجام مطالعه‌ای را نشان می‌دهد که عملکرد ترکیبی فرآیند بیولوژیکی هوازی و نانوسیلیکا را در بهبود راندمان حذف آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین، با تعیین شرایط بهینه عملیاتی روشی کارآمد، پایدار و اقتصادی برای بهبود عملکرد تصفیه شیرابه ارائه دهد که بتواند به عنوان راهکاری عملی در مدیریت پساب‌های صنعتی و شهری مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری، تعیین مشخصات فیزیکوشیمیایی شیرابه خام و تهیه نانوسیلیس

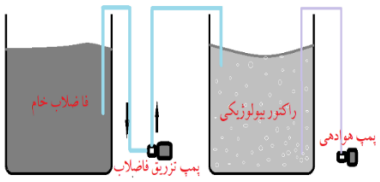
محل دفن پسماند سراوان با مساحتی بیش از ۱۵ هکتار در ناحیه‌ای جنگلی، در فاصله ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری شهر رشت واقع شده است. این سایت از سال ۱۳۶۳ به عنوان محل دفن دائمی پسماندهای حوزه مرکزی استان گیلان فعال بوده و بیش از ۳۵ سال سابقه بهره‌برداری دارد. در حال حاضر، روزانه حدود ۱۰۰۰ تن پسماند به این محل منتقل می‌شود که بیش از ۸۵۰ تن آن متعلق به شهر رشت است. میزان نشت شیرابه از کف محل دفن حدود ۰/۷ متر مکعب به ازای هر متر مربع در سال برآورد شده است [۳۲،۳۳]. در این مطالعه، نمونه‌های شیرابه خام به صورت تصادفی از محل ورود شیرابه به رودخانه در روستای کچا و در ظروف پلی‌اتیلنی ۱۰ لیتری جمع‌آوری گردید و تحت شرایط سرما به آزمایشگاه دانشکده بهداشت رشت منتقل شد. نمونه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا واکنش‌های بیولوژیکی و شیمیایی در طول استفاده از آنها به حداقل برسد.

ابتدا مشخصات فیزیکوشیمیایی شیرابه خام مطابق با دستورالعمل‌های کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب تعیین مقدار گردید [۳۴]. فلزات سنگین با استفاده از دستگاه ICP-OES مدل "ARCOS FHE12" اندازه‌گیری شدند. نانو سیلیس تهیه شده به فرمول شیمیایی SiO_2 از شرکت US Research Nanomaterials, Inc. با خلوص ۹۸ درصد تهیه شد.

آماده‌سازی راکتور و فرآیند تصفیه مورد نظر

در این پژوهش و به منظور تأمین شرایط مورد نظر، شیرابه خام به مدت ۲۵ روز در یک راکتور آزمایشگاهی در مقیاس آزمایشگاهی در ابعاد ۰/۳۵×۰/۳۵×۰/۴ متر و به حجم ۰/۰۵ متر مکعب به روش هوازی تصفیه شد. شیرابه خام به کمک یک دوزینگ پمپ با دبی پمپاژ ۱/۳۶ میلی‌لیتر در دقیقه از یک مخزن به راکتور پمپاژ گردید. یک پمپ هوای آکواریومی، با دبی ۰/۵ لیتر در دقیقه به مدت ۲۵ روز عمل هوادهی به راکتور بیولوژیکی را انجام داد. لجن فعال مورد نیاز از تصفیه‌خانه فاضلاب پگاه رشت با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر به عنوان بذر به راکتور تغذیه شد تا شیرابه داخل راکتور به صورت بیولوژیکی تصفیه شود (شکل شماره ۱).

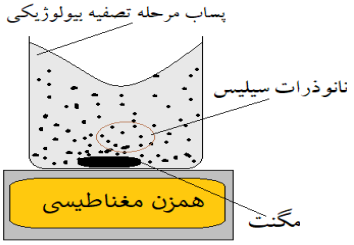
این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.



شکل ۱- راکتور تصفیه بیولوژیکی شیرابه خام
Figure 1- Biological treatment reactor for raw leachate

پس از ۲۵ روز، شیرابه تصفیه شده بطور کامل از راکتور خارج و به مدت ۲ ساعت ته‌نشین شد. نمونه‌های پساب بیولوژیکی با روش‌های استاندارد از نظر BOD_5، COD، TSS، pH، Cu، As، Ni، Mn و Hg (در روزهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵) مورد آزمایش قرار گرفتند.

پس از انجام آنالیزهای مربوط به پساب راکتور بیولوژیکی، یک نمونه ۵۰ میلی‌لیتری از آن در شیکر با ۰/۴ g/L نانوسیلیس به مدت ۵ تا ۷۵ دقیقه قرار داده شد تا زمان تماس بهینه با جاذب نانوسیلیس مشخص شود (شکل شماره ۲).



شکل ۲- اختلاط پساب فرآیند بیولوژیکی با نانوذرات سیلیس
Figure 2- Mixing of biologically treated effluent with silica nanoparticles

سپس pH بهینه، در pH های ۳-۱۱ به منظور حذف TSS، COD، BOD_5 و فلزات سنگین تعیین شد. در نهایت آزمایش در pH و زمان تماس بهینه با نانو سیلیس در محدوده غلظت ۰/۲۵ g/L تا ۶/۵ انجام شد تا غلظت بهینه نانوسیلیس برای کاهش متغیرهای مورد مطالعه مشخص شود. یافته‌های بدست آمده توسط بسته نرم‌افزاری MS-Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها

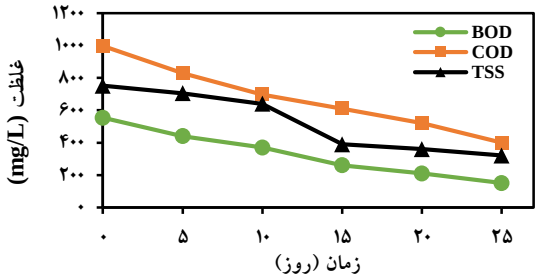
ترکیب فیزیکوشیمیایی شیرابه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شیرابه دارای مقادیر بالای مواد آلی، جامدات معلق و نیتروژن آمونیاکی است. بر اساس شاخص تجزیه‌پذیری بیولوژیکی (BOD_5/COD =۰/۵۶)، این شیرابه در فاز متوسط رو به جوان قرار می‌گیرد. همچنین، ماهیت خنثی تا قلیایی و قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی متوسط رو به بالا نشان می‌دهد که شیرابه از پتانسیل مناسبی برای تصفیه بیولوژیکی برخوردار است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی شیرابه خام
Table 1- Physicochemical characteristics of raw leachate

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
pH	-	۷/۷
کدورت	NTU	۱۲۳
COD	mg/L	۹۹۷
BOD_5	mg/L	۵۵۴
TSS	mg/L	۷۵۲
NH_4-N	mg/L	۲۰۸
Cu	mg/L	۰/۳۲
As	mg/L	۰/۰۳۳
Ni	mg/L	۰/۱۳۸
Mn	mg/L	۱/۴۸
Hg	mg/L	۰/۰۱۱

تأثیر فرآیند بیولوژیکی هوازی بر روند تغییرات غلظت بارآلی و TSS شیرابه خام

روند تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS شیرابه طی ۲۵ روز تصفیه بیولوژیکی در شکل شماره ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که پس از ۲۵ روز، راندمان حذف BOD_5، COD و TSS به‌ترتیب ۷۳، ۶۰ و ۵۷ درصد بود که بیانگر کارایی مناسب فرآیند بیولوژیکی در کاهش بار آلی و ذرات معلق شیرابه است.



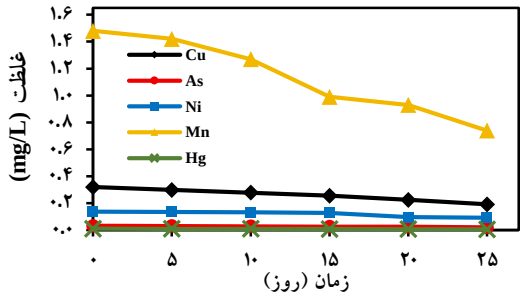
شکل ۳- نمودار تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS شیرابه در فرآیند تصفیه بیولوژیکی هوازی
Figure 3- Variation of BOD_5, COD, and TSS concentrations in leachate during aerobic biological treatment process

تأثیر فرآیند بیولوژیکی هوازی بر روند تغییرات غلظت فلزات سنگین شیرابه خام

روند تغییرات غلظت فلزات سنگین طی تصفیه بیولوژیکی هوازی شیرابه در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، بیشترین راندمان حذف مربوط به Mn بود که با حدود ۵۰ درصد کاهش، غلظت آن از ۱/۴۸ mg/L به ۰/۷۴ رسید. پس از آن، Cu با راندمان حدود ۴۰

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

درصد و As و Hg با راندمان مشابه (حدود ۳۶ درصد) کاهش قابل توجهی را نشان دادند. Ni کمترین کاهش را داشته و با راندمان حدود ۳۳ درصد، غلظت آن از ۰/۱۳۸ mg/L به ۰/۰۹۲ کاهش یافت. به طور کلی، این نتایج بیانگر کارایی مناسب فرآیند بیولوژیکی هوازی در حذف برخی فلزات سنگین، به‌ویژه Mn است، در حالی که راندمان حذف As، Hg و Ni محدودتر می‌باشد.

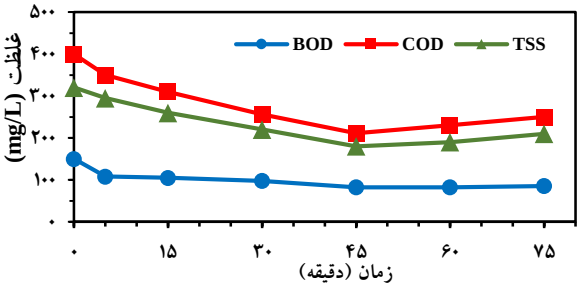


شکل ۴- نمودار تغییرات غلظت فلزات سنگین شیرابه در فرآیند تصفیه بیولوژیکی هوازی

Figure 4- Variation of heavy metal concentrations during aerobic biological treatment of leachate

استفاده از جاذب نانوسیلیس و تأثیر آن بر روند تغییرات غلظت بارآلی، TSS و فلزات سنگین پساب راکتور بیولوژیکی

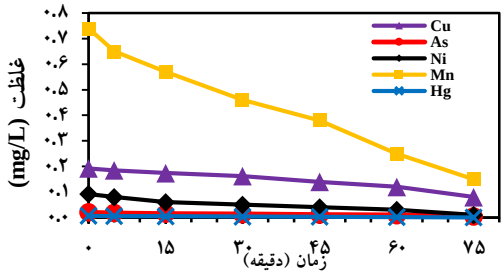
بر اساس شکل شماره ۵، تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS در پساب فرآیند بیولوژیکی با استفاده از جاذب نانوسیلیس با غلظت g/L ۰/۴ و در زمان‌های تماس مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس تا حدود ۴۵ دقیقه، غلظت آلاینده‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. در زمان تماس بهینه ۴۵ دقیقه، راندمان حذف BOD_5، COD و TSS به‌ترتیب حدود ۴۵، ۴۷ و ۴۳ درصد به‌دست آمد.



شکل ۵- نمودار تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS پساب فرآیند بیولوژیکی در زمان‌های تماس مختلف با استفاده از g/L ۰/۴ جاذب نانوسیلیس

Figure 5- Variation of BOD_5, COD, and TSS in biologically treated effluent at different contact times using 0.4 g/L nanosilica adsorbent

تغییرات غلظت فلزات سنگین در پساب فرآیند بیولوژیکی پس از تماس با جاذب نانوسیلیس به مقدار g/L ۰/۴ در زمان‌های مختلف در شکل شماره ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که غلظت تمامی فلزات اندازه‌گیری شده با افزایش زمان تماس کاهش یافته است. در زمان تماس ۷۵ دقیقه، راندمان حذف فلزات Ni، Hg، Mn، As و Cu به ترتیب ۸۹، ۸۵، ۸۰، ۷۶ و ۵۸ درصد به دست آمد.

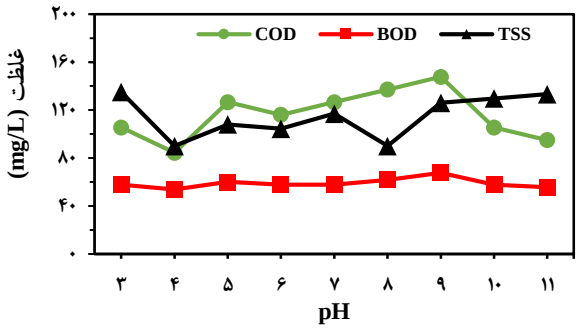


شکل ۶- نمودار تغییرات غلظت فلزات سنگین پساب فرآیند بیولوژیکی در زمان‌های تماس مختلف با استفاده از g/L ۰/۴ جاذب نانوسیلیس

Figure 6- Variation of heavy metal concentrations in biologically treated effluent at different contact times using 0.4 g/L nanosilica adsorbent

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

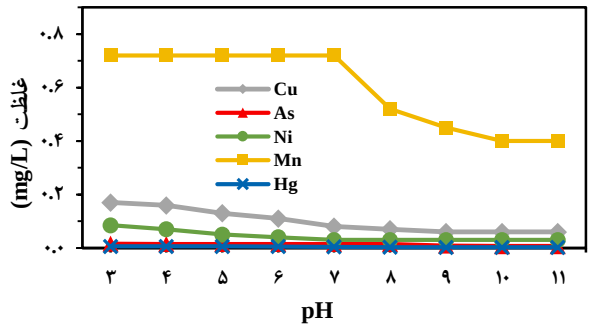
تغییرات غلظت پارامترهای BOD_5، COD و TSS در pH های مختلف با ۰/۴ g/L جاذب نانوسیلیس در شکل شماره ۷ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که تغییرات pH اثر قابل‌توجهی بر کارایی حذف آلاینده‌های آلی و جامدات معلق دارد. براساس نتایج، pH=۴ به عنوان بهترین شرایط عملکردی جاذب قابل انتخاب است. در pH=۴ بیشترین کاهش در مقدار COD (۸۴/۴ mg/L) مشاهده شد که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش بار سطحی مثبت نانو سیلیس در محیط اسیدی و در نتیجه بهبود برهم‌کنش با ترکیبات آلی باردار باشد. همچنین کاهش قابل‌توجه TSS (۹۰ mg/L) در همین pH بیانگر تجمع بهتر ذرات معلق و سهولت حذف آنها است. گرچه تغییرات BOD_5 در مقایسه با دو شاخص دیگر محدودتر بود، اما این پارامتر نیز در pH=۴ کمترین مقدار خود را ثبت کرده است (۵۳/۶ mg/L).



شکل ۷- نمودار تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS در pH های مختلف با ۰/۴ g/L جاذب نانوسیلیس

Figure 7- Variation of BOD_5, COD, and TSS at different pH values using 0.4 g/L nanosilica adsorbent

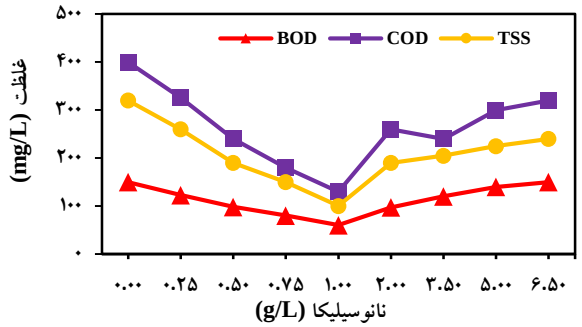
با توجه به شکل شماره ۸، بررسی تغییرات غلظت فلزات سنگین در pHهای مختلف نشان می‌دهد که pH اثر قابل‌توجهی بر کارایی نانو سیلیس در حذف فلزات دارد و الگوی واکنش هر فلز نسبت به تغییر pH متفاوت است. به طور کلی، با افزایش pH از ۳ تا ۱۱، غلظت اکثر فلزات کاهش یافته و نشان‌دهنده افزایش راندمان حذف در محیط‌های قلیایی‌تر است. مطابق شکل، pH بهینه برای حذف فلزات Cu، As، Ni، Mn و Hg به ترتیب برابر ۹، ۱۰، ۷، ۱۰ و ۹ بوده است و در pH بهینه برای هر فلز راندمان حذف به ترتیب ۸۱، ۷۹، ۷۸، ۷۳ و ۸۲ درصد بدست آمد. به طور کلی، شرایط قلیایی بیشترین کارایی را در حذف فلزات سنگین توسط نانوسیلیس فراهم کرد. تغییرات غلظت پارامترهای BOD_5، COD و TSS در غلظت‌های مختلف جاذب نانوسیلیکا از g/L ۰/۲۵ تا ۶/۵ تحت شرایط بهینه pH=۴ و زمان تماس ۴۵ دقیقه در شکل شماره ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانوسیلیکا از ۰/۲۵ تا g/L ۱، غلظت هر سه پارامتر روند کاهشی و معنی‌داری را نشان داده است. در نقطه بهینه g/L ۱، بیشترین راندمان حذف پارامترها مشاهده شد؛ به طوری که BOD_5 از حدود ۱۵۰ به حدود mg/L ۶۰ کاهش یافت. همچنین COD از حدود ۴۰۰ به حدود mg/L ۱۳۰ رسیده و TSS از حدود ۳۲۰ به حدود mg/L ۱۰۰ کاهش پیدا کرد. پس از این نقطه، با افزایش غلظت جاذب از g/L ۱ به بالا، دوباره روند افزایشی در مقادیر مشاهده شد.



شکل ۸- نمودار تغییرات غلظت فلزات سنگین در pH های مختلف با ۰/۴ g/L جاذب نانو سیلیس

Figure 8- Variation of heavy metal concentrations at different pH values using 0.4 g/L nanosilica adsorbent

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.



شکل ۹- نمودار تغییرات غلظت BOD_5، COD و TSS در غلظت‌های مختلف جاذب از g/L ۰/۲۵-۶/۵ (زمان ماند بهینه ۴۵ دقیقه و pH بهینه ۴)

Figure 9- Variation of BOD_5, COD, and TSS at different adsorbent dosages (0.25–6.5 g/L) under optimum conditions (45 min contact time and pH 4)

بحث

تأثیر فرآیند بیولوژیکی هوازی بر روند تغییرات غلظت بارآلی، TSS و فلزات سنگین شیرابه خام

نتایج این بخش با مطالعات مروری و تجربی پیشین که فرآیندهای هوازی مانند لجن فعال، SBR و MBR را به عنوان روش‌های مؤثر برای تصفیه شیرابه‌های نسبتاً جوان معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد [۹،۳۵]. Bernat و همکاران (۲۰۲۱) [۳۶] در تصفیه شیرابه پسماندهای شهری با استفاده از راکتور بیوفیلمی ناپیوسته متوالی، راندمان حذف BOD و COD را به‌ترتیب ۹۵/۵ و ۸۶/۵ درصد گزارش کردند که نشان‌دهنده عملکرد بالای فرآیندهای بیولوژیکی هوازی است. همچنین، Salim و همکاران (۲۰۲۴) [۳۷] در تصفیه شیرابه محل دفن با فرآیندهای فیزیکی- بیولوژیکی، راندمان حذف COD، BOD و TSS را در مرحله بیولوژیکی با راکتور SBR به‌ترتیب ۹۳/۶، ۹۶/۸ و ۱۰۰ درصد به‌دست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از فناوری‌های غشایی پیشرفته مانند اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس در مراحل نهایی می‌تواند راندمان حذف آلاینده‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. با وجود گزارش‌های متعدد از حضور فلزات سمی در شیرابه محل‌های دفن، اطلاعات دقیق درباره راندمان حذف فلزات در فرآیندهای بیولوژیکی هوازی محدود است؛ حال آنکه این فرآیندها به طور گسترده و معمول مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۸]. در این مطالعه، حذف بالای Mn با مکانیسم اکسیداسیون زیستی و تشکیل اکسیدهای جامد Mn توسط میکروارگانیسم‌های هوازی همخوانی دارد [۳۹،۴۰]. همچنین، راندمان حذف As با نقش اکسیداسیون بیولوژیکی آرسنیت As(III) به آرسنات As(V) در شرایط هوازی همخوان است، چرا که تبدیل As(III) به As(V)، امکان جذب و رسوب‌گذاری مؤثرتر را فراهم می‌سازد؛ این پدیده در مطالعات مشابه برای سامانه‌های تصفیه هوازی نیز گزارش شده است [۴۱،۴۲]. Yong و همکاران (۲۰۱۸) [۴۳] در یک فرآیند ترکیبی شامل SBR و انعقاد با آلوم، راندمان حذف بالاتری برای اغلب فلزات سنگین گزارش کردند؛ به طوری که به جز As و Mn، حذف سایر فلزات به مراتب بیشتر بود. این تفاوت، نقش مؤثر تلفیق فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی را در بهبود حذف فلزات سنگین از شیرابه برجسته می‌سازد.

تأثیر جاذب نانوسیلیس بر روند تغییرات غلظت بارآلی، TSS و فلزات سنگین پساب راکتور بیولوژیکی

Sorour و همکاران (۲۰۲۳) [۴۴] با استفاده از نانو سیلیس فعال شده در تصفیه فاضلاب صنعتی نشان دادند که این جاذب توانایی بالایی در حذف BOD، COD و TSS دارد و کارایی آن به دوز جاذب و زمان تماس وابسته است. Anjum و همکاران (۲۰۱۹) [۴۵] با بررسی عملکرد نانو مواد مختلف گزارش کردند که استفاده از نانو ذراتی مانند نانو سیلیس و نانو کامپوزیت‌ها موجب بهبود قابل‌توجه حذف COD، BOD و فلزات سنگین می‌شود؛ امری که به افزایش سطح ویژه و ظرفیت جذب سطحی نانومواد نسبت داده می‌شود. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد، زیرا بهبود حذف آلاینده‌های آلی و فلزات در حضور نانو سیلیس مشاهده شد.

Taghavi و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای با هدف حذف Hg، Cu، Ni، Mn و As از شیرابه قدیمی محل دفن پسماند، از سیستم ترکیبی بی‌هوازی، اکسیداسیون فنتون و جذب با نانوسیلیکا استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین حذف مربوط به Hg با ۹۷ درصد راندمان در دوز g/L ۰/۵، pH = ۹ و زمان تماس ۱۵ دقیقه بود، در حالی که حذف Cu تنها حدود ۱۰ درصد گزارش شد [۲۹]. Meky و همکاران (۲۰۲۴) در حذف Pb(II) و Cr(VI) از محلول آبی استاندارد با جذب ساده نانو سیلیکا سنتز شده به روش sol–gel، راندمان ۸۲ و ۷۸ درصد برای Pb و Cr به‌دست آوردند [۴۶]. همچنین Norton و Grant Norton (۲۰۲۵) توانایی نانو سیلیکا و نمونه‌های اصلاح شده آن را در فرآیندهای جذب ساده و اصلاح سطحی برای حذف فلزات سنگین از آب مورد ارزیابی قرار داد و در آن بر تأثیر عوامل کلیدی مانند pH، دوز جذب‌کننده، زمان تماس و اصلاح سطح بر عملکرد جذب تأکید شد [۴۷]. مقایسه این مطالعات حاکی از آن است که عملکرد نانو سیلیکا در محلول‌های کنترل شده و ساده به مراتب بالاتر از شیرابه‌های واقعی تحت فرآیندهای ترکیبی بوده است. با این حال، به طور کلی تمامی مطالعات بیانگر ظرفیت

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

بالای نانو سیلیکا در جذب فلزات سنگین هستند. هرچند کارایی نهایی تحت تأثیر نوع فرآیند، شرایط عملیاتی و ماهیت فلز هدف قرار دارد.

در مطالعه‌ای توسط Pavithra و Shanthakumar (۲۰۱۷) [۳۰] با هدف بررسی عملکرد نانو سیلیکا و نانو ذرات آهن در حذف COD، BOD و رنگ از شیرابه پسماند شهری، نتایج نشان داد که بهترین عملکرد جذب در pH=۶ به دست می‌آید. این مطالعه تأکید دارد که کاهش pH از مقدار اسیدی به حد متعادل باعث افزایش کارایی جاذب‌ها می‌شود، که با یافته‌های Shafqat و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد [۴۸]. این مطالعات به طور کلی نشان می‌دهند که pH اسیدی یا نزدیک به آن، به ویژه در جاذب‌های نانو سیلیکا، می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه راندمان حذف آلاینده‌های آلی و جامدات معلق شود. در نتیجه، به نظر می‌رسد که در فرآیندهای تصفیه مبتنی بر نانوسیلیکا، حفظ pH در محدوده اسیدی تا حدی به بهبود عملکرد جاذب کمک می‌کند. در pHهای بالا، افزایش بار منفی سطح نانو سیلیس و هیدرولیز و رسوب هیدروکسیدهای فلزی، فرآیند حذف را تسهیل می‌کنند. Li و همکاران (۲۰۱۹) [۴۹]، در بررسی حذف Cu^{2}□، Cd^{2}□ و Pb^{2}□ توسط ژل سیلیکای اصلاح شده با نیتریلوتری استیک اسید (NTA) نشان دادند که افزایش pH از ۲ تا حدود ۶ موجب افزایش چشمگیر راندمان حذف می‌شود. آن‌ها گزارش کردند که در pH بالاتر از نقطه ایزوالکتریک جاذب (حدود ۴/۱)، سطح جاذب بار منفی یافته و جذب یونی فلزات تقویت می‌شود، در حالی‌که درpHهای بالاتر از ۷ بخشی از حذف به رسوب هیدروکسیدهای فلزی نسبت داده می‌شود. این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر همخوانی دارد. Zhu و همکاران (۲۰۱۷) [۵۰]، نیز در بررسی جذب Cu^{2}□، Pb^{2}□ و Cd^{2}□ توسط سیلیکای مزوپور (MCM-41) نشان دادند که در pH کمتر از ۴ ظرفیت جذب پایین است، اما با افزایش pHبه بازه ۵ تا ۷ به حداکثر می‌رسد. این رفتار به کاهش رقابت یون‌های H□ و دپروتونه شدن گروه‌های سطحی سیلیکا و افزایش بار منفی سطح نسبت داده شد؛ در حالی که درpH های بسیار بالا، رسوب هیدروکسیدهای فلزی نیز در کاهش غلظت فلزات نقش دارد. این یافته‌ها نیز هم راستا با نتایج مطالعه حاضر است. در مقابل Wang و همکاران (۲۰۱۵) [۵۱] در بررسی جذب Pb(II) توسط لوله‌های نانو سیلیکا گزارش کردند که کاهش pH موجب افزایش ظرفیت جذب می‌شود؛ رفتاری که احتمالاً به شلاته‌سازی خاص و افزایش برهم‌کنش‌های سطحی در محیط اسیدی مربوط است. این نتیجه با یافته‌های مطالعه حاضر مغایرت دارد و نشان می‌دهد که رفتار جذب فلزات به نوع فلز و ساختار جاذب وابسته است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که اثر غلظت نانو سیلیکا بر حذف آلاینده‌ها از الگوی مشابهی پیروی می‌کند. Pavithra و Shanthakumar (۲۰۱۷) [۳۰] گزارش کردند که افزایش دوز نانو سیلیکا موجب افزایش راندمان حذف COD و BOD تا یک مقدار بهینه می‌شود، در حالی‌که مقادیر بالاتر باعث کاهش راندمان می‌گردد. Villarreal و همکاران (۲۰۲۵) [۵۲] نیز نشان دادند که افزایش غلظت نانو ذرات، جذب رنگ‌های آلی را افزایش می‌دهد، اما در دوزهای بالا تجمع نانوذرات با کاهش سطح فعال، راندمان را محدود می‌کند. همچنین Meky و همکاران (۲۰۲۴) [۴۶] گزارش کردند که دوز بهینه نانو سیلیکا یک نقطه بحرانی است و افزایش بیش از حد آن می‌تواند اثر معکوس بر حذف فلزات سنگین داشته باشد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانو سیلیکا تا مقدار بهینه موجب بهبود حذف آلاینده‌ها می‌شود، اما در غلظت‌های بالاتر، راندمان کاهش یافته یا تثبیت می‌گردد؛ موضوعی که اهمیت تعیین دوز بهینه جاذب را در فرآیندهای جذب برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری

با توجه به خطرات محیط زیستی، اثرات سمی و ماهیت پیچیده شیرابه محل دفن پسماند، ارتقای کارایی فرآیندهای تصفیه آن یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت پسماند است. نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که شیرابه محل دفن سراوان، با نسبت BOD□/COD بیش از ۰/۵، از قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی مناسبی برخوردار بوده و فرآیند بیولوژیکی هوازی طی ۲۵ روز توانست راندمان حذف BOD□، COD و TSS را به‌ترتیب به ۷۳، ۶۰ و ۵۷ درصد برساند. با این حال، کارایی محدود این فرآیند در حذف فلزات سنگین، ضرورت استفاده از یک مرحله تکمیلی را آشکار ساخت. به‌کارگیری نانوسیلیس به‌عنوان جاذب، بهبود چشمگیری در عملکرد فرآیند ایجاد کرد و نشان داد که زمان تماس، pH و دوز جاذب از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده راندمان جذب هستند. برای حذف آلاینده‌های آلی و جامدات معلق، شرایط بهینه شامل زمان تماس ۴۵ دقیقه، pH برابر۴ و دوز نانوسیلیس g/L ۱ بود که در این شرایط راندمان حذف BOD□، COD و TSS به‌ترتیب به ۸۹، ۸۷ و ۸۷ درصد افزایش یافت. در مقابل، بیشترین راندمان حذف فلزات سنگین در زمان تماس ۷۵ دقیقه، محدوده pH برابر ۷ تا ۱۰ و دوز ثابت نانوسیلیس g/L ۰/۴ حاصل شد و راندمان حذف فلزاتی نظیر Ni، Mn، As، Cu و Hg به بیش از ۷۳ تا ۸۲ درصد رسید. این تفاوت در شرایط بهینه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی باید متناسب با ماهیت آلاینده هدف انجام گیرد تا حداکثر بازده فرآیند حاصل شود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که تکمیل فرآیند تصفیه بیولوژیکی هوازی با جاذب نانوسیلیس می‌تواند محدودیت‌های هر یک از فرآیندهای منفرد را برطرف کرده و ضمن افزایش چشمگیر راندمان حذف آلاینده‌های آلی، جامدات معلق و فلزات سنگین، رویکردی کارآمد، پایدار و مقیاس‌پذیر برای تصفیه شیرابه‌های با قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی متوسط تا بالا و سایر فاضلاب‌های با بار آلودگی بالا فراهم آورد.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی با عنوان کارایی روش تلفیقی بیولوژیکی هوازی با نانو سیلیکا در تصفیه پساب حاصل از تصفیه شیرابه زباله سراوان و کد ۹۷۰۸۲۶۱۵ دانشگاه علوم پزشکی گیلان است. نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از تمام افراد و سازمان‌هایی که در انجام این پژوهش همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافعی ندارند.

تامین مالی مقاله

مطالعه فوق تحت حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی گیلان با شماره طرح ۹۷۰۸۲۶۱۵ انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه حاصل تحقیق مصوب دانشگاه علوم پزشکی گیلان با کد اخلاق .IR.GUMS.REC.1397.310 می‌باشد.

مشارکت مولفین

ایده و طراحی مطالعه: کامران تقوی

نظارت بر مطالعه: کامران تقوی

جمع‌آوری داده‌ها: داریوش نقی پور، سید داود اشرفی، محمد امین تقوی

تحلیل و تفسیر داده‌ها: داریوش نقی پور، سید داود اشرفی، زهرا شهیدی مقدم

نگارش پیشنویس مقاله: کامران تقوی، زهرا شهیدی مقدم

بازبینی مقاله از نظر محتوای علمی: کامران تقوی

استفاده از هوش مصنوعی

در این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

1- Kumar A, Yadav KD, Kumar S. Comprehensive review on technological advances in landfill leachate management: Physico-chemical characteristics, treatment methods and cost analysis. Bioresource Technology Reports 2025; 31:102222. Doi: 10. 1016/j.biteb.2025.102222.

2- Luo H, Zeng Y, Cheng Y, He D, Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. Science of the Total Environment 2020; 703:135468. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135468.

3- Dagwar PP, Dutta D. Landfill leachate a potential challenge towards sustainable environmental management. Science of the Total Environment 2024; 926:171668. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171668.

4- Mosanefi S, Alavi BN, Eslami A, Sadani M. Leachate pollution index evaluation of Sanandaj municipal landfill. Journal of Health in the Field 2024; 12(2):1-11 (In Persian).

5- Elleuch L, Messaoud M, Djebali K, Attafi M, Cherni Y, Kasmi M, et al. A new insight into highly contaminated landfill leachate treatment using Kefir grains pre-treatment combined with Ag-doped TiO(2) photocatalytic process. Journal of Hazardous Materials 2020; 382:121119. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121119.

6- Swar SS, Boonnorat J, Ghimire A. Algae-based treatment of a landfill leachate pretreated by coagulation-flocculation. Journal of Environmental Management 2023; 342:118223. Doi: 10. 1016/ j. jenvman. 2023. 118223.

7- Bouchareb R, Isik Z, Ozay Y, Karagunduz A, Keskinler B, Dizge N. A hybrid process for leachate wastewater treatment: Evaporation and reverse osmosis/sequencing batch reactor. Water Environment Research 2022; 94(4):e10717. Doi: 10.1002/wer.10717.

8- Abdelaal FB, Rowe RK, Islam MZ. Effect of leachate composition on the long-term performance of a HDPE geomembrane. Geotextiles and Geomembranes 2014; 42(4):348-362.

9- Ahmed FN, Lan CQ. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review. Desalination 2012; 287: 41-54. Doi: 10.1016/j.desal.2011.12.012.

10- Keyikoglu R, Karatas O, Rezania H, Kobya M, Vatanpour V, Khataee A. A review on treatment of membrane concentrates generated from landfill leachate treatment processes. Separation and Purification Technology 2021; 259:118182. Doi: 10. 1016/ j. seppur. 2020. 118182.

11- Wijekoon P, Koliyabandara PA, Cooray AT, Lam SS, Athapattu BCL, Vithanage M. Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. Journal of hazardous materials 2022; 421:126627. Doi: 10. 1016/ j. jhazmat. 2021.126627.

12- Mojiri A, Zhou JL, Ratnaweera H, Ohashi A, Ozaki N, Kindaichi T, et al. Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. Water Reuse 2020; 11(1):66-96.

13- Oller I, Malato S, Sánchez-Pérez JA. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination--a review. Science of the Total Environment 2011; 409(20):4141-66. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.061.

14- Hasar H, Unsal SA, Ipek U, Karatas S, Cinar O, Yaman C, et al. Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate. Journal of Hazardous Materials 2009; 171(1-3):309-17. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.003.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

15- Assou M, El Fels L, El Asli A, Fakidi H, Souabi S, Hafidi M. Landfill leachate treatment by a coagulation–flocculation process: effect of the introduction order of the reagents. Desalination and Water Treatment 2016; 57(46):21817-826.

16- Fernandes A, Pacheco MJ, Ciríaco L, Lopes A. Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. Applied Catalysis B: Environmental 2015; 176-177:183-200.

17- Sadeghi M, Tadrisi M, Bay A, Dadban Y. Treatment of municipal solid wastes leachate using electrocoagulation. Journal of Health in the Field 2017; 41-48 (In Persian).

18- Singa PK, Isa MH, Sivaprakash B, Ho Y-C, Lim J-W, Rajamohan N. PAHs remediation from hazardous waste landfill leachate using fenton, photo – fenton and electro - fenton oxidation processes – performance evaluation under optimized conditions using RSM and ANN. Environmental Research 2023; 231:116191. Doi: 10.1016/j.envres.2023.116191.

19- Galvão RB, da Silva Moretti AA, Fernandes F, Kuroda EK. Post-treatment of stabilized landfill leachate by upflow gravel filtration and granular activated carbon adsorption. Environmental Technology 2021; 42(26):4179-88.

20- Shadi AMH, Kamaruddin MA, Niza NM, Emmanuel MI, Ismail N, Hossain S. Effective removal of organic and inorganic pollutants from stabilized sanitary landfill leachate using a combined Fe2O3 nanoparticles/electroflotation process. Journal of Water Process Engineering 2021; 40:101988. Doi: 10. 1016/ j. jwpe.2021.101988.

21- Qu X, Alvarez PJJ, Li Q. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. Water Research 2013; 47(12):3931-46. Doi: 10. 1016/ j. watres. 2012.09.058.

22- Hua M, Zhang S, Pan B, Zhang W, Lv L, Zhang Q. Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: A review. Journal of Hazardous Materials 2012; 211-212:317-331. Doi: 10. 1016/ j. jhazmat. 2011.10.016.

23- Sharma YC, Srivastava V, Singh VK, Kaul SN, Weng CH. Nano-adsorbents for the removal of metallic pollutants from water and wastewater. Environmental Technology 2009; 30(6):583-609.

24- Kholafazad Kordasht H, Pazhuhi M, Pashazadeh-Panahi P, Hasanzadeh M, Shadjou N. Multifunctional aptasensors based on mesoporous silica nanoparticles as an efficient platform for bioanalytical applications: Recent advances. TrAC Trends in Analytical Chemistry 2020; 124:115778. Doi: 10.1016/j.trac.2019.115778.

25- Eivazzadeh-Keihan R, Chenab KK, Taheri-Ledari R, Mosafer J, Hashemi SM, Mokhtarzadeh A, et al. Recent advances in the application of mesoporous silica-based nanomaterials for bone tissue engineering. Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications 2020; 107:110267. Doi: 10. 1016/ j .msec. 2019. 110267.

26- Lazaro A, Benac-Vegas L, Brouwers HJH, Geus JW, Bastida J. The kinetics of the olivine dissolution under the extreme conditions of nano-silica production. Applied Geochemistry 2015:521-15. Doi: 10. 1016/ j. apgeochem. 2014.10.015.

27- Nguyen V-H, Vu CM, Choi HJ, Kien BX. Nanosilica Extracted from Hexafluorosilicic Acid of Waste Fertilizer as Reinforcement Material for Natural Rubber: Preparation and Mechanical Characteristics. Materials 2019; 12(17): Doi: 10.3390/ma12172707.

28- Mortazavian S, Bandala ER, Bae J-H, Chun D, Moon J. Assessment of p-nitroso dimethylaniline (pNDA) suitability as a hydroxyl radical probe: Investigating bleaching mechanism using immobilized zero-valent iron nanoparticles. Chemical Engineering Journal 2020; 385:123748. Doi: 10.1016/j.cej.2019.123748.

29- Taghavi K, Naghipour D, Ashrafi SD, Salehi M. The Removal of Heavy Metals from the Leachate of Aged Landfill: The Application of the Fenton Process and Nanosilica Absorbent. Environment and Natural Resources Journal 2021:191-98. Doi: 10. 32526/ ennrj/ 19/ 202100051.

30- Pavithra S, Shanthakumar S. Removal of COD, BOD and color from municipal solid waste leachate using silica and iron nano particles - a comparative study. Global Nest Journal 2017; 19:122-30. Doi: 10.30955/gnj.002065.

31- Reshadi MAM, Bazargan A, McKay G. A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: Focus on magnetic adsorption. Science of the Total Environment 2020; 731:138863. Doi: 10. 1016 /j. scitotenv. 2020.138863.

32- Ahmadi Orkomi A, Malekpour M. Energy utilization potential of Saravan landfill in Rasht with life cycle assessment approach. Advanced Environmental Sciences 2021; 19(2):205-24.

33- Shariatmadari N, Askari Lasaki B, Eshghinezhad H, Alidoust P. Effects of landfill leachate on mechanical behaviour of adjacent soil: a case study of Saravan landfill, Rasht, Iran. International Journal of Civil Engineering 2018; 16(10):1503-13.

34- Baird RB, Eaton AD, Rice EW, eds. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington DC: American Public Health Association 2017.

35- Kurniawan TA, Lo W, Chan G, Sillanpää ME. Biological processes for treatment of landfill leachate. Journal of Environmental Monitoring 2010; 12(11):2032-47.

36- Bernat K, Zaborowska M, Zielińska M, Wojnowska-Baryła I, Ignalewski W. Biological treatment of leachate from stabilization of biodegradable municipal solid waste in a sequencing batch biofilm reactor. International journal of environmental science and technology 2021; 18(5):1047-60.

37- Salim AA, Mohammed ZB, Fattah MY. Treatment the leachate of a landfill using physical and biological processes. AIP Conference Proceedings 2024; 2864(1). Doi: 10.1063/5.0186133.

38- Robinson T. Removal of toxic metals during biological treatment of landfill leachates. Waste Management 2017; 63:299-309. Doi: 10. 1016/ j. wasman. 2016. 12.032.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

39- Hou D, Zhang L, Li C, Chen L, Zou J. Enhancing the Mn-Removal Efficiency of Acid-Mine Bacterial Consortium: Performance Optimization and Mechanism Study. Microorganisms 2023; 11(9):2185. Doi: 10. 3390/ microorganisms11092185.

40- Santos AL, Johnson DB. Design and Operation of Empirical Manganese-Removing Bioreactors and Integration into a Composite Modular System for Remediating and Recovering Metals from Acidic Mine Waters. Applied Sciences 2021; 11(9):4287. Doi: 10.3390/app11094287.

41- Cavalca L, Corsini A, Zaccheo P, Andreoni V, Muyzer G. Microbial Transformations of Arsenic: Perspectives for Biological Removal of Arsenic from Water. Future Microbiology 2013; 8(6):753-68.

42- Ito A, Miura J-i, Ishikawa N, Umita T. Biological oxidation of arsenite in synthetic groundwater using immobilised bacteria. Water Research 2012; 46(15):4825-31.

43- Yong ZJ, Bashir MJK, Ng CA, Sethupathi S, Lim J-W. A sequential treatment of intermediate tropical landfill leachate using a sequencing batch reactor (SBR) and coagulation. Journal of Environmental Management 2018; 205: 244-252. Doi: 10. 1016/ j. jenvman. 2017. 09. 068.

44- Sorour M, Helmy M, Mahrouky A, Ahmed I. Using activated and Nano Silica as Adsorbent Materials for Filtration of Industrial Wastewater. Food Technology Research Journal 2023:268-72. Doi: 10. 21608/ ftrj. 2023. 329291.

45- Anjum M, Miandad R, Waqas M, Gehany F, Barakat MA. Remediation of wastewater using various nano-materials. Arabian Journal of Chemistry 2019; 12(8):4897-19.

46- Meky N, Salama E, Soliman MF, Naeem SG, Ossman M, Elsayed M. Synthesis of Nano-silica Oxide for Heavy Metal Decontamination from Aqueous Solutions. Water, Air, & Soil Pollution 2024; 235(2):154. Doi: 10. 1007 /s11270- 024-06944-6.

47- Norton KJ, Grant Norton M. Advances in the use of inorganic nanomaterials for sustainable remediation of contaminated water. Journal of Materials Science 2025; 60(37):16716-751.

48- Shafqat SS, Khan AA, Zafar MN, Alhaji MH, Sanaullah K, Shafqat SR, et al. Development of amino-functionalized silica nanoparticles for efficient and rapid removal of COD from pre-treated palm oil effluent. Journal of Materials Research and Technology 2019; 8(1):385-95.

49- Li Y, He J, Zhang K, Liu T, Hu Y, Chen X, et al. Super rapid removal of copper, cadmium and lead ions from water by NTA-silica gel. RSC Advances 2019; 9(1):397-407.

50- Zhu W, Wang J, Wu D, Li X, Luo Y, Han C, et al. Investigating the Heavy Metal Adsorption of Mesoporous Silica Materials Prepared by Microwave Synthesis. Nanoscale Research Letters 2017; 12(1):323. Doi: 10. 1186/ s11671-017-2070-4.

51- Wang P, Du M, Zhu H, Bao S, Yang T, Zou M. Structure regulation of silica nanotubes and their adsorption behaviors for heavy metal ions: pH effect, kinetics, isotherms and mechanism. Journal of Hazardous Materials 2015; 286:533-44. Doi: 10. 1016/ j. jhazmat. 2014. 12.034.

52- Villarreal NE, Martinez EG, Tijerina EP, Rodriguez FV, Delgado FP. Silica nanoparticles from agave distillate for the removal of the Methylene Blue dye from water. Journal of Materials Science: Materials in Engineering 2025; 20(1):124. Doi: 10.1186/s40712-025-00322-8.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

Journal of Behdasht dar Arseh (i.e., Health in the Field)
Shahid Beheshti University of Medical Sciences
School of Public Health and Safety
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf
Vol.13, No.4, Winter 2025

Performance evaluation of an integrated aerobic biological treatment and nanosilica adsorption process: A case study of Saravan landfill leachate, Gilan province, Iran

Dariush Naghipour [1], Seyed Davoud Ashrafi [1], Zahra Shahidi Moghadam [2], Mohammad amin Taghavi [3], Kamran Taghavi [1*]

[1] Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran.
[2] Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
[3] Department of Biomedical Physiology and Kinesiology, Simon Fraser University, Burnaby, Canada.

Abstract

Background and Aims: Landfill leachate treatment, owing to the high concentrations of recalcitrant organic and inorganic compounds, requires the application of combined treatment processes. This study aimed to evaluate the performance of an integrated aerobic biological treatment and nanosilica adsorption system for the treatment of leachate from the Saravan waste landfill.

Materials and Methods: Following physicochemical characterization, leachate samples were treated in a laboratory-scale aerobic reactor for 25 days. The reactor effluent was subsequently brought into contact with nanosilica adsorbent for further pollutant removal. The effects of operational parameters, including contact time, pH, and adsorbent dosage, on pollutant removal efficiency were investigated. Ethical principles were observed throughout the study.

Results: The results indicated that the raw leachate had moderate to high biodegradability, making it suitable for biological treatment. The aerobic biological process achieved removal efficiencies of 73% for BOD_5, 60% for COD, and 57% for TSS; however, heavy-metal removal at this stage was limited. During the subsequent nanosilica adsorption step, under optimal conditions—45 min contact time, pH 4, and an adsorbent dose of 1 g/L, the removal efficiencies of BOD_5, COD, and TSS increased to 89%, 87%, and 87%, respectively. Regarding heavy-metal removal, applying nanosilica at a contact time of 75 min, a fixed adsorbent dose of 0.4 g/L, and pH values ranging from 7 to 10 resulted in the maximum removal efficiencies for metals from the biologically treated effluent.

Conclusion: Integrating aerobic biological treatment with nanosilica adsorption, provided that operational variables are carefully optimized according to the target pollutant, can serve as an efficient and scalable approach for treating landfill leachate with suitable biodegradability.

Keywords: landfill leachate; Organic load; Aerobic biological treatment; Nanosilica adsorption.

Please cite this article as: Naghipour D, Ashrafi SD, Shahidi Moghadam Z, Taghavi MA, Taghavi K. Performance evaluation of an integrated aerobic biological treatment and nanosilica adsorption process: A case study of Saravan landfill leachate, Gilan province, Iran. Journal of Health in the Field 2025; 13(4):31-41. https://doi.org/10.22037/jhf.v13i4.51510

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran.

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran.

Email: k.taghavi@gums.ac.ir

Received: 28 January 2026
Accepted: 1 July 2026