

Reverse Osmosis and Nano Filtration Membranes Performance's Comparison in Assaluyeh Industrial Wastewater Treatment

S. Lashgari¹, S. Lashgari², F. Keshavarz³, Z. Esvandi⁴

1. PhD., Senior Researcher, National Petrochemical Company, Petrochemical Research and Technology Company, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Polymer and Chemical Engineering, Tangestan Branch, Islamic Azad University, Tangestan, Iran
(Corresponding Author) s.lashgari@iauahram.ac.ir
3. Former Graduate Student, Dept. of Chemical Engineering, Kherad Institute of Graduate Education, Bandar Bushehr, Iran
4. Former Graduate Student, Young Researchers and Elite Club, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

(Received Jan. 7, 2021 Accepted Sep. 26, 2021)

To cite this article:

Lashgari, S., Lashgari, S., Keshavarz, F., Esvandi, Z. 2022. "Reverse osmosis and nano filtration membranes performance's comparison in Assaluyeh industrial wastewater treatment"
Journal of Water and Wastewater, 33(1), 1-11. Doi: 10.22093/wwj.2021.266314.3101. (In Persian)

Abstract

Restriction of freshwater resources is one of the major challenges that humanity has always been faced with. The use of treatment membranes in effluent recovery is one of the basic solutions to deal with this global problem. Therefore, in the present study, the performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in Assaluyeh industrial wastewater treatment has been compared and evaluated. The membranes used in this system are of commercial type of spiral woven polyamide. The effect of flow pressure and flow rate on the membrane permeate flux, total dissolved solids, separation efficiency percentage and membrane flux reduction have been evaluated. In both membranes, with increasing pressure from 5 to 7 bar at a constant flow rate of 720 L/h, the flux enhanced and the TDS rate decreased. The separation efficiency percentage of industrial wastewater using NF and RO membranes at optimum pressure of 7 bar was obtained 92% and 98.4%, respectively, which indicates higher RO filtration performance than NF. Increasing the flow rate from 600 to 840 L/h at a constant pressure of 7 bar improved the permeate flux for the samples. The amount of TDS with rising flow rate in NF membrane

showed a decreasing and then increasing trend while in RO membrane there were slight changes. Meanwhile, the flow rate had no effect on the separation efficiency percentage of RO membrane, but in NF membrane, first an increasing and then a decreasing trend was observed. The highest separation efficiency percentage with NF and RO membranes at 720 L/h flow rate was 92% and 98.5%, respectively. The study of the effect of increasing pressure and flow rate on the percentage of flux reduction showed that in RO membrane it increases while in NF membrane this parameter depends on the result of the effect of flow rate and pressure.

Keywords: Membrane, Reverse Osmosis (RO), Nano Filtration (NF), Effluent, Comparison.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۱، صفحه: ۱۱-۱

بررسی و مقایسه عملکرد غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در تصفیه پساب صنعتی عسلویه

سمیه لشگری^۱، سهیلا لشگری^۲، فاطمه کشاورز^۳، زهرا عیسوندی^۴

۱- دکترا، پژوهشگر ارشد، شرکت ملی صنایع پتروشیمی،

شرکت تحقیقات و فناوری پتروشیمی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی پلیمر و شیمی، واحد تنگستان،

دانشگاه آزاد اسلامی، تنگستان، ایران

(نویسنده مسئول) s.lashgari@iauahram.ac.ir

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی،

مؤسسه تحصیلات تکمیلی خرد، بندر بوشهر، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان،

واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

پذیرش ۱۴۰۰/۷/۴

(دریافت ۱۳۹۹/۱۰/۱۸)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

لشگری، س.، لشگری، س.، کشاورز، ف.، عیسوندی، ز.، ۱۴۰۱، "بررسی و مقایسه عملکرد غشاهای اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در

تصفیه پساب صنعتی عسلویه" مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۱)، ۱۱-۱. Doi: 10.22093/wwj.2021.266314.31.3101

چکیده

محدودیت منابع آب شیرین و تخلیه آب به صورت پساب شهری و صنعتی در محیط‌زیست یکی از چالش‌های مهمی است که بشریت همواره با آن روبه‌رو بوده است. استفاده از غشاهای تصفیه در بازیابی پساب‌ها یکی از راه‌حل‌های اساسی برای مقابله با این معضل جهانی است. از این رو در این پژوهش، عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس در تصفیه پساب صنعتی عسلویه مقایسه و ارزیابی شد. غشاهای به کار رفته در این سیستم از نوع تجاری به صورت مارپیچ بافته شده از جنس پلی‌آمید بود. اثر پارامترهای فشار و دبی جریان بر شار عبوری از غشا، کل مواد جامد محلول، درصد تصفیه و درصد گرفتگی غشا بررسی شد. در هر دو غشا با افزایش فشار از ۵ تا ۷ بار در دبی ثابت 720 L/h ، شار جریان افزایش و میزان TDS کاهش یافت. بیشینه درصد تصفیه در فشار ۷ بار مشاهده شد که برای غشاهای NF و RO به ترتیب ۹۲ و ۹۸/۴ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده بالاتر بودن عملکرد تصفیه غشای RO نسبت به NF است. افزایش دبی جریان از 600 L/h تا 840 L/h در فشار ثابت ۷ بار موجب افزایش شار جریان برای نمونه‌ها شد. میزان TDS با افزایش دبی در غشای NF روند کاهشی و سپس افزایشی را نشان داد در حالی که در غشای RO تغییرات ناچیز بود. همچنین، میزان دبی تأثیری بر روی درصد تصفیه غشای RO نداشت اما در غشای NF ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی مشاهده شد. بیشترین میزان درصد تصفیه با غشاهای NF و RO در دبی جریان 720 L/h به ترتیب ۹۲ و ۹۸/۵ درصد به دست آمد. بررسی اثر افزایش فشار و دبی جریان بر درصد گرفتگی نشان داد میزان گرفتگی در غشای RO افزایش می‌یابد در حالی که در غشای NF این میزان بستگی به برآیند اثر دبی و فشار دارد.

واژه‌های کلیدی: غشا، اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون، پساب، مقایسه

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش رشد جمعیت کره زمین، مصرف منابع آبی در بخش‌های شهری و صنعتی شدت بیشتری گرفته، به طوری که برای حفظ رشد اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی، مدیریت منابع آبی، تغییر الگوی مصرف و بازیابی آن در سطح جهان به یک مسئله مهم تبدیل شده است (Licon et al., 2018, Mekonnen and Hoekstra, 2016).

در حال حاضر آبهای زیرزمینی شیرین و شور عمده‌ترین منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی محسوب می‌شود. با توجه به اینکه، سفره‌های آبهای زیرزمینی به دلیل بهره‌برداری بیش از حد در حال کاهش هستند، تصفیه آب‌های زیرزمینی شور و پساب‌های شهری و صنعتی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفع کمبود آب و تأمین آب با کیفیت مطلوب داشته باشد (Giagnorio et al., 2019).

فرایندهای گوناگونی برای تصفیه آبهای زیرزمینی و پساب‌ها وجود دارد که از آن جمله می‌توان به فیلتراسیون متراکم، تغذیه آبهای زیرزمینی، تصفیه آبخوان خاک، فیلتراسیون شنی آهسته، ازرنزی یا تصفیه با استفاده از گرانول کربن فعال، ته‌نشینی شیمیایی، تبادل یونی، روش‌های جذب، فیلتراسیون غشایی با استفاده از نانوفیلتراسیون^۱ و اسمز معکوس^۲ اشاره کرد (Abid et al., 2011, Heberer and Feldmann, 2008, Qu et al., 2013). از میان روش‌های غشایی NF و RO نسبت به سایر روش‌های بیان شده، در حذف آلاینده‌ها مؤثر بوده و از نظر عملیاتی نیز در تصفیه پساب‌های صنعتی آسان‌تر و مطمئن‌تر هستند (Baransi-Karkaby et al., 2019).

چهار ویژگی روش‌های RO و NO که موجب رشد و توسعه روزافزون آنها شده است عبارت‌اند از: ۱- حذف بیشتر مواد محلول، ۲- مصرف انرژی کمتر، ۳- رسوب کمتر و ۴- طول عمر بیشتر (Khedr, 2013).

همچنین به دلیل اندازه منافذ کوچک، این دسته از غشاها پتانسیل بالایی برای حذف مواد آلی زیست تخریب پذیر از منابع آبی دارند که از رشد باکتری در آب کاسته و موجب تولید آب سالم می‌شوند (Escobar et al., 2000).

فرایند RO یک روش غشایی انتخابی به‌شمار می‌رود که از دهه‌های گذشته برای نمک‌زدایی آب استفاده شده است و در حال حاضر یکی از مؤثرترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌های آب‌شیرین‌کن محسوب می‌شود. غشاهای RO، آب را با سرعت زیاد تحت فشار از خود عبور می‌دهد و بازدهی بسیار زیادی برای حذف املاح محلول دارد (Khedr, 2013).

از سوی دیگر، تاریخچه روش NF به دهه ۷۰ میلادی باز می‌گردد. در این روش فشار اعمالی پایین‌تر از روش RO بوده و حذف املاح محلول نیز کمتر از آن است. در این روش هیچ‌گونه ماده شیمیایی جانبی استفاده نمی‌شود، بنابراین هیچ‌گونه تأثیر منفی بر روی محیط‌زیست ندارد (Van Der Bruggen and Vandecasteele, 2003).

این فرایند با داشتن مزیت‌هایی مانند شار بالا، بازدهی مؤثر در حذف یون، فشار و هزینه کم در زمینه‌های مختلفی مانند شیرین کردن آبهای زیرزمینی، صنایع کاغذسازی، نساجی، لبنیات و صنایع غذایی، فرایندهای شیمیایی، نرم شدن آب دریا، نرم کردن آب سخت، بازیابی و تصفیه فاضلاب استفاده شده است (Ahsan and Imteaz, 2019, Lv et al., 2019).

تاکنون چندین پژوهش در ارتباط با عملکرد غشاهای RO و NF در شرایط عملیاتی مختلف و برای تصفیه انواع پساب‌ها انجام شده است. حافظ و همکاران در سال ۲۰۲۱، با استفاده از غشاهای بیان شده در فشارهای مختلف، فاضلاب شهری را تصفیه کردند. هدف آنها به‌کارگیری آب تصفیه شده در زمینه کشاورزی بود. نتایج پژوهش آنها مشخص کرد که فرایند NF برای بازیابی فاضلاب موردنظر مناسب نیست زیرا غلظت کلرید سدیم و کلسیم در همه فشارهای اعمال شده، فراتر از حد مجاز بود (Hafiz et al., 2021).

در پژوهشی دیگر توسط اینسکاج و همکاران در سال ۲۰۲۱، جداسازی هیدروکربن‌های کلر فرار موجود در آبهای زیرزمینی با استفاده از غشاهای RO و NF بررسی شد. آنها با توجه به محدودیت فضا و پتانسیل، حداکثر فشار عملیاتی را ۳ بار اعلام کردند. نتایج کار آنها مشخص کرد که غشای NF قابلیت حذف ۱۰۰ درصدی هیدروکربن کلر فرار از پساب واقعی را دارد، در حالی که قدرت حذف با غشای RO حدود ۹۳ درصد به‌دست آمد.

¹ Nano Filtration (NF)² Reverse Osmosis (RO)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش، برای خوراک ورودی دستگاه، از آب دیونیزه و پساب صنعتی آب شیرین کن شیرینو عسلویه استفاده شد. همچنین غشا اسمز معکوس RE4040-BE و نانوفیلتراسیون NE4040-90، ساخت شرکت کره‌ای CSM در دستگاه تصفیه آزمایش نصب شد. این غشاها به صورت مارپیچ بافته شده از جنس پلی آمید با بیشینه شار $4/09 \text{ m}^3/\text{hr}$ ، مدول صفحه‌ای در ابعاد $4 \times 4 \text{ inch}$ و سطح فعال غشا $7/9 \text{ m}^2$ بودند. علاوه بر این، در دستگاه مورد نظر یک عدد فیلتر میکرونی و فیلتر کربنی به عنوان پیش تصفیه آب ورودی به غشا به کار گرفته شد. سایر قسمت‌های دستگاه شامل یک مخزن مجهز به سیستم خنک‌کننده پساب صنعتی، پمپ فشار بالا برای تأمین فشار مورد نیاز آب ورودی به غشا، محفظه فشار بالا برای قرار دادن غشا درون آن، ۲ عدد فلومتر برای اندازه‌گیری دبی جریان آب تصفیه شده و پساب صنعتی خروجی از غشا، ۳ عدد فشارسنج نسبی به ترتیب برای اندازه‌گیری فشارهای ورودی به پمپ فشار بالا، فشار اعمال شده به غشا و فشار آب تصفیه شده خروجی از غشا است. نمایی از دستگاه استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- آزمایش

قبل از شروع هر آزمایش، ابتدا به مدت ۱ ساعت ۲۰ لیتر آب دیونیزه از دستگاه عبور داده شد تا دستگاه و غشا عاری از هر گونه ماده به جای مانده ناشی از آزمایش‌های قبل شود. سپس، محلول تهیه شده به مخزن منتقل شد و دستگاه به مدت ۹۰ دقیقه روشن ماند. مراحل مذکور در فشار و جریان‌های مختلف انجام شد. به منظور انجام آزمایش در غلظت ثابت، جریان‌های تصفیه و پساب صنعتی به مخزن اولیه برگشت داده شد. برای تنظیم فشار اعمال شده به غشا از یک شیر در جریان پساب صنعتی استفاده شد. برای پایداری شرایط دستگاه و قرائت اعداد مربوط به فلومترهای جریان تصفیه شده و پساب صنعتی به دستگاه ۹۰ دقیقه فرصت داده شد. سپس اعداد فلومترها، TDS^1 ، فشار ورودی و خروجی غشا و دمای واکنش در طول آزمایش ثبت شد. پس از اتمام مدت زمان مذکور،

آنها کاهش درصد حذف با غشای RO را مرتبط با رسوب ایجاد شده بر روی غشا ارزیابی کردند (Ainscough et al., 2021). علاوه بر این کایا و دایانیر در سال ۲۰۲۰، کاربرد غشاهای RO و NF برای تصفیه فاضلاب لباس شویی را بررسی کردند. بهترین شرایط عملیاتی برابر با pH معادل ۸/۵، فشار غشایی ۱۲ بار، دما ۳۰ درجه سلسیوس و دبی جریان ۲ لیتر بر دقیقه به دست آمد. این پژوهشگران گزارش کردند که pH مؤثرترین عامل بر حذف است. در حالی که عواملی چون فشار عملیاتی و دبی جریان تأثیر کمی بر تشکیل رسوب دارند (Kaya and Dayanir, 2020).

به دلیل وجود منابع سرشار نفت و گاز در کشور و سیاست‌های اقتصادی دولت، صنایع پتروشیمی‌های فعال کشور در دو منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و عسلویه متمرکز شده‌اند. این دو منطقه در کنار خلیج فارس قرار گرفته‌اند و به طور معمول فعالیت آنها بر محیط زیست این اکوسیستم با ارزش اثراتی را به دنبال دارد (Davoudi et al., 2014).

از طرفی کمبود آب شیرین در این منطقه حساس و خشک‌سالی‌های مکرر در کشور نیاز به تصفیه آب و فاضلاب‌های شهری و صنعتی را برجسته کرده است. با توجه به پیشرفت‌های انجام شده در زمینه غشا و نانوتکنولوژی، فرایندهای غشایی به عنوان یکی از راه‌حل‌های احتمالی برای پاسخ به این نیاز است زیرا در تولید آب آشامیدنی، فناوری‌های غشایی به دلیل استفاده از مواد شیمیایی کمتر و تولید لجن کمتر عملکرد بیشتری نسبت به سیستم‌های جداسازی معمول دارند (Bergman and Bergman, 2007).

تصفیه پساب پالایشگاه‌ها می‌تواند مزیت‌های مختلفی مانند کاهش حجم آب‌های مصرفی در فرایندها، کاهش پساب‌های آلوده، کاهش هزینه‌های فرایند و نگهداری فاضلاب، بهبود کیفیت تخلیه فاضلاب و عدم تأثیر منفی بر آلودگی محیط زیست داشته باشد (Davoudi et al., 2014).

بنابراین در این پژوهش به بررسی عملکرد و تفاوت غشاهای RO و NF در تصفیه پساب صنعتی عسلویه پرداخته شد که اهمیت بسیاری در احیا و بازگشت آب به چرخه صنعت، زمین‌های کشاورزی و همچنین جلوگیری از تخریب محیط زیست دارد.

¹ Total Dissolved Solid (TDS)

پساب‌های مذکور بررسی شد. پس از ارزیابی نتایج، فشار بهینه تعیین شد. سری دوم آزمایش، در فشار بهینه ثابت با سه دبی جریان ۶۰۰، ۷۲۰ و ۸۴۰ L/hr انجام شد و مجدداً پارامترهای فوق ارزیابی شد. درصد گرفتگی غشا^۱ FR با استفاده از معادله ۱ محاسبه شده است (Lindau et al., 1998)

$$FR (\%) = \left(1 - \frac{J}{J_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن

J و J₀ به ترتیب شار عبوری از غشا برای پساب صنعتی و آب دیونیزه است. برای محاسبه درصد تصفیه جریان R، از معادله ۲ استفاده شده است (Nataraj et al., 2006)

$$R (\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن

C_f و C_p به ترتیب غلظت یک جزء خاص در جریان تصفیه شده و جریان خوراک است که در اینجا برای محاسبه از مقدار TDS جریان تصفیه و خوراک استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر پارامتر فشار بر تصفیه پساب صنعتی با غشاهای RO و NF

اثر پارامتر فشار بر تصفیه پساب صنعتی با استفاده از غشاهای NF و RO در محدوده ۵ تا ۷ بار و دبی جریان ۷۲۰ L/h در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۲-a مشاهده می‌شود شار جریان به صورت خطی با افزایش فشار از ۵ به ۷ بار افزایش می‌یابد. مقایسه شار جریان آب دیونیزه و پساب صنعتی نشان می‌دهد که عملکرد غشا تحت تأثیر پدیده رسوب قرار نمی‌گیرد و کاهش اندک شار پساب صنعتی به دلیل غلظت زیاد آن است. بیشترین میزان شار جریان برای پساب صنعتی و آب دیونیزه در فشار ۷ بار مشاهده شد که علت آن افزایش سرعت عبور مولکول‌ها از غشا به واسطه فشار بیشتر است. همچنین با مقایسه شیب

¹ Flux Reduction (FR)

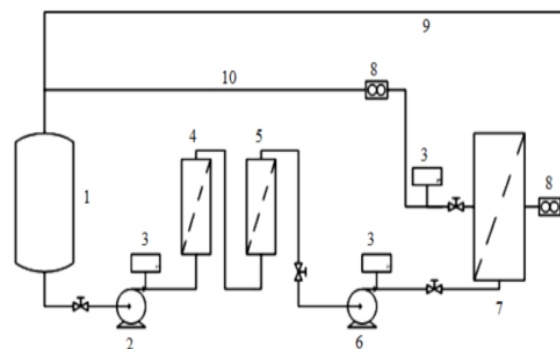


Fig. 1. View of: a) image of the device used in the experiments and b) schematic of the laboratory apparatus including: 1- tank with cooling system, 2- pump, 3- barometer, 4- carbon filter, 5- micron filter, 6- high pressure pump, 7- membrane chamber, 8- flowmeter, 9- refined flow, 10- concentrated excreted flow

شکل ۱- نمایی از: (a) تصویر دستگاه استفاده شده در آزمایش‌ها

(b) شماتیک دستگاه آزمایشگاهی شامل: ۱- مخزن دارای سیستم خنک‌کننده، ۲- پمپ، ۳- فشارسنج، ۴- فیلتر کربنی، ۵- فیلتر میکرونی، ۶- پمپ فشار بالا، ۷- محفظه غشایی، ۸- فلومتر، ۹- جریان تصفیه شده، ۱۰- جریان غلیظ دفع شده

هم‌زمان از محلول داخل مخزن و جریان تصفیه شده نمونه‌برداری شد تا میزان تصفیه در شرایط اعمالی مشخص شود. قبل و بعد از فرایند تصفیه، با استفاده از آب دیونیزه در شرایط عملیاتی موردنظر (فشار، دبی جریان و غشا) دستگاه به مدت ۳۰ دقیقه روشن ماند. در این پژوهش، آزمایش‌ها در دو سری با شرایط عملیاتی متفاوت و در محدوده دمایی 30 ± 3 درجه سلسیوس انجام شد. در سری اول، آزمایش‌ها در دبی جریان ۷۲۰ L/hr در فشارهای مختلف ۵، ۶ و ۷ بار با دو نوع خوراک ورودی (آب دیونیزه و پساب صنعتی) انجام شد. در هر آزمایش تأثیر غشاهای NF و RO بر روی شار عبوری از غشا، TDS، درصد تصفیه و درصد گرفتگی

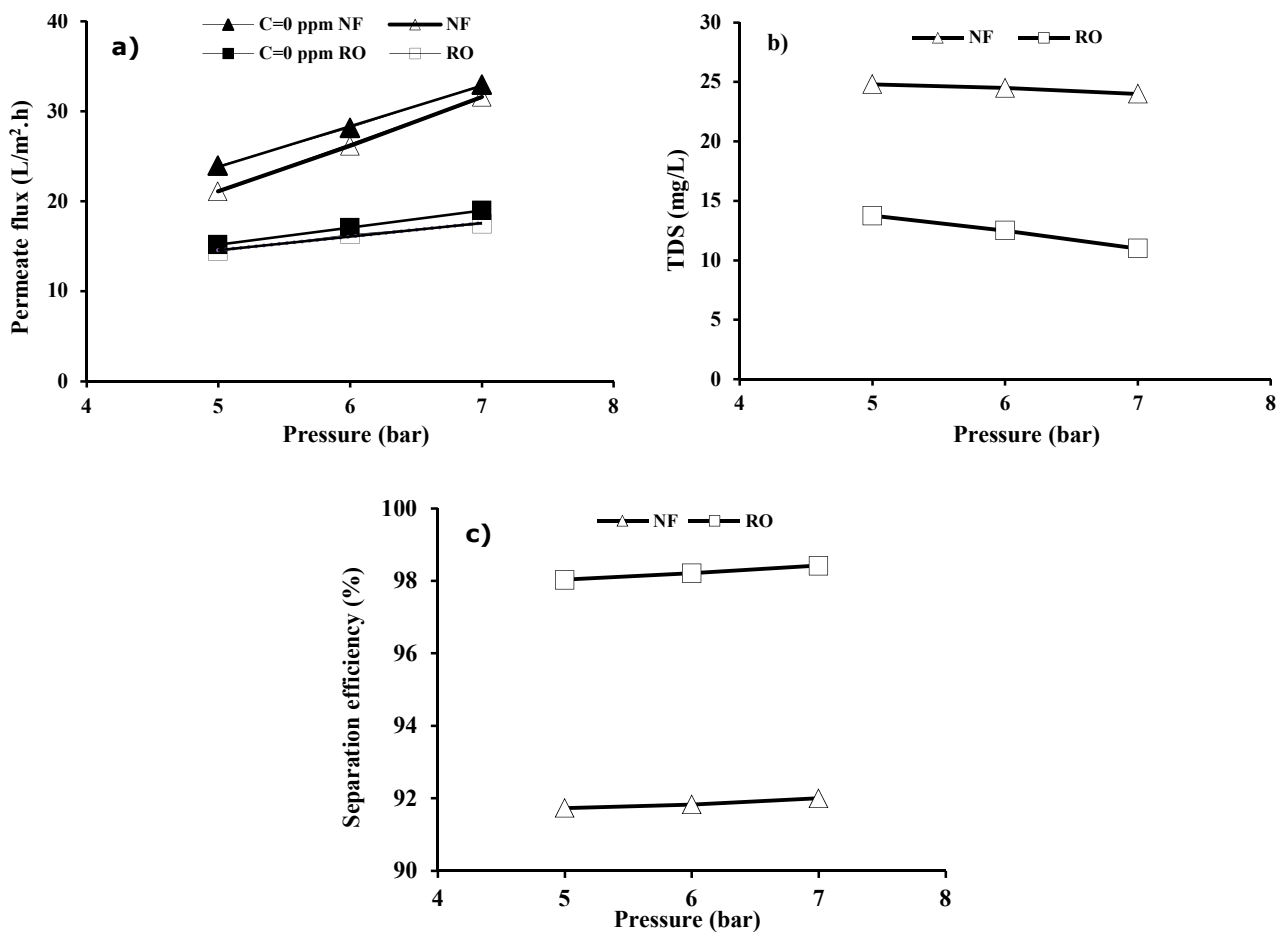


Fig. 2. Effect of pressure on the NF and RO membrane's performance including: a) permeate flux, b) TDS and c) separation efficiency

شکل ۲- اثر پارامتر فشار بر عملکرد غشاهای NF و RO (شامل: a) شار عبوری از غشا، b) TDS و c) درصد تصفیه

می‌یابد. زیرا افزایش فشار موجب می‌شود تا ذرات محلول در آب فرصت عبور از سطح غشا را از دست بدهند و تحت فشار زیاد در حفرات غشا گیر بیافتند. بیشینه درصد تصفیه با استفاده از غشاهای NF و RO در فشار ۷ بار به ترتیب ۹۲ و ۹۸/۵۲ درصد به دست آمد. مقایسه درصد تصفیه غشاها نشان می‌دهد که عملکرد تصفیه‌ای غشای RO نسبت به NF بیشتر است.

۲-۳- اثر پارامتر دبی جریان بر تصفیه پساب صنعتی با غشاهای NF و RO

اثر دبی جریان بر پارامترهای مختلف تصفیه پساب صنعتی با استفاده از غشاهای NF و RO در شکل ۳ ارائه شده است. آزمایش‌ها در فشار ۷ بار و دبی جریان ۶۰۰، ۷۲۰ و ۸۴۰ L/h

نمودارهای شکل ۲-ا می‌توان دریافت تأثیر افزایش فشار بر روی شار عبوری غشای NF بیشتر از غشای RO است. از سوی دیگر، با افزایش فشار از ۵ به ۷ بار میزان TDS در جریان پساب صنعتی کاهش می‌یابد و نمودار سیر نزولی دارد (شکل ۲-ب). این پدیده می‌تواند ناشی از به دام افتادن آلاینده‌های موجود در پساب صنعتی درون منافذ غشا تحت فشار زیاد باشد. به‌طور مشابه، این نتیجه در پژوهش نتاراج و همکاران در خصوص غشاهای تصفیه مشاهده شده است که با این پژوهش مطابقت دارد (Hassani et al., 2008, Nataraj et al., 2006)

همچنین، بررسی نتایج اثر فشار بر درصد تصفیه پساب صنعتی با استفاده از غشاهای NF و RO واقع در شکل ۲-ج نشان داد که هر چه فشار بیشتر شود درصد تصفیه پساب صنعتی نیز کمی افزایش

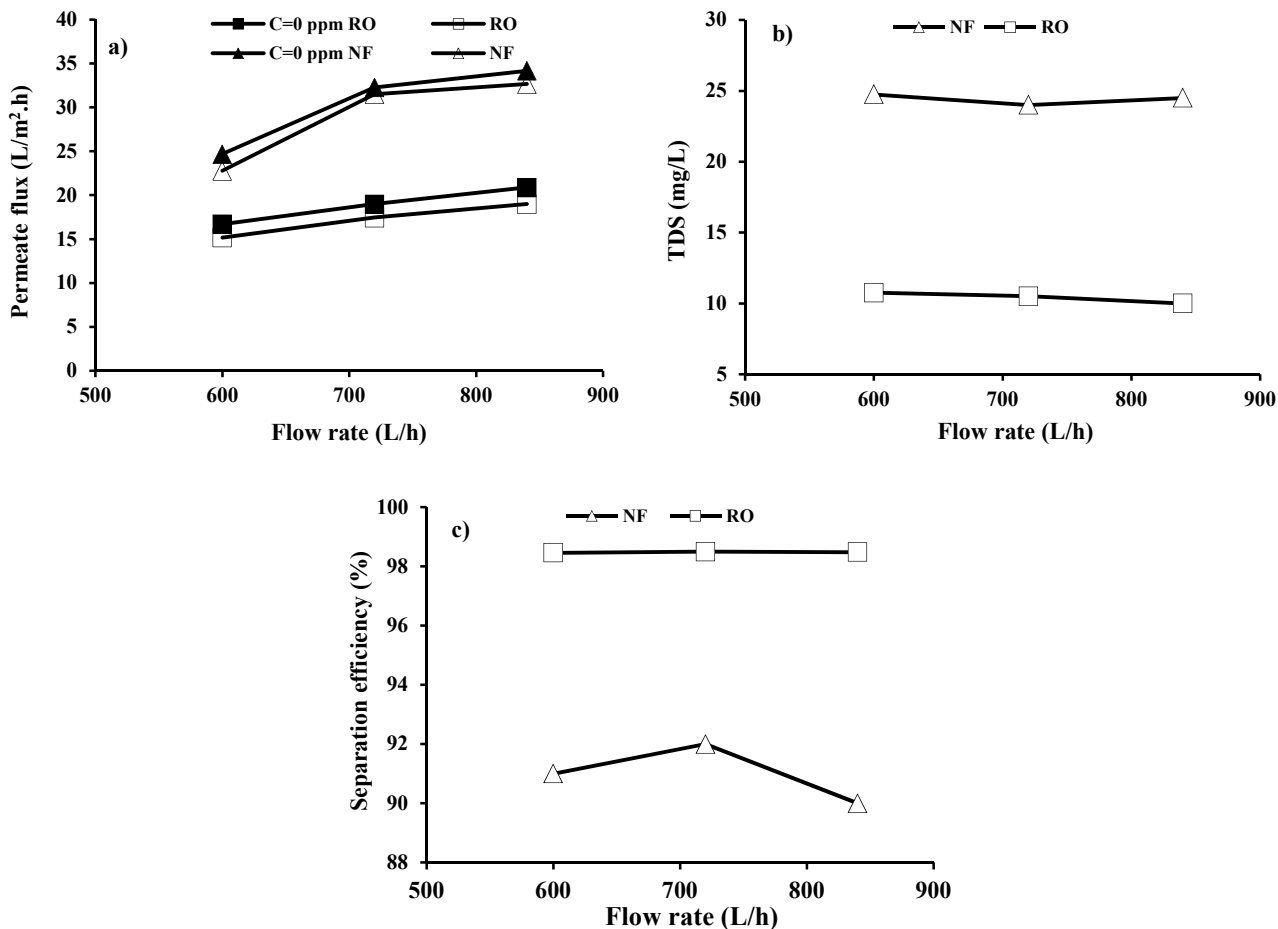


Fig. 3. Effect of volume flow rate on the NF and RO membrane's performance including: a) permeate flux, b) TDS and c) separation efficiency

شکل ۳- اثر پارامتر دبی جریان بر عملکرد غشاهای NF و RO: (a) شار عبوری از غشا، (b) TDS و (c) درصد تصفیه

انجام شد. با توجه به شکل ۳-ا مشاهده می شود که با افزایش دبی

۳-۳- مقایسه میزان گرفتگی در پساب صنعتی با استفاده از غشاهای NF و RO

میزان گرفتگی غشا از جمله مهم ترین پارامترها در بررسی غشا محسوب می شود. به طور کلی هر چه گرفتگی غشا کمتر باشد، غشا عملکرد بهتری از خود نشان می دهد (Delnavaz et al., 2018).

(Vatanpour and Zoqi, 2017)

اثر فشار و دبی جریان بر درصد گرفتگی در تصفیه پساب صنعتی با استفاده از غشاهای NF و RO در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴-ا مشاهده می شود که میزان گرفتگی در غشای RO در تمام دبی ها بیشتر از غشای NF است ولی روند تغییرات گرفتگی با افزایش دبی در هر دو غشا ابتدا

پس از ۶۰۰ L/h به ۸۴۰ L/h شار جریان برای هر دو نمونه پساب صنعتی و آب دیونیزه افزایش می یابد که علت آن ناشی از افزایش مقدار مایع عبوری از غشا است. همچنین، مطابق شکل ۳-ب میزان تغییرات TDS با افزایش دبی در غشای RO کم است، ولی در غشای NF با افزایش دبی جریان مقدار TDS ابتدا کاهش و سپس روند افزایشی دارد. این امر باعث می شود تغییرات دبی جریان تأثیری بر روی درصد تصفیه پساب صنعتی با غشای RO نداشته باشد، در حالی که در غشای NF، با افزایش دبی جریان ابتدا درصد تصفیه افزایش و سپس کاهش می یابد. علت این پدیده می تواند ناشی از گرفتگی غشا و حالت پلاریزاسیون غلظتی در غشای NF باشد. بیشترین میزان درصد تصفیه برای خوراک های مختلف پساب صنعتی و آب دیونیزه با غشاهای NF و RO در دبی جریان

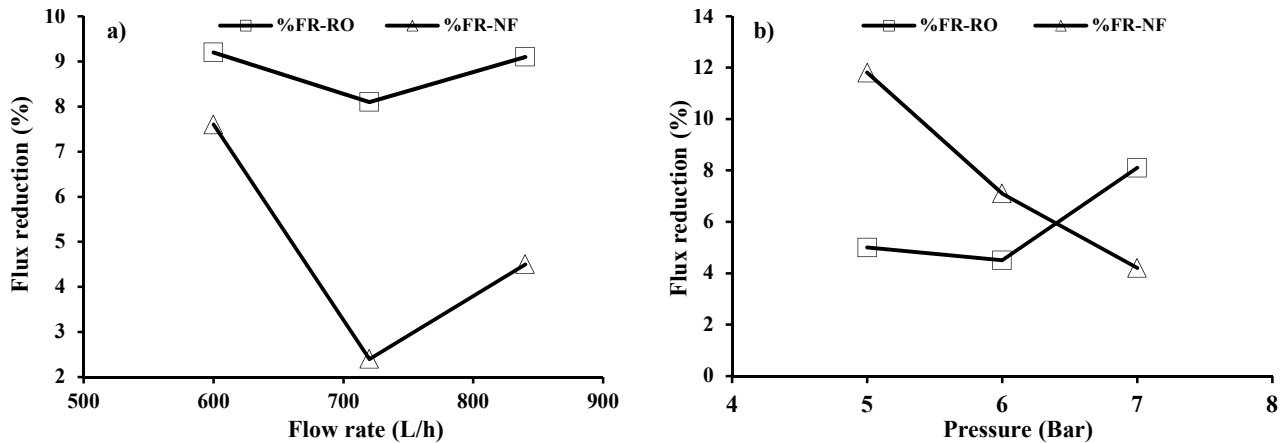


Fig. 4. Changes of obstruction percentage of RO and NF membranes with variables: a) volume flow rate and b) pressure

شکل ۴- تغییرات درصد گرفتگی غشاهای RO و NF نسبت به متغیرهای (a) دبی جریان و (b) فشار

فشار، میزان گرفتگی در غشای RO افزایش می‌یابد، در حالی که غشای NF رفتاری معکوس دارد. دلیل این امر می‌تواند مربوط به اندازه منافذ غشای RO باشد که نسبت به NF کوچکتر است و قابلیت گذراندن یون‌های چندظرفیتی را ندارد. افزایش فشار باعث مسدود شدن بیشتر منافذ غشای RO توسط یون‌های بزرگتر شده و میزان گرفتگی افزایش می‌یابد. در صورتی که در غشای NF بسته به اندازه یون دو یا چند ظرفیتی، امکان عبور وجود دارد و افزایش فشار می‌تواند عبور یون را تسهیل کند و باعث کاهش درصد گرفتگی غشا شود.

۳-۴- مقایسه اقتصادی

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب روش تصفیه بحث هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی آن است. بنابراین در این بخش، تحلیل اقتصادی از نظر هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه برای غشاهای به‌کار رفته در فرایند تصفیه RO و NF پساب صنعتی عسلویه با استفاده از پژوهش‌های پیشین گزارش شده است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ظرفیت تولید 3000 m^3 در روز متناظر با مصرف سرانه آب ۳۰۰۰۰ نفر تخمین زده شده است. مبلغ سرمایه‌گذاری اولیه شامل هزینه خود سیستم (ساخت و ساز، تجهیزات کمکی، پیش تصفیه، بعد از تصفیه، غشاهای استفاده شده و خدمات مختلف) و نصب آن در محل مورد نظر است. با توجه به محاسبات، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای غشاهای RO و NF

کاهشی و سپس افزایشی است. بیشتر بودن میزان گرفتگی در غشای RO نسبت به NF به دلیل منافذ کوچکتر آن است که باعث رسوب بیشتر یون‌های دو ظرفیتی و بزرگتر می‌شود. علت مشاهده شدن کمینه در نمودار گرفتگی را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد: با توجه به این که عبور یون‌ها از حفرات غشا به دو عامل سرعت (زمان) و اندازه یون بستگی دارد، بنابراین یون‌ها هنگام عبور از سطح غشا در صورتی که در حدود اندازه حفرات باشند درون منافذ وارد می‌شوند و در صورت فرصت کافی از غشا رد شده، در غیر این صورت در آن گیر می‌افتند. هنگامی که دبی کم است یعنی سرعت عبور یون‌ها کم است و یون‌ها فرصت نفوذ به حفرات غشا را دارند، در نتیجه بخشی از یون‌ها درون منافذ غشا وارد می‌شوند که ممکن است به دلیل اندازه یون امکان عبور از حفرات غشا را نداشته باشند. با افزایش دبی همین دسته از یون‌ها به دلیل سرعت زیاد روی سطح غشا می‌غلتنند و تحت سرعت زیاد آب از سطح آن عبور کرده و فرصت ورود به منافذ غشا را نمی‌یابند. بنابراین میزان گرفتگی کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر سرعت یون‌های کوچکتری که درون منافذ وارد شده‌اند فرصت عبور از غشا را نیافته و موجب افزایش مجدد گرفتگی غشا می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در دبی و فشار بیشتر (۷ بار و 840 L/h) علی‌رغم شار عبوری بیشتر، غشای RO میزان گرفتگی بیشتری خواهد داشت اما در غشای NF این میزان بستگی به برآیند اثر دبی و فشار در گرفتگی غشا دارد. از سوی دیگر، در شکل ۴- b دیده می‌شود با افزایش

غشاهای NF و RO افزایش یافت و بیشترین مقدار شار برای پساب صنعتی در فشار ۷ بار مشاهده شد. درصد تصفیه پساب صنعتی و TDS با افزایش فشار در هر دو غشا به ترتیب افزایش و سپس کاهش یافت که بیشترین میزان درصد تصفیه در فشار ۷ بار، مقدار ۹۲ و ۹۸/۴ درصد به ترتیب برای غشاهای NF و RO به دست آمد. از سوی دیگر، افزایش دبی جریان موجب افزایش شار عبوری در غشاهای NF و RO شد. افزایش شار موجب مشاهده مینیمم در نمودار TDS غشای NF و به تبع آن نقطه ماکسیمم در نمودار درصد تصفیه این غشا می شود در صورتی که تأثیر آن بر TDS و درصد تصفیه غشای RO ناچیز بود. نتایج گرفتگی غشا نشان داد که افزایش دبی جریان و فشار موجب افزایش گرفتگی غشای RO می شود در حالی که در غشای NF بستگی به برآیند اثر دبی و فشار دارد. مقایسه فنی و اقتصادی دو غشا با توجه به پژوهش های پیشین مشخص کرد، علی رغم هزینه سرمایه گذاری بیشتر در روش NF نسبت به RO، اما هزینه های عملیاتی فرایند NF نسبت به RO در تولید آب تصفیه کمتر است.

۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنگستان به دلیل حمایت مالی از این کار پژوهشی، کمال تشکر را دارند.

به ترتیب ۱۰۰۳۰۲۰ و ۱۰۱۴۴۹۲ دلار برآورد شده است. همان طور که دیده می شود میزان سرمایه گذاری اولیه غشای NF نسبت به RO کمی بیشتر است. تفاوت هزینه های سرمایه گذاری اولیه به دلیل گران تر بودن قیمت غشای NF به ازای مترمکعب در مقایسه با غشای RO است. علاوه بر این، برآورد هزینه عملیات برای غشاهای RO و NF به ترتیب $1/33$ و $1/19$ تعیین شد. نتایج حاصله نشان می دهد که هزینه عملیاتی غشای NF در مقایسه با RO کمتر است. این تفاوت می تواند به دلیل بالاتر بودن هزینه انرژی مورد نیاز در غشای RO باشد. قابل ذکر است که هزینه نهایی آب تصفیه شده علاوه بر هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی، تابعی از طول عمر غشاهای مذکور و طول عمر دستگاه نیز می باشد (Elazhar et al., 2015, Garg and Joshi, 2015).

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به مقایسه عملکرد دو روش صنعتی مهم غشایی NF و RO برای تصفیه پساب صنعتی عسلویه پرداخته شد. تأثیر پارامترهای فشار و دبی جریان به ترتیب در محدوده ۵ تا ۷ بار و ۸۴۰ تا ۶۰۰ L/h بر شار عبوری از غشا، TDS، درصد تصفیه و درصد گرفتگی غشا ارزیابی شد. با افزایش فشار، شار عبوری از

References

- Abid, M. F., Al-Naseri, S. K., Al-Sallehy, Q. F., Abdulla, S. N. & Rashid, K. T. 2011. Desalination of Iraqi surface water using nanofiltration membranes. *Desalination and Water Treatment*, 29, 174-180.
- Ahsan, A. & Imteaz, M. 2019. Nanofiltration membrane technology providing quality drinking water. *Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment*, 291-295.
- Ainscough, T. J., Oatley-Radcliffe, D. L. & Barron, A. R. 2021. Groundwater remediation of volatile organic compounds using nanofiltration and reverse osmosis membranes-a field study. *Membranes*, 11(1), 61.
- Baransi-Karkaby, K., Bass, M. & Freger, V. 2019. In situ modification of reverse osmosis membrane elements for enhanced removal of multiple micropollutants. *Membranes*, 9(2), 28.
- Bergman, R. & Bergman, R. 2007. *Reverse osmosis and nanofiltration*, American Water Works Association.
- Davoudi, M., Samieirad, S., Mottaghi, H. & Safadoost, A. 2014. The main sources of wastewater and sea contamination in the South Pars natural gas processing plants: prevention and recovery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 19, 137-146.
- Delnavaz, M., Vatanpour, V. & Farahbakhsh, J. 2018. A study for water purification using reverse osmosis membrane modified with carbon nanotube. *Journal of Water and Wastewater*, 29(5), 1-11. (In Persian)
- Elazhar, F., Touir, J., Elazhar, M., Belhamidi, S., El Harrak, N., Zdeg, A., et al. 2015. Techno-economic comparison of reverse osmosis and nanofiltration in desalination of a Moroccan brackish groundwater. *Desalination and Water Treatment*, 55, 2471-2477.

- Escobar, I. C., Hong, S. & Randall, A. A. 2000. Removal of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon by reverse osmosis and nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 175, 1-17.
- Garg, M. C. & Joshi, H. 2015. Optimization and economic analysis for a small scale nanofiltration and reverse osmosis water desalination system. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15, 1027-1033.
- Giagnorio, M., Ricceri, F. & Tiraferri, A. 2019. Desalination of brackish groundwater and reuse of wastewater by forward osmosis coupled with nanofiltration for draw solution recovery. *Water Research*, 153, 134-143.
- Hafiz, M., Hawari, A. H., Alfahel, R., Hassan, M. K. & Altaee, A. 2021. Comparison of nanofiltration with reverse osmosis in reclaiming tertiary treated municipal wastewater for irrigation purposes. *Membranes*, 11(1), 32.
- Hassani, A., Mirzayee, R., Nasser, S., Borghei, M., Gholami, M. & Torabifar, B. 2008. Nanofiltration process on dye removal from simulated textile wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5, 401-408.
- Heberer, T. & Feldmann, D. 2008. Removal of pharmaceutical residues from contaminated raw water sources by membrane filtration. *Pharmaceuticals in the Environment*, 427-453.
- Kaya, Y. & Dayanir, S. 2020. Application of nanofiltration and reverse osmosis for treatment and reuse of laundry wastewater. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 699-709.
- Khedr, M. G. 2013. Radioactive contamination of groundwater, special aspects and advantages of removal by reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination*, 321, 47-54.
- Licona, K., Geaquinto, L. D. O., Nicolini, J., Figueiredo, N., Chiapetta, S., Habert, A., et al. 2018. Assessing potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 195-204.
- Lindau, J., Jönsson, A. S. & Bottino, A. 1998. Flux reduction of ultrafiltration membranes with different cut-off due to adsorption of a low-molecular-weight hydrophobic solute-correlation between flux decline and pore size. *Journal of Membrane Science*, 149, 11-20.
- Ly, Y., Zhou, J., Mai, Z. & Liu, J. 2019. Nano-porous membrane process for brackish groundwater treatment: efficiency analysis using response surface methodology. *Nature Environment and Pollution Technology*, 18(4), 1131-1141.
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323.
- Nataraj, S. K., Hosamani, K. M. & Aminabhavi, T. M. 2006. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. *Water Research*, 40, 2349-2356.
- Qu, X., Alvarez, P. J. & Li, Q. 2013. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 47, 3931-3946.
- Van Der Bruggen, B. & Vandecasteele, C. 2003. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry. *Environmental Pollution*, 122, 435-445.
- Vatanpour, V. & Zoqi, N. 2017. Surface modification of commercial seawater reverse osmosis membranes by grafting of hydrophilic monomer blended with carboxylated multiwalled carbon nanotubes. *Applied Surface Science*, 396, 1478-1489.



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