

مروری بر روش‌های پیش تصفیه فرآیند اسمز معکوس

زهرا پاشایی باروق^۱، علی اکبر بابالو^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲ استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

علی اکبر بابالو

a.babaluo@sut.ac.ir

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در فناوری اسمز معکوس (RO) تنها به مواد غشایی RO، طراحی ماژول‌ها و بهینه سازی فرآیند RO محدود نمی‌شود. بلکه شامل پیش تصفیه خوراک نیز می‌باشد که مستقیماً بر عملکرد سیستم RO تأثیر می‌گذارد. چالش‌های مربوط به سیستم‌های اسمز معکوس از جمله گرفتگی و کاهش طول عمر غشاهای RO را می‌توان از طریق استفاده از روش‌های پیش تصفیه مناسب برطرف کرد. منابع آب به شدت آلوده و محدودیت‌های روش‌های مرسوم پیش تصفیه موجب شد تا پیش تصفیه غشایی به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده ظاهر شود. این مقاله مروری بر توسعه و روندهای فعلی در روش‌های پیش تصفیه مرسوم و غشایی را برای سیستم‌های اسمز معکوس ارائه و این روش‌ها را از نظر کارایی، هزینه‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار داده است. همچنین اشکالات عمده روش‌های مرسوم پیش تصفیه ارائه شدند. ضرورت استفاده از روش‌های نوین غشایی از جمله میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون و توسعه آنها از نظر مواد غشایی غیرآلی (سرامیکی) بیان شد. همچنین سیستم‌های هیبریدی که شامل ترکیب روش‌های غشایی و مرسوم می‌باشند به دلیل کارایی بالا برای پیش تصفیه سیستم‌های اسمز معکوس پیشنهاد شدند.

واژگان کلیدی: اسمز معکوس، پیش تصفیه، سیستم‌های هیبریدی، روش‌های غشایی.

مقدمه

تاریخچه

جمعیت جهان همه‌روزه در حال افزایش و سطح زندگی در حال ارتقاء است. این امر باعث تقاضای بیشتر و افزایش مصرف آب می‌گردد. منابع آب زیادی در طبیعت وجود دارد که حدود هفتاد درصد از سطح زمین را پوشانده است. پیش بینی محققان دانشگاه کلرادو، حاکی از این است که ذخایر آب شیرین جهان هر سال کاهش می‌یابد و تا ۵۴ سال دیگر نیمی از جمعیت جهان با مشکل کمبود آب شیرین مواجه خواهند بود. مطالعات نشان می‌دهد اکنون یک سوم جمعیت دنیا در نقاطی زندگی میکنند که آب کافی ندارند. مجمع عمومی سازمان ملل متحد یادآور میشود، نیمی از مردم جهان سوم حتی به آب قابل شرب دسترسی ندارند. طبق گفته یونیسف، تقریباً ۵۲۲۲ کودک هر روز به دلیل استفاده از آب ناسالم می‌میرند [۱]. کشورهای عربی حوزه خلیج-فارس تقریباً فاقد رودهای دائمی می‌باشد و نیازهای آبی عمدتاً از طریق چشمه‌ها، چاه‌ها و قنات برآورد می‌شود. درآمدهای نفتی در این کشورها به آنها این امکان را می‌دهد تا نیازهای خود را از طریق شیرین‌سازی آب رفع کنند. واحدهای نمک‌زدایی در مقیاس بزرگ برای اولین بار در خاورمیانه در دهه ۱۹۵۰ نصب شدند [۲]. تا سال ۲۰۱۹ تعداد تخمینی ۱۵۹۰۶ کارخانه آب شیرین کن در ۱۷۷ کشور جهان با ظرفیت کل آب شیرین‌کن حدود ۹۵/۳۵ میلیون مترمکعب در روز (۳۴/۸۱ میلیارد مترمکعب در سال) فعالیت داشتند [۳]. آب دریا منبع نامحدودی از آب برای فرآیندهای نمک‌زدایی فراهم می‌کند. دومین منبع بالقوه آب شور است که عمدتاً از منابع زیرزمینی در بسیاری از مناطق تامین می‌شود. میانگین نمک آب دریا ۳۵۰۰۰ میلی گرم در لیتر است (محدوده: ۲۴۰۰۰ تا ۴۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر بسته به مکان). سازمان بهداشت جهانی برای خوش طعم بودن، شوری کمتر از ۶۰۰ میلی گرم در لیتر را برای آب آشامیدنی توصیه می‌کند [۴]. در ادامه به بررسی اهمیت شیرین‌سازی آب و انواع روش‌های آن پرداخته می‌شود.

شیرین‌سازی آب و روش‌های آن

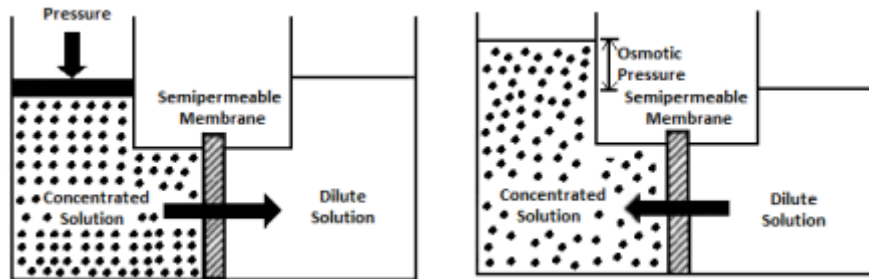
یکی از امیدوارکننده‌ترین راه‌ها برای غلبه بر کمبود آب، نمک‌زدایی است. نمک‌زدایی به عنوان فرآیند حذف نمک‌ها و مواد معدنی محلول از آب شور برای تولید آب آشامیدنی تعریف می‌شود. فرآیندهای شیرین‌سازی آب به دو دسته کلی فرآیندهای تقطیر و غشایی تقسیم بندی می‌شوند. البته روش‌هایی مانند، خلاء طبیعی، نمک‌زدایی جذبی، تقطیر غشایی (MD) و اسمز مستقیم (FO) در حال توسعه می‌باشند [۵]. فرآیندهای کلی تقطیر شامل روش‌های MSF^1 , MED^2 می‌باشند. که در این نوع فرآیندها تغییر فاز مایع با استفاده از حرارت مبنای کار می‌باشد. فرآیندهای غشایی شامل اسمز معکوس^۳ و الکترودیالیز است. اسمز معکوس اقتصادی‌ترین روش شیرین‌سازی آب است. کشورهای غربی و توسعه یافته سیستم‌های RO را به دلیل مصرف انرژی کارآمد آن ترجیح می‌دهند، در حالی که کشورهای خاورمیانه و خلیج‌فارس سیستم‌های MSF و MED را به دلیل منبع فراوان نفت در دسترس ترجیح می‌دهند. بزرگترین کارخانه آب شیرین کن رأس‌الخیر در عربستان سعودی است که از اواخر سال ۲۰۱۴ شروع به کار کرد. این کارخانه با اجرای هر دو فناوری MSF و RO روزانه حدود ۷۲۸۰۰۰ مترمکعب آب شیرین تولید می‌کند [۶]. فرآیند اسمز معکوس اگرچه قدمت کمتری نسبت به فرآیندهای حرارتی شیرین‌سازی آب دریا دارد ولی امروزه به عنوان اقتصادی‌ترین روش شیرین‌سازی آب دریا به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. RO یک فناوری نمک‌زدایی است که بر پایه غشاهای نیمه تراوا است که لایه‌های خاصی هستند که فقط به مولکول‌های انتخاب شده اجازه عبور می‌دهند [۷]. فرآیند اسمز یک فرآیند طبیعی است که در آن درحالی که یک غشای نیمه تراوا (قابل نفوذ به حلال اما نه به محلول) در وسط دو محفظه قرار می‌گیرد، که یکی حاوی حلال خالص و دیگری حاوی محلول (حلال به اضافه یک املاح) می‌باشد، حلال از روی غشا نفوذ می‌کند و به سمت محلول می‌رود، که این پدیده اسمز نامیده می‌شود، و به این دلیل رخ می‌دهد که سیستم به دنبال تعادل ترمودینامیکی است. پتانسیل شیمیایی حلال خالص بزرگتر از حلال در محلول است، بنابراین حلال به سمت محلول جریان می‌یابد تا به تعادل برسد. هنگامی

1 multiple effect distillation

2 multi-stage flash

3 reverse osmosis(RO)

که فشاری بزرگتر از فشار اسمزی به قسمت محلول تحمیل می‌شود و پتانسیل شیمیایی را افزایش می‌دهد، جریان حلال از قسمت محلول به قسمت حلال خالص بر می‌گردد. این فرآیند "اسمز معکوس" یا RO نامیده می‌شود. شماتیکی از فرآیند اسمز و اسمز معکوس در شکل ۱ نشان داده شده است [۸].



شکل ۱. شماتیکی از فرآیند اسمز و اسمز معکوس [۸]

با اینکه سیستم‌های RO از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای شیرین‌سازی آب می‌باشند اما رسوب‌گذاری در این سیستم‌ها از جمله چالش‌ها و محدودیت‌های آنها می‌باشد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها مشخصات آب خوراک ورودی به سیستم‌های اسمز معکوس باید کنترل شود که از جمله این مشخصات شاخص دانسیته ذرات SDI^4 می‌باشد. معمولاً SDI زیر ۳ بهترین عملکرد را می‌تواند برای سیستم‌های RO فراهم کند. برای رسیدن به این مشخصات مدنظر برای سیستم‌های RO و کنترل رسوب‌گذاری‌های RO روش‌های پیش‌تصفیه معرفی شدند. از جمله روش‌های پیش‌تصفیه، روش‌های مرسوم و روش‌های نوین غشایی می‌باشند. اما با توجه به اینکه این روش‌ها نتوانستند به تنهایی نیازهای سیستم‌های RO را برآورده کنند روش‌های هیبریدی که ترکیبی از روش‌های مرسوم و غشایی می‌باشند نیز معرفی شده‌اند که به دلیل ترکیب دو روش پیش‌تصفیه این سیستم‌های هیبریدی از کارایی و راندمان بالایی برخوردار می‌باشند. مطالعات زیادی ثابت کرده‌اند که ناکارآمدی اصلی در سیستم‌های RO به دلیل پیش‌تصفیه نامناسب خوراک می‌باشد [۹]. بنابراین، یک بررسی جامع در این حوزه ضروری است. تاکنون مطالعات بسیاری در مورد سیستم‌های پیش‌تصفیه در حالت‌های مستقل و یا سیستم‌های هیبریدی انجام شده است. [۱۰]. اما مطالعات بسیار نادری در زمینه سیستم‌های هیبریدی و همچنین مقایسه سیستم‌های مرسوم و غشایی از لحاظ مسائل زیست‌محیطی و حتی اقتصادی وجود دارد. بنابراین در این مقاله، مروری بر روش‌های پیش‌تصفیه مرسوم و غشایی انجام شده و همچنین این روش‌ها از نظر مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین کارایی و عملکرد مورد مقایسه قرار گرفتند. و در ادامه سیستم‌های هیبریدی به عنوان روش‌هایی با کارایی بالا برای تامین نیازهای سیستم‌های RO ارائه و مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱- مقادیر SDI و تاثیرات آن در سیستم اسمز معکوس

$SDI < 1$	می‌تواند چندین سال بدون رسوب کار کند
$SDI < 3$	هر چند ماه نیاز به تمیز کردن دارد
$SDI 3-5$	گرفتگی شدید و نیاز به تمیز کردن مکرر
$SDI > 5$	غیر قابل قبول است و نیاز به پیش‌تصفیه دارد

شاخص ارزیابی آب خوراک فرآیند اسمز معکوس

رسوب کلوئیدی (fouling Colloidal) در سیستم‌های اسمز معکوس می‌تواند بصورت جدی بازدهی این سیستم‌ها را پایین آورد. اولین نشان رسوب کلوئیدی ایجاد افزایش اختلاف فشار می‌باشد. منابع این ذرات یا کلوئیدها در آب ورودی به RO متفاوت بوده و اغلب شامل باکتری‌ها، گل و مواد آلی، کلوئیدهای سیلیسی و تولیدات ناشی از خوردگی آهن می‌باشد. چندین روش و شاخص برای پیش‌بینی تمایل رسوب کلوئیدی در آب خوراک پیشنهاد شده است، این روش‌ها شامل سنجش کدورت، شاخص

⁴ Silt density index

دانسیتته ذرات SDI و شاخص رسوب اصلاحی^۵ می‌باشند [۱۱]. شاخص SDI بیشترین کاربرد را برای شناسایی میزان رسوب در آب خوراک را شامل می‌باشد. شاخص دانسیته ذرات یک روش مفید برای نمایش مقدار ذرات جامد معلق بسیار ریز در آب بوده که تمایل به ایجاد رسوب در سیستم های RO را هم دارند. SDI بر اساس سرعت گرفتگی آب پس از عبور از روی فیلتر با اندازه حفرات $0.45\mu\text{m}$ با فشار ثابت محاسبه می‌شود. این شاخص بر اساس رابطه (۲-۱) محاسبه می‌شود:

$$SDI = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\%}{t_f} = \frac{\%p}{t_f} \quad (2-1)$$

که در آن SDI شاخص چگالی سیلت (درصد/دقیقه)، t_f زمان تصفیه سپری شده (min)، t_1 زمان اولیه مورد نیاز برای به دست آوردن نمونه اولیه (s) و t_2 زمان مورد نیاز برای بدست آوردن نمونه دوم یکسان پس از ۱۵ دقیقه یا کمتر است. اگر نسبت اتصال (%p) از ۷۵٪ بیشتر باشد، باید دوره کوتاه‌تری (t_f) در نظر گرفت.

پیش تصفیه اسمز معکوس

چالش‌های رسوب غشایی RO باعث اهمیت پیدا کردن پیش تصفیه RO میشوند. روش‌های پیش تصفیه می‌توانند آلاینده‌ها و رسوبات آلی و معدنی را با رد انتخابی قبل از رسیدن به RO کاهش دهند. طبق تعریف، هدف از سیستم پیش تصفیه حذف مواد رسوب از منبع آب و ارائه آبی به کیفیت قابل قبول جهت نمک‌زدایی کارآمد است. خرابی‌ها در تاسیسات RO آب دریا در خاورمیانه، منجر به انجام تحقیقات قابل توجهی در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، به ویژه در زمینه پیش تصفیه شد. این تحقیقات منجر به تغییرات اساسی در طراحی و فناوری‌های مورد استفاده در پیش تصفیه شدند که رشد فوق العاده صنعت نمک‌زدایی را در دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۰ تسهیل کرد. سیستم‌های پیش تصفیه RO به طور کلی شامل یک سری عملیات می‌باشد که هر یک از خطرات رسوب مورد انتظار را برطرف می‌کند [۱۲]. پیش تصفیه در RO بسیار مهم است زیرا مستقیماً بر رسوب غشاهای RO تأثیر می‌گذارد. رسوب گیری، تجمع رسوبات نامطلوب در سطح غشا یا در داخل ساختار غشا می‌باشد که این رسوب گیری غشا باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری به دلیل تمیز کردن، فشار بالاتر مورد نیاز برای حفظ شار آب و کاهش طول عمر غشا می‌شود [۱۳]. یک سیستم پیش تصفیه که به درستی طراحی شده و کار می‌کند، به طور ایده آل باعث می‌شود که کارخانه‌های RO برای مدت زمان قابل توجهی (مثلاً ۶ ماه یا بیشتر) بدون تمیز کردن کار کنند و به افزایش عمر مفید غشا کمک می‌کند. برعکس، چالش برانگیز بودن آب دریا در ترکیب با پیش تصفیه ناکافی منجر به ایجاد نواقصی در عملکرد سیستم RO می‌شود. انتخاب بهترین تکنولوژی پیش تصفیه همیشه ساده نیست، زیرا چندین فاکتور از جمله کیفیت آب خوراک، کیفیت آب تصفیه شده، سهولت بهره برداری، مشخصات طراحی، هزینه‌های ساخت و عملیات باید در نظر گرفته شوند [۱۴]. علاوه بر نمک‌های محلول، آب دریا حاوی چندین رسوب مختلف از جمله جامدات معلق، کلئیدها، میکروارگانیزم‌ها و انواع مواد آلی است که همگی می‌توانند عملکرد غشای RO را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند و هزینه‌ها را افزایش دهند [۱۵]. مقدار کدورت کمتر از ۰/۲ واحد کدورت نفلومتری (NTU) و شاخص چگالی سیلت (SDI) کمتر از ۳ نشانه خوبی از سطوح پایین جامدات معلق است، و این مقادیر اغلب برای RO نظارت و کنترل می‌شوند. SDI نشان دهنده مقدار ذرات زیر میکرونی موجود در آب است در حالی که کدورت معیاری برای شفافیت آب است [۱۶]. تکنیک‌های رایج پیش تصفیه مرسوم عبارتند از انعقاد و لخته‌سازی، اسیدی شدن، ضد عفونی، شناور سازی هوای محلول (DAF)، حذف رسوب، حذف سختی توسط آهک، تابش UV، حذف ذرات توسط صافی درشت و فیلتراسیون. با این حال در سال‌های اخیر روش‌های غیرمعارف مبتنی بر فرآیندهای غشایی به دلیل وجود راندمان جداسازی برتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۷]. فرآیندهای غشایی مختلفی برای جداسازی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF) و نانوفیلتراسیون (NF) می‌باشند.

⁵ Index Fouling Modified (MFI)

روش‌های مرسوم پیش تصفیه RO

فرآیند پیش تصفیه مرسوم به دو صورت پیش تصفیه فیزیکی و شیمیایی طبقه بندی می‌شود. فرآیند فیزیکی غربالگری مکانیکی اولیه ذرات معلق را از طریق فیلترها انجام می‌دهد و فرآیند شیمیایی شامل افزودن مواد شیمیایی از جمله، منعقد کننده‌ها و مواد ضد عفونی کننده است. تا به امروز، بسیاری از روش‌های پیش تصفیه RO معمولی و غشایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله روش‌های مرسوم پیش تصفیه اسمز معکوس شامل انعقاد و لخته سازی، اسیدی شدن، ضد عفونی، شناور سازی هوای محلول (DAF)، حذف رسوب، حذف سختی توسط آهک، تابش UV، حذف ذرات توسط صافی درشت و فیلتراسیون می‌باشد [۱۸]. که در ادامه به بررسی تعدادی از این روش‌ها و مقایسه آنها پرداخته می‌شود.

انعقاد و لخته سازی

ذرات معلق که بسیار کوچک هستند را نمی‌توان تنها از طریق رسوب گذاری گرانشی حذف کرد. بنابراین، مواد شیمیایی منعقد کننده اغلب برای افزایش حذف ذرات و مواد آلی اضافه می‌شوند. نقش آنها در کنار هم قرار دادن ذرات کوچک است که می‌تواند ذرات سنگین تر و بزرگتر را برای حذف آسان تر از آب خوراک توسط ته نشینی یا فیلتراسیون تشکیل دهند. مکانیسم عمل منعقد کننده‌ها معمولاً شامل کاهش یا حذف بارها از سطح کلوئیدها، کاهش فعل و انفعالات دافعه و اجازه دادن به ذرات برای اتصال به یکدیگر است. نمونه‌هایی از منعقد کننده‌های رایج عبارتند از سولفات آلومینیوم (آلوم)، سولفات آهن و کلرید آهن است [۱۹]. طباطبایی و همکاران اثر انعقاد بر ماده آلی جلبکی (AOM) در آب دریا را با استفاده از کلرید آهن، با دوز موثر $1 < 1$ میلی گرم آهن در لیتر، در ترکیب با اولترافیلتراسیون مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که پتانسیل رسوب غشاهای به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و یک مزیت دیگر کاهش تراکم پذیری لایه کیک / ژل تشکیل شده در سطح غشای اولترافیلتراسیون بود [۲۰].

فیلتراسیون

لخته سازی انعقادی اغلب قادر به حذف ۱۰۰٪ ناخالصی‌های معلق نیست. در نتیجه فیلتراسیون می‌تواند در حذف ناخالصی‌های باقیمانده با نفوذ به سمت پایین از طریق بستری از مواد متخلخل و دانه‌ای، مانند فیلتراسیون دانه‌ای^۷ موثر باشد. فیلترهای معمولی با بستر بسته بندی شده با استفاده از محیط‌های دانه‌ای مختلف، مانند شن، ماسه، خاک دیاتومه، اسفنج، پنبه، کربن فعال^۸ و آنتراسیت با اندازه‌های مختلف، این مزیت را دارند که می‌توانند از طریق شستشوی معکوس هیدرولیک احیا شوند [۲۱، ۲۲]. در سال ۲۰۲۳ براباخ و همکارانش عملکرد پیش تصفیه کارخانه آب شیرین کن بنی صف را بررسی کردند. این کارخانه از چندین مرحله پیش تصفیه برای آب دریا استفاده می‌کرد که مرحله اول شامل انعقاد با کلرید آهن بود سپس آب منعقد شده وارد فیلتر شنی که متشکل از دولایه ماسه و سیلیس بود عبور کرد این فیلتر دولایه قابلیت ارائه $SDI < 4$ را فراهم کرد. همچنین در مرحله بعدی آب خروجی از فیلتر شنی وارد فیلتر آنتراسیت برای کاهش کدورت و SDI شد. نتایج حاصله نشان داد که این مراحل پیش تصفیه مورد استفاده در کارخانه بنی صف با اینکه توانایی ارائه استانداردهای مورد نظر برای RO را دارد اما همچنان رسوب و گرفتگی بر روی غشای RO مشاهده می‌شود که نیازمند انجام پیش تصفیه‌های دیگر از جمله پیش تصفیه‌های غشایی می‌باشد. [۲۳].

شناور سازی هوای محلول

DAF^۹ جایگزینی برای رسوب گذاری معمولی است که در آن هوای تحت فشار به آب خوراک وارد می‌شود که باعث حذف ذرات معلق آبگریز از آب می‌شود [۱۹]. DAF به‌ویژه در حذف ذرات با چگالی کم مانند جلبک‌ها و مواد آلی طبیعی که با رسوب گذاری معمولی از بین نمی‌روند، مؤثر است [۲۴، ۲۵]. از سال ۲۰۰۳، DAF توانایی خود را در حذف درصد بالایی از NOM^{۱۰} و حدود ۹۰٪-۹۹٪ از سلول‌های جلبک را نشان داده است، در مقابل آن رسوب گذاری توانایی حذف تنها ۶۰٪-۹۰٪ را دارد. یکی

⁶ Algal organic matter

⁷ Granular media filtration (GMF)

⁸ Activated carbon (AC)

⁹ Dissolved air flotation

¹⁰ Natural organic matter (NOM)

از کاربردهای مهم DAF حذف جلبک‌ها می‌باشد. زیرا جلبک‌ها از طریق فرآیندهای رسوب‌گذاری معمولی به سختی حذف می‌شوند و می‌توانند منجر به مسدود شدن فیلترهای دانه‌ای و عمر کوتاه فیلتر شوند [۲۶]. در مطالعه‌ای بر روی آب خلیج فارس که پیش تصفیه شامل شناورسازی هوای محلول، فیلتراسیون مستقیم یا اولترافیلتراسیون بود نتایج خوبی از نظر کاهش کدورت و حذف جلبک‌ها حاصل شد. و این روند پیش تصفیه توانست آبی با کیفیت قابل قبول با SDI زیر ۳ را فراهم کند [۲۱].

ضد عفونی

گندزدایی یکی دیگر از روش‌های مهم پیش تصفیه است که برای از بین بردن میکروارگانیسم‌هایی که بیماری‌های ویروسی ایجاد می‌کنند از آب و حذف رسوب زیستی استفاده می‌شود. انواع مختلفی از روش‌های ضد عفونی وجود دارد که شامل روش‌های شیمیایی، الکتریکی، اولتراسونیک، اشعه ماورا بنفش و حرارتی است. در میان آنها محبوب‌ترینشان روش‌های شیمیایی هستند که شامل عوامل شیمیایی مانند ازن و گونه‌های کلر مانند هیپوکلریت، کلروآمین‌ها و دی‌اکسید کلر هستند. با این حال، سایر روش‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی مانند اولتراسوند و اشعه ماورا بنفش به دلیل اثربخشی برتر در از بین بردن و کلوخزدایی باکتری‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند [۱۷]. در کارخانه SWRO فوجیره که در آن از دوزهای بالای متغیر تا ۱۴ ppm کلر آزاد بسته به نوسانات در کیفیت آب خوراک و میزان SDI آب خوراک استفاده شد دو نقطه تزریق مختلف برای تنظیم دوز استفاده شد، یکی در دهانه ورودی و دیگری در محفظه انعقاد که این فرآیند کلر زنی به بهبود حذف میکروارگانیسم‌ها کمک کرد [۲۷].

مشکلات روش‌های مرسوم پیش تصفیه RO و راه حل‌های پیشنهادی

امروزه، روش‌های پیش تصفیه مرسوم RO به طور گسترده در کارخانه‌های متعدد RO در سراسر جهان رواج دارد. این روش‌ها ممکن است آب خوراک قابل قبولی را برای سیستم‌های RO در شرایطی که کیفیت آب خوراک ثابت می‌باشد ارائه دهند. با این حال، اغلب اینطور نیست و نوسانات در کیفیت آب ورودی می‌تواند فرآیندهای تصفیه و پیش تصفیه را به شدت مختل کند. آب خوراک ممکن است به ویژه در فصل طوفان از کیفیت پایینی برخوردار باشد بنابراین، واحدهای پیش تصفیه مرسوم ممکن است نوساناتی در کیفیت آب خوراک غشای RO ایجاد کنند و باعث مشکلاتی در سیستم‌های پیش تصفیه شوند که از جمله این مشکلات تامین آب با $SDI < 3$ می‌باشد. بنابراین سیستم‌های غشایی برای پیش تصفیه ارائه شدند که ترکیب این روش‌های غشایی با روش‌های مرسوم که با عنوان سیستم‌های هیبریدی نیز شناخته می‌شوند توانستند در ارائه آب خوراک مطلوب برای غشاهای RO کارآمد باشند. در ادامه بررسی روش‌های غشایی و این سیستم‌های هیبریدی پرداخته می‌شود [۲۸، ۲۹].

پیش تصفیه غشایی

فرآیندهای پیش تصفیه غشایی در دهه‌های گذشته اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. این روند رو به افزایش در تحقیقات و نصب در نیروگاه‌های RO به دلیل کاستی‌های مختلف مرتبط با تکنیک‌های پیش تصفیه مرسوم است. همان‌طور که گفته شد بیشتر اوقات، کلوئیدها و ذرات معلق از فیلترهای معمولی عبور می‌کنند و به آسیب غشای RO کمک می‌کنند [۳۰]. بنابراین استفاده از غشاهای با اندازه منافذ UF، MF و NF برای پیش تصفیه RO مناسب است [۳۱]. هر سه فرآیند پیش تصفیه غشایی RO مزایای بی‌شماری را نسبت به تکنیک‌های پیش تصفیه مرسوم دارند که در جدول زیر به آنها اشاره شده است. پیش تصفیه غشایی می‌تواند آب تصفیه شده با $SDI < 2$ را فراهم کند و می‌تواند کدورت را به کمتر از 0.05 NTU کاهش دهد [۳۲]. در بخش‌های بعدی پیشرفت‌های اخیر در این سه فرآیند پیش تصفیه غشایی را با توجه به مواد غشایی مرور خواهیم کرد.

جدول ۲- مقایسه روش‌های مرسوم و روش‌های غشایی در پیش تصفیه اسمز معکوس [۲۸، ۳۳-۳۵]

روش‌های مرسوم	روش‌های غشایی	
در رقابت با تکنیک‌های غشایی	بیشتر از روش‌های مرسوم با این حال به دلیل پیشرفت هزینه‌ها نسبتاً کم می‌شود.	هزینه سرمایه‌گذاری
کم	زیاد	نیازهای انرژی
زیاد به دلیل استفاده از مواد شیمیایی	کم	هزینه‌های شیمیایی

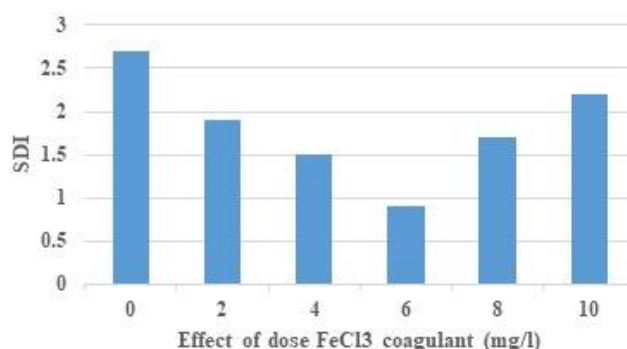
هزینه های RO	بالا از آنجایی که RO در شار کمتر عمل میکند.	شار بالاتر ممکن است و در نتیجه هزینه کمتری دارد.
هزینه های عملیاتی RO	بالا، پتانسیل رسوب دهی بیشتر	کم، عمر غشا طولانی تری انتظار میرود.
متوسط شار RO	14 LMH	۱۸ LMH

MF می تواند به طور موثر جامدات معلق و باکتری های ≤ 0.1 میکرومتر را حذف کند. یکی از مطالعات اولیه در مورد امکان سنجی MF به عنوان یک روش پیش تصفیه غشایی SWRO در سال ۱۹۹۷ انجام شد که متوجه شدند MF می تواند جایگزینی برای روش های پیش تصفیه مرسوم برای تامین آب با کیفیت خوب به واحد RO باشد. با این حال، این مطالعات اولیه همچنین بر نیاز به ترکیب MF با تکنیک های دیگر، مانند کلرزنی و صافی ها، برای کاهش تمایل رسوب زیستی اشاره کردند [۳۴]. اگرچه غشاهای MF برای دفع ذرات تا 0.1 میکرومتر انتخاب ایده آلی هستند، اما ممکن است در شرایطی که ذرات با اندازه منافذ بزرگتر از 0.1 میکرومتر به داخل ورودی وارد می شوند، شکست بخورند. این ذرات ممکن است منافذ غشا را مسدود کرده و باعث رسوب غیرقابل برگشت غشا شوند. بنابراین، قبل از هر عملیات اصلی، مطالعات آزمایشی مقایسه ای برای درک مناسب بودن نوع پیش تصفیه غشا ضروری می باشد. بر خلاف غشاهای MF، غشاهای UF به دلیل اندازه منافذ کوچکتر چنین مشکلاتی ندارند. در مقایسه با پیش تصفیه MF، UF به دلیل توانایی آن در دفع طیف گسترده ای از آلاینده ها مانند ویروس ها، مواد آلی معلق و باکتری ها، کاربردهای گسترده تری برای پیش تصفیه SWRO پیدا کرده است. مطالعات ثابت کرده اند که UF می تواند پتانسیل رسوب کمتر برای واحدهای RO ایجاد کند [۳۶]. فناوری های غشایی MF و UF به طور برجسته ای برای پیش تصفیه RO استفاده می شوند. با این حال، این فناوری ها معمولاً چالش بزرگی را برای آب خوراک با کیفیت پایین و آلوده به مواد آلی با وزن مولکولی کم ایجاد می کنند. علاوه بر این، کنترل پوسته پوسته شدن از طریق استفاده از MF و UF تا حدودی دشوار است، زیرا این فرآیندها در حذف نمک های معدنی شکست می خورند. NF به عنوان یک تکنیک پیش تصفیه غشایی امیدوارکننده برای غلبه بر کاستی های فناوری های MF و UF ظاهر شده است، تا جایی که می تواند حذف بالایی از نمک های آنیون چند ظرفیتی و مولکول های آلی با وزن مولکولی کم را برای غشاهای RO فراهم کند [۳۷]. NF هنگامی که قبل از پیش تصفیه RO استفاده می شود چندین مزیت را ارائه می دهد، که می تواند هزینه های عملیاتی و هزینه های تعمیر و نگهداری را با کاهش تعویض غشا RO و نیازهای تمیز کردن غشا RO کاهش دهد. با این حال، نیاز به هزینه سرمایه بالاتر و تمایلات رسوب غشایی باید هنگام طراحی عملیات پیش تصفیه بر اساس NF در نظر گرفته شود [۳۸]. در این میان غشاهای سرامیکی که ترکیبی ایده آل از استحکام و آبدوستی هستند توانستند در زمینه پیش تصفیه RO نتایج قابل قبولی را ارائه دهند. این غشاها خواص حرارتی عالی و پایداری شیمیایی بالایی دارند و می توانند فشارهای عملیاتی بالایی را تحمل کنند. پایداری حرارتی برتر آن ها می تواند سودمند باشد و به آن ها اجازه می دهد در طی تمیز کردن غشا در دمای بالای ۵۰۰ درجه سانتی گراد قرار بگیرند. یک مزیت اضافی دیگر، کنترل آسان پارامترهای فرآیند در طول ساخت است که منجر به کنترل اندازه منافذ و در نتیجه مقاومت بیشتر در برابر رسوب می شود [۳۹-۴۱]. در بیشتر موارد، یک سیستم هیبریدی متشکل از فرآیندهای پیش تصفیه غشایی و معمولی، بسته به کیفیت آب خوراک، مناسب ترین گزینه است. همچنین غشاهای UF به دلیل اندازه منافذ مناسب نسبت به غشاهای MF و هزینه های کمتر نسبت به غشاهای NF توانستند در ترکیب با روش های مرسوم در کاهش SDI به خوبی عمل کنند. هنگامی که روش های پیش تصفیه UF و MF در آزمایش هایی در سنگاپور مقایسه شدند، پس از پیش تصفیه UF، مقادیر SDI، بین ۲-۱ می بود در حالی که برای MF مقادیر SDI بین ۳-۲ در نوسان بود. با این وجود، درست مانند مورد MF، سیستم های هیبریدی که UF را با سایر تکنیک های پیش تصفیه مرسوم ادغام می کنند، در ارائه آب خوراک با SDI کمتر در مقایسه با واحدهای مستقل کارآمدتر هستند [۴۲].

سیستم های هیبریدی

سیستم های پیش تصفیه ترکیبی را می توان به عنوان ترکیبی از یک یا چند واحد پیش تصفیه معمولی با یک یا چند پیش تصفیه غشایی (MF، UF و NF) می باشد که یک گزینه مناسب و کارآمد برای پیش تصفیه RO هستند، این سیستم ها اغلب در کارخانه های تجاری SWRO استفاده می شوند. روش های پیش تصفیه مرسوم مانند DAF، انعقاد و کلرزنی برای ایجاد یک مانع آلاینده قبل از رسیدن آب به واحدهای غشایی استفاده می شود [۱۷]. UF به عنوان پرکاربردترین پیش تصفیه غشایی در سیستم-

های هیبریدی در نظر گرفته می‌شود. گلوکسترن و همکاران عملکرد غشای UF را در یک سیستم SWRO با روش هیبریدی در پیش تصفیه آب دریا آزمایش کردند. انعقاد، و کلرزی قبل از غشای UF اعمال شد. مقادیر SDI و کدورت به ترتیب از ۰/۸ تا ۳/۸ و ۰/۱ تا ۰/۲ NTU متغیر بودند [۴۳]. این نتایج از مطالعه تجربی انجام شده توسط کیم و همکاران انعقاد/لخته سازی را قبل از غشای DMF و UF اعمال کردند. نتایج نشان داد که مقدار SDI به ترتیب ۶ و ۲ بود [۴۴]. پارک و همکاران ترکیب فناوری DAF را با یک سیستم فیلتراسیون مبتنی بر غشا را مطالعه کردند. کارخانه نمک‌زدایی الشویخ در کویت مجهز به سیستم‌های DAF/UF توانست SDI < ۲ را برای آب خوراکی با SDI > ۳/۵ ارائه کند [۴۵]. در طول سال‌های گذشته غشاهای سرامیکی UF، MF و NF شاهد افزایش سریع تحقیقات بوده‌اند [۴۶]. دی و همکاران یک فیبر توخالی MF ۰/۱ میکرومتر را مطالعه کردند آب خوراک مورد استفاده آب دریای ساحلی عربستان با SDI حدود ۶ بود پس از استفاده از مازول غشایی مورد نظر شار ۳۷۰ LMH با SDI < ۲ دست آمد [۴۷]. حمد و همکاران یک مطالعه آزمایشی در کارخانه با استفاده از ورقه صاف، غشاهای یکپارچه آلومینا آبدوست تولید شده در شرکت METAWATER با اندازه منافذ حدود ۰/۱ میکرومتر گزارش کردند. غشاهای سرامیکی با موفقیت SDI_{۱۵} آب دریای سرخ را از ۶/۱ به ۲/۱ کاهش دادند، و همچنین مقادیر کدورت از ۰/۶ به ۰/۰۵ بهبود یافت. با این حال، مشاهده شد که افزایش قابل توجهی در TMP^{۱۱} پس از شستشوی معکوس مورد نیاز بود که به رسوب زیستی به دلیل وجود ذرات آگرو پلیمرهای شفاف چسبیده (TEP) نسبت داده شد که معمولاً در آب دریا فراوان هستند [۴۸]. همچنین طی مطالعاتی که توسط کینگ و همکاران انجام شد از یک غشای سرامیکی (Al₂O₃) میکروفیلتراسیون با اندازه حفرات ۰/۱ میکرومتر استفاده شد. عملکرد غشای سرامیکی با و بدون منعقد کننده از نظر کیفیت نفوذ و فشار گذرنده (TMP) مقایسه شد. پارامترهای مختلفی مانند کدورت، کربن آلی محلول (DOC)، UV_{۲۵۴}، SDI_{۱۵} (شاخص چگالی سیلت) و TMP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. شکل ۴ تاثیر دوز بهینه انعقاد بر SDI را نشان می‌دهد مشاهده شد که دوز بهینه ۶ mg/l منعقد کننده میزان SDI را به زیر ۱ رساند [۴۹].



شکل ۲- تاثیر دوز بهینه منعقد کننده بر میزان SDI [۴۹]

با توجه به کیفیت پایین آب دریا و نیاز به تولید آبی به کیفیت خوب از واحدهای پیش تصفیه RO برای جلوگیری از رسوب غشا RO، تحقیقات زیادی در زمینه فناوری‌های جدید، پیشرفته پیش تصفیه غشایی و روش‌های مرسوم فعال است. به عنوان مثال، برای کیفیت پایین خوراک، لخته سازی کامل و واحدهای ته نشینی ممکن است انتخاب مناسبی به نظر نرسد. در عوض، انعقاد درون خطی قبل از فیلتراسیون استفاده می‌شود که از طریق آن آب منعقد شده مستقیماً به سیستم فیلتراسیون غشایی وارد می‌شود. که این به نوبه خود می‌تواند یک پیش تصفیه مناسب برای سیستم‌های RO باشد. [۵۰]. علاوه بر این، سیستم‌های هیبریدی که در آن پیش تصفیه غشایی با واحدهای معمولی همراه است، به عنوان یک گزینه کارآمدتر ظاهر شده‌اند که در آن قدرت یک واحد با واحد دیگر ترکیب می‌شود. با این وجود، چنین سیستم‌هایی هنوز به آزمایش‌های بیشتری برای تجاری‌سازی نیاز دارند.

¹¹ Trans-membrane pressure

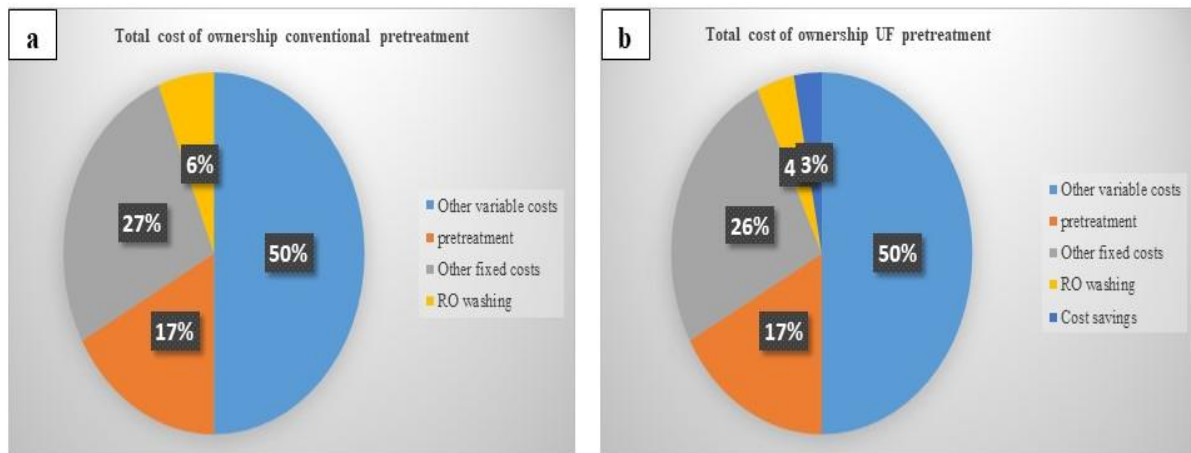
جنبه‌های اقتصادی پیش تصفیه RO

علاوه بر کمبود آب، بحران فزاینده انرژی یکی دیگر از نگرانی‌های جهانی است که باید مورد توجه قرار گیرد. آب و انرژی معمولاً در رابطه نزدیک با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند، زیرا واحدهای نمک‌زدایی معمولاً از منابع انرژی تجدیدپذیر یا بازیابی انرژی به منظور کاهش نیازهای انرژی و کاهش هزینه‌های کلی آب شیرین‌شده استفاده می‌کنند. [۵۱]. معمولاً هزینه‌های کار و نگهداری برای هر دو روش پیش تصفیه مشابه است، اما تمیز کردن و تعویض غشا هزینه اضافی برای سیستم‌های غشایی می‌باشد. با این حال، چون در عملیات پیش تصفیه غشایی سیستم RO در شار بالاتری کار می‌کند این هزینه‌های بالای سیستم‌های غشایی جبران می‌شود. اگرچه هزینه سرمایه UF/MF حدود ۲۵ درصد بیشتر از هزینه‌های معمولی است، اما هزینه طول عمر و چرخه بازیابی آنها قابل مقایسه است [۴]. گلوکسترن و پرل در یک مطالعه سیستم‌های پیش تصفیه غشایی معمولی و UF را با یکدیگر مقایسه کردند برای یک کارخانه SWRO بر اساس عملکرد یک واحد آزمایشی آب دریای اشدود و سایر داده‌های اقتصادی استفاده کردند. کل سرمایه گذاری در ۹۰۰۰۰ مترمکعب در روز برای واحد SWRO برای فیلتراسیون معمولی و UF به ترتیب ۶۴/۴ میلیون دلار و ۶۷/۳ میلیون دلار برآورد شد (جدول ۷)، برای فیلتراسیون معمولی و پیش تصفیه UF از جدول ۷، مشهود است که هزینه‌های سرمایه گذاری برای پیش تصفیه UF بسیار بیشتر از تصفیه معمولی است [۵۲]. کاردونا و همکاران مطالعه‌ای گزارش کردند که به موجب آن هزینه سرمایه برای پیش تصفیه معمولی در مقایسه با UF کمتر بود. آنها از یک سیستم RO دو مرحله‌ای همراه با UF و یک سیستم RO تک مرحله‌ای همراه با روش پیش تصفیه مرسوم استفاده کردند. اگرچه هزینه سیستم UF بالاتر بود، اما هزینه بالاتر معمولاً با مزایای روش پیش تصفیه مبتنی بر غشا مانند کاهش هزینه‌های شیمیایی جبران می‌شود. اغلب روش UF باعث کاهش جایگزینی غشای RO و هزینه‌های کارگری می‌شود که هزینه کل کارخانه را ۶ تا ۷ درصد کاهش می‌دهد. با این وجود، با افزایش تحقیقات بر روی مواد غشایی جدید، انتظار می‌رود هزینه کلی فناوری غشا به دلیل طول عمر بیشتر غشا، افزایش گزینش پذیری و افزایش شار کاهش یابد [۵۴]. انتخاب روش پیش تصفیه مستقیماً بر عملکرد کلی کارخانه RO و هزینه‌های مربوطه تأثیر می‌گذارد. شکل ۵ اجزای TCO^{۱۲} را برای روش‌های پیش تصفیه معمولی و غشایی مقایسه می‌کند. علاوه بر تمیز کردن و پیش تصفیه RO، سایر هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت مانند استهلاک تجهیزات و هزینه‌های متغیر مانند انرژی است. با استفاده از فناوری UF، میزان ۱٪ از هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری و ۲٪ از هزینه‌های شست و شوی RO کاهش یافته در نتیجه ۳٪ از کل هزینه‌ها TCO را می‌توان با فناوری UF کاهش داد یا اینکه ذخیره کرد.

جدول ۳- مقایسه هزینه‌های سرمایه گذاری پیش تصفیه مرسوم و غشایی [۵۲]

روش فیلتراسیون	پیش تصفیه مرسوم		UF		UF در مقابل پیش تصفیه مرسوم	
	M \$	\$/m ³ -day	M \$	\$/m ³ -day	M \$	%
هزینه‌های زیر ساخت	۱۵/۵	۱۷۲	۱۵	۱۶۷	-۰/۵	-۳/۲٪
پیش تصفیه	۹	۱۰۰	۱۶/۶	۱۸۴	۷/۶	+۸۴/۴٪
سیستم RO	۳۹/۹	۴۴۳	۳۵/۷	۲۹۷	-۴/۲	-۱۰/۵٪
هزینه‌های کل	۶۴/۴	۷۱۶	۶۷/۳	۷۴۸	۴/۱	+4.5%

¹² Total cost of ownership



شکل ۳- تقسیم بندی هزینه‌های کل در برگرفته برای روش پیش تصفیه مرسوم و غشایی [۱۵۵].

نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله چندین روش پیش تصفیه مرسوم از جمله انعقاد و لخته سازی، فیلتراسیون، شناورسازی هوای محلول، گندزدایی و آنتی اسکالانت‌ها بررسی شده است. اما این روش‌ها محدودیت‌های متعددی را برای آب‌های خوراک بسیار آلوده ارائه می‌کنند و بنابراین اغلب یک سیستم ترکیبی متشکل از سیستم پیش تصفیه غشایی و معمولی، ضروری است. همچنین در این مقاله تکنیک‌های پیش تصفیه غشایی MF، UF و NF را نیز بررسی شد. اگرچه روش‌های پیش تصفیه غشایی از هزینه‌های بالایی برخوردارند، اما هزینه‌های تولید آب به دلیل بهبود کیفیت آب حاصله و در نتیجه باری که بر روی سیستم RO ایجاد می‌شود، کمتر از سیستم‌های پیش تصفیه معمولی است. هزینه‌های سرمایه گذاری روی سیستم‌های پیش تصفیه مرسوم کمتر هستند، اما مصرف مواد شیمیایی آنها بیشتر است، که باعث افزایش هزینه‌های تمیز کردن و جایگزینی غشای RO می‌شود. کیفیت آب تولید شده با استفاده از تکنیک‌های پیش تصفیه مرسوم نیز پایین‌تر می‌باشد. در این مقاله، توصیه‌هایی برای بهبود عملکرد روش‌های پیش تصفیه مرسوم و همچنین تاکید بر ادغام این روش‌ها با روش‌های غشایی که به عنوان سیستم‌های هیبریدی شناخته می‌شوند برای کارایی بیشتر پیش تصفیه سیستم‌های RO ارائه شد. در حالت کلی بررسی نتایج و مطالعات نشان داد که سیستم‌های هیبریدی می‌توانند عملکرد مناسبی در پیش تصفیه سیستم‌های RO و تامین آب خوراک مناسب برای این سیستم‌ها باشند.

منابع و مراجع

- [1] N. A. Ahmad, P. S. Goh, L. T. Yogarathinam, A. K. Zulhairun, and A. F. Ismail, "Current advances in membrane technologies for produced water desalination," *Desalination*, vol. 493, p. 114643, 2020.
- [2] A. Swain, *Understanding emerging security challenges: threats and opportunities*. Routledge, 2013.
- [3] H. Nassrullah, S. F. Anis, R. Hashaikeh, and N. Hilal, "Energy for desalination: A state-of-the-art review," *Desalination*, vol. 491, p. 114569, 2020.
- [4] B. P. Walsh, S. N. Murray, and D. O'Sullivan, "The water energy nexus, an ISO50001 water case study and the need for a water value system," *Water Resources and Industry*, vol. 10, pp. 15-28, 2015.
- [5] A. Alkaisi, R. Mossad, and A. Sharifian-Barforoush, "A review of the water desalination systems integrated with renewable energy," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 268-274, 2017.
- [6] S.-M. Cheong, G.-W. Choi, and H.-S. Lee, "Barriers and solutions to smart water grid development," *Environmental management*, vol. 57, pp. 509-515, 2016.
- [7] D. Curto, V. Franzitta, and A. Guercio, "A review of the water desalination technologies," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 670, 2021.
- [8] D. Ghernaout, "Reverse Osmosis Process Membranes Modeling—A Historical Overview," *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 112-122, 2017.
- [9] B. Chakravorty and A. Layson, "Ideal feed pretreatment for reverse osmosis by continuous microfiltration," *Desalination*, vol. 110, no. 1-2, pp. 143-149, 1997.
- [10] R. Valavala, J. Sohn, J. Han, N. Her, and Y. Yoon, "Pretreatment in reverse osmosis seawater desalination: a short review," *Environmental Engineering Research*, vol. 16, no. 4, pp. 205-212, 2011.
- [11] A. Alhadidi, A. Kemperman, B. Blankert, J. Schippers, M. Wessling, and W. Van der Meer, "Silt density index and modified fouling index relation, and effect of pressure, temperature and membrane resistance," *Desalination*, vol. 273, no. 1, pp. 48-56, 2011.
- [12] L. Henthorne and B. Boysen, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment," *Desalination*, vol. 356, pp. 129-139, 2015.
- [13] L. Malaeb and G. M. Ayoub, "Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review," *Desalination*, vol. 267, no. 1, pp. 1-8, 2011.
- [14] L. Henthorne, *Evaluation of Membrane Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis Desalination*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service ..., 2007.
- [15] H. Churman, L. Henthorne, and M. Dixon, "Harmful Algae Blooms and Desalination: An Algae Cell'S Journey From Sea to SWRO," *International Desalination Association: Topsfield, MA, USA*, pp. 2-5, 2015.
- [16] P. Goh, W. Lau, M. Othman, and A. Ismail, "Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies," *Desalination*, vol. 425, pp. 130-155, 2018.
- [17] S. F. Anis, R. Hashaikeh, and N. Hilal, "Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review," *Desalination*, vol. 452, pp. 159-195, 2019.
- [18] T. Al-Sarkal and H. A. Arafat, "Ultrafiltration versus sedimentation-based pretreatment in Fujairah-1 RO plant: Environmental impact study," *Desalination*, vol. 317, pp. 55-66, 2013.
- [19] S. Jiang, Y. Li, and B. P. Ladewig, "A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies," *Science of the total environment*, vol. 595, pp. 567-583, 2017.
- [20] S. A. A. Tabatabai, J. C. Schippers, and M. D. Kennedy, "Effect of coagulation on fouling potential and removal of algal organic matter in ultrafiltration pretreatment to seawater reverse osmosis," *water research*, vol. 59, pp. 283-294, 2014.
- [21] V. Bonnelye, M. A. Sanz, J.-P. Durand, L. Plasse, F. Gueguen, and P. Mazounie, "Reverse osmosis on open intake seawater: pre-treatment strategy," *Desalination*, vol. 167, pp. 191-200, 2004.
- [22] H. Huang, K. Schwab, and J. G. Jacangelo, "Pretreatment for low pressure membranes in water treatment: a review," *Environmental science & technology*, vol. 43, no. 9, pp. 3011-3019, 2009.

- [23] M. Berrabah, H. Bouabdesselam, and N. Ghaffor, "Pretreatment Performance Evaluation of the Seawater Desalination Plant of Beni Saf BWC," *Advances in Systems Science and Applications*, vol. 23, no. 2, pp. 1-10, 2023.
- [24] S. A. A. Tabatabai, *Coagulation and ultrafiltration in seawater reverse osmosis pretreatment*. CRC Press/Balkema Leiden, The Netherlands, 2014.
- [25] A. B. Alayande, J. Lim, J. Kim, S. Hong, A. S. Al-Amoudi, and B. Park, "Fouling control in SWRO desalination during harmful algal blooms: A historical review and future developments," *Desalination*, vol. 543, p. 116094, 2022.
- [26] J.-M. Rovel, "Why A SWRO In Taweelah- Pilot Plant Results Demonstrating Feasibility And Performance Of SWRO On Gulf Water," *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, vol. 13, no. 4, p. 24, 2004.
- [27] M. A. Sanza, V. Bonnélyea, and G. Cremerb, "Fujairah reverse osmosis plant: 2 years of operation," *Desalination*, vol. 203, no. 1-3, pp. 91-99, 2007.
- [28] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, and T. Melin, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination," *Desalination*, vol. 216, no. 1-3, pp. 1-76, 2007.
- [29] L. Henthorne, "Trends in pretreatment for seawater reverse osmosis," *Water Conditioning & Purification Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 22-24, 2010.
- [30] A. Brehant, V. Bonnellye, and M. Perez, "Assessment of ultrafiltration as a pretreatment of reverse osmosis membranes for surface seawater desalination," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 3, no. 5-6, pp. 437-445, 2003.
- [31] M. Nair and D. Kumar, "Water desalination and challenges: The Middle East perspective: a review," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, no. 10-12, pp. 2030-2040, 2013.
- [32] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, and P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges," *Water research*, vol. 43, no. 9, pp. 2317-2348, 2009.
- [33] S. Jamaly, N. Darwish, I. Ahmed, and S. Hasan, "A short review on reverse osmosis pretreatment technologies," *Desalination*, vol. 354, pp. 30-38, 2014.
- [34] S. Ebrahim, S. Bou-Hamed, M. Abdel-Jawad, and N. Burney, "Microfiltration system as a pretreatment for RO units: Technical and economic assessment," *Desalination*, vol. 109, no. 2, pp. 165-175, 1997.
- [۳۵] ب.ع. حامد، ش. ز. سهیلا، و ص. س. ملیحه، "مروری بر گرفتگی زیستی در غشاهای اسمز معکوس جهت نمک زدایی آب دریا".
- [36] N. Voutchkov, "Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system," *Desalination*, vol. 261, no. 3, pp. 354-364, 2010.
- [37] E. K. Lee, V. Chen, and A. Fane, "Natural organic matter (NOM) fouling in low pressure membrane filtration—effect of membranes and operation modes," *Desalination*, vol. 218, no. 1-3, pp. 257-270, 2008.
- [38] M. A. Al-Sofi, A. M. Hassan, G. M. Mustafa, A. G. I. Dalvi, and M. N. Kither, "Nanofiltration as a means of achieving higher TBT of ≥ 120 C in MSF," *Desalination*, vol. 118, no. 1-3, pp. 123-129, 1998.
- [39] G. Y. Töre and Ş. K. Sesler, "Developments in membrane bioreactor technologies and evaluation on case study applications for recycle and reuse of miscellaneous wastewaters," in *Membrane-based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*: Elsevier, 2021, pp. 503-575.
- [40] E. Garmash, Y. N. Kryuchkov, and V. Pavlikov, "Ceramic membranes for ultra-and microfiltration," *Glass and ceramics*, vol. 52, pp. 150-152, 1995.
- [۴۱] م. طیبیه، ب.ع. اکبر، و ب. ف. علی، "ارزیابی عملکرد فناوری غشایی در جداسازی پروتئین های آب پنییر: مقایسه عملکرد غشاهای بسپاری و سرامیکی".
- [42] H.-J. Yang and H.-S. Kim, "Effect of coagulation on MF/UF for removal of particles as a pretreatment in seawater desalination," *Desalination*, vol. 247, no. 1-3, pp. 45-52, 2009.

- [43] P. Glueckstern, M. Priel, and M. Wilf, "Field evaluation of capillary UF technology as a pretreatment for large seawater RO systems," *Desalination*, vol. 147, no. 1-3, pp. 55-62, 2002.
- [44] S. Kim, I. Lee, K. Kim, D. Shon, and L. Kang, "Dual media filtration and ultrafiltration as pretreatment options of low-turbidity seawater reverse osmosis processes," *Desalination and Water Treatment*, vol. 33, no. 1-3, pp. 329-336, 2011.
- [45] K. S. Park, S. S. Mitra, W. K. Yim, and S. W. Lim, "Algal bloom—critical to designing SWRO pretreatment and pretreatment as built in Shuwaikh, Kuwait SWRO by Doosan," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, no. 31-33, pp. 6317-6328, 2013.
- [46] A. Kayvani Fard et al., "Inorganic membranes: Preparation and application for water treatment and desalination," *Materials*, vol. 11, no. 1, p. 74, 2018.
- [47] T. Dey, G. C. Sahoo, S. N. Roy, and S. Bandyopadhyay, "Studies on pre-treatment of seawater using tubular ceramic MF membrane of 19-channel configuration," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 10, pp. 1-5, 2013.
- [48] J. Hamad, C. Ha, M. D. Kennedy, and G. L. Amy, "Application of ceramic membranes for seawater reverse osmosis (SWRO) pre-treatment," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, no. 25-27, pp. 4881-4891, 2013.
- [49] J.-S. Kang, S. C. Sung, J. J. Lee, and H.-S. Kim, "Application of ceramic membrane for seawater desalination pretreatment," *Desalination and water treatment*, vol. 57, no. 55, pp. 26700-26705, 2016.
- [50] K. Y.-j. Choi and B. A. Dempsey, "In-line coagulation with low-pressure membrane filtration," *Water research*, vol. 38, no. 19, pp. 4271-4281, 2004.
- [51] W. L. Ang, A. W. Mohammad, N. Hilal, and C. P. Leo, "A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants," *Desalination*, vol. 363, pp. 2-18, 2015.
- [52] P. Glueckstern and M. Priel, "Comparative cost of UF vs conventional pretreatment for SWRO systems," *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, vol. 13, no. 1, pp. 34-39, 2003.
- [53] G. Pearce, "The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications," *Desalination*, vol. 203, no. 1-3, pp. 286-295, 2007.
- [54] E. Cardona, A. Piacentino, and F. Marchese, "Energy saving in two-stage reverse osmosis systems coupled with ultrafiltration processes," *Desalination*, vol. 184, no. 1-3, pp. 125-137, 2005.
- [55] F. Knops, S. Van Hoof, H. Futselaar, and L. Broens, "Economic evaluation of a new ultrafiltration membrane for pretreatment of seawater reverse osmosis," *Desalination*, vol. 203, no. 1-3, pp. 300-306, 2007.