



Application of Membrane Bioreactor Method for Removal of Pollutants from Industrial Wastewater Treatment Plant Effluent

Ali Hajrasouliha ¹ , Majid Hosseinzadeh ^{2*} 

1. B.Sc. Graduate in Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
(Corresponding Author) hosseinzadeh_m@iust.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.566014.3535>

Original Paper

Abstract

Given the intensification of water scarcity and increasing water demand, the reuse of treated industrial wastewater can be considered as a sustainable water resource. The aim of this study was to evaluate the performance of a lab-scale membrane bioreactor for improving the quality of the effluent from the industrial wastewater treatment plant of Shokouhieh Industrial Town for reuse purposes. The study focused on the simultaneous analysis of suspended solids removal, organic load reduction, and the limitation of the process in reducing dissolved salts, in order to evaluate the reuse potential of the effluent from the perspective of final end-use water quality. A plexiglass reactor with an effective volume of 32 L was operated continuously for 35 days, and the influent flow rate was set at 4 L/h (HRT \approx 8 h). Solids separation was carried out using a flat-sheet ultrafiltration membrane with a molecular weight cut-off of 150 kDa. During the operation period, influent and effluent samples were collected, and COD, TSS and TDS were measured according to standard methods. The results showed that the average COD decreased from 321 to 68 mg/L, corresponding to 79% removal, and the average TSS decreased from 99 to 2 mg/L, corresponding to 98% removal. In addition, TDS decreased from 1134 to 960 mg/L, corresponding to an approximately 15% reduction, which is consistent with the inherent limitation of UF membranes in removing dissolved salts. Therefore, in applications where further reduction of dissolved salts is required, complementary processes such as nanofiltration or reverse osmosis are recommended. Overall, the studied MBR showed a high capability for suspended solids removal and organic load reduction and, considering the quality requirements of the intended end use, can be regarded as a reliable option for some reuse applications. The 35-day monitoring period demonstrated the performance trend of the system under real wastewater conditions, and the results can provide a basis for the design and evaluation of longer-term pilot-scale experiments in future studies.

Keywords:

Membrane Bioreactor,
Ultrafiltration,
Industrial Wastewater,
Reuse, Membrane
Fouling.



Received: May 23, 2025

Revised: Aug. 19, 2025

Accepted: Sep. 9, 2025

To cite this article:

Hajrasouliha, A., Hosseinzadeh, M., 2025. Application of membrane bioreactor method for removal of pollutants from industrial wastewater treatment plant effluent. *Water and Wastewater*, (In press). <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.566014.3535>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

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



1. Introduction

Global water scarcity and increasing water demand have intensified interest in wastewater reclamation and reuse as sustainable water management strategies (He et al., 2021; Brown, 2012). Industrial wastewater, due to its complex composition and variable characteristics, poses significant environmental risks when inadequately treated (Besha et al., 2017). Enhancing industrial effluent quality for reuse can reduce pressure on freshwater resources while minimizing pollutant discharge into natural ecosystems (Raper et al., 2018). Furthermore, the expansion of industrial activities has increased pollutant loads in wastewater streams, creating an urgent need for improved and optimized biological treatment technologies (Rahman et al., 2023).

Among advanced treatment technologies, membrane bioreactors¹, which combine biological degradation with membrane filtration, have been widely applied for wastewater treatment and reuse (Hai et al., 2018; Bolzonella et al., 2010). MBRs are recognized as effective systems for water reclamation (Hoinkis et al., 2012; Comerton et al., 2005); however, membrane fouling remains a major challenge, leading to reduced permeate flux, increased transmembrane pressure², and higher operational costs (Iorhemen et al., 2016; Zhang et al., 2006).

The performance of MBRs treating industrial effluents depends strongly on feed characteristics, particularly the presence of recalcitrant and dissolved organic compounds (Lin et al., 2009). In addition, membrane properties, operating conditions, retention times, reactor environment, and fouling intensity significantly affect treatment efficiency (Xie et al., 2010; Niu et al., 2023). Although many studies have focused on the removal of individual pollutants or the use of MBRs as pretreatment for reverse osmosis³ systems (Hosseinzadeh et al., 2016), evaluating water reuse potential requires simultaneous assessment of key quality indicators. While high removal of Total Suspended Solids⁴ and Chemical Oxygen Demand⁵ indicates substantial improvement, persistent Total Dissolved Solids⁶ may limit reuse in salinity-sensitive applications.

Therefore, integrated evaluation of TSS, COD, and TDS is essential for accurately

assessing MBR performance and determining the need for further treatment. Accordingly, this study investigated the performance of a laboratory-scale UF-MBR treating actual wastewater from the Shokouhieh Industrial Town wastewater treatment plant. The objective was to evaluate the system's capability for suspended solids removal, organic load reduction, and dissolved salt control in order to assess its practical potential for industrial wastewater reclamation and reuse.

2. Methodology

To ensure the empirical validity and practical applicability of the findings, genuine industrial wastewater was utilized as the continuous feed source for the MBR pilot system. Representative wastewater samples were systematically collected directly from the effluent discharge of the operational sand filters situated at the Shokouhieh Industrial Town wastewater treatment plant located in Qom Province, Iran. To meticulously preserve the intrinsic quality of the samples and prevent any unwarranted alterations in their chemical composition, sampling was executed using non-reactive plastic containers of appropriate volume. These samples were immediately transported under strictly controlled thermal conditions to the dedicated laboratory housing the pilot apparatus.

The experimental setup comprised a continuously operated ultrafiltration MBR. The bioreactor tank was fabricated from transparent plexiglass, featuring an effective working volume of 32 liters. The authentic industrial feed was continuously introduced into the biological system at a calibrated flow rate of 4 L/h. Based on these dimensional and operational parameters, the hydraulic retention time⁷ was calculated to be approximately 8 hours. To facilitate the critical solid-liquid separation phase and generate the final treated permeate, a submerged flat-sheet ultrafiltration⁸ membrane module was deployed. The specific membrane utilized was characterized by a molecular weight cut-off of 150 kDa, a nominal pore size of 0.04 μm, an effective surface area of 0.048 m², and was manufactured from EPS material. The system was thoroughly equipped with necessary aeration mechanisms to maintain optimal aerobic conditions and ensure adequate mixing within the mixed liquor.

Over the extensive 35-day operational period, samples from both the raw influent and the final UF permeate were collected at defined regular

¹ Membrane Bioreactors (MBRs)

² Transmembrane Pressure (TMP)

³ Reverse Osmosis (RO)

⁴ Total Suspended Solids (TSS)

⁵ Chemical Oxygen Demand (COD)

⁶ Total Dissolved Solids (TDS)

⁷ Hydraulic Retention Time (HRT)

⁸ Ultrafiltration (UF)



intervals to rigorously monitor dynamic changes in crucial qualitative parameters. The analytical evaluation encompassed the precise measurement of pH, TSS, COD and TDS. All analytical procedures were conducted in strict accordance with the protocols detailed in the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 2005). Specifically, pH was measured electrometrically (Standard Methods 4500-H⁺ B). TSS and TDS were quantified utilizing gravimetric techniques (Standard Methods 2540D and 2540C, respectively). The organic load, represented by COD, was determined via the closed reflux colorimetric method (Standard Methods 5220D).

3. System specifications and wastewater characteristics

The detailed technical specifications of the UF membrane and the qualitative characteristics of both the influent and effluent streams are presented in Tables 1–3. Specifically, the influent wastewater characteristics are summarized in Table 1, the treated effluent characteristics are presented in Table 2, and the technical specifications of the ultrafiltration membrane are provided in Table 3.

Table 1. Qualitative characteristics of the influent to the MBR system

Parameter	Unit	Ave.	Min.	Max.
pH	-	7.4	6.6	8.3
TSS	mg/L	99	82	121
COD	mg/L	321	302	347
TDS	mg/L	1134	876	1443

Table 2. Qualitative characteristics of the effluent from the MBR system

Parameter	Unit	Ave.	Min.	Max.
pH	-	7.4	6.6	8.3
TSS	mg/L	2	1	4
COD	mg/L	68	52	87
TDS	mg/L	960	710	1312

Table 3. Technical specifications of the UF membrane used in the MBR system

Process parameters	Unit	Value
Membrane configuration	-	Flatsheet
Cut off	kDalton	150
Pore size	μm	0.04
Dimensions (Width × Height)	mm	240×200
Effective surface area	m ²	0.048
Material	-	EPS
Membrane charge	-	Neutral
pH resistance range	-	4-11

4. Results and discussion

Prior to the commencement of the primary data acquisition phase, the MBR system underwent a crucial start-up and acclimatization period to achieve a steady-state operational condition. During this vital phase, the robust growth and proliferation of active microorganisms within the reactor's biological environment were systematically facilitated. The Mixed Liquor Suspended Solids¹, serving as the primary indicator of active biomass concentration, was continuously monitored and observed to increase significantly, reaching an operational concentration of approximately 3500 mg/L. Upon attaining this requisite biomass level, controlled sludge wasting protocols were initiated to maintain biological equilibrium.

4.1. TSS removal

The empirical data presented in Fig. 1 conclusively demonstrated that the investigated MBR system exhibited exceptional efficacy in eliminating suspended solids. The average influent TSS concentration of 99 mg/L was drastically reduced to merely 2 mg/L in the final treated effluent, representing a highly significant removal efficiency of approximately 98%. This outstanding level of separation is fundamentally consistent with the mechanistic nature of MBRs. In such advanced systems, the separation of solids is not reliant on the often-unpredictable gravitational settling characteristics of biological flocs; instead, the UF membrane functions as a highly formidable physical barrier. This barrier efficiently prevents the passage of suspended particulates, biological flocs, and the vast majority of the active biomass into the final permeate stream. From the critical perspective of water reuse, this near-complete removal of TSS is of paramount importance, as residual suspended solids can drastically increase turbidity, degrade

¹ Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)



the visual quality of the reclaimed water, and significantly heighten the probability of severe clogging in sensitive downstream industrial equipment.

4.2. Organic matter reduction (Measured as COD)

As shown in Fig. 2, in MBR systems, the systematic reduction of COD is the direct result of a complex synergy between continuous microbial biodegradation within the reactor and the physical retention properties of the membrane. The results indicated that the average COD was successfully reduced from an initial 321 mg/L in the feed stream to 68 mg/L in the final permeate, achieving an overall removal

efficiency of 79%. This substantial decrease signifies the system's robust capability to manage and mitigate the organic loading prevalent in the industrial wastewater (Alotaibi et al., 2024). Mechanistically, this high efficiency is attributed to the biological oxidation of readily biodegradable organic constituents by the suspended biomass, coupled with the membrane's physical entrapment of larger, colloidal, and particulate organic fractions. However, the persistence of a residual COD fraction in the effluent requires careful interpretation. Given that the raw feed for this MBR pilot was sourced downstream of a sand filtration unit, it is highly probable that the more easily biodegradable organic compounds had already been partially oxidized or removed during preceding

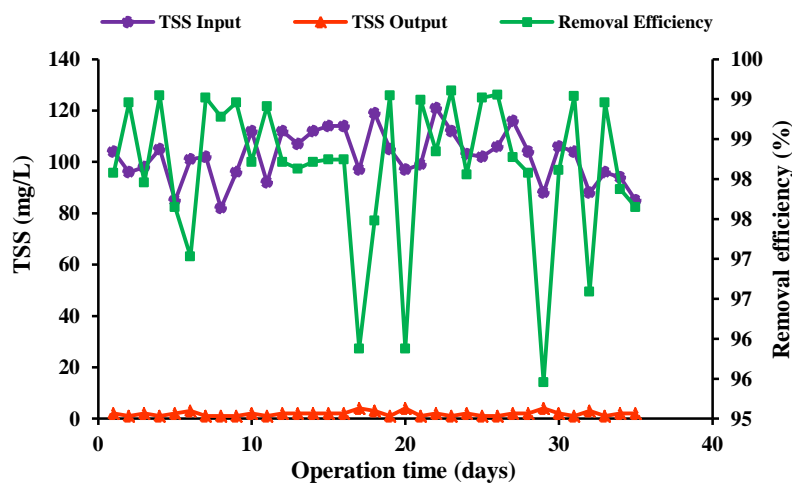


Fig. 1. Variations of TSS in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period

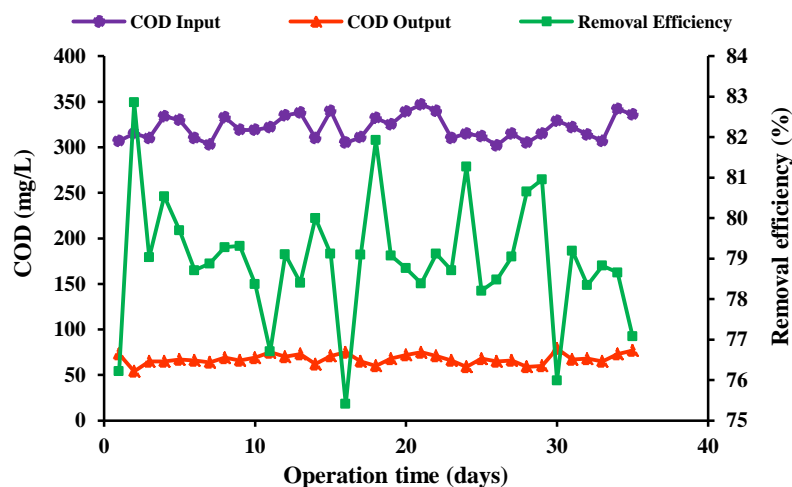


Fig. 2. Variations of COD in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period



preliminary treatment stages (Tchobanoglous et al., 2003). Consequently, the residual COD navigating into and subsequently passing through the MBR likely constitutes a higher proportion of complex, recalcitrant, or slowly biodegradable soluble organic compounds.

4.3. TDS variations

As shown in Fig. 3, in stark contrast to the highly efficient removal of TSS and COD, the overall reduction in TDS was inherently limited, averaging merely a 15% decrease (from 1134 mg/L to 960 mg/L). From an engineering and process perspective, this precise outcome is

entirely anticipated. UF membranes, characterized by their specific pore sizes and molecular weight cut-offs, are fundamentally engineered to selectively separate suspended particulates, colloidal matter, and high-molecular-weight organic macromolecules. They do not possess the necessary physical or electrostatic mechanisms required to effectively reject dissolved monovalent or divalent mineral ions. Therefore, this restricted reduction in TDS must not be erroneously interpreted as a functional flaw or weakness of the biological system; rather, it accurately reflects the absolute physical boundary and inherent technological limitation of the UF-MBR configuration.

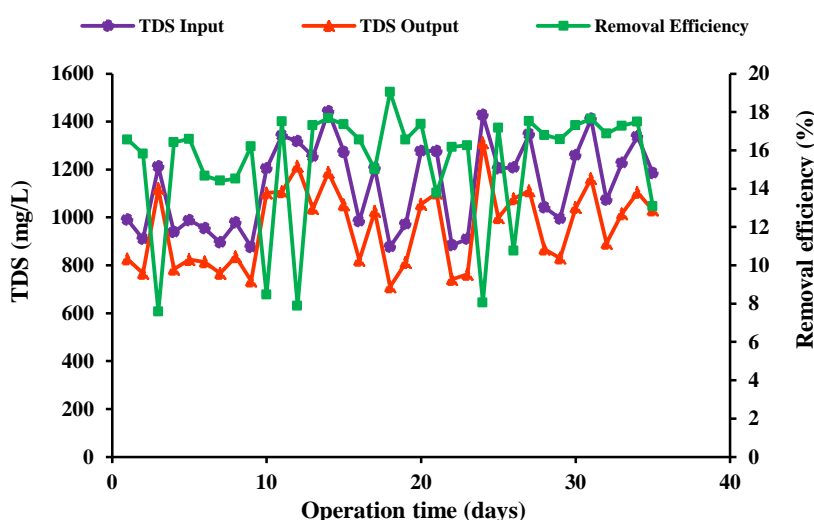


Fig. 3. Variations of TDS in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period

4.4. Implications for reuse and operational considerations

Comparing the distinctly divergent behaviors of TSS, COD and TDS clearly underscores that the overall performance of the MBR is highly specific to the targeted pollutant category. While the physical retention of TSS is absolute and the biological/physical removal of COD is substantial, the unhindered passage of dissolved salts remains a pivotal factor. For industrial applications exhibiting lower sensitivity to salinity, the marked improvements in TSS and COD achieved by the MBR alone may render the effluent perfectly acceptable. However, for stringent applications-such as make-up water for cooling towers or processes where mineral accumulation is profoundly detrimental-the MBR standalone system is definitively insufficient. In these rigorous scenarios, the MBR serves as an exceptional advanced pre-treatment phase,

necessitating the crucial integration of subsequent high-pressure membrane technologies, specifically Nanofiltration¹ or RO, to reliably achieve the required demineralization (Aziz et al., 2021; Kim et al., 2024). Additionally, while robust treatment efficiencies were recorded, the absence of continuous, quantitative monitoring of critical fouling indicators, such as TMP and operational flux variations over the 35-day period, constitutes a noted limitation in comprehensively assessing long-term operational sustainability.

5. Conclusions

This empirical study comprehensively investigated the performance and reuse potential of a laboratory-scale MBR treating genuine industrial wastewater from the Shokouhieh

¹ Nanofiltration (NF)



Industrial Town. The analytical findings emphatically demonstrated that the UF-MBR system exhibits exemplary proficiency in the complete elimination of suspended solids, achieving a 98% reduction (from 99 to 2 mg/L) by virtue of the UF membrane acting as a highly reliable physical barrier.

Furthermore, the system successfully managed the organic load, registering a 79% reduction in COD (from 321 to 68 mg/L), effectively combining biological oxidation with physical retention. However, consistent with fundamental membrane theory, the reduction of TDS was intrinsically limited to approximately 15%. This phenomenon is not indicative of system failure but precisely delineates the operational frontier of UF technology, which

lacks the capability to reject dissolved ionic species. Consequently, it is concluded that while the UF-MBR is highly suitable for industrial reuse applications prioritizing strict TSS and COD control, its deployment for salinity-sensitive applications must be mandatorily coupled with advanced desalination processes such as RO or NF.

Future extensive studies should incorporate the rigorous, long-term monitoring of quantitative fouling indices (TMP, Flux), comprehensive solids retention time¹ calculations, and detailed fractionation of soluble organic matter to provide a more holistic evaluation of MBR sustainability in industrial contexts.

¹ Solids Retention Time¹ (SRT)





استفاده از روش بیوراکتور غشایی برای حذف آلاینده‌ها از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی

علی حاج رسولیها^۱، مجید حسین‌زاده^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) hosseinzadeh_m@iust.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.566014.3535>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
بیوراکتور غشایی،
اولترافیلتراسیون، پساب
صنعتی، استفاده مجدد،
گرفتگی غشاء

با توجه به تشدید کم‌آبی و افزایش تقاضای آب، استفاده مجدد از پساب‌های صنعتی تصفیه شده می‌تواند به‌عنوان یک منبع پایدار آب مورد توجه قرار گیرد. هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد یک بیوراکتور غشایی در مقیاس آزمایشگاهی برای ارتقای کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی شکوهیه به‌منظور استفاده مجدد بود. تمرکز پژوهش بر تحلیل هم‌زمان حذف جامدات معلق، کاهش بار آلی و بررسی محدودیت فرایند در کاهش املاح محلول بود تا قابلیت استفاده مجدد پساب از منظر کیفیت نهایی مصرف ارزیابی شود. راکتور پلکسی‌گلاس با حجم مفید ۳۲ لیتر به‌صورت مداوم به مدت ۳۵ روز بهره‌برداری شد و دبی خوراک ۴ لیتر بر ساعت تنظیم شد ($HRT \approx 8$ ساعت). جداسازی جامدات با غشای اولترافیلتراسیون تخت با حد برش ۱۵۰ کیلو دالتون انجام شد. در طول بهره‌برداری، نمونه‌برداری از ورودی و خروجی انجام شد و پارامترهای COD، TSS و TDS بر اساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد میانگین COD از ۳۲۱ به ۶۸ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافت (۷۹ درصد حذف) و میانگین TSS از ۹۹ به ۲ میلی‌گرم در لیتر رسید (۹۸ درصد حذف). همچنین TDS از ۱۱۳۴ به ۹۶۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافت (حدود ۱۵ درصد کاهش) که با محدودیت ذاتی غشای اولترافیلتراسیون در حذف املاح محلول سازگار است؛ بنابراین، در کاربردهایی که کاهش بیشتر املاح ضروری باشد، استفاده از فرایندهای تکمیلی مانند نانوفیلتراسیون یا اسمز معکوس پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی، MBR مورد بررسی توانایی بالایی در حذف جامدات معلق و کاهش بار آلی داشته و می‌تواند برای برخی کاربردهای استفاده مجدد، با توجه به الزامات کیفی مقصد، گزینه‌ای مطمئن‌بخش باشد. پایش ۳۵ روزه، روند عملکرد سامانه را در شرایط پساب واقعی نشان داد و نتایج می‌تواند مبنایی برای طراحی و ارزیابی آزمایش‌های بلندمدت‌تر در مقیاس پایلوت در ادامه باشد.



دریافت: ۱۴۰۴/۳/۲

اصلاح: ۱۴۰۴/۵/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

حاج رسولیها، ع، حسین‌زاده، م، ۱۴۰۴، استفاده از روش بیوراکتور غشایی برای حذف آلاینده‌ها از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی. آب و فاضلاب. (در حال انتشار)

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.566014.3535>



© The Author(s).

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تشدید کم‌آبی و افزایش تقاضای آب، استفاده مجدد از پساب تصفیه شده را به‌عنوان یکی از گزینه‌های واقع بینانه برای مدیریت پایدار منابع آب مطرح کرده است. در این میان، پساب‌های صنعتی به دلیل تنوع ترکیبات و نوسانات کیفی، در صورت تصفیه ناکافی می‌توانند پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کنند؛ بنابراین، ارتقای کیفیت پساب صنعتی تا سطح قابل استفاده مجدد، علاوه بر کاهش فشار بر منابع آب، می‌تواند به کاهش بار آلاینده‌گی تخلیه شده به محیط زیست نیز کمک کند (He et al., 2021). این عوامل منجر به نیاز به جستجوی منابع جدید آب در سراسر جهان شده‌اند (Besha et al., 2017).

با گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی و تأثیرات جهانی شدن، حجم زیادی از آلاینده‌ها وارد فاضلاب‌ها می‌شود. این روند نه تنها کیفیت منابع آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی نیز به دنبال دارد. افزایش تولید، مصرف و تبادل جهانی کالاها موجب شده تا میزان تولید پساب صنعتی و تنوع آلاینده‌های موجود در آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یابد (Raper et al., 2018) که این موضوع ضرورت ارتقا و بهینه‌سازی روش‌های تصفیه بیولوژیکی برای انواع پساب‌های صنعتی را دوچندان کرده است (Fadaei Tehrani and Jamshidipour, 2024).

در حال حاضر، فاضلاب صنعتی تصفیه شده به‌طور معمول در اکثر شهرک‌های صنعتی ایران به محیط زیست تخلیه می‌شود، در حالی که این پساب‌ها قابلیت احیاء و استفاده مجدد برای تولید آب در فرایندهای صنعتی را دارند و برای رسیدن به قابلیت استفاده مجدد، نیاز به تصفیه بیشتری وجود دارد.

فرایندهای جداسازی غشایی امروزه در تصفیه و احیای فاضلاب به‌طور فزاینده‌ای رواج یافته‌اند. بیوراکتور غشایی^۱، به‌عنوان یکی از این فناوری‌ها، به‌طور گسترده‌ای بررسی و استفاده شده و در مقیاس کامل در تصفیه فاضلاب به کار گرفته می‌شود (Comerton et al., 2005). این فناوری به‌عنوان یک راهکار مؤثر در احیاء و استفاده مجدد از آب در میان روش‌های مختلف مطرح است (Hoinkis et al., 2012, Falahati Marvast and Karimi, 2023).

¹ Membrane Bioreactor (MBR)

دو نوع پیکربندی برای بیوراکتورهای غشایی وجود دارد: MBR جریان جانبی و MBR غوطه‌ور. در نوع جریان جانبی، مایع مخلوط از مخزن هوادهی به ماژول غشایی پمپ می‌شود، در حالی که در MBR غوطه‌ور، ماژول غشایی به‌طور مستقیم در مخزن هوادهی غوطه‌ور می‌شود. MBR غوطه‌ور نسبت به پیکربندی‌های جریان جانبی به توان کمتری نیاز دارند، اما رسوب غشایی و کاهش جریان نفوذی، مانع اصلی استفاده گسترده از این تکنیک است. عوامل زیادی باعث گرفتگی غشا می‌شوند که شامل جنس ماژول غشایی، اختلاف فشار در دو طرف غشاء هنگام فیلتراسیون، سرعت جریان متقاطع، زمان ماند هیدرولیکی^۲، زمان ماند لجن^۳، فرایندهای پلیمریزاسیون و حل شدن میکروبی و اختلاط هستند (Xie et al., 2010).

هنگامی که گرفتگی غشاء رخ می‌دهد، این مشکل باعث کاهش جریان نفوذپذیر، افزایش فشار ورودی، کاهش بهره‌وری، افزایش زمان از کارافتادگی سیستم، افزایش هزینه‌های نگهداری و عملیاتی به دلیل نیاز به شست‌وشوی غشاء و کاهش عمر مفید ماژول‌های غشایی می‌شود (Zhang et al., 2006).

با وجود مزایای MBR، یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از این سامانه‌ها، گرفتگی غشاء و اثر آن بر پایداری عملکرد و هزینه‌های بهره‌برداری است (Besha et al., 2017, Iorhemen et al., 2016). از سوی دیگر، عملکرد MBR در پساب‌های صنعتی می‌تواند به کیفیت خوراک و سهم ترکیبات مقاوم و محلول بستگی داشته باشد؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد این فناوری بر روی پساب واقعی و در شرایط عملیاتی مشخص، برای تصمیم‌گیری در خصوص امکان استفاده مجدد ضروری است.

مطالعات مروری اخیر نیز نشان می‌دهد که عملکرد سامانه‌های MBR تنها به نوع غشاء وابسته نیست، بلکه مجموعه‌ای از عوامل طراحی و بهره‌برداری مانند ویژگی‌های سطحی غشاء، شار عبوری، زمان ماند، شرایط شیمیایی و زیستی راکتور، کیفیت خوراک و شدت گرفتگی غشاء بر کارایی نهایی فرایند اثرگذار هستند (Rahman et al., 2023)؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد MBR در پساب‌های صنعتی باید بر پایه داده‌های واقعی و تحلیل هم‌زمان شاخص‌های کیفی مختلف انجام شود.

² Hydraulic Retention Time (HRT)

³ Sludge Retention Time (SRT)



تصادفی، می‌تواند به‌طور مؤثری گرفتگی غشاء را در سیستم‌های MBR پیش‌بینی کرده و به بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی کمک کند که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش عمر مفید سیستم می‌شود (Niu et al., 2023).

۲- مواد و روش‌ها (روش پژوهش)

۲-۱- ویژگی‌های پساب

در این پژوهش، از پساب واقعی به‌عنوان منبع ورودی برای پایلوت MBR استفاده شد تا عملکرد سیستم در شرایط واقعی فاضلاب صنعتی ارزیابی شود. نمونه‌های پساب از خروجی فیلترهای شنی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی شکوهیه برداشت شد. این پساب به‌طور معمول بار آلودگی قابل توجهی داشته و شامل مواد آلی، ترکیبات مغذی و جامدات معلق است که در صورت عدم تصفیه مناسب می‌تواند اثرات منفی بر محیط‌زیست و سلامت انسان داشته باشد.

به‌منظور حفظ کیفیت نمونه‌ها و جلوگیری از تغییر در ترکیبات آن‌ها، نمونه‌برداری در ظروف پلاستیکی غیر واکنشی با حجم مناسب انجام شد و بلافاصله تحت شرایط کنترل شده دمایی به آزمایشگاهی که سامانه پایلوت در آن مستقر بود، منتقل شد. پس از انتقال، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن استفاده شدند تا از تغییرات احتمالی فیزیکی و شیمیایی جلوگیری شود.

ویژگی‌های کیفی پساب ورودی و خروجی سامانه بر اساس پارامترهای pH، TSS، COD و TDS بررسی شد. انتخاب این پارامترها با هدف ارزیابی هم‌زمان تغییرات اسیدیته، حذف جامدات معلق، کاهش بار آلی و بررسی محدودیت سامانه در کاهش املاح محلول انجام شد. مقدار حداقل، حداکثر و میانگین این شاخص‌ها برای جریان ورودی و خروجی به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

بازبینی داده‌های pH نشان داد که مقدار pH در جریان ورودی و خروجی سامانه در محدوده نزدیک به خنثی باقی مانده و میانگین و دامنه تغییرات آن در جدول‌های ۱ و ۲ مشابه بوده است. این پایداری می‌تواند به ظرفیت بافری^۵ پساب صنعتی و محدود بودن تغییرات اسیدی-قلیایی در شرایط بهره‌برداری این پژوهش مربوط

با وجود مطالعات انجام شده درباره کاربرد MBR در تصفیه پیشرفته پساب‌های شهری و صنعتی، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین به‌طور معمول بر حذف آلاینده‌های خاص، کاهش شاخص‌های آلی، کنترل گرفتگی غشاء یا استفاده از MBR به‌عنوان پیش تصفیه فرایندهای غشایی فشار بالا مانند اسمز معکوس متمرکز بوده‌اند. با این حال، ارزیابی قابلیت استفاده مجدد از پساب صنعتی تنها با گزارش کارایی حذف یک یا دو شاخص کیفی کامل نمی‌شود؛ زیرا کیفیت نهایی پساب برای استفاده مجدد به رفتار هم‌زمان شاخص‌های ذره‌ای، آلی و محلول وابسته است. در این میان، حذف بالای جامدات معلق کل^۱ و کاهش اکسیژن موردنیاز شیمیایی^۲ می‌تواند نشان‌دهنده بهبود قابل توجه کیفیت پساب باشد، اما باقی ماندن جامدات محلول کل^۳ و املاح محلول ممکن است کاربرد پساب تصفیه شده را در برخی مصارف صنعتی یا حساس به شوری محدود کند؛ بنابراین، تحلیل هم‌زمان TSS، COD و TDS برای تعیین مرز کارایی MBR و تشخیص نیاز احتمالی به فرایندهای تکمیلی ضروری است.

بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد یک سامانه MBR در مقیاس آزمایشگاهی برای ارتقای کیفیت پساب واقعی خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی شکوهیه با رویکرد استفاده مجدد بود. در این پژوهش، عملکرد سامانه طی دوره بهره‌برداری ۳۵ روزه بر پایه تغییرات سه شاخص کلیدی TSS، COD و TDS در جریان ورودی و خروجی بررسی شد. تمرکز اصلی پژوهش، صرفاً تعیین درصد حذف آلاینده‌ها نبود، بلکه تحلیل هم‌زمان توان سامانه در حذف جامدات معلق، کاهش بار آلی و شناسایی محدودیت آن در کاهش املاح محلول بود. این رویکرد امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از قابلیت MBR مجهز به غشای اولترافیلتراسیون^۴ برای استفاده مجدد از پساب صنعتی و تعیین نیاز احتمالی به فرایندهای تکمیلی مانند نانو فیلتراسیون یا اسمز معکوس فراهم می‌کند.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های

¹ Total Suspended Solids (TSS)

² Chemical Oxygen Demand (COD)

³ Total Dissolved Solids (TDS)

⁴ Ultrafiltration (UF)

⁵ Buffering Capacity



جدول ۱- مشخصات کیفی پساب ورودی به سامانه MBR

Table 1. Qualitative characteristics of the influent to the MBR system

Typical characteristics of input				
Parameter	Unit	Ave.	Min.	Max.
pH	-	7.4	6.6	8.3
TSS	mg/L	99	82	121
COD	mg/L	321	302	347
TDS	mg/L	1134	876	1443

جدول ۲- مشخصات کیفی پساب خروجی از سامانه MBR

Table 2. Qualitative characteristics of the effluent from the MBR system

Typical characteristics of output				
Parameter	Unit	Ave.	Min.	Max.
pH	-	7.4	6.6	8.3
TSS	mg/L	2	1	4
COD	mg/L	68	52	87
TDS	mg/L	960	710	1312

غشاء مطابق جدول ۳ ارائه شده است.

باشد؛ بنابراین، کاهش COD و TSS در این پژوهش الزاماً با تغییر محسوس pH همراه نبوده است.

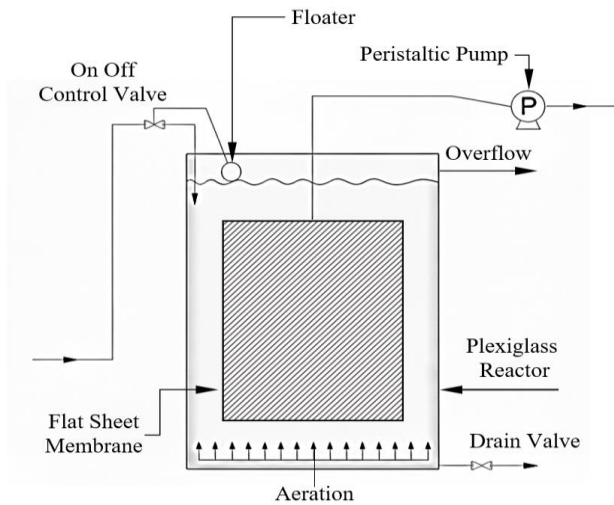


Fig. 1. Schematic diagram of the MBR process used in the present study

شکل ۱- شماتیک فرایند MBR استفاده شده در این پژوهش

۲-۳- شرایط آزمایش و تجزیه و تحلیل

پایلوت مجهز به تجهیزات لازم برای بهره‌برداری و پایش شرایط عملکردی بود و هوادهی به‌منظور حفظ شرایط هوازی و اختلاط درون راکتور انجام شد. به‌منظور کنترل شرایط فرایند و پایش وضعیت سامانه، اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی در طول دوره

۲-۲- راه‌اندازی راکتور و مشخصات سامانه MBR

در این پژوهش، عملیات مداوم یک سیستم MBR اولترافیلتراسیون در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور ارتقای کیفیت پساب صنعتی انجام شد. خوراک سیستم از پساب واقعی خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی شکوهیه (استان قم) تأمین شد. نمای کلی پایلوت و اجزای اصلی آن در شکل ۱ ارائه شده است. در طول دوره بهره‌برداری، نمونه‌برداری از جریان ورودی و خروجی در بازه‌های زمانی مشخص انجام شد تا تغییرات پارامترهای کیفی بررسی شود.

بیوراکتور از پلکسی‌گلاس با حجم مفید ۳۲ لیتر ساخته شد و جریان خوراک با دبی ۴ لیتر بر ساعت به‌صورت پیوسته وارد سیستم شد. با توجه به حجم مفید راکتور و دبی خوراک، HRT از رابطه $HRT = V/Q$ محاسبه شد و برابر با حدود ۸ ساعت به‌دست آمد. برای جداسازی جامدات و تولید پساب تصفیه شده، از غشای اولترافیلتراسیون تخت با حد برش ۱۵۰ kDa و اندازه منفذ $0.4 \mu m$ استفاده شد و جریان خروجی پس از عبور از غشاء به‌عنوان پساب تصفیه شده جمع‌آوری شد. مشخصات فنی

جدول ۳- مشخصات فنی غشای اولترافیلتراسیون استفاده شده در سامانه MBR

Table 3. Technical specifications of the ultrafiltration membrane used in the MBR system

Specification of membrane		
Process parameters	Unit	Value
Membrane configuration	-	Flatsheet
Cut off	kDalton	150
Pore size	μm	0.04
Dimensions (Width × Height)	mm	240×200
Effective surface area	m ²	0.048
Material	-	EPS
Membrane charge	-	Neutral
pH resistance range	-	4-11

۳- نتایج و بحث

۳-۱- حذف مواد جامد معلق

پیش از شروع آزمایش‌های اصلی، در مرحله راه‌اندازی^۱، ماژول MBR به مدت مشخصی تحت بهره‌برداری قرار گرفت تا سیستم به شرایط پایدار عملیاتی^۲ برسد. در این مرحله، رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها در محیط بیولوژیکی راکتور انجام شد تا جمعیت میکروبی به اندازه کافی برای تجزیه مؤثر آلاینده‌ها برسد. در طی این مدت، مقدار مواد جامد معلق در مایع مخلوط^۳ به‌عنوان شاخصی از غلظت لجن فعال، به‌طور مستمر اندازه‌گیری شد. در برخی مقاطع، افزایش قابل توجه غلظت MLSS مشاهده شد، به‌طوری‌که مقدار آن تا حدود ۳۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافت. این افزایش به دلیل رشد بیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها در پاسخ به مواد آلی موجود در پساب ورودی بود. پس از رسیدن به این سطح، عملیات تخلیه لجن اضافی آغاز شد تا تعادل بیولوژیکی حفظ شود و مقدار MLSS در سطح بهینه باقی بماند. در طول ۳۵ روز بهره‌برداری پایدار از سیستم، عملکرد MBR بر اساس کیفیت آب ورودی و پساب خروجی و با تحلیل پارامترهای مهمی مانند TDS، TSS و COD ارزیابی شد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، سامانه MBR مورد بررسی، عملکرد بسیار مطلوبی در حذف مواد جامد معلق نشان داد؛ به‌طوری‌که میانگین TSS از ۹۹ میلی‌گرم در لیتر در جریان ورودی به حدود ۲ میلی‌گرم در لیتر در جریان خروجی کاهش یافت و

بهره‌برداری انجام شد. همچنین برای جلوگیری از افزایش بیش‌از‌حد غلظت جامدات در راکتور، برداشت مخلوط لجن طبق برنامه بهره‌برداری سیستم انجام شد؛ با این حال، اطلاعات کمی مربوط به نرخ/حجم برداشت به‌صورت عددی در این پژوهش گزارش نشد و بنابراین محاسبه عددی SRT در نتایج ارائه نشد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه، نمونه‌های پساب ورودی و خروجی در طول دوره بهره‌برداری برداشت و پارامترهای pH، TSS، COD و TDS اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری pH بر اساس روش الکترومتری مطابق Standard Methods 4500-H⁺ B انجام شد. TSS و TDS به ترتیب بر اساس روش‌های وزنی Standard Methods 2540D و 2540C اندازه‌گیری شدند. همچنین COD با استفاده از روش رفلکس بسته رنگ‌سنجی مطابق Standard Methods 5220D تعیین شد. کارایی حذف یا کاهش هر پارامتر با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Federation and Association, 2005).

$$\text{درصد حذف} = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن

C_{in} غلظت آلاینده در جریان ورودی به راکتور (میلی‌گرم در لیتر) و C_{out} غلظت آلاینده در پساب خروجی از سیستم است.

¹ Start-up Phase

² Steady-State Condition

³ Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)

باقیمانده ممکن است شامل ترکیبات محلول مقاوم‌تر، ترکیبات آلی با قابلیت زیست‌تخریب پذیری پایین‌تر یا فرآورده‌های میکروبی محلول باشد. از آنجاکه در پژوهش حاضر آنالیزهایی مانند COD محلول، TOC یا شناسایی ترکیبات آلی خاص انجام نشده است، ماهیت COD باقیمانده تنها به صورت احتمالی و در چارچوب داده‌های اندازه‌گیری شده تفسیر می‌شود (Tchobanoglous et al., 2003).

COD یکی از شاخص‌های اصلی برای ارزیابی بار آلی پساب است و کاهش آن در سامانه‌های MBR حاصل برهم‌کنش فرایندهای زیستی و جداسازی غشایی است. در این سامانه‌ها، بخش زیست‌تخریب‌پذیر مواد آلی عمدتاً توسط میکروارگانیسم‌های موجود در راکتور مصرف می‌شود و غشاء نیز با جداسازی لخته‌های زیستی، ذرات معلق و بخشی از ترکیبات کلوئیدی، به کاهش COD خروجی کمک می‌کند. با این حال، ماهیت COD باقیمانده در خروجی بدون انجام آنالیزهای تکمیلی مانند تفکیک COD محلول و ذره‌ای، اندازه‌گیری TOC یا شناسایی ترکیبات آلی خاص، نباید به صورت قطعی به یک گروه مشخص از ترکیبات نسبت داده شود؛ بنابراین، در این پژوهش، تفسیر COD باقیمانده با احتیاط و در چارچوب داده‌های اندازه‌گیری شده انجام شد.

مطابق شکل ۳، میانگین COD از ۳۲۱ میلی‌گرم در لیتر در جریان ورودی به ۶۸ میلی‌گرم در لیتر در جریان خروجی کاهش یافت و کارایی حذف آن حدود ۷۹ درصد بود. این مقدار نشان می‌دهد که سامانه MBR توانسته است بخش قابل توجهی از بار آلی پساب صنعتی را کاهش دهد. از نظر فرایندی، این کاهش می‌تواند ناشی از تجزیه زیستی مواد آلی قابل تجزیه، به دام افتادن بخشی از مواد آلی ذره‌ای و کلوئیدی در لخته‌های زیستی و جلوگیری از عبور بخشی از ترکیبات آلی با اندازه بزرگتر توسط غشاء باشد.

مقایسه این نتیجه با پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که کارایی حذف COD در سامانه‌های MBR می‌تواند دامنه نسبتاً وسیعی داشته باشد. برای نمونه، در پژوهش حاضر کارایی حذف COD حدود ۷۹ درصد به دست آمد که از مقدار گزارش شده در برخی مطالعات پایلوت MBR برای پساب صنعتی قابل مقایسه است، اما نسبت به برخی گزارش‌های جدیدتر پایین‌تر است (Alotaibi et al., 2024). در بررسی عملکرد MBR برای تصفیه پساب صنعتی

کارایی حذف آن حدود ۹۸ درصد به دست آمد. این سطح از حذف با ماهیت عملکردی بیوراکتورهای غشایی سازگار است؛ زیرا در این سامانه‌ها، جداسازی جامدات تنها به ته‌نشینی لخته‌های زیستی وابسته نیست، بلکه غشای اولترافیلتراسیون به عنوان یک مانع فیزیکی مؤثر، از عبور ذرات معلق، لخته‌های زیستی و بخش عمده زیست‌توده به جریان خروجی جلوگیری می‌کند؛ بنابراین، حتی در شرایطی که ویژگی‌های ته‌نشینی لجن دچار نوسان باشد، کیفیت پساب خروجی از نظر جامدات معلق می‌تواند در سطح مطلوب باقی بماند.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که کارایی حذف TSS در سامانه‌های MBR معمولاً در محدوده بسیار زیاد گزارش می‌شود. برای مثال، در پژوهش حسین‌زاده و همکاران، حذف مواد معلق در یک پایلوت MBR برای پساب صنعتی بیش از ۹۹ درصد گزارش شده است (Hosseinzadeh et al., 2016). نزدیک بودن کارایی حذف TSS در پژوهش حاضر به مقدار گزارش شده در مطالعات مشابه نشان می‌دهد که غشای مورد استفاده از نظر جداسازی فیزیکی جامدات عملکرد قابل قبولی داشته است. اختلاف محدود میان کارایی این پژوهش و برخی گزارش‌های قبلی می‌تواند به تفاوت در کیفیت خوراک، غلظت اولیه TSS، شرایط بهره‌برداری، وضعیت غشاء و ویژگی‌های لجن فعال مربوط باشد.

از منظر استفاده مجدد، کاهش TSS اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا جامدات معلق می‌توانند موجب افزایش کدورت، کاهش کیفیت ظاهری پساب و افزایش احتمال گرفتگی در تجهیزات پایین دست شوند. با این حال، حذف قابل توجه TSS نباید به معنای حذف هم‌زمان همه آلاینده‌های محلول تفسیر شود. در واقع، عملکرد بسیار خوب سامانه در حذف TSS عمدتاً ناشی از جداسازی فیزیکی ذرات است، در حالی که حذف COD محلول و کاهش TDS به ماهیت شیمیایی ترکیبات و توان فرایند زیستی یا غشایی در حذف آن‌ها وابسته است؛ بنابراین، برای ارزیابی قابلیت استفاده مجدد، نتایج TSS باید در کنار COD و TDS تحلیل شود، نه به صورت مستقل.

۳-۲- حذف مواد آلی

در سامانه‌های MBR، کاهش COD حاصل برهم‌کنش فرایندهای زیستی و جداسازی غشایی است. با این حال، بخشی از COD می‌تواند پس از تصفیه در جریان خروجی باقی بماند. این بخش

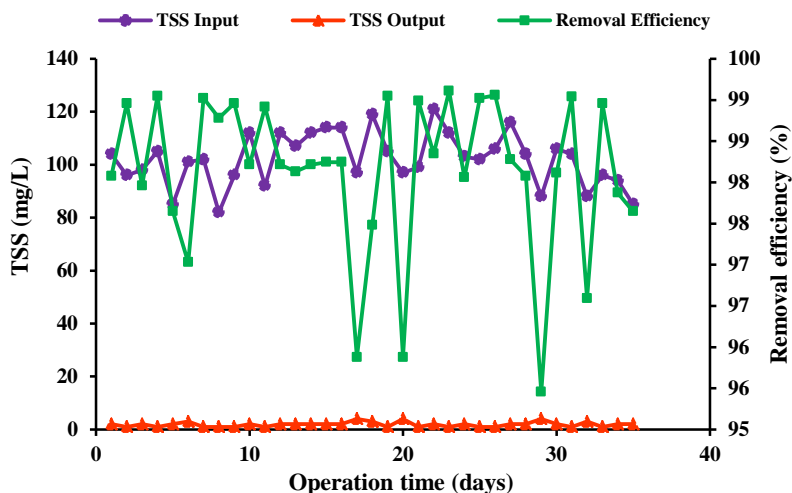


Fig. 2. Variations of TSS in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period

شکل ۲ - تغییرات TSS در ورودی سامانه MBR (پساب ورودی) و خروجی سامانه MBR (پساب تصفیه شده) و درصد حذف آن در طول دوره بهره‌برداری

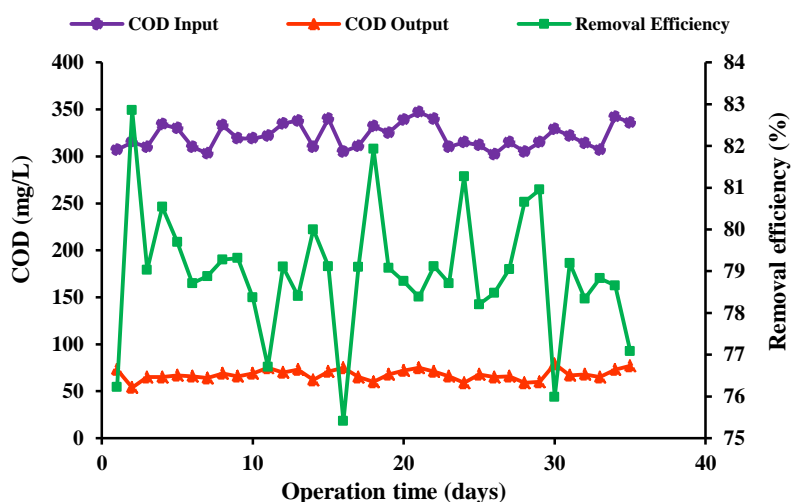


Fig. 3. Variations of COD in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period

شکل ۳ - تغییرات COD در ورودی سامانه MBR (پساب ورودی) و خروجی سامانه MBR (پساب تصفیه شده) و درصد حذف آن در طول دوره بهره‌برداری

پساب، بارگذاری آلی، زمان ماند، غلظت زیست توده و شرایط عملیاتی تحلیلی کرد.

یکی از دلایل احتمالی تفاوت کارایی COD در این پژوهش با برخی گزارش‌های قبلی، ماهیت پساب ورودی به پایلوت است. در این پژوهش، خوراک MBR از خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه صنعتی برداشت شده است؛ بنابراین بخشی از مواد آلی ساده‌تر و

شور، کارایی حذف COD بیشتری گزارش کردند؛ با این حال، نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش بار آلی ورودی و تغییر شرایط بهره‌برداری می‌تواند موجب افزایش COD باقیمانده در خروجی و تأثیر بر پایداری عملکرد سامانه شود؛ بنابراین، اختلاف کارایی حذف COD میان پژوهش‌های مختلف را نمی‌توان صرفاً به کارایی یا ناکارایی MBR نسبت داد، بلکه باید آن را در ارتباط با ماهیت

و املاح محلول ندارند؛ بنابراین، کاهش محدود TDS در این پژوهش نباید به‌عنوان ضعف عملکرد سامانه تلقی شود، بلکه نشان‌دهنده محدودیت ذاتی فرایند UF-MBR در حذف ترکیبات محلول معدنی است.

این نتیجه با گزارش‌های جدید درباره سامانه‌های MBR تلفیقی نیز هم‌خوان است. کیم و همکاران نشان دادند که اگرچه MBR می‌تواند نقش مؤثری در تولید پساب باکیفیت مناسب برای بازچرخانی داشته باشد، اما در مواردی که کاهش ترکیبات محلول و املاح معدنی هدف باشد، ترکیب MBR با فرایندهای تکمیلی و فناوری‌های غشایی پیشرفته‌تر ضرورت پیدا می‌کند (Kim et al., 2024). بر این اساس، کاهش محدود TDS در پژوهش حاضر با ماهیت غشای اولترافیلتراسیون سازگار است و نشان می‌دهد که MBR به‌تنهایی برای کاربردهای حساس به شوری کافی نیست.

عزیز و کسونگو نیز در یک پژوهش پایلوت بر روی پساب خروجی MBR نشان دادند که فرایندهای غشایی تکمیلی مانند NF و به‌ویژه RO می‌توانند برای کاهش ترکیبات معدنی و بهبود کیفیت پساب در کاربردهای استفاده مجدد مؤثر باشند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که انتخاب فرایند تکمیلی باید بر اساس الزامات کیفی مصرف نهایی انجام شود (Aziz and Kasongo, 2021)؛ بنابراین، پیشنهاد استفاده از نانوفیلتراسیون یا اسمز معکوس پس از MBR در پژوهش حاضر، به‌ویژه برای کاربردهای حساس به TDS، از نظر مطالعات مشابه نیز قابل دفاع است.

مقایسه رفتار TDS با TSS و COD نشان می‌دهد که عملکرد سامانه MBR نسبت به نوع آلاینده کاملاً متفاوت است. درحالی‌که حذف TSS به دلیل جداسازی فیزیکی ذرات بسیار بالا بود و COD نیز به‌واسطه ترکیب فرایندهای زیستی و غشایی کاهش قابل توجهی نشان داد، کاهش TDS محدود باقی ماند. این تفاوت نشان می‌دهد که ارزیابی قابلیت استفاده مجدد پساب نباید تنها بر اساس حذف TSS و COD انجام شود؛ زیرا در برخی کاربردهای صنعتی، شوری و املاح محلول می‌توانند عامل محدودکننده اصلی باشند.

از منظر استفاده مجدد، این نتیجه اهمیت کاربردی زیادی دارد. برای مصارفی که حساسیت کمتری نسبت به شوری دارند، کاهش TSS و COD می‌تواند کیفیت پساب را تا حد قابل قبولی بهبود دهد؛ اما برای کاربردهایی مانند برج‌های خنک‌کننده، برخی فرایندهای صنعتی حساس، یا مواردی که تجمع املاح مشکل‌ساز

زیست‌تخریب‌پذیر احتمالاً در مراحل پیشین تصفیه کاهش یافته و COD باقیمانده در ورودی MBR می‌تواند سهم بیشتری از ترکیبات محلول یا مقاوم‌تر داشته باشد. در چنین شرایطی، انتظار حذف کامل COD واقع‌بینانه نیست و باقی ماندن بخشی از COD در خروجی می‌تواند ناشی از حضور ترکیبات آلی با قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری کمتر باشد.

علاوه بر ماهیت خوراک، شرایط بهره‌برداری نیز در حذف COD مؤثر است. HRT، غلظت MLSS، زمان ماند جامدات، بارگذاری آلی و پایداری شرایط هوازی می‌توانند فرصت تماس میکروبی با ترکیبات آلی و در نتیجه کارایی حذف COD را تحت تأثیر قرار دهند. در این پژوهش، HRT حدود ۸ ساعت بود؛ اما به دلیل نبود داده کمی کافی درباره SRT و شاخص‌های دقیق‌تر بهره‌برداری، تفکیک سهم هر یک از عوامل عملیاتی در حذف COD امکان‌پذیر نبود؛ بنابراین، این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در تفسیر نتایج COD در نظر گرفته شد.

در مجموع، نتایج COD نشان می‌دهد که سامانه موردبررسی، علاوه بر حذف مؤثر جامدات معلق، توانایی مناسبی در کاهش بار آلی پساب صنعتی داشته است. با این حال، باقی ماندن بخشی از COD در خروجی نشان می‌دهد که برای دستیابی به کیفیت بالاتر، به‌ویژه در کاربردهای حساس‌تر استفاده مجدد، ممکن است کنترل دقیق‌تر شرایط بهره‌برداری یا استفاده از فرایندهای تکمیلی پس از MBR ضروری باشد.

همچنین، مقایسه با پژوهش حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh et al., 2016) نشان می‌دهد که کارایی حذف COD در پژوهش حاضر در محدوده قابل‌مقایسه با پایلوت‌های مشابه MBR بر روی پساب صنعتی قرار دارد، هرچند تفاوت در کیفیت خوراک و شرایط بهره‌برداری می‌تواند بر مقدار گزارش شده اثرگذار باشد.

۳-۳- تغییرات TDS و پیامدهای استفاده مجدد

مطابق شکل ۴، کاهش TDS در این پژوهش محدود بوده و حدود ۱۵ درصد مشاهده شد. این نتیجه از نظر فرایندی قابل‌انتظار است؛ زیرا غشاهای اولترافیلتراسیون عمدتاً برای جداسازی ذرات معلق، کلوئیدها، میکروارگانیسم‌ها و بخشی از ترکیبات آلی با وزن مولکولی بالاتر طراحی شده‌اند و توان قابل‌توجهی در حذف یون‌ها



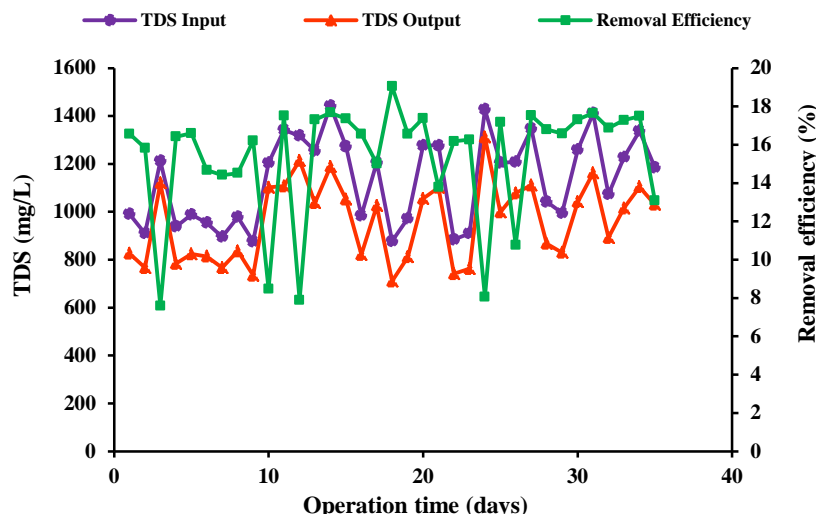


Fig. 4. Variations of TDS in the MBR influent (raw wastewater) and MBR effluent (treated wastewater), and its removal efficiency during the operation period

شکل ۴ - تغییرات TDS در ورودی سامانه MBR (پساب ورودی) و خروجی سامانه MBR (پساب تصفیه شده) و درصد حذف آن در طول دوره بهره‌برداری

در مطالعات اخیر نیز تأکید شده است. برای نمونه، (Alotaibi et al., 2024) نشان دادند که تغییرات بار آلی و شرایط بهره‌برداری در سامانه MBR می‌تواند بر روند افزایش فشار ترانس‌ممبران و شدت گرفتگی غشاء اثرگذار باشد؛ بنابراین، نبود داده‌های کمی فشار ترانس‌ممبران و Flux در پژوهش حاضر، تحلیل ارتباط میان کیفیت خوراک، شرایط عملیاتی و پایداری عملکرد غشاء را محدود می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، پایش هم‌زمان کیفیت پساب و شاخص‌های فولینگ برای ارزیابی جامع‌تر پایداری عملکرد سامانه در دوره‌های بهره‌برداری طولانی‌تر انجام شود.

جمع‌بندی نتایج سه شاخص اصلی نشان می‌دهد که عملکرد سامانه MBR در این پژوهش، انتخابی و وابسته به ماهیت آلاینده بوده است. حذف بسیار قابل توجه TSS عمدتاً ناشی از نقش فیزیکی غشاء در جداسازی ذرات و لخته‌های زیستی بود، کاهش COD نتیجه هم‌زمان تجزیه زیستی و جداسازی بخشی از ترکیبات آلی ذره‌ای و کلوئیدی محسوب می‌شود، اما کاهش محدود TDS نشان داد که املاح محلول از محدوده عملکرد مؤثر غشای اولترافیلتراسیون خارج هستند؛ بنابراین، کاربرد MBR برای استفاده مجدد از پساب صنعتی باید بر اساس نیاز کیفی مصرف نهایی تعریف شود. در کاربردهایی که کاهش جامدات معلق و بار آلی هدف اصلی است، سامانه موردبررسی می‌تواند عملکرد مناسبی

است، MBR به‌تنهایی کافی نخواهد بود. در چنین شرایطی، استفاده از MBR می‌تواند به‌عنوان مرحله تصفیه پیشرفته و پیش‌تصفیه مؤثر برای کاهش جامدات معلق و بار آلی مطرح شود، اما برای کاهش قابل توجه TDS باید از فرایندهای تکمیلی مانند نانوفیلتراسیون یا اسمز معکوس استفاده شود.

۳-۴- گرفتگی غشاء و ملاحظات بهره‌برداری

یکی از چالش‌های اصلی در سامانه‌های MBR، گرفتگی^۱ غشاء و پیامدهای آن بر پایداری شاره، نیاز به شست‌وشو و پایداری عملکرد است. با توجه به حذف زیاد TSS و کاهش قابل توجه COD در این پژوهش، بررسی شاخص‌های فولینگ می‌توانست درک کامل‌تری از پایداری عملکرد سامانه فراهم کند. با این حال، در این پژوهش شاخص‌های کمی مرتبط با فولینگ مانند افت فشار ترانس‌ممبران^۲ یا تغییرات شار عبوری^۳ به‌صورت عددی گزارش نشد؛ از این رو امکان تحلیل روند فولینگ در طول ۳۵ روز فراهم نبود و این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در بخش نتیجه‌گیری بیان می‌شود. اهمیت پایش شاخص‌های فولینگ

¹ Fouling

² Transmembrane Pressure (TMP)

³ Flux



آن‌ها کاهش TSS و COD است گزینه‌ای مناسب باشد، اما برای مصارف حساس به شوری یا مواردی که کاهش جدی املاح محلول ضروری است، استفاده از فرایندهای تکمیلی مانند نانوفیلتراسیون یا اسمز معکوس پس از MBR پیشنهاد می‌شود.

دامنه این پژوهش به بررسی pH، TSS، COD و TDS محدود بود و پارامترهایی مانند BOD، فلزات سنگین، COD محلول، ترکیبات آلی خاص و شاخص‌های دقیق‌تر قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری در چارچوب داده‌های گزارش شده این پژوهش قرار نداشتند. همچنین، شاخص‌های کمی مرتبط با گرفتگی غشاء، از جمله افت فشار ترانس‌ممبران و تغییرات شار عبوری، به صورت عددی پایش و گزارش نشدند؛ بنابراین امکان تحلیل دقیق روند فولینگ و ارتباط آن با تغییرات کیفیت پساب در طول دوره بهره‌برداری فراهم نبود. افزون بر این، با وجود محاسبه HRT بر اساس حجم راکتور و دبی خوراک، اطلاعات کمی کافی برای محاسبه و تحلیل عددی SRT ارائه نشد.

بر اساس نتایج این پژوهش، MBR مجهز به غشای اولترافیلتراسیون می‌تواند به عنوان یک گزینه تصفیه پیشرفته برای بهبود کیفیت پساب صنعتی واقعی، به ویژه از نظر حذف جامدات معلق و کاهش بار آلی، مورد توجه قرار گیرد. با این حال، تصمیم‌گیری درباره استفاده مجدد از پساب خروجی باید بر اساس الزامات کیفی مصرف نهایی انجام شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، بهره‌برداری در دوره‌های زمانی طولانی‌تر، همراه با پایش هم‌زمان کیفیت پساب، COD، SRT، Flux، TMP، محلول، BOD و در صورت نیاز فلزات سنگین انجام شود تا ارزیابی جامع‌تری از پایداری عملکرد، گرفتگی غشاء و قابلیت استفاده مجدد پساب صنعتی فراهم شود.

۴-۴-۴-۴ قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مدیریت شهرک صنعتی شکوهیه برای در اختیار گذاشتن پساب و آزمایشگاه محیط زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، برای استفاده از خدمات آزمایشگاهی قدردانی کنند.

داشته باشد؛ اما در کاربردهای حساس به شوری، استفاده از فرایندهای غشایی تکمیلی ضروری خواهد بود.

۴-۴-۴-۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه MBR در مقیاس آزمایشگاهی برای ارتقای کیفیت پساب واقعی خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی شکوهیه و ارزیابی ظرفیت آن برای استفاده مجدد بررسی شد. نتایج نشان داد که سامانه مورد بررسی در حذف جامدات معلق عملکرد بسیار مطلوبی داشته است؛ به طوری که میانگین TSS از ۹۹ میلی‌گرم در لیتر در ورودی به حدود ۲ میلی‌گرم در لیتر در خروجی کاهش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که غشای اولترافیلتراسیون، به عنوان مانع فیزیکی مؤثر، نقش اصلی را در جداسازی ذرات معلق و لخته‌های زیستی ایفا کرده و می‌تواند کیفیت ظاهری و پایداری پساب خروجی را برای برخی کاربردهای استفاده مجدد بهبود دهد.

از نظر کاهش بار آلی، میانگین COD از ۳۲۱ به ۶۸ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافت که معادل کارایی حذف حدود ۷۹ درصد بود. این مقدار بیانگر توان مناسب سامانه MBR در کاهش بخش قابل توجهی از بار آلی پساب صنعتی است. با این حال، باقی ماندن بخشی از COD در خروجی نشان می‌دهد که ماهیت ترکیبات آلی ورودی، سهم مواد محلول یا مقاوم‌تر و شرایط بهره‌برداری مانند HRT، SRT و غلظت زیست‌توده می‌توانند بر عملکرد نهایی سامانه اثرگذار باشند؛ بنابراین، ارزیابی COD در چنین سامانه‌هایی باید تنها بر اساس درصد حذف انجام نشود، بلکه ماهیت پساب ورودی و محدودیت‌های فرایند نیز در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد.

در مقابل، کاهش TDS محدود و حدود ۱۵ درصد بود. این نتیجه با ماهیت غشای اولترافیلتراسیون سازگار است، زیرا اولترافیلتراسیون اساساً برای حذف ذرات معلق، کلوئیدها و بخشی از ترکیبات آلی با وزن مولکولی بیشتر، کارایی دارد و توان قابل توجهی در حذف یون‌ها و املاح محلول ندارد. از این رو، کاهش محدود TDS را نباید به عنوان ضعف عملکرد سامانه تلقی کرد، بلکه باید آن را مرز عملکرد ذاتی فرایند UF-MBR دانست. بر این اساس، سامانه MBR می‌تواند برای کاربردهایی که هدف اصلی

References

- Alotaibi, M., Refaat, A., Munshi, F., El-Said, M. A. and El-Shafai, S. A., 2024. Influence of organic loading rates on the treatment performance of membrane bioreactors treating saline industrial wastewater. *Water*, 16(18), 2629. <https://doi.org/10.3390/w16182629>.
- APHA, AWWA and WEF., 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21st ed.). American Public Health Association. 1288 pages. [Link]
- Aziz, M., Kasongo, G., 2021. The removal of selected inorganics from municipal membrane bioreactor wastewater using UF/NF/RO membranes for water reuse application: a pilot-scale study. *Membranes*, 11(2), 117. <https://doi.org/10.3390/membranes11020117>.
- Besha, A. T., Gebreyohannes, A. Y., Tufa, R. A., Bekele, D. N., Curcio, E. and Giorno, L., 2017. Removal of emerging micropollutants by activated sludge process and membrane bioreactors and the effects of micropollutants on membrane fouling: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2395-2414. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.027>.
- Bolzonella, D., Fatone, F., Di Fabio, S. and Cecchi, F., 2010. Application of membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse in the Mediterranean region: focusing on removal efficiency of non-conventional pollutants. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2424-2431. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.024>.
- Brown, J. A., 2012. The early history of wastewater treatment and disinfection. In *Impacts of Global Climate Change: Proceedings of the 2012 World Water and Environmental Resources Congress*. American Society of Civil Engineers (ASCE). NY, USA. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)288](https://doi.org/10.1061/40792(173)288).
- Comerton, A. M., Andrews, R. C. and Bagley, D. M., 2005. Evaluation of an MBR-RO system to produce high quality reuse water: microbial control, DBP formation and nitrate. *Water Research*, 39(16), 3982-3990. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.014>.
- Fadaei Tehrani, M. R. and Jamshidipour, P., 2024. Optimization of phosphate removal from industrial wastewater in a sequencing batch reactor and extended aeration unit. *Journal of Water and Wastewater*, 35(2), 53-71. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2024.446732.3405>.
- Falahati Marvast, H. and Karimi Jashni, A., 2023. Water recovery from greywater of Shiraz University dormitory complex using a membrane bioreactor (MBR). *Journal of Water and Wastewater*, 34(2), 78-90. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.367741.3298>.
- Hai, F. I., Yamamoto, K. and Lee, C. H., 2018. *Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse*. Second Edition. IWA Publishing, London, UK. [Link]
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J. et al., 2021. Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12, 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>.
- Hoinkis, J., Deowan, S. A., Panten, V., Figoli, A., Huang, R. R. and Drioli, E., 2012. Membrane bioreactor (MBR) technology for industrial water reuse. *Procedia Engineering*, 33, 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1199>.
- Hosseinzadeh, M., Bidehendi, N., Torabian, A., Alimoradi, S. and Nayeb, M., 2016. A pilot study on the performance of a membrane bioreactor in advanced treatment of industrial wastewater for reverse osmosis pretreatment. *Mohit Shenasi*, 42(2), 387-396. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jes.2016.58740>.
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A. and Tay, J. H., 2016. Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. *Membranes*, 6(2), 33. <https://doi.org/10.3390/membranes6020033>.

- Kim, J., Wu, B., Jeong, S., Jeong, S. and Kim, M., 2024. Recent advances of membrane-based hybrid membrane bioreactors for wastewater reclamation. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 3, 1361433. <https://doi.org/10.3389/frmst.2024.1361433>.
- Lin, H. J., Xie, K., Mahendran, B., Bagley, D. M., Leung, K. T., Liss, S. N. et al., 2009. Sludge properties and their effects on membrane fouling in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs). *Water Research*, 43(15), 3827–3837. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.025>.
- Niu, C., Li, B. and Wang, Z., 2023. Using artificial intelligence-based algorithms to identify critical fouling factors and predict fouling behavior in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 687, 122076. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122076>.
- Rahman, T. U., Roy, H., Islam, M. R., Tahmid, M., Fariha, A., Mazumder, A. et al., 2023. The advancement in membrane bioreactor (MBR) technology toward sustainable industrial wastewater management. *Membranes*, 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/membranes13020181>.
- Raper, E., Stephenson, T., Anderson, D. R., Fisher, R. and Soares, A., 2018. Industrial wastewater treatment through bioaugmentation. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.035>.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D. and Metcalf & Eddy, Inc., 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education, New York, NY. 1819 pages. [[Link](#)]
- Xie, Y., Zhu, T., Xu, C., Han, J. and Jiang, J., 2010. Research progress in influence factors on membrane fouling in membrane bioreactor. *Chemical Engineering (CHINA)*, 38, 26-31. (In Chinese). [[Link](#)]
- Zhang, K., Choi, H., Dionysiou, D. D., Sorial, G. A. and Oerther, D. B., 2006. Identifying pioneer bacterial species responsible for biofouling membrane bioreactors. *Environmental Microbiology*, 8(3), 433–440. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00909.x>.

