

Efficiency of biological treatment processes in the leather industry under wastewater salinity

M. Fadaei Tehrani¹ * and S. Taheri²

Extended Abstract

Introduction:

Tannery wastewater is widely recognized as one of the most challenging industrial effluents due to its extremely high organic load, heavy metals (particularly chromium), suspended solids, and substantial salinity. The high salt content originates mainly from the extensive use of sodium chloride during hide preservation and tanning processes. Such salinity poses major environmental threats, including soil salinization, groundwater contamination, and ecological disruption in aquatic systems. Moreover, salinity is a critical inhibitory factor in biological wastewater treatment systems. Elevated salt concentrations impose osmotic stress on microbial cells, leading to reduced metabolic activity, enzyme inhibition, and ultimately lower COD and BOD removal efficiencies. Conventional activated sludge systems function properly at salinity levels below approximately 10 g/L TDS, while real tannery wastewater often ranges between 10 and 40 g/L. This discrepancy highlights the difficulty of biological treatment under real industrial conditions. Although previous studies have examined saline stress in biological systems, comprehensive evaluations based on real tannery wastewater (particularly in hybrid treatment configurations) are still limited. Therefore, this study aims to investigate the performance and salinity tolerance of an integrated chemical-biological-chemical treatment system when exposed to real high-strength tannery wastewater.

Materials and Methods:

A semi-industrial pilot plant was developed in Varamin (2025) to evaluate the treatment performance of a hybrid system designed for real tannery wastewater with high salinity. The system consisted of three sequential units. First, a primary chemical pretreatment stage involving coagulation and flocculation was applied to reduce suspended solids, colloids, chromium, and part of the biodegradable organic load. This step was essential for minimizing shock load and ensuring more stable biological activity in the subsequent reactor. The second unit was a Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), selected for its ability to support robust biofilms and maintain microbial stability under fluctuating environmental conditions. The reactor was seeded with halotolerant activated sludge sourced from an industrial facility already treating saline wastewater. The initial MLSS concentration was maintained at approximately 1500 mg/L. Nutrient supplementation followed a COD:N:P ratio of 100:5:1 to ensure appropriate microbial growth. Before continuous operation, an acclimation phase of 3 to 6 days was implemented, during which the microbial community was gradually exposed to real tannery wastewater with salinity levels ranging from 19 to 24 g/L TDS. The third treatment stage provided secondary chemical polishing, aimed at improving effluent clarity and removing remaining suspended solids and residual organic fractions. The pilot operated continuously over three months. Operational parameters such as hydraulic retention time, aeration rate, MLSS content, and dosing of coagulants and flocculants were optimized as needed. Sampling was performed at the influent, after the primary chemical unit, at the MBBR outlet, and at the final effluent point. The main analyzed parameters included COD, TSS, TDS, EC, and pH. The naturally fluctuating salinity levels during the monitoring period enabled a realistic assessment of microbial tolerance and process stability under high-salinity conditions.

1- Assistant Professor and Faculty Member, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

2- Master's Student at the Daneshpajoohan Higher Education Institute, Isfahan, Iran

* Corresponding Author: mfadaei@nri.ac.ir

Received: 2026/02/15

Accepted: 2026/04/15

Results and Discussions:

The hybrid treatment system demonstrated a notable reduction in organic pollution, achieving an overall COD removal efficiency of approximately 70%. The MBBR contributed the largest portion of this removal, accounting for about 35.5%, while the secondary chemical polishing stage added roughly 15.1%, confirming the need for a combined chemical–biological approach for complex saline wastewater. The primary chemical stage effectively removed suspended solids and colloidal material, thereby stabilizing downstream performance. The biological treatment performance was strongly influenced by salinity. The MBBR maintained stable COD removal when TDS levels remained at or below 22 g/L. Under these conditions, the halotolerant microbial community remained active, and biofilm carriers provided structural protection against osmotic stresses. Biofilms generally offer higher resilience than suspended- growth systems due to slower mass transfer rates and gradual salt exposure within the biofilm matrix. However, when salinity exceeded the threshold of 22 g/L, noticeable decreases in COD removal efficiency occurred. Temporary spikes in salinity led to an immediate decline in metabolic activity, manifested as increased effluent COD concentrations. These observations suggest osmotic shock, which may cause cellular dehydration, membrane dysfunction, and in severe cases, microbial lysis. Although the system maintained partial functionality, the reduced performance reflected a diminished capacity of the biomass to process organic load under fluctuating saline stress. Throughout the entire study, the system exhibited no significant reduction in TDS. Final effluent salinity remained around 22 g/L, indicating that neither biological oxidation nor chemical precipitation effectively removes dissolved salts. This aligns with literature that highlights the inherent limitation of conventional biological and chemical processes for treating saline industrial effluents. Operational observations further emphasized the importance of stable loading conditions, gradual acclimation, and the use of halotolerant sludge. Despite these measures, managing salinity requires more advanced or complementary strategies. Technologies such as reverse osmosis, nanofiltration, or hybrid desalination approaches can significantly reduce TDS but require substantial investment and energy. Source reduction measures within tanning operations, including improved salt- curing methods, recycling of brine solutions, or adoption of low- salt tanning technologies, may also reduce the salinity load entering treatment systems. Overall, the results indicate that while the hybrid system effectively addresses organic pollution, salinity remains the dominant limiting factor governing biological performance. Therefore, long- term wastewater management strategies must integrate both end- of- pipe treatment improvements and upstream process optimization.

Conclusion:

This study showed that the hybrid chemical–biological–chemical system effectively reduced organic pollutants in tannery wastewater, achieving about 70% COD removal. However, biological performance was constrained by salinity, remaining stable only up to 22 g/L TDS, with higher levels causing microbial inhibition and reduced efficiency. Since TDS remained virtually unchanged during treatment, the effluent still exceeded allowable discharge limits. Effective long- term management therefore requires combining optimized biological treatment with desalination technologies or implementing upstream modifications to reduce salt input at the industrial source.

Keywords: Tannery wastewater, Salinity (TDS), Biological processes, MBBR, Hybrid treatment

Citation: Fadaei Tehrani, M. and Taheri, S., 2026. Efficiency of Biological Treatment Processes in the Leather Industry under Wastewater Salinity. *Iranian Water Research Journal*, 20(60), pp. 128-140. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14929.2633>

Copyright:

© Authors, Published by Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی اثر شوری فاضلاب بر کارایی فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب صنعت چرم‌سازی

محمد رضا فدائی تهرانی^{۱*} و سمیرا طاهری^۲

چکیده

فاضلاب صنعت چرم‌سازی، به عنوان یک فاضلاب پیچیده با داشتن بار آلی بسیار بالا و شوری زیاد، می‌تواند با ایجاد استرس اسمزی کارایی فرایندهای بیولوژیکی را مختل نماید. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد یک سامانه ترکیبی در مقیاس پایلوت و با فاضلاب واقعی شهرک چرم‌سازی ورامین انجام شد. سامانه شامل پیش تصفیه شیمیایی، راکتور بیولوژیکی هوازی با بستر متحرک و پالایش نهایی شیمیایی بود. پایش کیفی در محدوده شوری ۱۹ تا ۲۴ گرم بر لیتر انجام و پارامترهای COD، TSS، TDS، EC و pH در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد این سیستم به‌طور میانگین ۷۰ درصد از COD را حذف کرد که بیشترین سهم مربوط به واحد بیولوژیکی (میانگین راندمان ۳۵/۵ درصد) و سهم تکمیلی مربوط به واحد شیمیایی ثانویه بود. عملکرد بیولوژیکی در برابر شوری رفتاری آستانه‌ای داشت، به‌گونه‌ای که تا حدود ۲۲ گرم بر لیتر پایدار بود اما افزایش ناگهانی آن موجب کاهش شدید راندمان و افزایش COD خروجی شد. همچنین TDS در طول فرآیند تقریباً ثابت مانده و پساب نهایی از نظر شوری غیراستاندارد بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که باوجود کارایی مناسب در حذف مواد آلی، مدیریت شوری و به‌ویژه جلوگیری از شوک‌های شوری، چالش اصلی و فراتر از توان فرایندهای متعارف است.

واژه‌های کلیدی: تصفیه ترکیبی، راکتور هوازی بسترمتحرک، فاضلاب چرم‌سازی، شوری، فرایندهای بیولوژیکی

ارجاع: فدائی تهرانی، م.ر.، طاهری، س.، ۱۴۰۵. بررسی اثر شوری فاضلاب بر کارایی فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب صنعت چرم‌سازی. مجله

پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۱۴۰-۱۲۹. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14929.2633>

۱- استادیار و عضو هیات علمی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی دانش‌پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول: mfadaei@nri.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

مقدمه

صنعت چرم‌سازی به عنوان یکی از صنایع قدیمی و مهم، نقش بسزایی در اقتصاد بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. با این حال، فرآیندهای تولید به ویژه مراحل دباغی و رنگ‌آمیزی، مقادیر قابل توجهی فاضلاب با بار آلودگی بالا تولید می‌کنند. فاضلاب این صنعت به طور مشخص حاوی غلظت‌های بالایی از مواد آلی پیچیده (مانند پروتئین‌ها و چربی‌ها)، مواد جامد معلق، فلزات سنگین (مانند کروم) و به ویژه املاح ناشی از شوری است (Appiah-Brempong et al., 2021). شوری عمدتاً ناشی از استفاده گسترده از نمک طعام در فرآیندهای حفظ پوست خام و دباغی است (Hassen, 2017). تخلیه این فاضلاب بدون تصفیه مناسب، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی، حاصلخیزی خاک و منابع آب زیرزمینی محسوب شده و از طریق زنجیره غذایی برای انسان خطرآفرین است (Anthony et al., 2025). بنابراین، یافتن روش‌های تصفیه کارآمد و پایدار برای مدیریت این فاضلاب پیچیده، یک ضرورت محیط‌زیستی است.

فرآیندهای بیولوژیکی به دلیل کارایی بالا، هزینه نسبتاً پایین و سازگاری با محیط‌زیست، گزینه‌ای متداول برای حذف مواد آلی از فاضلاب محسوب می‌شوند. با این حال، کارایی این فرآیندها به شدت تحت تأثیر شرایط کیفی فاضلاب ورودی قرار دارد (Husain et al., 2024; Saritha and Chockalingam, 2018). وجود غلظت‌های بالای املاح در فاضلاب چرم‌سازی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی تصفیه بیولوژیکی است. شوری بالا با ایجاد فشار اسمزی، سبب دهیدراته شدن سلول‌های میکروبی، اختلال در عملکرد آنزیم‌ها و کاهش فعالیت متابولیکی جامعه میکروبی لجن فعال می‌گردد (Husain et al., 2024; Mandal et al., 2010; Zhao et al., 2022). این امر منجر به کاهش راندمان حذف COD، BOD و نیتروژن می‌شود. بر اساس تعاریف رایج، فاضلاب‌های صنعتی با غلظت نمک کمتر از ۱۰ گرم بر لیتر، کم‌شور و با غلظت بین ۱۰ تا ۳۰ گرم بر لیتر، پر شور تلقی می‌شوند. سیستم‌های لجن فعال متعارف معمولاً قادر به مدیریت فاضلاب‌های با شوری کمتر از ۱۰ گرم بر لیتر هستند، اما فراتر از این آستانه، اثرات بازدارندگی شوری مشهود می‌شود (Lofrano et al., 2013). میکروارگانیسم‌های درگیر در فرآیندهای تصفیه، از جمله باکتری‌های هتروتروف و نیتریفایر، نسبت به تغییرات

اسمزی بسیار حساس هستند. افزایش شوری موجب کاهش سرعت رشد میکروبی، افزایش SVI و تغییر ساختار لخته‌ها می‌شود (Husain et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که شوری بالا فعالیت آنزیمی نیتروزوموناس و نیتروباکتر را مختل کرده و راندمان نیتریفیکاسیون و نیترات‌زدایی را کاهش می‌دهد. همچنین شوری بالا به واسطه تغییر بار سطحی میکروارگانیسم‌ها، پدیده شناوری لجن را تشدید می‌کند. افزون بر اثرات بیولوژیکی، حضور یون کلرید موجب تسریع خوردگی در سازه‌های بتنی و تجهیزات فلزی می‌گردد (Bhardwaj et al., 2023).

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای به منظور درک اثرات شوری و یافتن راهکارهای مقابله با آن در سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی انجام شده است. مطالعات نشان داده‌اند که سازگاری تدریجی لجن فعال با شوری، راهبردی مؤثر برای افزایش تحمل سیستم است. به عنوان مثال، افزایش تدریجی شوری در یک سیستم SBR برای تصفیه فاضلاب چرم با ۳۵ گرم بر لیتر نمک، منجر به حذف ۹۵٪ COD از غلظت اولیه ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پس از دوره سازگاری شد (Pundir et al., 2024; Rai et al., 2025). همچنین، الکتروزاسیون لجن با کنسرسیون‌های میکروبی مقاوم به شوری (هالوفیل) به عنوان یک راهکار امیدوارکننده مطرح است. استفاده از باکتری‌های هالوفیل جدا شده از محیط‌های شور طبیعی یا سیستم‌های تصفیه فاضلاب صنایع دریایی، می‌تواند عملکرد سیستم را در شرایط شوری بالا به طور قابل توجهی بهبود بخشد (R et al., 2014).

در میان تکنولوژی‌های بیولوژیکی پیشرفته، بیورآکتورهای غشایی (MBR) به دلیل مزایایی همچون زمان ماند سلولی (SRT) طولانی، کیفیت بالای پساب خروجی و جداسازی کامل زیست‌توده، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. SRT طولانی در MBR از خروج میکروارگانیسم‌های کندرشد (از جمله بسیاری از میکروارگانیسم‌های مقاوم به شوری) جلوگیری کرده و امکان تطبیق بهتر با شرایط سخت را فراهم می‌آورد. مطالعات متعدد، پتانسیل بالای سیستم MBR را در تصفیه فاضلاب‌های شور صنعتی تأیید کرده‌اند (Mandal et al., 2010; Moktadir et al., 2023). به عنوان مثال، یک سیستم MBR با بذر لجن سازگار شده، توانست در شوری ۲۱/۳ گرم بر لیتر، نرخ نیتریفیکاسیونی معادل ۱/۷۱ گرم نیتروژن بر لیتر در روز را حفظ کند (Pendashteh et al., 2010). مطالعه دیگری نشان داد که

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور ارزیابی عملکرد یک سیستم ترکیبی شیمیایی-بیولوژیکی-شیمیایی در تصفیه فاضلاب صنعت چرم‌سازی، در سال ۱۴۰۴ یک سیستم پایلوت نیمه‌صنعتی در ورامین طراحی و اجرا گردید. مطالعات پایلوت به عنوان پل ارتباطی بین تحقیقات آزمایشگاهی و طراحی در مقیاس واقعی، امکان بررسی دقیق فرایندها، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد تصفیه‌خانه در مقیاس کامل را فراهم می‌نماید (Bhardwaj et al., 2023; G and Manivasagan, 2011). با توجه به ترکیب ویژه فاضلاب این صنعت که شامل بار آلی بالا (ناشی از پروتئین‌ها و چربی‌ها)، مواد معلق زیاد، فلزات سنگین (به ویژه کروم) و شوری قابل توجه است، طراحی یک سیستم تصفیه چندمرحله‌ای ضروری به نظر می‌رسد. تصویر واقعی و فلوجارت سیستم پایلوت در شکل ۱ ارائه شده است. این سیستم متشکل از مراحل زیر می‌باشد:

مرحله اول) پیش‌تصفیه فیزیکی شامل یک آشغالگیر ریز برای حذف ذرات درشت و یک مرحله ته‌نشینی اولیه (۳۰ دقیقه) به منظور کاهش بخشی از مواد معلق؛
مرحله دوم) تصفیه شیمیایی اولیه متشکل از یک راکتور مجهز به میکسرهای سریع و آهسته برای انجام فرآیند انعقاد و لخته‌سازی از ترکیب منعقدکننده (آلوم یا فریک کلراید)، کمک منعقدکننده (لایم) و پلیمر آنیونی برای بهبود جداسازی جامدات، چربی و بخشی از بار آلی (به ویژه ترکیبات مقاوم)؛

مرحله سوم) تصفیه بیولوژیکی هوازی شامل یک راکتور بیولوژیکی با بستر متحرک (MBBR) به حجم مفید ۸۰ لیتر، مجهز به مدیای پلاستیکی معلق با سطح ویژه بالا (پرشدهی ۳۰٪) و سیستم هوادهی عمقی ریزحباب. این راکتور به صورت ناپیوسته (Batch) با چرخه‌های مشخص پر-شدن، هوادهی، ته‌نشینی و تخلیه بهره‌برداری شد.
مرحله چهارم) تصفیه شیمیایی ثانویه (پالایش نهایی) شامل یک سیستم جارتست، تحت عملیات انعقاد-لخته‌سازی مجدد که مواد معلق ریز و بخشی از مواد آلی باقیمانده که به صورت کلونیدی یا محلول بودند، حذف شوند.

برای راه‌اندازی راکتور بیولوژیکی، از لجن فعال سازگار شده گرفته شده از یک تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی مشابه (با

MBR می‌تواند فاضلاب شوری با غلظت تا ۳۵ گرم بر لیتر را با کارایی مناسب تصفیه نماید. همچنین، گزارش‌ها حاکی از آن است که MBRهای هالوفیل قادر به مدیریت فاضلاب‌های فوق‌شور با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر هستند (Lay et al., 2009). با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد MBR برای فاضلاب‌های شور، تشکیل رسوب بیولوژیکی (فاولینگ^۱) روی غشا است. شوری بالا می‌تواند با تحریک تولید مواد پلیمری خارج سلولی (EPS) و محصولات میکروبی محلول (SMP)، باعث تشدید فاولینگ غشا، افزایش فشار ترا-غشایی (TMP) و کاهش شار تراوه شود (Zhao et al., 2022).

اگرچه تحقیقات ارزشمندی در حوزه تصفیه فاضلاب‌های شور انجام شده، اما اغلب روی فاضلاب‌های سنتزی یا صنایع خاصی مانند نساجی، غذایی و پتروشیمی متمرکز بوده‌اند و در مورد فاضلاب پیچیده صنعت چرم‌سازی با ترکیبی از شوری بالا، بار آلی سنگین و مواد بازدارنده‌ای نظیر کروم، خلأ مطالعاتی به ویژه در کاربرد سیستم‌های پیشرفته‌ای مانند MBR احساس می‌شود (Sawalha et al., 2020).

اکثر پژوهش‌های موجود بر سیستم‌های ناپیوسته یا لجن فعال متعارف متمرکز بوده و بررسی جامع تأثیر غلظت‌های مختلف شوری بر عملکرد تصفیه و پدیده فاولینگ در یک سیستم MBR که با لجن سازگار شده با شوری بدرپاشی شده باشد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف اصلی این مطالعه بررسی سیستماتیک پیامدهای غلظت‌های مختلف شوری (در محدوده کم‌شور تا پر شور) بر کارایی فرایندهای بیولوژیکی تصفیه در یک سیستم بیوراکتور غشایی (MBR) است که با لجن فعال گرفته شده از یک تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شور راه‌اندازی شده است. نوآوری این تحقیق در استفاده از فاضلاب واقعی چرم‌سازی به جای فاضلاب سنتزی و ارائه ارزیابی جامع و یکپارچه از عملکرد تصفیه و پایداری هیدرولیکی سیستم تحت استرس شوری است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای طراحی، بهره‌برداری و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه MBR در صنایع پرالاینده مانند چرم‌سازی فراهم آورد.

¹ Fouling

کلیه آنالیزهای فیزیکی-شیمیایی روی نمونه‌ها مطابق با استاندارد روش‌های آزمون آب و فاضلاب انجام شد. پارامترهای عمومی pH و هدایت الکتریکی (EC) به ترتیب با استفاده از دستگاه pH متر پرتابل مدل AL20 و دستگاه EC متر از کمپانی AL20، پس از کالیبراسیون با محلول‌های استاندارد مربوطه، اندازه‌گیری شدند. پارامترهای اصلی آلودگی شامل اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) به روش بسته (Closed Reflux) و تیتراسیون با استفاده از محلول سولفات فروس آمونیوم (Method 5220 B)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD₅) به روش استاندارد (Method 5210 B)، کل مواد جامد معلق (TSS) و مواد جامد معلق فرار (MLSS) به روش وزن‌سنجی با ترازوی حساسیت ۰/۱ میلی‌گرم مدل ADAM (Method 2540 D and E) و همچنین کل مواد جامد محلول (TDS) اندازه‌گیری شد. با توجه به غلظت بالای یون کلرید در فاضلاب چرم که می‌تواند منجر به افزایش خطای مثبت در آزمون COD گردد، از روش استاندارد استفاده از مهارکننده سولفات جیوه (HgSO₄) برای مهار تداخل کلراید طبق دستورالعمل Method 5220 B بهره گرفته شد. علاوه بر این، اندازه‌گیری فلز سنگین کروم کل (Cr Total) با استفاده از طیف‌سنج جذب اتمی شعله‌ای (FAAS) مدل Multi Direct از کمپانی واریان (Varian) یا آنالوگ معتبر آن، پس از آماده‌سازی نمونه به روش هضم اسیدی انجام شد. راندمان حذف هر واحد و کل سیستم بر اساس درصد کاهش غلظت پارامترهای کلیدی از رابطه ۱ محاسبه گردید:

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

که در آن، C_{in} و C_{out} به ترتیب غلظت ورودی و خروجی می‌باشند. همچنین، نرخ بارگذاری آلی (OLR) از رابطه ۲ و نسبت غذا به میکروارگانیسم (F/M) در راکتور بیولوژیکی از رابطه ۳ تعیین گردید:

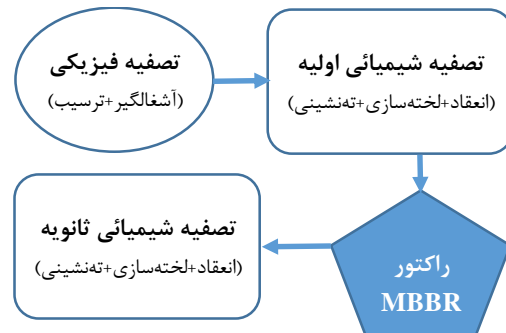
$$\text{OLR} = \frac{Q \times S_0}{V} \quad (2)$$

که در آن، Q دبی ورودی (L/d)، S_0 غلظت COD ورودی (mg/L) و V حجم راکتور (L) است. مقدار OLR بر حسب kg COD/m³.d گزارش شد.

$$\text{F/M} = \frac{Q \times S_0}{X \times V} \quad (3)$$

که در آن، X غلظت MLSS در راکتور (mg/L) بوده و F/M بر حسب kg COD/kg MLSS·d بیان شد. مقدار F/M

شوری بالا) به عنوان بذر اولیه استفاده شد. غلظت MLSS در ابتدای راه‌اندازی در حدود ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تنظیم و در صورت نیاز، مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) به نسبت COD:N:P معادل ۱۰۰:۵:۱ به منظور حمایت از رشد میکروبی اضافه شد (Metcalf and Eddy, 2014).



شکل ۱- فلوچارت و تصاویر پایلوت ترکیبی تصفیه فاضلاب صنعت چرم‌سازی در این پژوهش

دوره راه‌اندازی و سازگاری (اکلیماسیون) به مدت ۳ تا ۶ روز با تغذیه تدریجی فاضلاب واقعی انجام شد تا جامعه میکروبی به شرایط خاص این فاضلاب عادت کند. مشخصات کیفی فاضلاب ورودی در جدول ۱ ارائه شده است. دوره بهره‌برداری پایلوت به مدت سه ماه به طول انجامید. در طول این دوره، متغیرهای عملیاتی کلیدی از جمله زمان ماند هیدرولیکی (HRT) در واحد بیولوژیکی، غلظت MLSS در راکتور MBBR و نوع و دوز مواد شیمیایی در مراحل شیمیایی اولیه و ثانویه مورد پایش قرار گرفت و به صورت سیستماتیک تغییر داده شدند تا نقطه بهینه عملکرد هر واحد و کل سیستم تعیین گردد. نمونه‌برداری به طور منظم از نقاط مختلف سیستم انجام شد.

در مواجهه با فاضلاب چرم‌سازی، ابتدا مشخصات آماری فاضلاب خام ورودی به تصفیه‌خانه موجود شهرک چرم ورامین به نقل از واحد بهره‌برداری، ارائه می‌گردد (جدول ۱ و ۲). این فاز مقدماتی با هدف حذف بخش عمده‌ای از مواد معلق، چربی و بخشی از بار آلی مقاوم طراحی شد تا شرایط بهینه برای ورود به راکتور بیولوژیکی فراهم آید. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، فاضلاب ورودی به راکتور بیولوژیکی از بار آلی قابل توجهی برخوردار است (\sim mg/L 1900 COD).

به‌عنوان شاخصی از بارگذاری زیستی و عملکرد توده میکروبی مورد استفاده قرار گرفت.

در نهایت، مقاومت جامعه میکروبی بیولوژیکی در برابر شوک‌های کیفی و شوری نیز از طریق پایش پاسخ سیستم به نوسانات طبیعی فاضلاب ورودی مورد مشاهده قرار گرفت.

نتایج و بحث

ارزیابی سیستم ترکیبی و مشخصه‌های فاضلاب

به منظور ارزیابی دقیق پتانسیل سیستم تصفیه ترکیبی متشکل از مراحل شیمیایی اولیه (انعقاد-لخته‌سازی-ته‌نشینی)، بیولوژیکی هوازی (MBBR) و شیمیایی ثانویه

جدول ۱- مشخصات کیفی فاضلاب در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه موجود فاضلاب شهرک صنعتی چرم به نقل از واحد بهره‌برداری

پارامتر	Cr mg/L	MLSS mg/L	EC MS/cm	OandG mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	pH	COD mg/L
ورودی آشغالگیر	-	-	-	۳۰۰	۱۵۰۰	-	-	۱۱۰۰۰
ورودی ته‌نشینی اولیه	۴	-	۲۹/۶	۲۷۰/۲۸	۱۲۲۰	۱۵۰۱۲	۳/۹	۳۷۵۵
خروجی ته‌نشینی اولیه	۶/۳	-	-	۴۲۵/۴۲۸	۱۵۸۷	-	۳/۹	۴۶۵۰
خروجی نهر اکسیداسیون	۷/۱	-	-	۳۲۹/۷۱۴	۱۱۰۵	-	۳/۳	۴۴۶۵
خروجی ته‌نشینی شیمیایی	۶/۴	-	-	۱۴۶/۲۸۵	۱۰۰۲	-	۳/۴	۳۰۱۰
خروجی لاگون هوادهی	۶/۹	۳۱۰۰	-	۲۳۴	۲۹۵۰	-	۴/۴	۴۲۵۰
خروجی زلال ساز (تصفیه خانه)	۴/۷	۹۵۰	۳۲/۱	۲۰۰/۸۵۷	۸۴۰	۱۶۴۹۲	۴/۴	۳۴۹۰

میانگین‌های دارای حروف یکسان در هر ردیف، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارند ($p > 0.05$)

جدول ۲- خلاصه آماری کیفیت فاضلاب در نقاط کلیدی سیستم تصفیه ترکیبی این پژوهش

پارامتر	ورودی به MBBR	خروجی MBBR	خروجی نهائی (پس از شیمیائی ثانویه)
COD (mg/L)	۱۹۱۷ \pm ۵۱۸	۱۱۲۰ \pm ۲۴۵	۵۸۴ \pm ۱۱۹
BOD ₅ (mg/L)	۷۴۴ \pm ۱۵۶	۲۷۵ \pm ۸۹	۶۳ \pm ۲۲
TSS (mg/L)	۱۲۲ \pm ۳۴	۹۵ \pm ۲۸	۸ \pm ۴
TDS (mg/L)	۲۲۰۳۶ \pm ۱۶۹۷	۲۲۱۷۹ \pm ۱۶۸۲	۲۲۴۱۶ \pm ۱۷۰۱
Ec (μ S/cm)	۱۵۲۹ \pm ۱۱۰	۱۵۳۷ \pm ۱۱۲	۱۶۰۱ \pm ۱۲۱
pH	۷,۵ \pm ۰/۳	۷,۸ \pm ۰/۴	۷,۲ \pm ۰/۳
تعداد نمونه (n)	۱۱@۳	۱۱@۳	۱۱@۳

اولیه تأثیری بر کاهش شوری نداشته، که نشان‌دهنده ماهیت غیرفرار و پایدار نمک‌های معدنی (عمدتاً NaCl) در برابر فرآیندهای شیمیایی متداول است (Zhao et al., 2022). پس از عبور از سیستم MBBR، غلظت COD و BOD به‌طور معنی‌داری کاهش یافته، اما پارامترهای TDS و EC

نکته حائز اهمیت، غلظت بسیار بالای املاح محلول (mg/L) (۲۲,۰۰۰ TDS \approx) و هدایت الکتریکی (۱۵۰۰ μ S/cm \approx) می‌باشد که بیانگر شوری بالا ناشی از کاربرد نمک در دبای است. این سطح از شوری، چالشی اساسی برای فرآیندهای بیولوژیکی متعارف ایجاد می‌نماید. پیش‌تصفیه شیمیایی

اطمینان را ایفا نمود. عملکرد باثبات این مرحله مستقل از نوسانات ورودی، نشان‌دهنده کارایی بالای فرآیند انعقاد-لخته‌سازی در حذف مواد آلی باقیمانده، ذرات ریز و احتمالاً مواد پلیمری خارج سلولی (EPS) تولیدشده در فرآیند بیولوژیکی است.

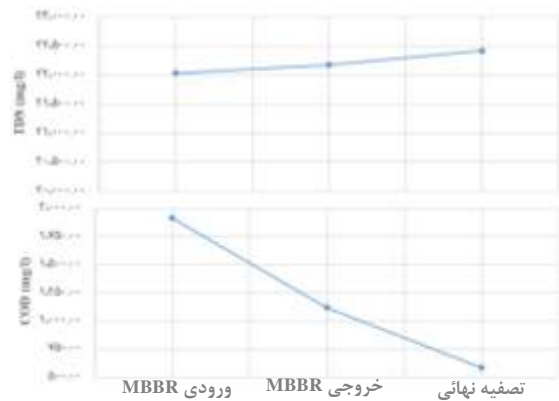
مقایسه با مطالعات مشابه نشان داد راندمان کلی سیستم (۷۰٪) در محدوده گزارش‌های مطالعاتی روی فاضلاب چرم با شوری بالا قرار دارد. به عنوان مثال، Lefebvre et al. (2006) با استفاده از یک سیستم SBR برای فاضلاب چرم با شوری ۳۵ گرم بر لیتر، راندمان حذف COD حدود ۶۰٪ را گزارش کردند. Song et al. (2020) با استفاده از یک MBR مجهز به لجن هالوفیل برای فاضلاب شور صنایع دارویی، به راندمان ۸۹٫۲٪ دست یافتند که بالاتر از نتیجه این پژوهش است. این تفاوت می‌تواند ناشی منبع میکروبی اختصاصی (هالوفیل) و کیفیت متفاوت فاضلاب باشد. از طرفی، مطالعه Johir et al. (2013) نشان داد که افزایش شوری از ۰ به ۳۰ گرم بر لیتر در یک MBR معمولی می‌تواند راندمان حذف DOC را از ۷۷٪ به ۱۰٪ کاهش دهد، که حساسیت شدید فرآیندهای بیولوژیکی غیرسازگار به شوری را تأیید می‌کند. عملکرد نسبتاً پایدار MBBR در این مطالعه (در شرایط عادی) در مقایسه با افت شدید گزارش‌شده توسط Johir et al. (2013) می‌تواند نشان‌دهنده مزیت بذریاشی با لجن سازگار شده با شوری باشد.

تأثیر شوری بر عملکرد بیولوژیکی MBBR

در این مطالعه، شوری به عنوان عامل استرس‌زای اصلی برای فرآیند بیولوژیکی شناسایی شد. برای تحلیل کمی این رابطه، داده‌های عملکرد MBBR در مقابل غلظت TDS در جدول ۴ ارائه شده‌اند. از تحلیل جدول ۴ می‌توان موارد زیر را تفسیر نمود:

الف) در محدوده TDS بین ۱۹۰۰۰ تا ۲۲۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (معادل ۱۹ تا ۲۲/۵ گرم بر لیتر)، راکتور MBBR نه تنها دچار شکست نشد، بلکه در نمونه‌های ۶ تا ۹ و ۱۱، راندمان و نرخ حذف حجمی بهبود یافت که این موضوع حاکی از توانایی قابل توجه جامعه میکروبی بومی (سازگار شده با شوری) در حفظ و حتی افزایش فعالیت متابولیک تحت استرس اسمزی مداوم است. این یافته با گزارش Jang et al. (2013) همسو است که نشان دادند افزایش تدریجی شوری تا ۲۰ گرم بر لیتر در یک MBR

تقریباً بدون تغییر باقی مانده‌اند. در نهایت، مرحله شیمیایی ثانویه منجر به کاهش بیشتر COD و به‌ویژه TSS شده و کیفیت نهایی پساب را بهبود بخشیده است. این روند کلی در شکل ۲ نمایش داده شده است. این نمودار به وضوح کاهش پیوسته COD و در مقابل پایداری غلظت TDS در مراحل مختلف تصفیه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقایسه روند تغییرات غلظت COD و TDS در مراحل مختلف سیستم تصفیه ترکیبی

کارایی در حذف مواد آلی

برای درک دقیق سهم هر یک از واحدهای تصفیه، راندمان حذف COD به تفکیک محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس، حذف نهایی COD از حدود ۱۹۰۰ به ۵۸۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده است و میانگین راندمان حذف کلی سیستم ۶۹٫۵٪ است. این راندمان کلی حاصل عملکرد زنجیره‌ای واحدهاست. نمودار ترکیبی خطی-میله‌ای در شکل ۳، روند کاهش COD و سهم کمی حذف در هر مرحله را نمایش می‌دهد. شکل ۳ و جدول ۳ نشان می‌دهد میانگین راندمان واحد بیولوژیکی MBBR ۳۵٫۵٪ با انحراف معیار نسبتاً بالا (۱۹٫۲٪) است. این نوسان بالا، حساسیت فرآیند بیولوژیکی را به تغییرات کیفی ورودی، به ویژه شوری و غلظت COD نشان می‌دهد. در دوره‌های با کیفیت نسبتاً پایدار ورودی، راندمان MBBR بین ۲۱ تا ۳۵٪ بود. جالب توجه آنکه در دوره دوم با وجود بار آلی بالاتر (COD حدود ۲۰۰۰ mg/L)، راندمان این واحد به بیش از ۵۰٪ افزایش یافت که می‌تواند نشان‌دهنده سازگاری تدریجی جامعه میکروبی با شرایط محیطی یا تغییر در ترکیب جامعه باشد که با مطالعات سایرین همخوانی دارد (Zhao et al., 2022).

واحد شیمیایی ثانویه با راندمانی پایدار و با انحراف معیار کم (۵۱٫۱ ± ۲٫۲ درصد)، نقش پالایش‌گر مؤثر و قابل

اسمزی به مصرف انرژی بیشتری نیاز دارند و اگر همزمان منبع کربن و انرژی کافی در محیط نباشد، سلولها قادر به تأمین این انرژی اضافی نبوده که منجر به تخریب سلول و آزادسازی محتوای آلی داخل سلولی به محیط می‌گردد. این مشاهده با گزارش Shokri et al. (2024) همخوانی دارد که نشان دادند شوک‌های کوتاه‌مدت شوری بسیار بالا در یک MBR هالوفیل نیز می‌تواند منجر به کاهش موقت راندمان COD شود.

داده‌ها نشان می‌دهند آستانه تحمل این سیستم بیولوژیکی سازگار شده، فراتر از ۲۲ گرم بر لیتر NaCl است، اما در مواجهه با شوک‌های شدید (حدود ۲۲۰ گرم بر لیتر) حتی با بار آلی پایین، تاب‌آوری خود را از دست می‌دهد. این یافته بر اهمیت اجتناب از نوسانات شدید کیفی در بهره‌برداری از سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب چرم تأکید می‌کند.

لزوماً منجر به کاهش راندمان حذف کربن آلی نمی‌شود اگر سیستم زمان کافی برای سازگاری داشته باشد.

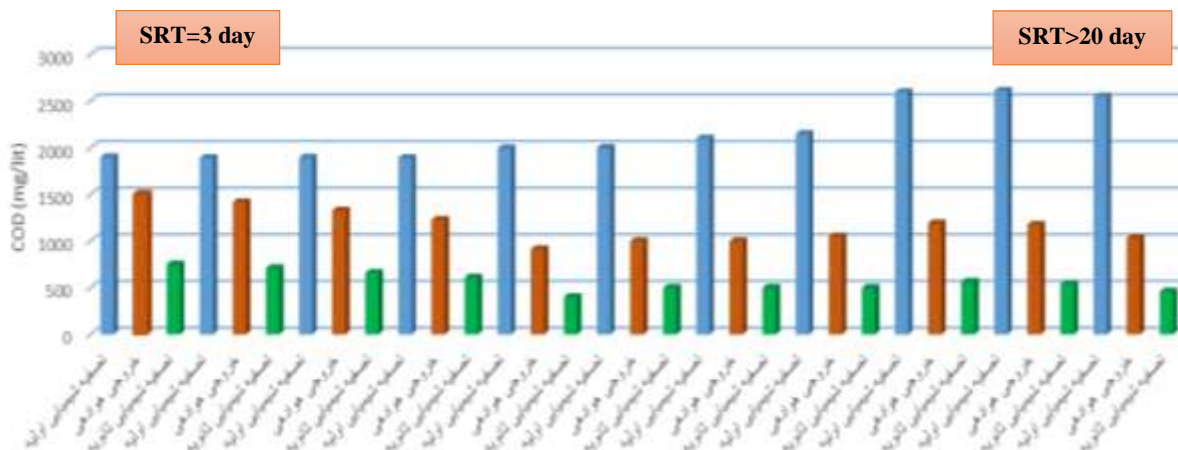
ب) شوری بالا از دو طریق بر میکروارگانیسم‌ها اثر می‌گذارد: اول، استرس اسمزی که منجر به دهیدراتاسیون و کاهش فعالیت متابولیک می‌شود و دوم، سمیت یونی خاص که در عملکرد آنزیم‌ها اختلال ایجاد می‌کند (Guo et al., 2023; Johir et al., 2013; Lay et al., 2009). عملکرد نسبتاً خوب MBBR در این مطالعه نشان می‌دهد که جامعه میکروبی احتمالاً با مکانیسم‌هایی مانند تولید املاح سازگار در داخل سلول، فشار اسمزی را متعادل کرده است.

ج) نقطه بحرانی نمونه شماره ۱۰ دارای نتیجه مهمی است، زیرا ترکیب شوری بسیار بالا (حدود ۲۲۴ گرم بر لیتر TDS) با بار آلی ورودی بسیار پایین (۶۱۲ میلی‌گرم بر لیتر COD) منجر به راندمان منفی و افزایش COD خروجی شد. این پدیده را می‌توان با مکانیسم شوک اسمزی-تغذیه‌ای تبیین کرد. تحت شوری فوق‌العاده بالا، سلولها برای حفظ تعادل

جدول ۳- راندمان حذف COD در مراحل مختلف سیستم تصفیه ترکیبی و مقایسه با مطالعات مشابه

نمونه (دوره)	راندمان حذف COD (%)		COD ورودی به MBBR (mg/L)	
	کل	شیمیائی ثانویه	MBBR	
دوره اول (پایدار)	۶۰/۵ تا ۶۷/۷	۴۹/۸ تا ۵۰/۴	۲۱/۱ تا ۳۵/۰	۱۸۹۰ تا ۱۹۰۰
دوره دوم (متغیر)	۷۵/۰ تا ۷۸/۳	۵۰/۰ تا ۵۲/۸	۵۰/۰ تا ۵۴/۱	۲۰۰۰ تا ۲۱۵۰
دوره سوم (شوگ)	۱۱/۸ تا ۵۹/۵	۰ تا ۵۴/۱	۸/۲ تا ۵۹/۵	۶۱۲ تا ۲۵۵۰
میانگین کل	۱۸/۱ ± ۶۳/۲	۲/۲ ± ۵۱/۱	۱۹/۲ ± ۳۵/۵	۱۷۸۷ ± ۶۳۹

*مقدار غیرعادی (۱۱/۸٪) ناشی از ورودی با COD بسیار پایین و شوری بسیار بالا (شرایط شوگ) است که عملکرد بیولوژیکی را مختل کرد.



شکل ۳- سهم مراحل مختلف تصفیه در کاهش بار آلاینده‌ی آلی

تطابق شوری پساب خروجی با استانداردها

نتایج مقایسه کیفیت پساب نهایی با استانداردهای ملی و بین‌المللی تخلیه در جدول ۵ ارائه شده است. اگرچه سیستم ترکیبی در کاهش آلاینده‌های آلی کارآمد بوده است، اما داده‌های جدول ۲ و ۵ نشان می‌دهند که پارامتر TDS (شوری) در طول فرآیند تصفیه بدون تغییر باقی می‌ماند که مهمترین چالش برای دفع نهایی پساب محسوب می‌شود. بر اساس نتایج جدول ۵، تخلیه به آب‌های سطحی از نظر شوری (TDS) استانداردهای تخلیه را برآورده نمی‌کند که افزایش شوری آب‌های پذیرنده موجب تنش اسمزی بر اکوسیستم‌های آبی، کاهش تنوع زیستی و محدودیت در مصارف کشاورزی و شرب می‌شود (Anthony et al., 2025). همچنین در صورت تخلیه به شبکه فاضلاب

شهری، علیرغم مطابقت نسبی پارامترهای آلی، غلظت TDS (حدود ۲۲۰۰۰ mg/L) به مراتب بالاتر از حد مجاز (۲۰۰۰-۳۰۰۰ mg/L) است که عملکرد تصفیه‌خانه شهری را مختل کرده و امکان استفاده مجدد از پساب را کاهش می‌دهد. از آنجا که سیستم‌های تصفیه متعارف قادر به حذف املاح نیستند، مدیریت پایدار فاضلاب چرم‌سازی نیازمند استراتژی دو مرحله‌ای شامل حذف مواد آلی با سیستم ترکیبی و سپس مدیریت املاح از طریق بازچرخانی داخلی در فرآیندهای غیرحساس به کیفیت آب یا تغلیظ و دفع نهایی با فناوری‌های تبخیری و غشایی (مانند اسمز معکوس) است. دفع نهایی جریان غلیظ نمک نیز نیازمند روش‌های مهندسی مانند تزریق به چاه‌های عمیق با رعایت ملاحظات محیط‌زیستی است.

جدول ۴- همبستگی بین شوری (TDS) و شاخص‌های عملکردی راکتور MBBR

نمونه	TDS در MBBR (mg/L)	COD ورودی MBBR (mg/L)	COD خروجی MBBR (mg/L)	راندمان MBBR (%)	نرخ حذف حجمی COD (g/m ³ .d)	توصیف وضعیت
۱	۱۹۴۰۰	۱۹۰۰	۱۵۰۰	۲۱/۱	۴۰۰	عملکرد اولیه+سازگاری ناقص
۲	۱۹۵۲۰	۱۸۹۰	۱۴۱۷	۲۵/۰	۴۷۳	روند بهبود تدریجی
۳	۱۹۵۱۰	۱۸۹۶	۱۳۲۷	۳۰/۰	۵۶۹	ادامه روند سازگاری
۴	۱۹۶۳۵	۱۸۹۰	۱۲۲۸	۳۵/۰	۶۶۲	عملکرد نسبتاً پایدار
۵	۱۹۶۳۳	۹۹۵	۹۱۳	۸/۲	۸۲	بار آلی ورودی پائین
۶	۱۹۷۳۲	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰/۰	۱۰۰۰	اوج عملکرد (سازگاری+بار مناسب)
۷	۲۲۴۳۵	۲۱۰۰	۱۰۰۰	۵۲/۴	۱۱۰۰	حفظ عملکرد تحت شوری بالا
۸	۲۲۴۰۰	۲۱۵۰	۱۰۵۰	۵۱/۲	۱۱۰۰	عملکرد پایدار
۹	۲۲۴۵۷۳	۲۵۹۶	۱۱۹۲	۵۴/۱	۱۴۰۴	عملکرد خوب تحت بار بالا
۱۰ (شوک)	۲۲۴۳۶۰	۶۱۲	۱۱۷۶	-۹۲/۲	-۵۶۴	شکست عملکرد (شوک شوری+ بار پائین)
۱۱	۲۲۴۵۱۰	۲۵۵۰	۱۰۳۳	۵۹/۵	۱۵۱۷	بازیابی نسبی عملکرد

* نرخ حذف حجمی با فرض HRT ثابت محاسبه شده و معیار بهتری برای سنجش فعالیت بیولوژیکی مستقل از غلظت ورودی است.

جدول ۵- مقایسه کیفیت پساب نهایی با استانداردهای ملی و بین‌المللی تخلیه

پارامتر	میانگین کیفیت پساب خروجی (در این مطالعه) آب‌های سطحی ایران	استاندارد تخلیه به فاضلاب شهری ایران	استاندارد تخلیه به شبکه ضوابط EPA برای تخلیه به سطحی/فاضلاب شهری	وضعیت انطباق (آب)
COD (mg/L)	۱۱۹±۵۸۴	≤۶۰	≤۲۰۰	غیرقابل قبول/قابل قبول
BOD ₅ (mg/L)	۲۲±۶۳	≤۳۰	≤۱۰۰	غیرقابل قبول/قابل قبول
TSS (mg/L)	۴±۸	≤۴۰	≤۱۰۰	قابل قبول/قابل قبول
TDS (mg/L)	۱۷۰۱±۲۲۴۱۶	≤۱۵۰۰*	≤۲۰۰۰*	غیرقابل قبول/غیرقابل قبول
pH	۷/۲ ± ۰/۳	۸/۵ تا ۶/۵	۹ تا ۶	قابل قبول/قابل قبول

* مقادیر دقیق بر اساس طبقه‌بندی آب پذیرنده و قوانین محلی متغیر است. مقادیر ذکر شده رایج‌ترین مقادیر این محدودیت‌ها هستند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی پیامدهای شوری بر کارایی یک سیستم ترکیبی تصفیه فاضلاب صنعت چرم‌سازی انجام شد. یافته‌ها نشان داد که رویکرد ترکیبی شیمیایی-بیولوژیکی-شیمیایی برای مدیریت این فاضلاب پیچیده ضروری و مؤثر است، به‌گونه‌ای که سیستم موفق به دستیابی به راندمان حذف کلی COD با میانگین حدود ۷۰٪ نسبت به تصفیه‌خانه موجود گردید. تحلیل‌ها حاکی از نقش محوری واحد بیولوژیکی MBBR در کاهش بار آلی و اهمیت واحد شیمیایی ثانویه به عنوان پالایش‌گری پایدار برای ارتقای کیفیت نهایی پساب بود که تأکید می‌کند تصفیه بیولوژیکی به تنهایی جهت تامین استانداردهای تخلیه کافی نیست.

این پژوهش، نشان داد جامعه میکروبی سازگار شده تا آستانه تحمل حدود ۲۲ گرم بر لیتر TDS قادر به حفظ فعالیت خود بود، اما افزایش ناگهانی شوری به مقادیر بسیار بالا منجر به شکست کامل فرآیند بیولوژیکی و افزایش COD خروجی گردید. این نتیجه هشدار می‌دهد که مدیریت نوسانات شوری از مدیریت غلظت متوسط آن مهم‌تر است. با وجود موفقیت سیستم در کاهش بار آلی، چالش بنیادی حل‌نشده باقی ماند؛ شوری در طول فرآیندهای متداول تصفیه حذف نمی‌شود و غلظت نهایی TDS در پساب (حدود ۲۲ گرم بر لیتر) آن را برای تخلیه به آب‌های پذیرنده سطحی کاملاً نامناسب می‌سازد. بنابراین تصفیه فاضلاب این صنعت نمی‌تواند تنها معطوف به حذف مواد آلی باشد و تدوین استراتژی جامع برای مدیریت املاح ضروری است.

بر این اساس، راهکارهای عملی شامل بهینه‌سازی عملیاتی سیستم بیولوژیکی از طریق آکلیماسیون تدریجی، استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی هالوفیل و کنترل دقیق نسبت غذا به میکروارگانیسم برای افزایش تاب‌آوری سیستم پیشنهاد می‌گردد. در گام بعدی، ادغام فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت نهایی شوری اجتناب‌ناپذیر است که می‌تواند شامل بازچرخانی پساب در فرآیندهای غیرحساس به شوری یا به کارگیری تکنیک‌های جداسازی مانند اسمز معکوس برای حذف املاح و بازیابی آب باشد.

قدردانی

نویسندگان پژوهش از پژوهشگاه نیرو و موسسه آموزش عالی دانش‌پژوهان پیشرو و مهندسی مشاور پارس آراین آب، به خاطر همکاری در انجام این پژوهش، قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: هدایت و نظارت بر انجام آزمایش‌ها، تفسیر نتایج، نگارش و ویرایش نهایی مقاله
نویسنده دوم: انجام آزمایش‌ها

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Anthony, E., Adanlawo, O., and Oladoja, N., 2025. Management of Wastewater from Tannery and Leather Processing Industries. *Springer Water (SPWA)*, pp.153-189. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90314-4_6
2. Appiah-Brempong, M., Essandoh, H., Asiedu, N., Dadzie, S., and Momade, F., 2021. Artisanal tannery wastewater: Quantity and characteristics. *Heliyon*, 8, e08680. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08680>
3. Bhardwaj, A., Kumar, S., and Singh, D., 2023. Tannery effluent treatment and its environmental impact: a review of current practices and emerging technologies. *Water Quality Research Journal*, 58, pp.128-152. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2023.002>
4. Manivasagan, R., 2011. Biological Treatment of Tannery Wastewater - A Review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.1.17>
5. Guo, L., Xie, Y., Sun, W., Xu, Y., and Sun, Y., 2023. Research Progress of High-Salinity Wastewater Treatment Technology. *Water*, 15, 684. <https://doi.org/10.3390/w15040684>
6. Hassen, A., 2017. Evaluation and Characterization of Tannery Wastewater in each process at batu and

- microorganism consortium. *Environmental technology*, 31, pp.1229-1239. <https://doi.org/10.1080/09593331003646612>
16. Pundir, A., Thakur, M., Goel, B., Radha, Kumar, A., Prakash, S., Thakur, M., and Kumar, M., 2024. Innovations in tannery wastewater management: a review of zero liquid discharge technology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05986-x>
 17. Rai, M., Kumar, M., Singhanian, R., and Giri, B., 2025. Tannery waste management and cleaner production of leather in beam house and tanning section: A review. *Bioresource Technology Reports*, 30, 102116. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102116>
 18. Saritha, B., and Chockalingam, M. P., 2018. Evaluation and characterization of tannery wastewater. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, pp.8479-8487, 119.
 19. Sawalha, H., Al-Jabari, M., Elhamouz, A., Abusafa, A., and Rene, E., 2020. Tannery wastewater treatment and resource recovery options. *In* (pp. 679-705). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818228-4.00025-3>
 20. Shokri, S., Bonakdarpour, B., and Abdollahzadeh Sharghi, E., 2024. How high salt shock affects performance and membrane fouling characteristics of a halophilic membrane bioreactor used for treating hypersaline wastewater. *Chemosphere*, 354, 141716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141716>
 21. Song, W., Xu, D., Bi, X., Ng, H. Y., and Shi, X., 2020. Intertidal wetland sediment as a novel inoculation source for developing aerobic granular sludge in membrane bioreactor treating high-salinity antibiotic manufacturing wastewater. *Bioresource Technology*, 314, 123715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123715>
 22. Zhao, J., Wu, Q., Tang, Y., Zhou, J., and Guo, H., 2022. Tannery wastewater treatment: conventional and promising processes, an updated 20-year review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1186/s42825-022-00082-7>
 - modjo tannery, Ethiopia. *international journal of rural development, Environment and Health*, 3, pp.17-26 .
 7. Husain, A., Ansari, M. A., Khan, A., Shadan, M., and Baig, M. W., 2024. Overview of treatment methods of tannery wastewater, 1326. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012134>
 8. Johir, M. A. H., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., BenAim, R., and Grasmick, A., 2013. Effect of salt concentration on membrane bioreactor (MBR) performances: Detailed organic characterization. *Desalination*, 322, pp.13-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.025>
 9. Lay, W., Liu, Y., and Fane, A. G., 2009. Impacts of salinity on the performance of high retention membrane bioreactors for water reclamation: A review. *Water research*, 44, pp.21-40. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.026>
 10. Lefebvre, O., Vasudevan, N., Torrijos, M., Thanasekaran, K and Moletta, R., 2006. Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment. *Water research*, 40(7), 1492-1500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.004>
 11. Lofrano, G., Meric, S., Zengin Balci, G., and Orhon, D., 2013. Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review. *The Science of the total environment*, 461-462C, 265-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.004>
 12. Mandal, T., Mandal, D., Mandal, S., and Datta, S., 2010. Treatment of leather industry wastewater by aerobic biological and Fenton oxidation process. *Journal of hazardous materials*, 180, pp.204-211. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.014>
 13. Metcalf, and Eddy, I., 2014. Wastewater engineering : treatment and reuse. *Boston :McGraw-Hill*, pp.1106-1168.
 14. Muktadir, M., Maliha, M., Fatematujjohra, Munmun, S. A., Alam, M. S., Islam, M. A., and Rahman, M., 2023. Treatment of tannery wastewater by different membrane bioreactors: A critical review. *Environmental Advances*, 15, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100478>
 15. Pendashteh, A., Fakhru'l-Razi, A., Luqman Chuah, A., Radiah, D., Madaeni, S. S., and Abidin, Z., 2010. Biological treatment of produced water in a sequencing batch reactor by isolated halophilic