



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

1113P-NWWCE

واحدهای بهره‌ور شیرین سازی آب با استفاده از فرایند نانوفیلتراسیون

حمیدرضا تأملی^۱، فاطمه مسعودیه^۱، محمدرضا مزدیان فرد^{۲*}

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

mozdianfard@kashanu.ac.ir

خلاصه

شیرین سازی آب دریا همواره با موانعی روبرو بوده است که مهمترین آن‌ها گرفتگی غشا و مصرف بالای انرژی است. این موارد، به شدت بازده و عملکرد فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نانوفیلتراسیون (NF) با داشتن ویژگی‌هایی مابین دو فرایند اسمز معکوس (RO) و اولترافیلتراسیون، کاربردهای زیادی در واحدهای تصفیه دارد که به صورت تصفیه تمام انواع آب (زیرزمینی، سطحی و فاضلاب) و یا پیش تصفیه فرایندهای شیرین سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. غشاهای NF توانایی حذف کدورت، سختی، فلئوئراید و نیترات و همچنین بخش قابل توجهی از نمک‌های محلول را دارند. با استفاده از NF، فرایند شیرین سازی در فشارهای عملیاتی بسیار کمتر عمل می‌کند و از نظر مصرف انرژی نیز مقرون به صرفه می‌شود. این مقاله، عملکرد غشاهای NF موجود و کاربرد آن‌ها را در شیرین سازی به عنوان پیش تصفیه/جایگزین واحد RO برای فرایندهایی با مصرف انرژی پایین مورد بررسی قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، شیرین سازی، فرایند بهره‌ور

۱. مقدمه

کمیابی (کمبود) منابع آب سالم به دلیل جمعیت روبه افزایش جهان و همچنین مسائل زیست محیطی، به موضوعی بسیار جدی تبدیل شده است [۱]. ۱/۶ میلیارد نفر جمعیتی که قبلاً در مناطقی با کمبود صد در صد آب مواجه بوده‌اند، تا سال ۲۰۲۵ به دوسوم جمعیت دنیا افزایش خواهند یافت [۲]. تکنولوژی شیرین سازی، مخصوصاً فرایندهای غشایی به طور گسترده به عنوان یکی از بهترین کاندیداهای حل معضل کمبود آب شناخته می‌شوند. در این میان، تکنولوژی غشایی اسمز معکوس (RO) که از بیش از ۴۰ سال پیش توسعه یافته است، یک تکنولوژی پیشگام در تأسیسات شیرین سازی جدید محسوب می‌شود. به طوری که رفع مشکل کمبود آب در مناطق خشک به وسیله تکنولوژی RO روبه افزایش است [۳-۵]. با این حال، هنوز مسائلی وجود دارد که باید در اجرای واحدهای شیرین سازی صنعتی بخصوص RO مورد توجه قرار گیرد. مهمترین این مسائل عبارت است از گرفتگی غشا و مصرف انرژی [۵]. گرفتگی غشا باعث کاهش تولید محصول می‌شود، و مصرف زیاد انرژی به واسطه فشار بالای عملیاتی که تقریباً ۴۴٪ هزینه تولید آب را به خود اختصاص می‌دهد، بکارگیری فرایندهای شیرین سازی غشایی را با اقبال کمتری مواجه می‌کند [۶]. به دلیل وجود این معایب، فرایندهای یکپارچه غشایی شامل تکنولوژی‌های مختلف غشایی به عنوان امیدوارکننده‌ترین گزینه‌های مدیریتی اهمیت یافته است [۷]. در این میان، غشای NF پتانسیل بالایی دارد تا برای رفع مشکلات مطرح شده، در فرایندهای شیرین سازی بکار گرفته شود [۸]. این فرایند، یک تکنولوژی مؤثر با نیرومحرکه فشاری و با ویژگی‌هایی مابین اولترافیلتراسیون و RO است [۹]. غشاهای NF قادرند تا سدیم کلرید را به میزان ۸۰٪-۲۰ حذف کنند و ظرفیت دفع یون‌های چند ظرفیتی مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} نیز در آن‌ها بالاست. در حال حاضر، NF به عنوان جایگزینی کاربردی برای تکنولوژی‌های تصفیه آب متداول ظهور یافته است؛ زیرا نسبت به سیستم RO، در فشار کمتری عمل می‌کند، فلاکس تولیدی بالایی دارد و از نظر مصرف انرژی، پربازده‌تر است [۱۰]. حتی در مواردی نشان داده شده است که جریان آب تولیدی حاصل از NF دو برابر RO است و با جایگزینی RO با غشاهای NF می‌توان مصرف انرژی را تقریباً ۲۰٪ کاهش داد [۱۱]. در این مقاله، عملکرد غشاهای NF موجود مقایسه می‌شود و مطالعات انجام شده در مورد کاربرد NF در فرایند شیرین سازی توضیح داده می‌شود. به طور کلی، از NF به عنوان پیش تصفیه فرایند شیرین سازی آب دریا، جایگزین RO در فرایند تصفیه آب و همچنین همراه با سایر فرایندها برای بهبود کلی عملکرد استفاده می‌شود که مورد آخر در این مقاله مورد بحث قرار نمی‌گیرد.

۲. عملکرد غشاهای NF تجاری موجود

به واسطه توانایی منحصر به فرد NF در جداسازی نمک‌های غیر آلی و مولکول‌های آلی کوچک، این تکنولوژی جایگاه ویژه‌ای در موضوعات مختلف بخصوص در تصفیه آب و پساب و فرایندهای شیرین‌سازی پیدا کرده است [۱۳ و ۱۲]. مطالعات زیادی برای ارزیابی عملکرد آن‌ها تحت شرایط مختلف انجام گرفته است. برخی از اطلاعات موجود برای غشاهای NF تجاری در جدول ۱ فهرست شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت دفع یونی غشاهای NF در بین نام‌های تجاری به شدت تغییر می‌کند. عملکرد شیرین‌سازی سه نوع غشای نانوفیلتراسیون NF90، NF270 و N30F توسط هیلال و همکارانش [۱۴] بررسی شد و آن‌ها دریافتند که فلاکس و نرخ دفع نمک NF90 و NF270، سازگاری خوبی با مدل اسپیکلر-کدم^۱ دارد. لیناس و همکاران [۱۵]، توانایی شش غشای تجاری (NF270، NF200، NF90، K-SR2، ESNA1-LF2 و NF99HF) را در مورد دفع یون‌های دوظرفیتی بررسی کردند. براساس یافته آن‌ها، غشاهای NF270، K-SR2 و NF99HF برای پیش تصفیه در شیرین‌سازی به روش RO مناسب‌تر بودند. سونگ و همکاران [۱۶] متوجه شدند که غشای ESNA3 گزینه مناسبی برای دفع سختی آب دریاست؛ درحالی‌که براساس پیشنهاد پوتنی و همکاران [۱۷ و ۱۸]، با استفاده از غشای NF200 می‌توان سیستم‌های تحت غلظت بالای نمک و شرایط فشاری زیاد را کنترل (مدیریت) نمود. نتایج مطالعه لیناس و همکاران [۱۹] نیز نشان داد، NF270، K-SR2 و NF99HF برای حذف یون‌های رسوب‌گذار در آب دریا مناسب هستند. کارهای مذکور، همچنین مطالعات جامع انجام شده روی پولرایزاسیون غلظتی یون‌های سختی، گرفتگی غشا و جرم‌گرفتگی آلی روی سطح غشاهای NF [۲۰-۲۴] حاکی از آن است که تکنولوژی NF یک فرایند کارآمد برای حذف اکثر یون‌های دوظرفیتی و کاهش کل جامدات محلول (TDS) آب دریاست.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به عملکرد غشاهای NF تجاری از مرجع [۲۹] همراه با بروزسانی.

| مرجع | نسبت دفع (%) | | | | | | | خوراک | مواد سازنده غشا | کمپانی فروشنده | عنوان تجاری |
|------|--------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------|---------|-----------------|------------------|-------------|
| | TDS | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | SO ₄ ²⁻ | Na ⁺ | Cl ⁻ | NaCl | | | | |
| [۱۹] | ۶۵/۵ | ۹۴/۳ | ۹۶/۸ | ۹۶/۷ | ۵۸/۷ | ۶۴/۱ | - | آب دریا | PA | Dow Filmtec | NF90 |
| [۱۶] | ۸۳/۰ | ۹۷/۸ | - | ۹۹/۴ | ۷۷/۴ | ۸۵/۰ | - | | | | |
| [۲۵] | ۸۳/۵ | ۹۵/۰ | ۹۶/۳ | ۹۸/۷ | ۸۰/۹ | ۸۱/۷ | - | | | | |
| [۲۶] | ۵۱/۷ | ۹۵/۵ | ۹۶/۹ | ۹۹/۲ | ۵۰/۰ | ۵۶/۳ | - | آب دریا | PA | Dow Filmtec | NF270 |
| [۱۹] | ۲۸/۲ | ۶۹/۰ | ۸۴/۱ | ۹۷/۵ | ۲۷/۴ | ۱۳/۹ | - | | | | |
| [۱۶] | ۴۴/۸ | ۶۰/۲ | - | ۹۸/۹ | ۳۰/۸ | ۴۰/۲ | - | | | | |
| [۲۶] | ۱۹/۵ | ۹۲/۵ | ۹۸/۸ | ۹۸/۸ | ۱۵/۴ | ۲۱/۹ | - | آب دریا | PA | Dow Filmtec | NF200 |
| [۱۹] | ۳۷/۵ | ۷۰/۰ | ۸۸/۲ | ۹۹/۱ | ۳۷/۰ | ۲۴/۹ | - | | | | |
| [۱۸] | - | - | - | - | - | - | ۵۲ | | | | |
| [۱۴] | - | - | - | - | - | - | ۳/۰ | NaCl | - | MICRODYN-NADIR | N30F |
| [۱۹] | ۱۸/۴ | ۵۹/۰ | ۷۵/۶ | ۹۷/۰ | ۷/۱ | ۱۱/۵ | - | آب دریا | - | Koch | K-SR2 |
| [۱۸] | - | - | - | - | - | - | ۴۰ | NaCl | - | Koch | MPS34 |
| [۱۹] | ۱۶/۵ | ۱۷/۸ | ۲۴/۳ | ۶۶/۰ | ۱۲/۱ | ۱۱/۷ | - | آب دریا | PA | Hydranautics | ESNA1-LF2 |
| [۱۶] | ۸۹/۶ | ۹۳/۲ | - | ۹۹/۴ | ۸۰/۹ | ۸۹/۷ | - | آب دریا | PES | Hydranautics | ESNA1 |
| [۱۶] | ۲۲/۷ | ۴۵/۷ | - | ۹۹/۱ | ۱۱/۷ | ۲۰/۴ | - | آب دریا | PA | Hydranautics | ESNA3 |
| [۱۹] | ۲۹/۳ | ۶۷/۳ | ۸۵/۵ | ۹۷/۳ | ۱۴/۲ | ۲۴/۴ | - | آب دریا | - | Alfa Laval | NF99HF |
| [۱۸] | - | - | - | - | - | - | ۵۲ | NaCl | - | Weizmann | MPS44 |
| [۱۶] | ۲۰/۶ | ۶۹/۸ | - | ۹۵/۳ | ۱۴/۹ | ۱۸/۸ | - | آب دریا | PA | GE Osmonics | DL |
| [۱۶] | ۳۵/۸ | ۶۰/۴ | - | ۹۳/۶ | ۲۷/۳ | ۲۸/۰ | - | آب دریا | PA | GE Osmonics | DK |
| [۲۸] | ۲۷/۳ | - | - | - | - | - | - | آب دریا | PA | Filtration Gamma | MPT 03 |

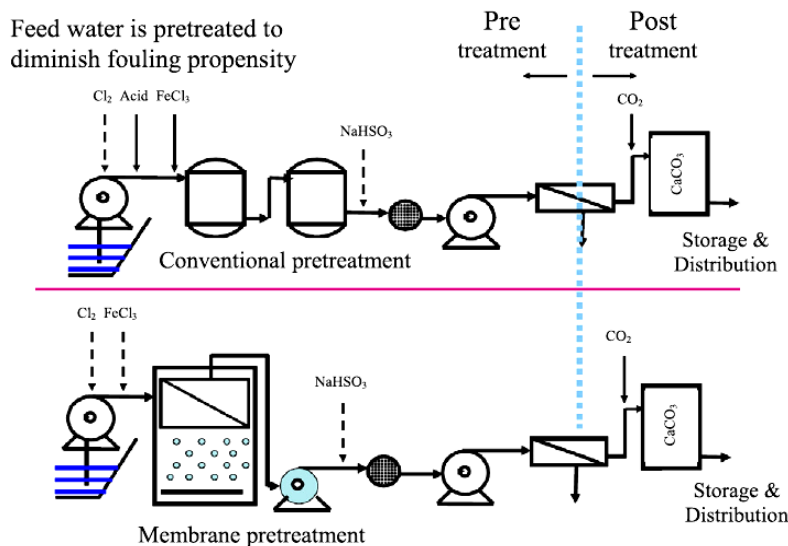
۳. NF به عنوان جایگزین RO در فرایند شیرین سازی

اخیراً مطالعاتی انجام شده است تا امکان جایگزین نمودن RO را با NF در فرایند شیرین سازی آب دریا و آب لب شور بررسی کنند. دلیل انتخاب NF، فشار عملیاتی کمتر و نرخ تولید بیشتر آن در مقایسه با واحد RO است. یکی از جالب ترین یافته ها در این زمینه، حاصل آزمایشات NF در مقیاس پایلوت برای شیرین سازی آب دریا در دپارتمان آب Long Beach است [۳۰]. آن ها نوعی فرایند NF-NF را با هدف اولیه کاهش مصرف انرژی بدون از دست دادن نرخ بازیابی آب آشامیدنی تولیدی، برای جایگزینی واحد RO پیشنهاد دادند [۸]. آزمایشات مقیاس پایلوت مشخص نمود که سیستم NF قادر به تولید آب آشامیدنی از آب دریاست [۳۱]. نهایتاً، دستگاهها و تجهیزات شیرین سازی آب دریا با ظرفیت $300,000 \text{ gpd}$ تا سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ ساخته و عملیاتی شد [۳۲] تا آب دریا با TDS تقریباً $30,000 \text{ ppm}$ تا $35,000 \text{ ppm}$ را شیرین کند. بر اساس ارزیابی عملکرد فرایند NF دومرحله ای، به خوبی مشخص شد که این فرایند برای تولید آبی مطابق با استانداردهای آب آشامیدنی، قابل اطمینان است. به علاوه، تولید آب در این فرایند (NF دومرحله ای) نسبت به سیستم RO-NF با هزینه کمتری همراه بود که مؤید توانایی NF برای بکارگیری در فرایندهای شیرین سازی آب دریاست. براساس نسبت دفع بالا برای یون های تک و دو ظرفیتی در غشاهای NF متقارن همراه با لایه جداکننده پلی آمیدی سخت، وونگ [۲۵ و ۳۳] سیستم شیرین سازی دومرحله ای NF را طراحی کردند که با بازده خوبی یونها را از آب دریا حذف نمود و در عین حال هزینه های مربوط به انرژی در آن ۲۰٪ تا ۳۰٪ کمتر از واحد RO یک مرحله ای بود. در Long Beach ایالات متحده، فرایند NF-NF کاملاً عملیاتی با ظرفیت تولید آب روزانه 1135 m^3 دایر شده است [۳۴]. التایی و همکاران [۳۵]، عملکرد فرایند شیرین سازی NF90-NF90 را با استفاده از نرم افزار ROSA شبیه سازی کردند. برای خوراک با شوری $35,000 \text{ mg/L}$ ، فشار اولین و دومین مرحله به ترتیب برابر با 37 bar و 19 bar و ریکاوری ۵۹٪ و ۶۷٪ بود؛ در حالی که TDS خروجی و مصرف انرژی سیستم به ترتیب 254 mg/L و $3/35 \text{ kWh/m}^3$ مشخص شد. بر طبق مطالعه انجام شده توسط لیو و همکاران [۳۶]، در سیستم NF90-NF90، فشار عملیات، بیشترین تأثیر را بر روی فلاکس و TDS آب خروجی دارد. علاوه بر آن، نشان داده شده است که میزان دفع غشای NF نیز، به شدت تحت تأثیر فشار قرار می گیرد [۳۷]. بی و همکاران پیشنهاد دادند که برای دست یافتن به ریکاوری بیش از ۸۵٪، آرایش دومرحله ای برای سیستم NF کافی است؛ در حالی که برای رسیدن به همین مقدار ریکاوری باید از آرایش RO سه مرحله ای استفاده نمود. به منظور شناخت بهتر کارآمدی فرایند NF دومرحله ای، در مطالعه ای آنالیز انرژی و اکسرژی با استفاده از نرم افزار ROSA انجام گرفت [۳۸]. در این شبیه سازی، برای کاهش مصرف انرژی و بهبود بازدهی اکسرژی و نسبت ریکاوری، فرایند NF دومرحله ای به وسایل ریکاوری انرژی متصل شد. بر طبق گزارش این کار، مصرف انرژی تا $2/09 \text{ kWh/m}^3$ کاهش یافت و نسبت ریکاوری سیستم نیز تا ۴۲/۷۸٪ افزایش داشت. با توجه به اینکه کیفیت آب لب شور معمولاً بهتر از آب دریاست، در بعضی موارد سعی شده است تا در واحد شیرین سازی، غشای RO را با غشای NF (منفرد) جایگزین کنند. در اردن، شیرین سازی آب لب شور با استفاده از واحد مقیاس پایلوت متشکل از غشای MF به عنوان پیش تصفیه واحد NF بررسی شد [۳۹]. بر اساس مشاهدات آن ها، با در نظر گرفتن حذف مواد آلی و غیر آلی از آب خوراک، فرایند شیرین سازی به نحو مؤثری عمل کرد. در مطالعه ای دیگر، امکان تولید آب آشامیدنی از آب زیرزمینی لب شور، به کمک فرایندهای الکترو دیالیز (ED)، RO و NF ارزیابی گردید [۲۸]. آزمایشات NF با استفاده از غشای لوله ای کمپانی Gamma Filtration (با نام MPT 03)، تحت فشار 20 bar انجام گرفت؛ در حالی که برای RO از پایلوت مجهز به غشای مارپیچی کمپانی Filmtec (با نام Nanomax 95) و در فشار 15 bar استفاده شد. نتایج نشان داد که NF باعث کاهش غلظت Ca^{2+} ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} (عوامل اصلی بالابودن سختی سولفاتی) می شود. با این حال، کاهش TDS در این روش از 2600 به 1890 mg/L بود که از میزان قابل قبول برای آب آشامیدنی فاصله داشت (بیشترین مقدار TDS برای آب آشامیدنی بر طبق استاندارد WHO برابر با 500 mg/L است [۴۰]). در مقایسه با فرایند NF، کیفیت آب حاصل از RO و ED مطابق با استانداردهای مجاز WHO بود. به طور کلی می توان این گونه استنباط کرد که با در نظر گرفتن کیفیت آب و مصرف انرژی، فرایند شیرین سازی NF دومرحله ای، تکنولوژی نویدبخشی برای شیرین سازی آب دریا به شمار می آید.

۴. NF به عنوان پیش تصفیه در واحدهای شیرین سازی به کمک RO

علیرغم پتانسیل فرایندهای پیش تصفیه سنتی در تولید آب با کیفیت متغیر، این روش ها به طور گسترده در واحدهای شیرین سازی آب دریا به کمک RO (SWRO) مورد استفاده قرار گرفته اند. با این حال، با ظهور و پیشرفت تکنولوژی های غشایی، تلاش های اخیر به سمت بکارگیری غشاها به عنوان پیش تصفیه واحدهای SWRO جهت یافته است. نتایج فعالیت تأسیسات روبه افزایش و آزمایشات مقیاس پایلوت برای بررسی فرایندهای پیش تصفیه

غشایی، امیدوارکننده و نویدبخش است. شکل ۱، مقایسه‌ای از فرایندهای پیش تصفیه سنتی و غشایی را قبل از واحد RO نشان می‌دهد [۴۱]. هزینه انرژی واحدهای شیرین‌سازی، به شدت وابسته به شوری آب خوراک است [۴۲]. زمانی که شوری زیاد باشد، باید فشار بیشتری اعمال گردد تا فرایند RO پیش رود. بنابراین، مطالعه قسمت پیش تصفیه واحدهای SWRO بر فرایندهایی تمرکز دارد که بتواند مشکلات گرفتگی غشا و همچنین مصرف انرژی (و هزینه) واحد را کاهش دهد [۳۱].



شکل ۱ - مقایسه بین پیش تصفیه سنتی و غشایی قبل از واحد RO [۴۱].

مطالعات مربوط به بررسی NF به عنوان پیش تصفیه در شیرین‌سازی آب دریا، به سال ۱۹۹۰ توسط شرکت تبدیل آب شور (SWCC) برمی‌گردد. در کار آن‌ها، پایلوت یکپارچه متشکل از فیلتراسیون شنی ریز دومرحله‌ای - غشای NF-SWRO، فیلتراسیون شنی ریز دومرحله‌ای - غشای NF-MSF (تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای) و فیلتراسیون شنی ریز دومرحله‌ای - غشای NF-MSF-SWROreject بود [۴۳]. با توجه به نتایج بدست آمده، NF میزان یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SO_4^{2-} و HCO_3^- را به ترتیب ۸۹/۶٪، ۹۴/۰٪، ۹۷/۸٪ و ۷۶/۶٪ کاهش داد و کاهش سختی کل معادل ۹۳/۳٪ بود. علاوه، بکارگیری NF به عنوان پیش تصفیه باعث کاهش مقدار هریک از یون‌های Cl^- ، Na^+ و K^+ تا ۴۰/۳٪ و TDS کل تا ۵۷/۷٪ شد. در مطالعه دیگر نیز نشان داده شده است که پیش تصفیه به کمک NF منجر به تولید آب بیشتر (تقریباً ۶۰٪) و کاهش ۳۰٪ هزینه در واحدهای RO و MSF می‌شود [۴۴]. اوهلینگر [۴۵] در فرایند شیرین‌سازی کم‌هزینه پیشنهادی خود به صورت NF-RO که در فشار پایین ۲۲ bar کار می‌کند به کاهش ۲۷٪ در هزینه خالص تولید آب نسبت به SWRO یک مرحله‌ای دست یافت. در این شرایط نیز (مشابه حالت تصفیه آب به کمک NF دومرحله‌ای) متوجه شدند که کیفیت آب خروجی از واحد NF به شدت به فشار عملیاتی، نرخ ریکاوری، کیفیت آب خوراک، دمای آب خوراک و تعداد و ترکیب المان‌های غشایی وابسته است [۴۶]. حسن و همکاران [۴۷ و ۴۸]، پایلوتی از آرایش NF-RO و NF-RO را به مدت ۵۰۰ ساعت مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که فلاکس آب تولیدی و ریکاوری NF با افزایش فشار عملیاتی، افزایش می‌یابد. میزان دفع برای SO_4^{2-} بیشتر از Ca^{2+} و Mg^{2+} بود؛ در حالی که دفع مقادیر بیشتر Ca^{2+} و Mg^{2+} در فلاکس‌های کمتر اتفاق افتاد. در واحد شیرین‌سازی Umm Lujj، اریکسون و همکاران [۴۹] دریافتند در صورت استفاده از NF به عنوان پیش تصفیه واحد RO، سختی کل، TDS و کلرید به ترتیب از ۷۵۰۰ ppm تا ۲۲۰ ppm، ۴۵،۵۰۰ تا ۲۸،۲۰۰ ppm و ۲۱،۶۰۰ تا ۱۶،۴۰۰ ppm کاهش می‌یابد و ریکاوری آب از ۲۸٪ تا ۵۶٪ افزایش دارد؛ در این شرایط مصرف برق از $۹/۵۹۶ \text{ kWh/m}^3$ به $۵/۸۵۸ \text{ kWh/m}^3$ کاهش داشت [۵۰]. در مطالعه دیگر، سونگ و همکاران [۲۷] تأثیر ریکاوری روبه افزایش خروجی NF (RNF) را به وسیله گردش دوباره و غلظت مواد شیمیایی روی سطح غشای NF بررسی کردند. آزمایشات مقیاس پایلوت آن‌ها نشان داد که در صورت افزودن اسید و آنتی اسکالانت، غشای ESNA3 در فشار بهینه عملیاتی ۱۹/۴ bar، pH خوراک به میزان ۵/۰ و غلظت ۲۰ mg/L برای آنتی اسکالانت، به RNF تقریبی ۶۵٪ می‌رسد. میزان دفع برای Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، CO_3^{2-} ، SO_4^{2-} و TDS و سختی کل به ترتیب برابر با ۳۲/۸٪، ۳۶/۹٪، ۱۸/۷٪، ۹۶/۵٪، ۱۳/۸٪ و ۳۶/۳٪ بود. عملکرد سیستم‌های یکپارچه NF-RO برای شیرین‌سازی آب دریا به صورت کمی و کیفی نیز مقایسه شده‌اند [۲۶]. بر اساس یافته‌ها، عملکرد

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

دفع سیستم‌های یکپارچه، بیشتر از عملکرد غشای SW30-RO بود و ترکیب NF90(30 bar)+SW30(40 bar) بهترین سیستم یکپارچه برای این منظور تشخیص داده شد. چن و همکاران [۵۱ و ۵۲]، فرایند شیرین‌سازی یکپارچه‌ای برای RO-NF پیشنهاد دادند تا باعث افزایش ریکاوری کلی آب شود. در فرایند پیشنهادی، آب تغلیظ شده حاصل از فرایند RO، توسط فرایند NF نمک زدایی و آب خروجی به واحد RO برگردانده می‌شد. با استفاده از المان‌های غشایی ۴ اینچ SW30 و المان‌های غشایی ۲ اینچ NF، در ریکاوری ۷۱٪، هزینه تولید آب $0.57 \$/m^3$ بود که ۲۰/۰۶٪ کمتر از فرایند RO تک مرحله‌ای به حساب می‌آمد [۵۳]. در مقایسه با فرایند RO دومرحله‌ای، فرایند RO-NF باعث صرفه‌جویی بیشتری در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی الکتریکی می‌شود [۵۴ و ۵۵].

مطالعات در مورد تأثیر پیش تصفیه‌های مختلف روی جرم گرفتگی ذره‌ای و ترکیبات غیر آلی در واحدهای شیرین‌سازی SWRO توسط جوی و همکاران [۵۶] انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین فلاکس تولیدی RO به دلیل حذف ذرات کلونیدی و غیر آلی، در حالت استفاده از NF به عنوان پیش تصفیه حاصل شد. علاوه بر آن، ساختار غشایی یکپارچه UF-NF مورد مطالعه قرار گرفت تا عملکرد NF در پیش تصفیه شیرین‌سازی آب دریا بررسی گردد [۲۲]. خروجی این سیستم با حذف ۹۶/۳٪ کل ترکیبات آلی (TOC) از کیفیت مناسبی برخوردار بود. اما با این حال به تدریج، گرفتگی غشا بخصوص بعد از شستشوی شیمیایی مشاهده شد. بنابراین، مطالعات بیشتری برای بهبود این سیستم انجام گرفت تا تمایل غشاها به گرفتگی را کاهش دهد. برای مثال، متوجه شدند که پتانسیل رسوب‌گذاری مرحله NF در سیستم یکپارچه UF-NF-SWRO، متفاوت از فرایندهای SWRO سنتی و حرارتی است [۲۴]. چنین مطالعاتی می‌تواند شناخت مناسبی از مکانیزم گرفتگی در فرایند غشایی در اختیار قرار دهد تا متناسب با آن مشکلات ناشی از آن را برطرف نمود.

علیرغم تعدد مطالعات عملی انجام شده تا به امروز، مطالعات پیش‌بینی‌کننده محدودی در مورد مزایای بکارگیری NF در پیش تصفیه فرایند شیرین‌سازی RO صورت گرفته است. آنالیزهای انرژی و اکسرژی برای پیش‌بینی انرژی مورد نیاز سیستم بسیار مفید هستند. این آنالیز برای تعیین شرایط بهینه عملیاتی یک سیستم یکپارچه NF-SWRO به منظور حداقل نمودن مصرف انرژی بکار گرفته شد [۵۷ و ۵۸]. مقایسه بین سیستم NF-SWRO و RO منفرد نشان می‌دهد که فرایند یکپارچه به ریکاوری بیشتر (نرخ تولید بیشتر) و افت انرژی کمتر منجر می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود با استفاده از چنین آنالیزی، تدابیر سودمندی برای تعیین شرایط عملیاتی فرایندهای یکپارچه در اختیار قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

کارآمدی سیستم‌های شیرین‌سازی معمولاً از طریق عملکرد آن‌ها که شامل کیفیت آب خروجی، طول عمر غشا، تمایل غشا به گرفتگی و هزینه است، ارزیابی می‌گردد. علاوه بر این عوامل، باید ملاحظات دیگری نیز هنگام ارزیابی سیستم‌ها بخصوص در قسمت پیش تصفیه مدنظر قرار گیرد؛ از جمله بررسی امکان بازیابی عملکرد غشای رسوب گرفته از طریق شستشوی معکوس یا شیمیایی آن، بازده غشای تمیز شده، اثر مواد افزودنی شیمیایی روی غشا و تمایل به گرفتگی در آن. علیرغم محدودیت‌های سیستم‌های غشایی، نشان داده شده است که ترکیب واحد RO با NF می‌تواند تدبیر مناسبی برای کاهش هزینه‌های سیستم‌های شیرین‌سازی موجود باشد. زمانی که کیفیت آب و مصرف انرژی در نظر گرفته می‌شوند، فرایند NF دومرحله‌ای برای شیرین‌سازی آب دریا با استفاده از دفع بالای NF، می‌تواند یک سیستم مناسب با هزینه پایین محسوب شود. به عنوان یک تکنیک مدون و سازمان‌یافته، فرایند NF-RO با استفاده از غشاهای NF270، K-SR2 و NF99HF با کاهش هزینه‌های تولید آب و گرفتگی غشاهای RO همراه بوده است؛ به طور کلی واحد NF-SWRO باعث کاهش ۳۰٪ هزینه‌ها می‌شود. با این حال، باید مطالعات بیشتری برنامه‌ریزی شود تا گرفتگی غشای NF را کاهش دهند و فلاکس آب تولیدی در شرایط دفع بالای یونها، بهبود یابد.

۶. مراجع

1. Liu, J., Yuan, J., Ji, Z., Wang, B., Hao, Y., Guo, X., (2016). Concentrating brine from seawater desalination process by nanofiltration–electrodialysis integrated membrane technology. *Desalination*, 390, pp. 53–61.
2. UN water, (2012). World water day 2012 brochure, March 22nd, <http://www.unwater.org>.
3. Pérez-González, A., Ibáñez, R., Gómez, P., et al., (2015). Nanofiltration separation of polyvalent and monovalent anions in desalination brines. *Journal of membrane science*, 473, pp. 16–27.
4. Liu, J., Yuan, J.S., Xie, L.X., Ji, Z.Y., (2013). Exergy analysis of dual-stage nanofiltration seawater



- desalination. *Energy*, 62 (4), 248–254.
5. Liu, Y., Wang, J., Sun, X., (2016). Energy-saving "NF/EDR" integrated membrane process for seawater desalination Part I. Seawater desalination by NF membrane with high desalination capacity. *Desalination*, 397, 165–173.
 6. Wilf, M., Fundamentals of RO–NF technology, (2004). *Int. Conf. Desalination Costing*, pp. 18–31.
 7. Pérez-González, A., Urriaga, A.M., Ibáñez, R., Ortiz, I., (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*, 46, pp. 267–283.
 8. Mohammad, A.W., Teow, Y.H., Ang, W.L., Chung, Y.T., Oatley-Radcliffe, D.L., Hilal, N., Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. (2015). *Desalination*, 356, pp. 226–254.
 9. Oatley-Radcliffe, D.L., Williams, S.R., Barrow, M.S., Williams, P.M., (2014). Critical appraisal of current nanofiltration modeling strategies for seawater desalination and further in- sights on dielectric exclusion. *Desalination*, 343, 154–161.
 10. Subramanian, S., Seeram, R., (2013). New directions in nanofiltration applications — Are nanofibers the right materials as membranes in desalination?. *Desalination*, 308, pp. 198–208.
 11. Mohammad, A.F., Al-Naseri Saadi, K., Qusay, A.F., Samirra, A.N., Khalid, R.T., (2011). Desalination of Iraqi surface water using nanofiltration membranes, *Desalination Water Treatment*, 29, pp. 174–180.
 12. Irvine, E., Welch, D., Smith, A., et al., (2001). Nanofiltration for colour removal-8 years' operational experience in Scotland, *Water Supply*, 1, pp. 55–63.
 13. Hassan, A.M., Al-Sofi, M.A., Al-Amoudi, A., et al., (1997). A Nanofiltration (NF) Membrane Pretreatment of SWRO Feed and MSF Make-up, *IDA World Congress*, Madrid.
 14. Hilal, N., Al-Zoubi, H., Mohammad, A.W., (2005). Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity. *Desalination*, 184, pp. 315–326.
 15. Llenas, L., Martínez-Lladó, X., Yaroshchuk, A., et al., (2011). Nanofiltration as pretreatment for scale prevention in seawater reverse osmosis desalination, *Desalination Water Treatment*. 36, pp. 310–318.
 16. Song, Y.F., Xu, J., Xu, Y., et al., (2011). Performance of UF–NF integrated membrane process for seawater softening. *Desalination*, 276, pp. 109–116.
 17. Pontié, M., Lhassani, A., Diawara, C.K., et al., (2004). Seawater nanofiltration for the elaboration of usable salty waters, *Desalination*, 167, pp. 347–355.
 18. Pontié, M., Derauw, J.S., Plantier, S., et al., (2013). Seawater desalination: nanofiltration—a substitute for reverse osmosis?. *Desalination Water Treatment*. 51, pp. 485–494.
 19. Llenas, L., Ribera, G., Martínez-Lladó, X., et al., (2013). Selection of nanofiltration membranes as pretreatment for scaling prevention in SWRO using real seawater, *Desalination Water Treatment*. 51, pp. 930–935.
 20. Bader, M.S.H., Jennings, P.A., (1992). Concentration polarization phenomena in turbulent flow: review and modification, *Journal of environmental science and health*. 27, pp. 463–483.
 21. Al-Amoudi, A.S., Farooque, A.M., (2005). Performance restoration and autopsy of NF membranes used in seawater pretreatment. *Desalination*, 178, 261–271.
 22. Song, Y.F., Su, B.W., Gao, X.L., et al., (2012). The performance of polyamide nanofiltration membrane for long-term operation in an integrated membrane seawater pretreatment system. *Desalination*, 296, pp. 30–36.
 23. Song, Y.F., Su, B.W., Gao, X.L., et al., (2013). Investigation on high NF permeate recovery and scaling potential prediction in NF–SWRO integrated membrane operation. *Desalination*, 330, pp. 61–69.
 24. Song, Y.F., Gao, X.L., Gao, C.J., (2013). Evaluation of scaling potential in a pilot-scale NF–SWRO integrated seawater desalination system. *Journal of membrane science*. 443, pp. 201–209.
 25. Vuong, D.X., (2006). Two stage nanofiltration seawater desalination system. *U.S. Patent*: 7,144,511.
 26. Kaya, C., Sert, G., Kabay, N., Arda, M., Yüksel, M., Egemen, Ö., (2015). Pre-treatment with nanofiltration (NF) in seawater desalination—Preliminary integrated membrane tests in Urla, Turkey. *Desalination*, 369, pp. 10–17.
 27. Song, Y., Gao, X., Li, T., Gao, C., Zhou, J., (2015). Improvement of overall water recovery by increasing RNF with recirculation in a NF–RO integrated membrane process for seawater desalination. *Desalination*, 361, pp. 95–104.
 28. Walha, K., Amar, R. B., Firdaus, L., Quéméneur, F., Jaouen, P., (2007). Brackish groundwater



- treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electro dialysis in Tunisia: performance and cost comparison. *Desalination*, 207, pp. 95–106.
29. Zhou, D., Zhu, L., Fu, Y., Zhu, M., Xue, L., (2015). Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies — A review. *Desalination*, 376, pp. 109–116.
 30. Harrison, C., Le Gouellec, Y., Cheng, R., Childress, A., (2007). Bench-scale testing of nanofiltration for seawater desalination. *Journal of environmental engineering*. 133, pp. 1004–1014.
 31. W. L., Ang, A.W., Mohammad, N., Hilal, C. P., Leo, (2015). A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants. *Desalination*, 363, pp. 2-18.
 32. Cheng, R.C., Tseng, T.J., Wattier, K.L., (2013). Two-Pass Nanofiltration Seawater Desalination Prototype Testing and Evaluation, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Long Beach, CA.
 33. Adham, S., Cheng, R.C., Vuong, D.X., et al., (2003). Long beach's dual-stage NF beats single-stage SWRO. *International desalination water reuse Q.* 13, pp. 18–21.
 34. Long Beach water department, (2006). Long Beach desalination technology receives patent protection. *Membr. Technol.* 11.
 35. Altaee, A., Sharif, A.O., (2011). Alternative design to dual stage NF seawater desalination using high rejection brackish water membranes. *Desalination*, 273, pp. 391–397.
 36. Liu, J., Xie, L.X., Wang, Z., et al., (2014). Dual-stage nanofiltration seawater desalination: water quality, scaling and energy consumption. *Desalination Water Treatment*, 52, pp. 134–144.
 37. Bi, F., Zhao, H., Zhou, Z., Zhang, L., Chen, H., Gao, C., (2016). Optimal Design of Nanofiltration System for Surface Water Treatment. doi: 10.1016/j.cjche.2016.05.012.
 38. Liu, J., Yuan, J., Xie, L., Ji, Z., (2013). Exergy analysis of dual-stage nanofiltration seawater desalination. *Energy*, 62, pp. 248–254.
 39. Mohsen, M.S., Jaber, J.O., Din, M., (2003). Desalination of brackish water by nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*, 157, pp. 167.
 40. Memento, (1989). *Technique de l'eau*, Cinquantenaire, 1.
 41. Hasson, D., Shemer, H., (2013). Hybrid-membrane systems. 1st Int. Conf. Desalin. Using Membr. Technol.,
 42. Pankratz, T., (2004). *Desalination Technology Trends*.
 43. Hassan, A.M., Jamaluddin, A.T.M., Farooque, A.M., Rowaili, A., Dalvi, A.G.I., Kither, N.M., et al., (1998). A new approach to membrane and thermal seawater desalination processes using nanofiltration membranes (part 1). *Desalination*, 118, pp. 35–51.
 44. Abdul-Kareem Al-Sofi, M., (2001). Seawater desalination — SWCC experience and vision. *Desalination*, 135, pp. 121–139.
 45. Uhlinger, R.A., (2001). Desalination method and apparatus utilizing nanofiltration and reverse osmosis membranes: US 6,190,556 B1.
 46. Abdullatef, A.E., Farooque, M., Al-Otaibi, G., et al., (2011). Optimum nanofiltration membrane arrangements in seawater pretreatment—part-I. *Desalination Water Treatment*, 28, pp. 270–286.
 47. Hassan, A.M., Farooque, A.M., Jamaluddin, A.T.M., et al., (1999). Optimization of NF Pretreatment of Feed to Seawater Desalination Plants, IDA World Congress, San Diego.
 48. Hassan, A.M., Farooque, A.M., Jamaluddin, A.M.T., et al., (2000). A demonstration plant based on the new NF–SWRO process. *Desalination*, 131, pp. 157–171.
 49. Erikssona, P., Kyburzb, M., Pergande, W., (2005). NF membrane characteristics and evaluation for sea water processing applications. *Desalination*, 184, pp. 281–294.
 50. Hassan, A.M., Farooque, A.M., Jamaluddin, A.M.T., et al., (2002). Conversion and operation of the commercial UmmLujj SWRO plant from a single SWRO desalination process to the new dual NF–SWRO desalination process, Paper presented at IDA Conference, March 2002 at Manama Bahrain.
 51. Chen, Y.T., Chen, B., Feed optimization of multi effect stack desalination system. (2004). *Technol. Water Treat.*, 30, pp. 196–198 (in Chinese).
 52. Chen, Y.T., Zhang, H.Z., Zhou, N.M., (2005). Seawater desalination with high recovery rate by integrated membrane desalination process. *Technol. Water Treat.* 31, pp. 38–42 (in Chinese).
 53. Chen, Y.T., Chen, L., (2004). A cost study of the seawater desalination by reverse osmosis–nanofiltration process, *Technol. Water Treat.* 30, pp. 251–254 (in Chinese).
 54. Chen, Y.T., Hu, X., (2006). Optimization of seawater desalination by RO and NF process, *Technol. Water Treat.* 32, pp. 79–81 (in Chinese).



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



55. Kurihara, M., Yamamura, H., Nakanishi, T., et al., (2001). Operation and reliability of very high-recovery seawater desalination technologies by brine conversion two-stage RO desalination system. *Desalination*, 138, pp. 191–199.
56. Choi, Y.H., Kweon, J.H., Kim, D.I., Lee, S., (2009). Evaluation of various pretreatment for particle and inorganic fouling control on performance of SWRO. *Desalination*, 247, pp. 137–147.
57. Criscuoli, A., Drioli, E., (1999). Energetic and exergetic analysis of an integrated membrane desalination system. *Desalination*, 124, pp. 243–249.
58. Mehdizadeh, H., (2006). Membrane desalination plants from an energy–exergy viewpoint. *Desalination*, 191, pp. 200–209.