

گزارش مطالعاتی: فرآیند اسمز معکوس به کمک اسمز

Study Report: Osmotically-Assisted Reverse Osmosis

تهیه کنندگان:

رزیتا م معطری

مصطفی مهین روستا

دی ماه ۱۴۰۳



فهرست مطالب

۸	 ۱-تشریح فناوری
۱۶	 ۲-میزان اهمیت فناوری OARO
۲۶	 ۳-تاریخچه‌ی شروع فناوری
۳۷	 ۴-بررسی پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO
۶۸	 ۵-بازیگران گذشته و فعلی و سطح بلوغ OARO
۷۹	 ۶-پیش‌بینی آینده فناوری
۸۲	 ۷-نگاه مراکز تحلیلی مانند گارتنر به فناوری
۸۲	 ۸-ارتباط فناوری OARO با فناوری نانو
۸۶	 ۹-جمع‌بندی کاربردی و تحلیل راهکارها
۸۸	 مراجع

فهرست اختصارات

معنی فارسی	معادل کامل انگلیسی	اختصار
حداقل تخلیه مایع	Minimal Liquid Discharge	MLD
اسمز معکوس	Reverse Osmosis	RO
فشرده‌سازی بخار مکانیکی	Mechanical Vapor Compression	MVC
تقطیر چند مرحله	Multiple Effect Distillation	MED
بدون تخلیه مایع	Zero Liquid Discharge	ZLD
اسمز معکوس فشار بالا	High pressure Reverse Osmosis	HPRO
اسمز معکوس با دفع نمک کم	Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis	LSRRO
اسمز مستقیم	Forward Osmosis	FO
اسمز معکوس با کمک اسمز	Osmotically Assisted Reverse Osmosis	OARO
اسمز تحت فشار	Pressurized Reverse Osmosis	PRO
حداقل رساندن حجم آب نمک	Brine Volume Minimization	BVM
اسمز معکوس چند مرحله‌ای	Multi-Stage Reverse Osmosis	MSRO
اسمز به کمک فشار	Pressure-Assisted Osmosis	PAO
تقطیر غشایی	Membrane Distillation	MD
بازیابی محلول کشش	Draw Solution Recovery	DSR
انرژی مصرفی مخصوص	Specific energy consumption	SEC
اسمز معکوس با کمک محلول کششی	Draw solution assisted reverse osmosis	DSARO
هزینه‌های آب شیرین	Levelized cost of water	LCOW
اسمز معکوس با واسطه اسمزی آبشاری	Cascading osmotically mediated reverse osmosis	COMRO
بازگشت بخار مکانیکی	Mechanical vapor return	MVR
بازگشت بخار حرارتی	Thermal vapor return	TVR
اسمز معکوس با فشار فوق‌العاده بالا	Ultra High Pressure Reverse Osmosis	UHPRO
اسمز معکوس آب دریا	Sea Water Reverse Osmosis	SWRO

فهرست شکل‌ها

شماره شکل	عنوان شکل	صفحه
شکل ۱	محدوده شوری جریان‌ها و انرژی مصرفی در بخش‌های فرآیند ZLD	۱۰
شکل ۲	دیاگرام فرآیندهای مختلف غشایی (الف) اسمز معکوس (RO)، (ب) اسمز مستقیم (FO)، (ج) اسمز تحت فشار (PRO) و (د) اسمز معکوس کمکی (OARO)	۱۳
شکل ۳	مقایسه OARO با سیستم‌های سنتی RO	۱۴
شکل ۴	نمودار جریان فرآیند حلقه OARO متوالی	۱۵
شکل ۵	حجم آب نمک و خوراک با توجه به بازیافت آب شیرین کارخانه آب شیرین‌کن	۱۸
شکل ۶	جریان آب J_w نسبت به فشار کاری ΔP برای RO، OARO، PAO و FO	۲۳
شکل ۷	مقایسه شماتیک OARO با سیستم RO سنتی و تبخیرکننده	۲۶
شکل ۸	نقشه فرآیند OARO. دو مرحله اول OARO هستند، در حالی که مرحله نهایی RO است.	۲۷
شکل ۹	مصرف انرژی فرآیندهای RO، MVC و OARO و کار حداقلی نظری با توجه به غلظت خوراک و بازیابی	۲۸
شکل ۱۰	شماتیک فرآیند پژوهش پارک و همکاران	۲۹
شکل ۱۱	تصویری از تفاوت فشار اسمزی نظری در فرآیندهای RO سنتی، DSARO و FO	۳۰
شکل ۱۲	طرح‌واره پیکربندی طبقات سری	۳۱
شکل ۱۳	طرح‌واره پیکربندی سیکل متوالی	۳۲
شکل ۱۴	تأثیر غلظت خوراک و نرخ بازیابی بر هزینه بهینه LCOW (بالا)، SEC (وسط) و تعداد مراحل (پایین) برای OARO و COMRO، LSRRO	۳۴
شکل ۱۵	طرح‌واره پیکربندی تقسیم جریان تغذیه	۳۵
شکل ۱۶	اولین فرآیند جریان یکپارچه OARO	۳۶
شکل ۱۷	چهار فرآیند جریان یکپارچه OARO دیگر	۳۷
شکل ۱۸	(بالا) تغذیه بخشی از محلول محلول باقی‌مانده و (پایین) تغذیه بخشی از خوراک به سمت نفوذی اولین غشاء نیمه‌نفوذپذیر	۳۸
شکل ۱۹	طرح‌واره غشای لوله‌ای و الیاف توخالی استفاده شده در فرآیند OARO	۴۲
شکل ۲۰	سیستم چندمرحله‌ای از غشاهای پیشرفته OARO	۴۴
شکل ۲۱	وضعیت ثبت پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO برحسب سال انتشار	۴۸
شکل ۲۲	انواع سندهای پتنت با جستجوی Osmotically Assisted Reverse Osmosis	۴۸
شکل ۲۳	مخترعان حوزه فناوری OARO	۴۹
شکل ۲۴	مالکان حوزه فناوری OARO	۴۹
شکل ۲۵	شرکت‌های صنعتی کلیدی در زمینه فناوری OARO	۶۹
شکل ۲۶	تولید نمک گرید غذایی از آب دریا با تلفیق فناوری‌های مختلف غشایی	۷۰
شکل ۲۷	موازنه جرم سیستم تولید نمک گرید غذایی از آب دریا	۷۱
شکل ۲۸	جانمایی بخش‌های مختلف پروژه تولید نمک گرید غذایی از آب دریا در اندونزی	۷۱
شکل ۲۹	واحد پیش تصفیه در پروژه OARO اندونزی	۷۲

شماره شکل	عنوان شکل	صفحه
شکل ۳۰	واحد تغلیظ آب نمک در پروژه OARO اندونزی	۷۲
شکل ۳۱	سیستم حرارتی در پروژه OARO اندونزی	۷۳
شکل ۳۲	مراحل ساخت و نصب واحدهای مختلف غشایی پروژه تولید نمک گرید غذایی از آب دریا در اندونزی	۷۳
شکل ۳۳	نمودار خوشه‌ای خروجی نرم‌افزار VOSViewer حاصل از بررسی پایگاه داده حاوی OARO	۷۵
شکل ۳۴	ارتباط فناوری OARO با سایر حوزه‌های فناوری آب	۷۵
شکل ۳۵	روند حرکت تحقیقات فناوری‌های غشایی از سال ۲۰۱۰ به سمت سال ۲۰۲۵	۷۶
شکل ۳۶	دانشگاه‌های فعال در زمینه OARO	۷۷
شکل ۳۷	محققان فعال در زمینه OARO	۷۷
شکل ۳۸	مقایسه فناوری‌های مختلف تغلیظ آب نمک به لحاظ مصرف انرژی	۸۰

فهرست جدول‌ها

شماره جدول	عنوان جدول	صفحه
جدول ۱	فهرست پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO (تاریخ جستجو: اول ژانویه ۲۰۲۵)	۵۱
جدول ۲	استفاده از فناوری OARO در پروژه‌های تجاری در نقاط مختلف دنیا	۷۴
جدول ۳	تحلیل تطبیقی چالش‌های فنی فرآیند OARO و راهکارهای پیشنهادی مبتنی بر فناوری نانو	۸۷

۱- تشریح فناوری

بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، در حال حاضر بیش از ۸۴۴ میلیون نفر در جهان به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند. پیش‌بینی می‌شود که بحران جهانی آب در سال‌های آینده وخیم‌تر شود [۱]. تا سال ۲۰۵۰ یک‌سوم تا نیمی از جمعیت شهرنشین جهان با کمبود آب روبرو خواهند شد و تعداد شهرهای بزرگ در معرض کمبود آب از ۱۹۳ به ۲۳۴ عدد افزایش خواهد یافت [۲]. عواملی مانند رشد جمعیت، افزایش مصرف، توسعه اقتصادی و تغییرات اقلیمی باعث کمبود منابع آب شیرین و تشدید بحران‌های موجود خواهند شد. تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، حدود ۳/۹ میلیارد نفر در مناطقی با تنش شدید آبی زندگی کنند [۳].

برای مقابله با این بحران، گزینه‌های پایداری وجود دارد که شامل کاهش مصرف و هدررفت آب در کشاورزی، مناطق شهری و صنعتی، جلوگیری از نشت آب در زیرساخت‌ها، و بهبود استفاده مجدد از فاضلاب می‌شود. با این حال، تنها با اقدامات صرفه‌جویی ممکن است نتوان به تقاضای رو به رشد برای آب پاسخ داد. همچنین نیاز به روش‌های کارآمد تصفیه و بازیافت آب هرگز به این اندازه حائز اهمیت نبوده است [۴، ۵]. برطرف کردن این چالش‌ها نیازمند رویکردی چندوجهی است که نوآوری‌های فناورانه، اصلاحات سیاست‌گذاری و افزایش آگاهی عمومی را ترکیب کند [۶، ۷]. منابع آب جایگزین مانند نمک‌زدایی آب دریا و بازچرخانی فاضلاب می‌توانند نقش کلیدی در افزایش منابع آب ایفا کنند [۸-۱۰].

با توجه به اینکه تنها ۲/۵ درصد از آب‌های موجود در جهان شیرین و قابل استفاده است و بخش عمده‌ای از آن آب شور (عمدتاً آب دریا) است، شیرین‌سازی آب شور به‌عنوان منبعی جایگزین و مناسب مطرح شده است. این فناوری می‌تواند به بشریت کمک کند تا با بحران‌های آبی آینده مقابله کند [۱۱]. با این حال، فرآیند نمک‌زدایی با چالش‌های متعددی برای دستیابی به پایداری و مقرون‌به‌صرفه بودن در کشورهای با درآمد پایین و متوسط مواجه است. از میان تکنولوژی‌های موجود نمک‌زدایی، مفهوم حداقل تخلیه مایع (MLD)^۱ به‌عنوان یک رویکرد

^۱ Minimal Liquid Discharge (MLD)

نوآورانه مدیریت آب به وجود آمده است که هدف آن حداقل سازی تولید زباله شورابه در فرآیندهای صنعتی، به ویژه در زمینه نمک زدایی و بازیافت فاضلاب است [۱۲، ۱۳]. در این روش با تغلیظ پساب، حجم آن کاهش می یابد یا آب درون پساب بطور کامل جدا شده و نمک جامد به جا می ماند. استفاده از این رویه در تصفیه پساب های صنعتی، علاوه بر جلوگیری از آسیب به محیط زیست، موجب کاهش فشار بر روی منابع آبی موجود می شود [۱۴]. همچنین استفاده دوباره از مواد شیمیایی موجود در پساب در واحدهای صنعتی [۱۵] و هزینه حاصل از فروش گونه های مختلف نمک بعد از جداسازی انتخابی [۱۶] موجب کاهش هزینه های سیستم می شود [۱۷، ۱۸]. در مقایسه با روش های سنتی، MLD سعی دارد تا حد ممکن آب را از آب خوراک تصفیه شده بازیابی کند و مزایای متعددی نظیر کاهش تأثیرات زیست محیطی، بازیابی آب و منابع بیشتر و پایداری به مقررات را ارائه دهد [۱۹]. با این حال، پیاده سازی MLD نیازمند فناوری های تخصصی است که توانایی "فشردن" آب از شورابه را داشته باشند [۲۰].

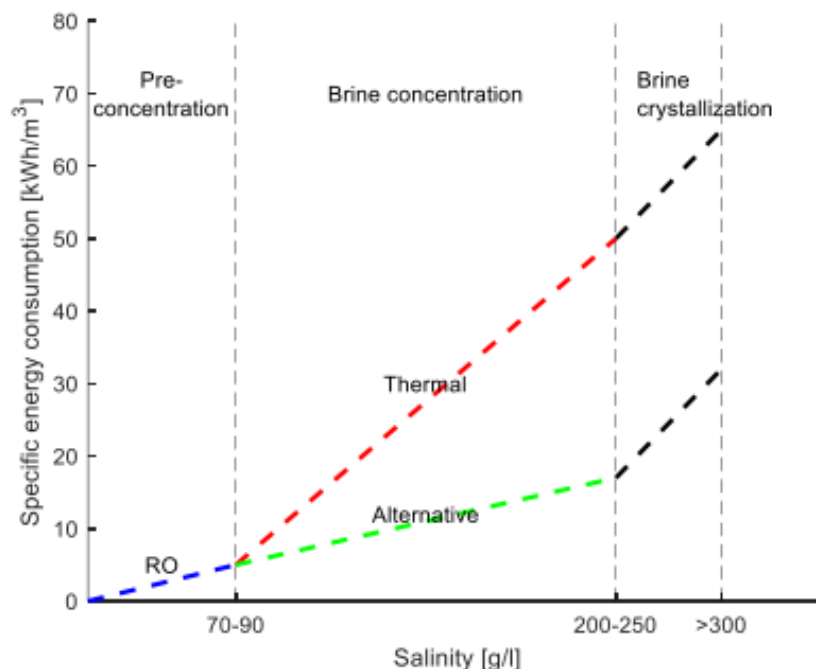
اسمز معکوس (RO) سنتی نمی تواند استفاده شود زیرا فشار مورد نیاز برای تصفیه شورابه بسیار بالاست و ممکن است از حداکثر فشار مجاز غشاهای RO (بیش از ۹۰ bar) فراتر رود [۲۱]. اگرچه فرآیندهای حرارتی مانند فشرده سازی بخار مکانیکی (MVC)^۱ و تقطیر چند مرحله (MED)^۲ می توانند برای تصفیه شورابه مورد استفاده قرار گیرند، اما هزینه بر و انرژی بر هستند [۲۲]. روش MVC در حال حاضر روش تجاری مورد استفاده در بخش تغلیظ پساب، است که در کنار مصرف انرژی زیاد، بین 20 kWh/m^3 تا $55/4$ برای جلوگیری از خوردگی لازم است از تیتانیوم و آهن ضدزنگ [۱۴] ساخته شود، که این موجب هزینه اولیه بالای این روش می شود. روش های مبتنی بر گرما مانند تقطیر غشایی^۳ و تقطیر چند مرحله با وجود مزیت نیاز به منابع گرمایی با دمای پایین، به دلیل گرمای نهان تبخیر بالای آب، 630 kWh/m^3 ، مصرف انرژی بالایی دارند و برای سازگاری بهتر با محیط

^۱ Mechanical Vapor Compression (MVC)

^۲ Multiple Effect Distillation (MED)

^۳ Membrane Distillation (MD)

زیست بهتر است از منابع گرمای اتلافی استفاده کنند [۲۳]. شکل (۱) محدوده شوری جریان‌ها و انرژی مصرفی در بخش‌های فرآیند بدون تخلیه مایع^۱ (ZLD) را نشان می‌دهد.



شکل ۱- محدوده شوری جریان‌ها و انرژی مصرفی در بخش‌های فرآیند ZLD [۱۶]

در بین روش‌های موجود برای نمک‌زدایی روش اسمز معکوس^۲ به دلیل عدم استفاده از روش‌های گرمایی بازدهی بسیار بالایی داشته [۲۴] و به عنوان کارآمدترین انتخاب از نظر مصرف انرژی شناخته می‌شود و بیشترین سهم از واحدهای شیرین‌سازی را داراست [۲۴]. این فرآیند به دلیل استفاده از فشار، قادر است تلفات برگشت‌ناپذیر ناشی از انتقال فاز آب محصول را که در فرآیندهای حرارتی نمک‌زدایی اجتناب‌ناپذیر است، کاهش دهد. در نتیجه، کارخانه‌های RO می‌توانند به حداقل انرژی ترمودینامیکی جداسازی نزدیک‌تر عمل کنند. با این حال، حداکثر فشار عملیاتی این فرآیند، که برای مقابله با فشار اسمزی خوراک لازم است، به فشار ترکیدگی غشا محدود می‌شود [۲۵]. بنابراین، این محدودیت، حداکثر بازیابی آب در سیستم‌های RO را به ویژه در غلظت‌های بالاتر خوراک

^۱ Zero Liquid Discharge (ZLD)

^۲ Reverse Osmosis (RO)

(بیش از ۷۵ گرم در لیتر) کاهش می‌دهد [۲۶]. همین سیستم‌های سنتی RO معمولاً با مشکلاتی در قالب شورابه، یک محلول نمکی متمرکز که به‌عنوان محصول جانبی فرآیند RO تولید می‌شود، مواجه هستند [۲۷، ۲۸]. میزان شوری جریان خروجی آن محدود است (شکل (۱)). این شورابه حاوی آلودگی‌ها و نمک‌های جدا شده از آب و همچنین مواد شیمیایی اضافی استفاده‌شده در فرآیند تصفیه است [۲۹]. دفع این شورابه می‌تواند تأثیر منفی بر محیط‌زیست داشته باشد. اگر به‌درستی مدیریت نشود، تخلیه شورابه به آب‌های طبیعی می‌تواند اکوسیستم‌های آبی را با افزایش سطح شوری و آسیب به موجودات آبی مختل کند [۳۰]. روش مشابهی بنام اسمز معکوس فشار بالا (HPRO)^۱ تا حدی می‌تواند این محدودیت را کم کند؛ مثلاً با تحمل فشار ۱۲۰ بار توانایی تغلیظ تا ۱۳۰ g/l را پیدا می‌کند [۱۹]. با فرض دستیابی به غلظت‌های بالاتر، که مستلزم تولید غشاهای مقاوم است، این روش بازده بسیار بالاتری نسبت به روش MVC دارد. برای نمونه مصرف انرژی یک سیستم دو طبقه HPRO برای تغلیظ پساب از ۷۰ g/l به ۲۵۰ g/l به مقدار ۷/۳ kWh/m³ است [۳۱]. با این وجود، عملکرد غشاها در فشارهای بسیار بالا کاهش می‌یابد [۳۲، ۳۳] که به دلیل کاهش شار آب از غشا نیاز به سطح غشا افزایش یافته و منجر به افزایش هزینه اولیه می‌شود. همچنین رسوب‌گذاری بر روی غشا با افزایش فشار افزایش یافته و هزینه‌های جاری ناشی از تمیز کردن و تعویض غشا افزایش می‌یابد [۲۶].

روش‌های جایگزین برای تغلیظ پساب عبارتند از الکترودیالیز، یون‌زدایی خازنی، سیکل جداسازی آب با محلول حساس به دما، اسمز معکوس با جداسازی پایین نمک (LSRRO)، اسمز مستقیم (FO) و اسمز معکوس با کمک اسمز (OARO)^۳ [۲۵، ۳۳].

در روش FO نرخ رسوب‌گذاری نسبت به روش RO کمتر بوده [۳۴] و گزینه‌ای ایده‌آل برای تصفیه پساب‌های دارای املاح کم محلول رسوب‌گذار است. در این روش از یک محلول جاذب^۴ برای استخراج آب موجود در پساب

^۱ High pressure Reverse Osmosis (HPRO)

^۲ Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis (LSRRO)

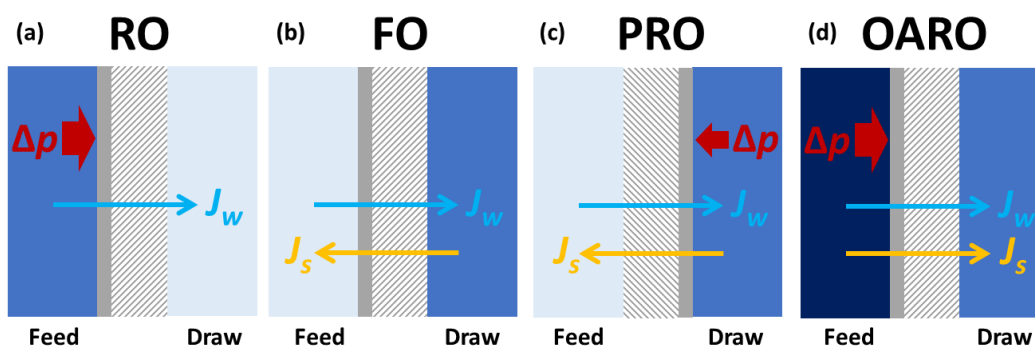
^۳ Osmotically Assisted Reverse Osmosis (OARO)

^۴ Draw solution

استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای این روش در کشاورزی استفاده از کودهای شیمیایی به عنوان ماده جاذب است که پس از رقیق شدن آن نیازی به جداسازی آب نیست [۳۵]. اما برای استفاده از آب موجود در جریان جاذب، در مرحله‌ی بازیابی آب آن استخراج شده و جریان جاذب تغلیظ می‌شود و به ماژول FO بر می‌گردد. برای بازیابی، در صورتی که محلول جاذب مبتنی بر مواد فرار مثل اتانول [۳۶] و یا محلول آمونیاک و دی اکسید کربن [۳۷] باشد، لازم است از روش‌های حرارتی استفاده کرد، ولی اگر ماده جاذب محلول آب و نمک باشد، هم می‌توان از روش حرارتی مثل تقطیر غشایی استفاده کرد [۳۸] و هم از روش‌های غشایی مبتنی بر فشار هیدرولیکی [۳۴]. استفاده از مواد جاذب فرار، به دلیل تبخیر در فرآیندهای گرمایی، موجب می‌شود که برای زدودن مقدار ماده وارد شده به محصول نهایی آب، واحدهای اضافه مورد نیاز باشد؛ چرا که وجود این مواد در آب تازه موجب سمی بودن آن می‌شود. ترکیب روش FO با استفاده از محلول آب نمک به عنوان ماده جاذب و روش غشایی غیرگرمایی باعث کاهش مصرف انرژی در عین اثر کم رسوب‌گذاری در غشا می‌شود. این به آن علت است که واحد بازیابی ماده جاذب، فقط محلول آب و نمک را تغلیظ می‌کند و با مواد رسوب‌گذار تماس ندارد. در روش LSRRO شدت شار نمک زیاد می‌شود تا غلظت جریان در طرف دیگر غشا کاهش یابد. این موجب دسترسی به غلظت‌های نمک بالا می‌شود. فرآیند ساخت ماژول‌ها در این روش مانند روش RO است و هزینه‌ی ساخت آن تقریباً در محدوده هزینه ساخت ماژول‌ها در روش RO است. ایده‌ی ترکیب روش RO و روش LSRRO در پژوهش‌های مختلف بررسی شده است [۱۵، ۴۴-۳۹].

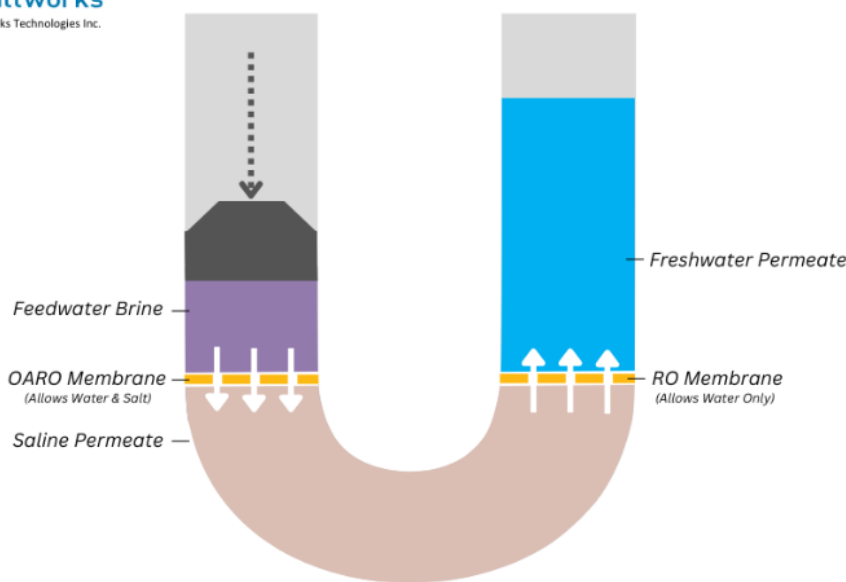
در سال‌های اخیر، OARO به عنوان یک روش مؤثر برای کاهش رطوبت آب نمک‌های بسیار شور محبوبیت پیدا کرده است. در شوری‌های بالای خوراک، کاربرد RO سنتی برای تولید آب خالص محدود است، زیرا برای غلبه بر فشار اسمزی غشایی بسیار بالا به فشار بسیار زیادی نیاز دارد. فشار مورد نیاز برای غلبه بر تفاوت فشار اسمزی عظیم بین سمت خوراک و سمت نفوذ می‌تواند به راحتی بیشتر از فشار ترکیدن غشاء (یعنی ۷۰ تا ۸۰ بار) باشد. در مقابل، OARO می‌تواند با معرفی یک محلول رقیق در سمت جذب، این محدودیت را برطرف کند تا تفاوت فشار اسمزی را کاهش دهد. این شیب اسمزی به انتقال آب در غشاء کمک می‌کند، فشار هیدرولیک مورد نیاز را

کاهش می‌دهد و احتمالاً مصرف انرژی را پایین می‌آورد [۴۵]. در این روش، علاوه بر جریان در حال تغلیظ شدن، یک جریان با غلظت کمتر در سمت دیگر غشا وارد می‌شود. به علت اینکه با این کار اختلاف فشار اسمزی کمتر می‌شود، غشا می‌تواند با فشارهای هیدرولیکی نه چندان زیاد، به غلظت‌های بسیار بالا دسترسی پیدا کند. فرآیند OARO یک فرآیند غشایی ترکیبی است که اصول FO و RO را تلفیق می‌کند [۴۶]. نیروی محرکه برای RO معمولی فشار هیدرولیک است، در حالی که نیروی محرکه برای OARO ترکیبی از فشار هیدرولیک و فشار اسمزی است. توانایی OARO در دستیابی به نرخ‌های بازیابی آب بالاتر، آن را به یک فناوری امیدوارکننده برای کاربردهای MLD تبدیل می‌کند [۳۷]. فرآیند OARO همچنین از نظر انرژی کارآمدتر از MED یا MVC است [۴۷]. به دلیل پتانسیل خود، OARO به‌تازگی در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است [۴۶-۴۹]. دیاگرام‌های فرآیندهای غشایی در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- دیاگرام فرآیندهای مختلف غشایی (الف) اسمز معکوس (RO)، (ب) اسمز مستقیم (FO)، (ج) اسمز تحت فشار (PRO) و (د) اسمز معکوس کمکی (OARO). رنگ آبی تیره‌تر نشان‌دهنده محلول با غلظت بالاتر است [۵۰].

مفهوم OARO در شکل (۳) زیر با استفاده از یک دیاگرام U-tube نشان داده شده است. در اینجا، یک «محلول نمکی میانه» فشار اسمزی را به مراحل مختلف تقسیم می‌کند و این امکان را فراهم می‌آورد که غلظت نهایی آب شور از طریق مراحل متوالی افزایش یابد.



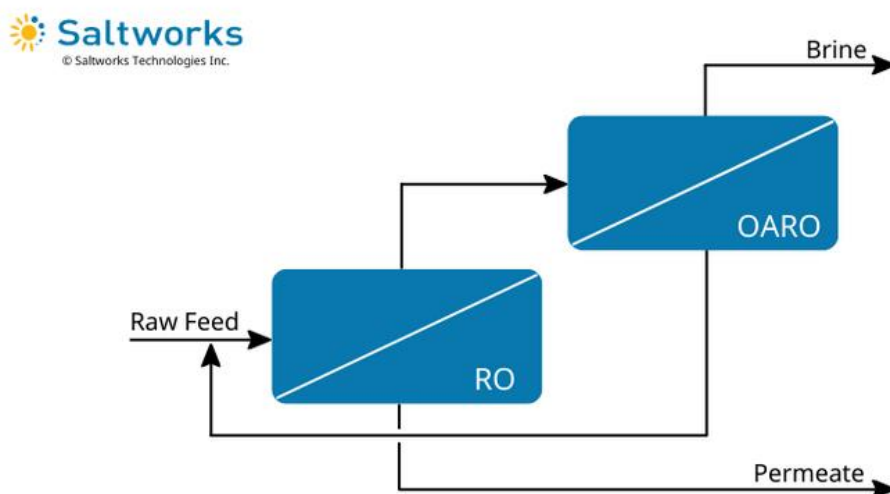
Osmotically Assisted Reverse Osmosis Basic Principle

شکل ۳- مقایسه OARO با سیستم‌های سنتی RO [۵۱]

فرآیند OARO با FO/PRO متفاوت است، زیرا OARO یک فرآیند غشایی تحت فشار است که در آن فشار هیدرولیکی برای رانش جریان آب از سمت خوراک با غلظت بالا به سمت محلول جذب با غلظت پایین اعمال می‌شود، در حالی که FO و PRO فرآیندهای غشایی اسمزی هستند که در آن جریان آب با استفاده از گرادیان غلظت بین محلول خوراک با غلظت پایین و محلول جذب با غلظت بالا رانده می‌شود [۵۰]. هر دو روش LSRRO و OARO از فرآیند غشایی غیر گرمایی استفاده می‌کنند؛ اما روش LSRRO به دلیل پس‌زنی پایین نمک، نسبت به روش OARO اتلاف زیادی دارد. مقایسه این دو روش در یک پژوهش نشان داد که مصرف انرژی بالای روش LSRRO موجب می‌شود هزینه‌ی تمام‌شده آب با کیفیت تولیدی بالاتر از روش OARO باشد. مزیت‌های روش OARO، اعم از توانایی تغلیظ بالا و بازدهی بالاتر نسبت به روش‌های گرمایی و روش LSRRO، آن را گزینه‌ی مناسبی برای بازیابی محلول جاذب آب و نمک برای روش FO می‌کند [۵۲].

غشاهای ترکیبی نازک و مارپیچی OARO را می‌توان به‌عنوان نوعی بین غشاهای «سخت» نانوفیلتراسیون^۱ (NF) و «سست» RO تصور کرد. این غشاها اجازه نفوذ کنترل‌شده نمک را می‌دهند و به جای تولید آب شیرین، آب شور عبوری تولید می‌کنند.

در فرآیند OARO، تصویر U-tube با حلقه‌های متوالی RO جایگزین می‌شود که در شکل (۴) نشان داده شده است. در اینجا، حلقه‌ای که بالاترین غلظت را دارد، آب شور را غلیظ می‌کند و هم آب و هم نمک را از طریق یک غشای «سست RO» به حلقه «میان» منتقل می‌کند.



شکل ۴- نمودار جریان فرآیند حلقه OARO متوالی [۵۱]

در سال ۲۰۱۹، آزمایشگاه پروفیسور الیمله^۲ در دانشگاه ییل^۳ مقاله‌ای درباره فناوری فوق با استفاده از غشاهای مارپیچی RO منتشر کرد و آن را RO با رد نمک پایین (LSSRO) نامید. صنعت به‌طور گسترده‌تری از اصطلاح OARO استفاده کرده است. آب شور تولید شده در مرحله «میان» توسط OARO دو هدف دارد. اولاً، این آب شور امکان افزایش غلظت نهایی آب شور را با استفاده از تجهیزات RO تحت فشار معمولی فراهم می‌کند، هرچند

^۱ Nanofiltration

^۲ Elimelech

^۳ Yale

که درون آن یک غشای خاص به نام «loose OARO» وجود دارد. ثانیاً، این آب شور به سمت بالا به یک پیش تغلیظ کننده RO سنتی تر بازگردانده می شود که آب RO با کیفیت بالاتری تولید می کند. این امر منجر به ایجاد یک سیستم غشایی می شود که قادر است غلظت های بسیار بالاتری از آب شور را به دست آورد، هرچند با هزینه اضافی ناشی از پیچیدگی فرآیند. تا به حال، غشاهای مارپیچی OARO به طور تجاری در دسترس نبودند. محققان با استفاده از اکسیدان های شیمیایی، غشاهای RO سنتی آب دریا را اصلاح کردند تا تخلخل (نفوذپذیری نمک) را افزایش دهند و غشاهای «loose RO» تولید کنند. اکنون، این غشاهای نازک و ترکیبی «loose RO» توسط تولیدکنندگان بزرگ و معتبر غشا به صورت انبوه تولید می شوند و این امر امنیت تأمین و تضمین های فرآیندی را که مشتریان و یکپارچه سازان سیستم به دنبال آن هستند، فراهم می کند [۵۱].

۲- میزان اهمیت فناوری OARO

نرخ بازیابی پایین در فرآیندهای نمک زدایی پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی نامطلوبی به همراه دارد، زیرا نیاز است حجم بیشتری از آب تغذیه استخراج و پیش تصفیه شود تا همان مقدار آب شیرین تولید گردد. همچنین، حجم بیشتری از آب نمک، یا به عبارت دیگر، کنسانتره باقی مانده از فرآیند، باید دفع شود. به صورت جهانی، فناوری های نمک زدایی بیش از ۱۴۰ میلیون متر مکعب آب نمک تولید می کنند، که این میزان تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از آب شیرینی است که تولید می کنند (۹۵ میلیون متر مکعب در روز) [۱۱].

آب نمک، که محصول جانبی ناخواسته نمک زدایی است، از نظر اقتصادی به شکل نامطلوبی در محیط زیست تخلیه می شود. این آب نمک معمولاً به شدت آلوده است و می تواند حاوی آلاینده هایی مانند افزودنی های ضد رسوب و ضد پوسته پوسته شدن، ضد کف، رباینده های اکسیژن و محصولات خوردگی باشد [۵۳، ۵۴]. علاوه بر این، آب نمک دارای شوری بسیار بالایی است و در برخی فرآیندهای نمک زدایی حرارتی، ممکن است در دماهای

بالا تخلیه شود. به همین دلیل، آب‌نمک تصفیه‌نشده می‌تواند به زندگی دریایی و زیست‌بوم‌های اقیانوسی آسیب جدی وارد کند [۳۰].

این اثرات منفی اکولوژیکی را می‌توان با توسعه راه‌حل‌های مدیریت آب‌نمک اقتصادی‌تر و سازگار با محیط زیست کاهش داد. به گفته موریلو^۱ و همکاران [۵۵]، این راه‌حل‌ها می‌توانند برای سه هدف اصلی استفاده شوند: (۱) به حداقل رساندن حجم آب‌نمک (BVM)^۲، (۲) بازیابی نمک و فلزات ارزشمند، و (۳) تطبیق آب‌نمک برای استفاده در صنعت. فرآیندهای بازیابی نمک و فلزات از آب‌نمک می‌توانند محصولات جانبی با ارزشی تولید کنند. به گفته لوگاناثان^۳ و همکاران [۵۶]، پتانسیل استخراج موادی مانند سدیم، منیزیم، کلسیم و بروماید از آب دریا وجود دارد، که از لحاظ اقتصادی نیز بسیار مطلوب است.

یکی دیگر از گزینه‌ها این است که آب‌نمک را با تمرکز و تطبیق آن برای استفاده در صنایعی مانند صنعت کلر-قلیایی و تولید اسیدها بهره‌برداری کنیم [۵۷، ۵۸]. همچنین، توانایی برداشت آب از آب‌نمک‌هایی با غلظت بالای املاح (۳۵۰-۵۰ گرم در لیتر) به شیوه‌ای کارآمدتر از نظر انرژی، برای صنایع مختلفی مانند نفت، گاز و انرژی مفید خواهد بود [۵۴، ۵۹]. به عنوان مثال، این موضوع می‌تواند به تسهیل استفاده مجدد از فاضلاب‌های با شوری بالا کمک کند و به فرآیندهای دیگری مانند نمک‌زدایی داخلی اجازه دهد تا با کاهش حجم آب‌نمک، از محدودیت‌های قانونی، اقتصادی و زیست‌محیطی عبور کنند [۳۱].

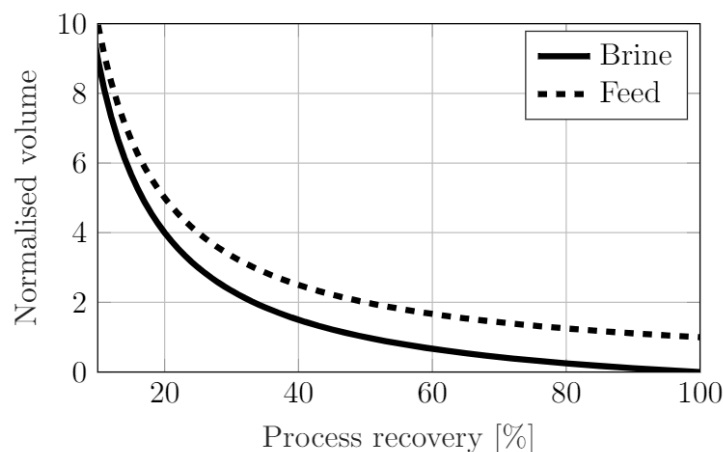
علاوه بر این، فرآیندهای ZLD می‌توانند حاشیه سود را افزایش دهند، زیرا محصولات جانبی ارزشمندی مانند مواد معدنی، با کاهش هزینه‌های انرژی تولید می‌شوند. اگرچه در نگاه اول BVM ممکن است سود اقتصادی مستقیمی به نظر نرسد، اما با بازیابی بیشتر فرآیند، حجم آب‌نمک به‌طور تصاعدی کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان برداشت آب دریا برای تولید آب شیرین نیز کمتر می‌شود. این روند در شکل (۵) نشان داده شده است. کاهش

¹ Morillo

² Brine volume minimisation (BVM)

³ Loganathan

حجم آب نمک، دفع آن را ساده‌تر کرده و هزینه‌های مرتبط را کاهش می‌دهد، و کاهش حجم آب ورودی می‌تواند هزینه‌های پیش‌فرآوری را نیز کم کند [۱۱].



شکل ۵- حجم آب نمک و خوراک با توجه به بازیافت آب شیرین کارخانه آب شیرین‌کن با نرخ تولید آب تراویده‌ی ثابت

[۱۱].

براساس گزارش موریلو و همکاران [۵۵]، هزینه‌های تخلیه آب نمک بین ۵٪ تا ۳۳٪ از کل هزینه نمک‌زدایی را شامل می‌شود. کاهش حجم آب نمک می‌تواند هزینه‌های مربوط به تخلیه و تصفیه آن را کاهش دهد که این روش ممکن است برای رعایت مقررات محلی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تخلیه لازم باشد. بنابراین، راه‌حل‌های مدیریت آب نمک که از نظر زیست‌محیطی سازگارتر هستند، ممکن است با حجم‌های پایین‌تر آب نمک و بازیابی‌های بالاتر فرآیند به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر شوند.

با این حال، فرآیندهای بازیابی مایع BVM و ZLD هنوز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، زیرا سایر گزینه‌های دفع آب نمک از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر به نظر می‌رسند [۱۸]. علاوه بر این، آب‌گیری آب نمک‌های با شوری بسیار بالا (بیش از ۷۵ گرم در لیتر) به لحاظ فنی چالش‌برانگیز است.

در حال حاضر، فرآیندهای حرارتی، به ویژه MVC، برترین تکنیک‌های انتخابی برای آب‌گیری آب نمک با TDS بیش از ۷۰ گرم در لیتر هستند و می‌توانند شوری آب نمک نهایی را به حدود ۲۵۰ گرم در لیتر برسانند [۳۱].

سیستم MVC شامل یک کمپرسور جریان حجمی است که به عنوان یک "پمپ حرارتی" عمل می‌کند. این کمپرسور به طور مداوم فعالیت می‌کند و گرمای نهانی که در مراحل تبخیر و تراکم تبادل می‌شود را حفظ می‌کند. بخار فشرده‌شده با عبور گرما، بخشی از خوراک فرآوری شده را از طریق سطح انتقال حرارت تبخیر می‌کند. این چرخه تبخیر و تراکم به طور پیوسته اجرا می‌شود.

علاوه بر این، تغلیظ‌کننده‌ها و متبلورکننده‌ها نیز بر اساس رویکرد مشابهی عمل می‌کنند و از یک کمپرسور برای تأمین گرمای مورد نیاز در فرآیند آب‌گیری آب نمک استفاده می‌کنند.

هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی مرتبط با فرآیندهای حرارتی مانند MVC و متمرکزکننده‌های آب نمک، موجب محدودیت در کاربرد گسترده این تکنیک‌ها شده است. به عنوان مثال، میزان مصرف انرژی در فناوری MVC بین ۷ تا ۲۵ کیلووات‌ساعت به ازای هر متر مکعب متغیر است، در حالی که این میزان برای تغلیظ‌کننده‌های آب نمک بین ۱۸ تا ۲۶ کیلووات‌ساعت به ازای هر متر مکعب تخمین زده شده است.

علاوه بر این، تغلیظ آب نمک به حداکثر حد حلالیت و تبلور آن با استفاده از فناوری‌های حرارتی، نیاز به سرمایه و انرژی بیشتری دارد. به عنوان مثال، کریستالیزرهای آب نمک ممکن است به ۵۲ تا ۶۶ کیلووات‌ساعت به ازای هر متر مکعب انرژی احتیاج داشته باشند.

روش تبخیر خورشیدی نیز با چالش‌های خاصی مواجه است. این روش معمولاً محدود به مناطق خشک و گرم است، جایی که تابش خورشیدی کافی برای بهره‌برداری وجود دارد. همچنین، نیاز به فضای وسیع برای نصب سیستم‌های تبخیر خورشیدی به عنوان یک محدودیت دیگر مطرح است، که می‌تواند کارایی و مقرون به صرفه بودن آن را تحت تأثیر قرار دهد. این عوامل به نوبه خود به محدود کردن پذیرش و استفاده از این تکنیک‌ها در مقیاس وسیع کمک می‌کنند [۶۰].

فرآیندهای غشایی می‌توانند به غلظت‌های بالاتری از آب نمک نسبت به روش‌های معمولی دست یابند. این فرآیندها شامل اسمز معکوس تک مرحله‌ای هستند که از تکنیک‌هایی مانند تقطیر غشایی و تبلور بهره می‌برند

[۶۱-۶۳]. همچنین، اسمز معکوس چند مرحله‌ای (MSRO)^۱ و اسمز معکوس فشار بالا از دیگر روش‌های موثر در این زمینه هستند [۳۱].

روش دیگری به نام اسمز معکوس با دفع نمک پایین (LSRRO)^۲ نیز وجود دارد که به طور خاص برای حذف آب‌های کم‌نمک طراحی شده است [۶۴]. دیگر فناوری‌هایی مانند OARO [۵۹، ۶۵] و اسمز به کمک فشار (PAO) [۶۶، ۶۷] نیز می‌توانند به افزایش کارایی جداسازی و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کنند. همچنین، FO به دلیل توانایی در حفظ فشار و جداسازی مؤثر، مورد توجه قرار گرفته است [۶۸]. در کنار این فناوری‌ها، الکترودیالیز و دیونیزاسیون خازنی نیز می‌توانند در فرآیندهای BVM (کاهش غلظت آب نمک) مورد استفاده قرار گیرند [۲۶]، هرچند که عمدتاً برای خوراک‌های با شوری کم مناسب هستند. این به دلیل هزینه‌های سرمایه و عملیاتی نسبتاً بالای آن‌ها و همچنین انتخاب‌پذیری پایین‌تر آب/نمک در مقایسه با اسمز معکوس است [۶۹، ۷۰].

تصفیه آب شور با استفاده از تقطیر غشایی نیازمند مصرف انرژی نسبتاً زیادی است، به ویژه هنگامی که با سایر روش‌های تصفیه آب شور که به خوبی تثبیت شده‌اند، مقایسه شود [۷۱]. کارایی حرارتی پایین سیستم‌های تقطیر غشایی^۴ (MD) به تلفات حرارت محسوس نسبتاً بالا که مربوط به عملکرد آن‌هاست، و همچنین به مشکلات مربوط به ادغام حرارتی کارآمد در این سیستم‌ها مرتبط است. میستری^۵ و همکاران [۲۴] مدل‌سازی کردند که آنتروپی تولید شده توسط فناوری‌های مختلف تصفیه آب شور چقدر است و تخمین زدند که بازده قانون دوم η_{II} در سیستم تقطیر با تماس مستقیم می‌تواند به ۱٪ برسد. در مقایسه، بازده‌های قانون دوم سایر فناوری‌های تصفیه آب شور حرارتی، مانند MVC و تقطیر چند مرحله‌ای، به مراتب بالاتر تخمین زده شد ($\eta_{II} = 8/5$ MVC: و ٪). $\eta_{II} = 5/9$ MED). فرآیندهای تصفیه آب شور حرارتی با تلفات شدید غیرقابل برگشت ناشی از تغییر فاز در طول

^۱ Multi-Stage Reverse Osmosis (MSRO)

^۲ Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis (LSRRO)

^۳ Pressure-Assisted Osmosis (PAO)

^۴ Membrane distillation (MD)

^۵ Mistry

فرآیند جداسازی روبرو هستند. این تلفات غیرقابل برگشت می‌تواند با استفاده از اسمز معکوس بازیابی شود، زیرا مکانیزم جداسازی در RO شامل تغییر فاز ترمودینامیکی نیست و به جای آن بر پایه سینتیک نسبی جذب و انتشار استوار است. بنابراین، بازده قانون دوم RO توسط میستری و همکاران [۲۴] تخمین زده شد که به طور قابل توجهی بالاتر بود ($\eta_{II}=32\%$).

فرآیندهای غشایی تحت فشار دارای پتانسیل بالایی برای کارکردن نزدیک‌تر به حداقل انرژی ترمودینامیکی جداسازی هستند، که معادل انرژی آزاد گیبس برای جداسازی می‌باشد [۲۴، ۵۹]. این ویژگی آن‌ها را به عنوان جایگزین‌های جذاب برای فناوری‌های مبتنی بر حرارت در تصفیه آب شور و بدون تخلیه مایع (BVM/ZLD) تبدیل می‌کند. به‌طور مشابه، فرآیندهای غشایی مبتنی بر اسمز، مانند FO، اسمز به کمک فشار یا OARO، نیز می‌توانند بر فناوری‌های حرارتی BVM/ZLD غلبه کنند [۳۷، ۴۹، ۷۲].

یک سیستم کلی غلظت آب شور در FO شامل (۱) یک سیستم غشایی FO است که در آن ورودی توسط اسمز غلیظ می‌شود در حالی که محلول کشش از طرف دیگر از طریق یک غشای نیمه‌نفوذپذیر رقیق می‌شود و (۲) یک سیستم بازیابی محلول کشش (DSR) که محلول کشش را با استخراج آب محصول نهایی دوباره غلیظ می‌کند. اگرچه تقریباً هیچ انرژی در سیستم غشایی FO مصرف نمی‌شود (به استثنای حالت کار پمپی با فشار پایین)، اما سیستم DSR از نظر انرژی هزینه‌بر است. برای این که آب‌گیری از آب شور در سیستم غشایی FO اتفاق بیفتد، محلول کشش باید پتانسیل اسمزی بالاتری نسبت به محلول ورودی داشته باشد.

همان‌طور که الیملیک^۲ و فیلیپ^۳ توضیح داده‌اند [۷۳]، حداقل انرژی جداسازی با افزایش پتانسیل اسمزی محلول کشش افزایش می‌یابد و به همین خاطر، نیازهای انرژی نظری و واقعی برای بازیابی محلول کشش نیز بالاتر از نیازهای جداسازی مستقیم خواهد بود. به عبارت دیگر، فرآیندهای غشایی مبتنی بر اسمز که در آن‌ها محلول کشش (۱) غلیظ‌تر از محلول ورودی است (یعنی FO و PAO) و (۲) برای استفاده مجدد بازیابی می‌شود، از نظر

¹ Draw Solution Recovery System (DSR)

² Elimelech

³ Phillip

مصرف انرژی نسبت به همتایان تحت فشار خود بیشتر خواهد بود (با فرض اینکه بازیابی محلول کشش با RO یک مرحله‌ای انجام می‌شود)، حداقل زمانی که از نظر حداقل انرژی‌های ترمودینامیکی جداسازی در نظر گرفته شوند [۷۳، ۷۴]. در عمل، انتخاب فرآیند می‌تواند بر برگشت‌پذیری و کارایی قانون دوم تأثیرگذار باشد و هر پیش‌تصفیه لازم نیز ممکن است تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی داشته باشد. به عنوان مثال، اگر FO به عنوان یک پیش‌تصفیه برای RO آب دریا یا آب شور در نظر گرفته شود، ممکن است بتوان به صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی دست یافت.

در موارد استثنایی، محلول کشش در فرآیند FO/PAO برای استفاده مجدد بازیابی نمی‌شود. در این موارد، سیستم یکپارچه FO/PAO می‌تواند به وضوح از نظر انرژی کارآمدتر از RO مستقل باشد. به عنوان مثال، (۱) سیستم‌های FO-RO که در آن‌ها جریان‌های زائد با شوری پایین غلیظ می‌شوند تا محلول کشش شوری (مانند آب دریا) رقیق شود قبل از تصفیه در سیستم RO [۷۵] و (۲) سیستم‌های FO که در آن‌ها محلول کشش رقیق شده به عنوان محصول نهایی شکل می‌گیرد [۷۶].

سیستم‌های FO-RO همچنین می‌توانند هنگام مقایسه با RO دو مرحله‌ای از نظر مصرف انرژی کارآمدتر باشند. شافر^۱ و همکاران [۷۷] نشان دادند که اگر از آب دریا به عنوان منبع آب تازه استفاده شود، فرآیند FO-RO انرژی کمتری نسبت به RO دو مرحله‌ای مصرف می‌کند و در عین حال به استانداردهای سخت‌گیرانه بور و کلرید برای آب آبیاری کشاورزی دست می‌یابد. با این حال، فرآیند FO-RO به دلیل جریان آب پایین‌تر در فرآیند FO، نیاز به سطح غشای بیشتری دارد. در نتیجه، بن^۲ و همکاران [۷۸] دریافتند که فرآیند FO-RO به طور کلی به دلیل افزایش سرمایه‌گذاری فرآیند پرهزینه‌تری است.

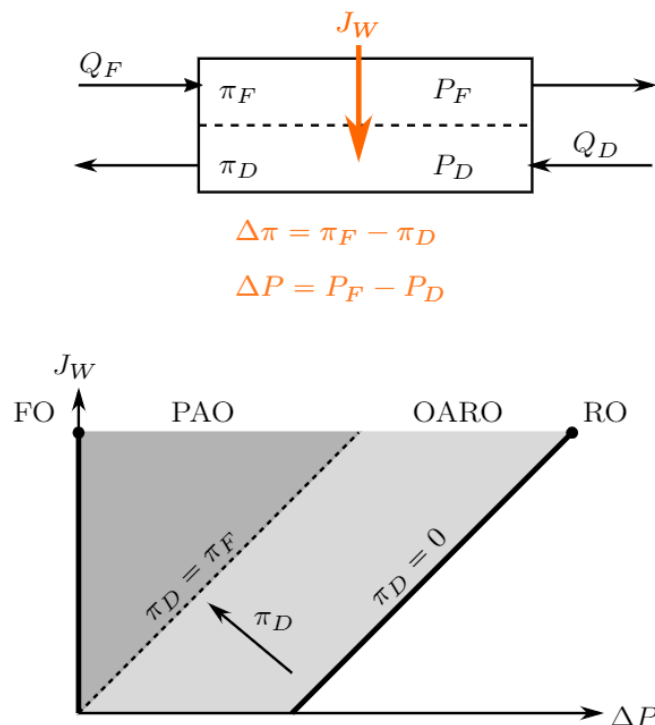
از میان فرآیندهای غشایی مبتنی بر اسمز، OARO به عنوان بهترین گزینه از نظر کارایی انرژی شناخته شده است. وابستگی مفهومی جریان آب، J_w ، به تفاوت فشار هیدرولیکی ترانس ممبرانی ΔP در چهار فرآیند اصلی

¹ Shaffer

² Ban

غشایی تحت فشار و/یا مبتنی بر اسمز در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است. در حالی که RO و FO به ترتیب تحت فشار و مبتنی بر اسمز کار می‌کنند، هر دو اصل کاری در PAO و OARO برای اطمینان از انتقال آب از طریق غشا گنجانده شده است. نسبت به FO و PAO، غلظت محلول کشش OARO از محلول ورودی کمتر است ($\pi_D < \pi_F$) و فقط برای کاهش فشار اسمزی ترانس‌ممبرانی $\Delta\pi$ استفاده می‌شود.

برای مقایسه، به گونه‌ای که همه فرآیندها بتوانند همان جریان آب را به دست آورند، فرآیندهای با فشار هیدرولیکی پایین‌تر ($\Delta P_{FO} < \Delta P_{PAO} < \Delta P_{OARO} < \Delta P_{RO}$) می‌بایست از محلول کشش اسمزی قوی‌تری استفاده کنند ($\pi_{D,FO} < \pi_{D,PAO} < \pi_{D,OARO} < \pi_{D,RO}$) تا بخش بیشتری از نیروی محرکه کلی را تأمین کنند. با این حال، استفاده از محلول‌های کشش قوی‌تر می‌تواند منجر به بازدهی انرژی کلی کمتری شود، زیرا فرآیند DSR شدیدتر انرژی می‌طلبد. بنابراین، هنگام مقایسه فرآیندهای برگشت‌پذیر، انتظار می‌رود که $\eta_{II,OARO} > \eta_{II,PAO} > \eta_{II,FO}$ باشد [۴۸].



شکل ۶- جریان آب J_W نسبت به فشار کاری ΔP برای FO، PAO، OARO و RO [۴۸]

در این روش، به جای استفاده از فشار زیاد برای عبور آب از غشا، از یک محلول غلیظ (معمولاً نمک) استفاده می‌شود تا فشار اسمزی بالاتری ایجاد کند. این موضوع باعث می‌شود که آب به راحتی از غشاء عبور کند و ناخالصی‌ها از آن جدا شوند. با استفاده از این تکنیک، می‌توان به طور مؤثری هزینه‌ها را کاهش و کارایی سیستم را افزایش داد. همچنین نرخ بازیابی بالا و بهره‌وری انرژی را حتی در صورت برخورد با آب نمک بسیار شور ارائه می‌دهد. فرآیند OARO برای خوراک آب نمک با شوری ۱۵۰,۰۰۰ میلی گرم در لیتر آزمایش شده است [۷۹]. به عبارت دیگر OARO اصول کار FO و RO را ترکیب می‌کند. برخلاف فرآیند RO سنتی، یک محلول نمکی از طریق سمت نفوذی پمپ می‌شود تا شیب فشار اسمزی را در سراسر غشا کاهش دهد. این امکان کار در فشارهای پایین‌تر را فراهم می‌کند و آن را برای تصفیه آب نمک‌های بسیار غلیظ بدون تجاوز از فشار ترکیدن غشا مناسب می‌کند [۴۹]. با این حال، محلول کشش برای رسیدن به سطوح شوری مطلوب نیاز به عملیات اضافی دارد.

دو تا از مزایای اصلی OARO، کارایی انرژی آن و قابلیت آن در دور زدن محدودیت‌های حداکثر بازیابی در RO و فرآیندهای مرتبط با آن (مانند MSRO و HPRO) است. استفاده از یک محلول کشش اضافی در OARO، فشار هیدرولیکی لازم برای دستیابی به جریان آب معادل RO را کاهش می‌دهد. این امر اجازه می‌دهد تا با استفاده از OARO، جریان‌های خوراک با شوری بالاتر بدون تجاوز از حداکثر فشار هیدرولیکی مجاز برای مازول غشا، کارایی رطوبت‌زدایی داشته باشند. به عبارت دیگر، بازیابی فرآیند در پیکربندی‌های OARO ممکن است تحت تأثیر فشار شکست غشا نباشد. هرگونه محدودیتی در بازیابی بیشتر ناشی از عوامل دیگر مانند گرفتگی و رسوب‌گذاری، محدودیت‌های هزینه‌ای یا ناتوانی مواد در تحمل شرایط شوری بالا خواهد بود [۶۵].

مزایای اضافی OARO شامل حفاظت چندگانه آن در برابر آلاینده‌های آب ورودی در فرآیندهای غشایی به صورت سری و امکان بازیابی مواد حل‌کننده کششی با استفاده از اشکال انرژی حرارتی کم کیفیت است که ارزان‌تر و تجدیدپذیرتر از انرژی برق شبکه هستند. تمام این مزایا OARO را به یک فناوری BVM و ZLD امیدوارکننده تبدیل می‌کند.

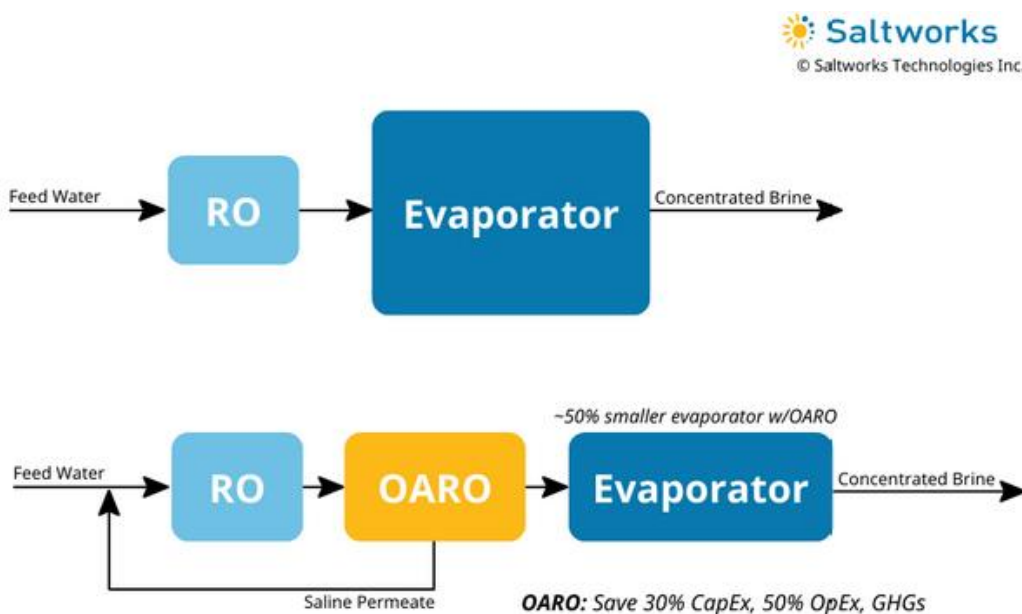
فرآیند OARO ظرفیت بازیابی آب بالاتری نسبت به RO تحت همان فشار هیدرولیکی نشان می‌دهد زیرا تفاوت فشار اسمزی بین دو محلول کاهش می‌یابد [۸۰]. علاوه بر این، OARO می‌تواند آب خوراک با غلظت بالا (< ۷۵ گرم در لیتر) مانند آب نمک را از طریق یک فرآیند چندمرحله‌ای تصفیه کند؛ در حالی که RO به دلیل محدودیت فشار شکست غشاء نمی‌تواند آب با غلظت بالا را به‌طور مؤثر تصفیه کند [۸۱].

به طور کلی، OARO نه تنها مشکلات مربوط به مدیریت پساب‌ها را کاهش می‌دهد بلکه امکان تولید آب شیرین با کیفیت بالا را نیز فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها OARO را به یک گزینه جذاب برای توسعه پایدار منابع آبی تبدیل کرده است.

این فناوری با افزایش کارایی جداسازی و کاهش هزینه‌های عملیاتی، امکان بازیابی بیشتر آب را فراهم می‌آورد. فرآیند OARO قادر است غلظت‌های بالاتری از آب شور را نسبت به روش‌های معمولی تولید کند و همچنین مصرف انرژی را کاهش دهد. علاوه بر این، OARO می‌تواند به عنوان یک پیش‌تصفیه مؤثر برای سیستم‌های RO مورد استفاده قرار گیرد که منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش کارایی کلی سیستم خواهد شد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع آبی پایدار و کمبود منابع طبیعی، OARO می‌تواند یک گزینه جذاب برای توسعه پایدار منابع آبی باشد.

سیستم‌های OARO به‌طور قابل‌توجهی غلظت آب شور را افزایش می‌دهند و با ظرفیت تبخیرکننده‌ها رقابت می‌کنند. در واقع، OARO می‌تواند مصرف انرژی را تا ۵۰٪ کاهش دهد و هزینه سرمایه‌گذاری را برای تولید معادل یک تبخیرکننده تا ۳۰٪ کمتر کند. با این حال، پذیرش OARO تنها برای سیستم‌های بزرگ‌تر که ظرفیت ورودی آن‌ها بیشتر از ۵۰۰ مترمکعب در روز است، از نظر اقتصادی منطقی است. در ظرفیت‌های پایین‌تر، ممکن است هزینه‌های اضافی عملیات واحد OARO و شدت عملیاتی توجیه‌پذیر نباشد. همان‌طور که به‌صورت شماتیک نشان داده شده است، ادغام OARO در یک سیستم تغلیظ‌کننده می‌تواند نیاز به یک تبخیرکننده ۵۰٪ کوچکتر را ایجاد کند. در مورد استحصال لیتیوم به صورت کربنات لیتیوم (Li_2CO_3)، OARO می‌تواند نیاز به تبخیرکننده

را حذف کند و ارزش سیستم را به طور چشمگیری افزایش دهد. مزایای اقتصادی OARO با افزایش ظرفیت بیشتر می شود. در شکل (۷) مقایسه شماتیک OARO با سیستم RO سنتی و تبخیرکننده آورده شده است [۵۱].



شکل ۷- مقایسه شماتیک OARO با سیستم RO سنتی و تبخیرکننده [۵۱]

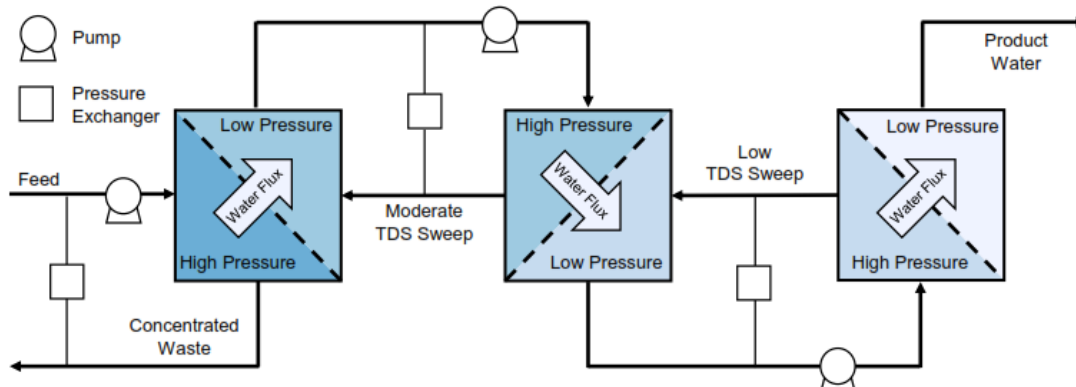
۳- تاریخچه‌ی شروع فناوری

روش OARO برای اولین بار توسط بارتولومه^۱ و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۱۷ با پیکربندی سیکل متوالی ابداع شد (شکل (۸)). همین گروه تحقیقاتی این پیکربندی را برای خواص مشخص غشا برای سه فرآیند تغلیظ آب شور با غلظت ۷۵ g/l و بازیابی آب ۵۰٪، غلظت ۷۵ g/l و بازیابی ۷۰٪، و غلظت ۱۲۵ g/l با بازیابی ۴۰٪ بهینه‌سازی کردند. نتیجه آن دستیابی به انرژی مصرفی مخصوص (SEC) به ترتیب ۸/۷، ۱۳/۵ و ۱۲/۱ kWh/m^۳ و هزینه‌ی آب تولیدی^۲ به ترتیب ۲/۷، ۵/۷ و ۶/۶ \$/m^۳ با استفاده از سیستم‌هایی به ترتیب با تعداد کل طبقات ۳، ۵ و ۴ بود.

^۱ Bartholomew

^۲ Specific energy consumption (SEC)

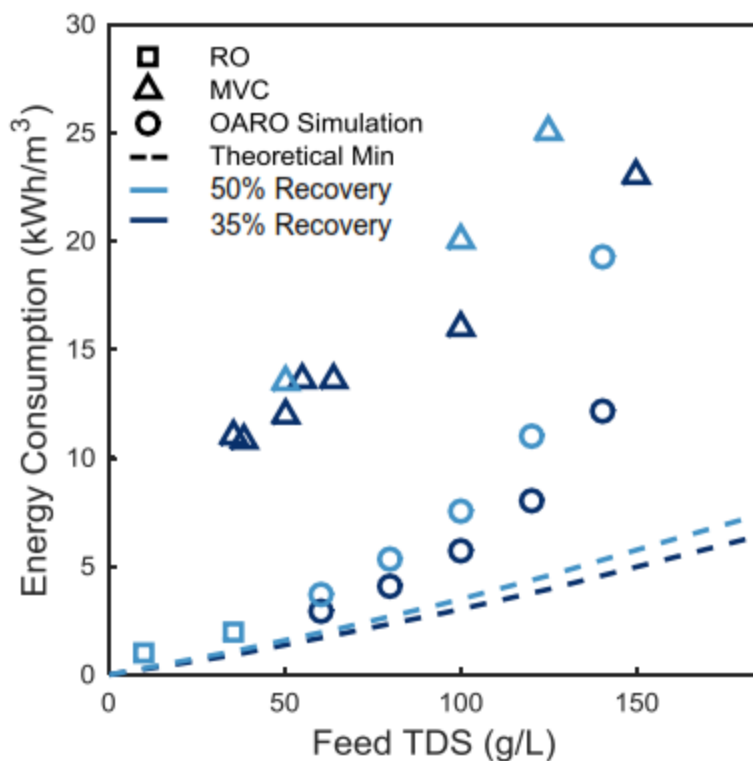
^۳ Unit water cost (UWC)



شکل ۸- نقشه فرآیند OARO. دو مرحله اول OARO هستند، در حالی که مرحله نهایی RO است [۲۵].

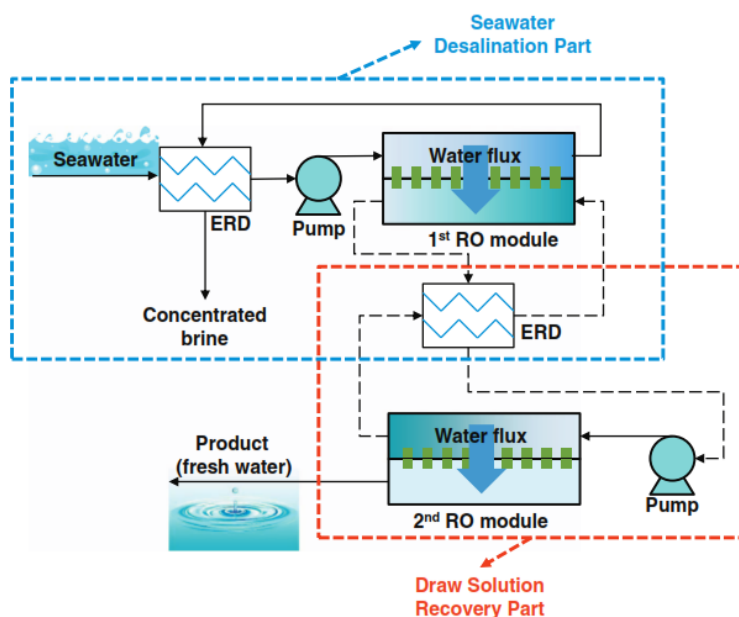
در این پژوهش آنها بر روی مقایسه مصرف انرژی OARO با سایر فرآیندهای تصفیه آب شور مطالعه کردند. مصرف انرژی یک معیار کلیدی برای ارزیابی اثربخشی و قابلیت اقتصادی فرآیند OARO نسبت به فرآیندهای تبخیری پیشرفته، مانند MVC است. شکل (۹) مقادیر مصرف انرژی گزارش شده در منابع را برای RO، MVC و شبیه‌سازی‌های OARO در فشار خوراک ۶۵ بار و مساحت غشاء هر ماژول ۱۰ و ۲۰ متر مربع برای بازیابی‌های ۳۵ و ۵۰ درصد ارائه می‌دهد. مصرف انرژی RO از ۱ تا ۲ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب آب تولیدی برای آب لب‌شور (۵ گرم در لیتر TDS) و آب دریا (۳۵ گرم در لیتر TDS) در بازیابی ۵۰ درصد متغیر است. مصرف انرژی MVC بین ۱۱ تا ۲۵ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب آب تولیدی برای آب دریا (۳۵ گرم در لیتر TDS) تا آب شور با شوری بالا (۱۵۰ گرم در لیتر TDS) با بازیابی‌های ۳۵ تا ۵۰ درصد متغیر است. مصرف انرژی OARO تخمین زده می‌شود که بین ۲/۹ تا ۳/۷ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب آب تولیدی برای TDS خوراک ۶۰ گرم در لیتر در بازیابی‌های ۳۵ و ۵۰ درصد باشد. در خوراک با TDS بالاتر به میزان ۱۴۰ گرم در لیتر، این مقادیر به ترتیب به ۱۲/۴ و ۱۹/۳ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب آب تولیدی برای بازیابی‌های ۳۵ و ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. این تخمین‌ها شامل تلفات مرتبط با افت فشار در سراسر ماژول، تلفات در مبدل‌های فشار و کارایی ایزنتروپیک پمپ فشار بالا است. برخی از ناکارآمدی‌ها در عملکرد واقعی سیستم، از جمله کثیفی غشاء و استفاده ناقص از مساحت غشاء مدنظر قرار گرفته نمی‌شود. شکل (۹) همچنین کار حداقلی نظری

برای کاهش رطوبت شور را ارائه می‌دهد که به عنوان تفاوت بین انرژی آزاد گیبس خوراک ورودی و دو محصول (آب شیرین و آب شور غلیظ) محاسبه شده است. روش الکترولیت NRTL در AspenPlus برای تعیین انرژی آزاد گیبس محلول‌ها استفاده می‌شود. کارایی کاهش رطوبت، که به عنوان نسبت کار نظری حداقل به مصرف انرژی تعریف می‌شود، برای فرآیندهای غشایی (RO و OARO) بین ۳۰ تا ۵۵ درصد و برای MVC بین ۱۰ تا ۲۰ درصد متغیر است [۲۵].



شکل ۹- مصرف انرژی فرآیندهای RO، MVC و OARO و کار حداقلی نظری با توجه به غلظت خوراک و بازیابی (۳۵٪ آبی تیره، ۵۰٪ آبی روشن). مصرف انرژی RO برای شیرین‌سازی آب لب‌شور و آب دریا در بازیابی ۵۰ درصد است. مصرف انرژی MVC شامل آب دریا و آب شور با شوری بالاتر از صنعت نفت و گاز است که در بازیابی‌های ۳۵ تا ۵۰ درصد متغیر است. شبیه‌سازی OARO از فشار خوراک ۶۵ بار و مساحت غشاء هر ماژول به ترتیب ۱۰ و ۲۰ متر مربع برای بازیابی‌های ۳۵ و ۵۰ درصد استفاده می‌کند. کار حداقلی نظری بر اساس تفاوت در انرژی آزاد گیبس بین خوراک ورودی و محصولات خروجی محاسبه شده است [۲۵].

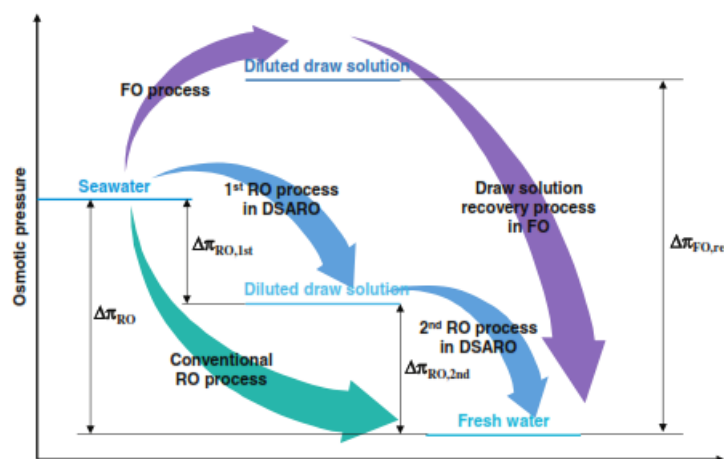
همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، مصرف انرژی فرآیندهای تصفیه با افزایش غلظت خوراک و بازیابی آب شیرین به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای تمامی شوری‌های بررسی شده، فرآیندهای مبتنی بر غشاء (RO و OARO) مصرف انرژی کمتری نسبت به MVC دارند. با این حال، MVC می‌تواند بازیابی‌هایی تا ۹۰ درصد برای آب شور به دست آورد که این مقدار به‌طور قابل توجهی بالاتر از بازیابی‌های OARO در حالت پایه‌ای است که در این مطالعه بررسی شده است. در حالی که امکان افزایش بازیابی فرآیند OARO با افزایش مساحت کل غشاء، غلظت‌های جستجو و تعداد ماژول‌ها وجود دارد، این تغییرات منجر به افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های فرآیند OARO خواهد شد [۲۵]. در پژوهش دیگری پارک^۱ و همکارانش [۸۲] از پیکربندی سیکل متوالی در یک سیستم دو طبقه (یک طبقه OARO و یک طبقه RO) در زمینه‌ی تصفیه‌ی معمول آب دریا استفاده شده بود (شکل (۱۰)). نتیجه‌ی این تحقیق برای تولید آب از آب شور با غلظت نمک ۳۵ g/l و بازیابی ۴۰٪ آن بود که این سیستم مقدار SEC برابر با ۳/۲۵ kWh/m^۳ و مقدار UWC برابر با ۰/۹۸۴ \$/m^۳ دارد و از این نظر فرآیندی ارزان‌تر از همتای RO با مقدار UWC برابر با ۱/۱ \$/m^۳ خواهد بود.



شکل ۱۰- شماتیک فرآیند پژوهش پارک و همکاران [۸۲]

^۱ Park

همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، ویژگی بارز فرآیند OARO این است که با کمک محلول کششی با غلظت پایین می‌تواند فرآیند RO با فشار بالا و تک‌مرحله‌ای را به یک فرآیند دو مرحله‌ای با فشار پایین تبدیل کند. بنابراین، این فرآیند می‌تواند نیاز به تجهیزات مقاوم در برابر عملیات با فشار بالا را از بین ببرد و به این ترتیب، هزینه سرمایه‌گذاری فرآیند OARO را نسبت به فرآیند RO سنتی کاهش دهد. علاوه بر این، تمایل بالای کششی غیرقابل برگشت، که دلیل اصلی هزینه‌های جایگزینی غشاء است، می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد. این موضوع می‌تواند هزینه‌های عملیاتی فرآیند OARO را نیز کاهش دهد. در مقایسه با فرآیند FO، فرآیند OARO انرژی حداقلی مورد نیاز را افزایش نمی‌دهد. با توجه به این ویژگی‌ها، فرآیند OARO می‌تواند پتانسیل تبدیل شدن به یک فرآیند شیرین‌سازی آب دریا با هزینه پایین‌تر نسبت به فرآیند RO سنتی را داشته باشد. برای ارزیابی قابلیت اجرایی فرآیند OARO به عنوان یک گزینه جایگزین، باید یک مدل ریاضی برای توصیف این فرآیند توسعه داده شود و همچنین تحلیل مبتنی بر هزینه بر اساس این مدل باید با فرآیند RO سنتی تحت شرایط مشابه انجام شود. در این پژوهش از عبارت اسمز معکوس با کمک محلول کششی یا DSARO^۱ به جای OARO استفاده شده بود [۸۲].

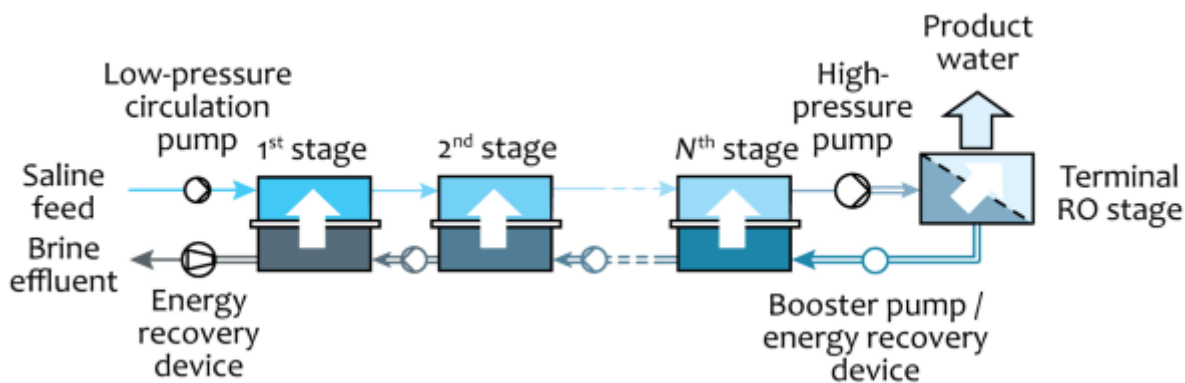


شکل ۱۱- تصویری از تفاوت فشار اسمزی نظری در فرآیندهای RO سنتی، DSARO و FO [۸۲].

^۱ Draw solution assisted reverse osmosis (DSARO)

پیترز^۱ و هانکینز^۲ [۳۷] از پیکربندی سیکل متوالی به عنوان مرحله تغلیظ پساب با استفاده از محلول آمونیاک و دی اکسید کربن در جریان ثانویه استفاده کردند. محلول دوم در واحدهای تقطیر بازیابی می شود. سیستم آنها توانایی آگیری از جریان های با شوری ۳۵ g/l و ۴۵ g/l و رساندن به شوری ۲۰۵ g/l و ۲۴۵ g/l با مقدار SEC معادل سازی شده برابر با ۹/۳ و ۱۲/۹۳ kWh/m^۳ را دارا بود. همچنین در مقایسه با روش FO و بازیابی محلول فرار به صورت مشابه، پیکربندی پیشنهادی آنها توانایی استفاده از منبع گرما با ۱۲ درجه سلسیوس دمای کمتر را داشت. محدودیت این پیکربندی، آن است که از نظر تئوری، انرژی مصرفی برابر با روش RO تک طبقه دارد [۵۹]. در عمل، به دلیل تاثیر بیشتر قطبش غلظت، مصرف انرژی بالاتری نسبت به RO دارد [۸۲].

پیکربندی طبقات سری توسط چن^۳ و ییپ^۴ [۵۹] پیشنهاد داده شد. در این پیکربندی از روش OARO بصورت طبقه های پشت سر هم استفاده می شود (شکل (۱۲)). در این روش جریان شور ورودی به عنوان جریان ثانویه در طبقات پشت سر هم OARO رقیق می شود تا اینکه بتوان از آن در طبقه RO آگیری کرد. پساب خروجی RO به عنوان جریان اولیه وارد طبقات OARO شده و بخشی از آب خود را به جریان ورودی سیستم می دهد و بعد از تغلیظ، از سیستم خارج می شود.



شکل ۱۲- طرحواره پیکربندی طبقات سری [۵۹]

¹ Peters

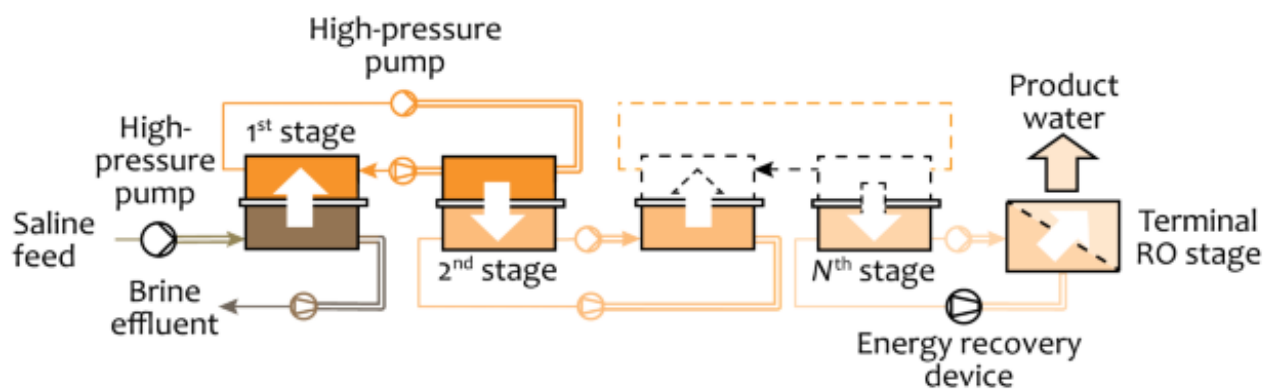
² Hankins

³ Chen

⁴ Yip

طبق شبیه‌سازی ساده شده‌ی آن‌ها، این ساختار مصرف انرژی کمتری از روش RO تک طبقه دارد. همچنین این سیستم برای تغلیظ آب‌های با شوری 35 g/l و 70 g/l با بازیابی 70% و 50% مقدار SEC برابر با $2/12$ و $3/15$ kWh/m^3 دارد. محدودیت این پیکربندی، محدود شدن مقدار افزایش شوری بین جریان‌های پساب ورودی و خروجی سیستم است. این بدان دلیل است که نقطه‌ی پینچ در طبقات OA در اولین طبقه اتفاق می‌افتد. برای رسیدن به شوری‌های بالاتر با این پیکربندی لازم است از چند طبقه شامل این پیکربندی استفاده شود که در آن پساب خروجی هر زیر سیستم، جریان ورودی سیستم دیگری است [۵۹].

آتیا^۱ و همکارانش [۸۳] در یک شبیه‌سازی دقیق و برای رسیدن به کمترین هزینه، پیکربندی‌های سیکل‌های متوالی و طبقات سری را مقایسه کردند. شکل (۱۳) طراحی پیکربندی سیکل متوالی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- طراحی پیکربندی سیکل متوالی [۵۹]

در این روش در اولین طبقه OARO، جریان تغذیه وارد می‌شود و بعد از استخراج آب، به عنوان شورآب از سیستم خارج می‌شود. اولین طبقه OARO جریان ثانویه‌ی با غلظت کمتر دارد که در آن رقیق می‌شود. این جریان وارد طبقه دوم OARO شده و در آن آبگیری می‌شود و به طبقه اول برمی‌گردد. بین هر دو طبقه، حلقه‌ی بسته‌ی جریان، آب را از طبقه قبلی به طبقه بعدی منتقل می‌کند. با جلوگیری از رفتن در طبقات بعدی، میزان شوری جریان

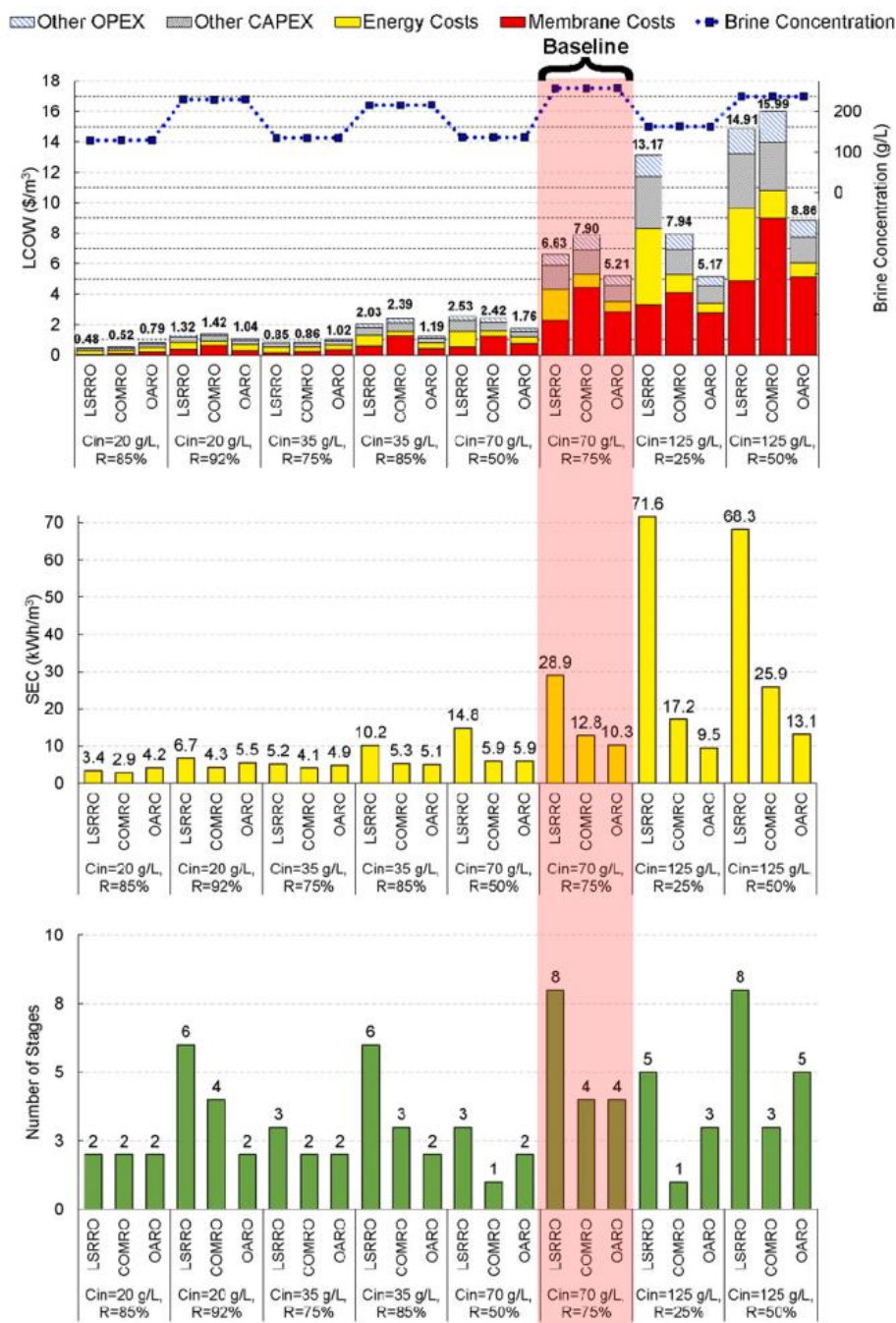
¹ Atia

حلقه‌ها کاهش می‌یابد؛ تا آنجا که می‌توان از آن در طبقه آخر که از روش RO استفاده می‌کند، آب با کیفیت را به عنوان محصول خروجی استخراج کرد. بسته بودن حلقه‌های جریان در این روش این امکان را می‌دهد تا از محلول‌های شیمیایی دلخواه استفاده کرد. عملکرد دو سیستمی که بررسی کردند برای تصفیه‌ی پساب با شوری 70 g/l و بازیابی 75% آن بود که مقدار SEC این دو پیکربندی با چهار طبقه به ترتیب $10/3$ و $123/8 \text{ kWh/m}^3$ و مقدار UWC برابر با $5/14$ و $7/90 \text{ \$/m}^3$ بود. استدلال آنها برای برتری پیکربندی سیکل متوالی به پیکربندی طبقات سری آن بود که در پیکربندی طبقات سری، هر چه جریان ورودی به سیستم شورتر باشد، طول بیشتری از غشا در طبقه OARO لازم است تا شوری آن به اندازه‌ای کاهش یابد که در سیستم RO آب با کیفیت تولید کند [۸۳].

شکل (۱۴) تأثیر غلظت خوراک و نرخ بازیابی را بر هزینه‌های آب شیرین (LCOW)، هزینه انرژی ویژه و تعداد مراحل در فرآیندهای RO، MVC و OARO نشان می‌دهد. LCOW برای شیرین‌سازی خوراک با غلظت 70 گرم در لیتر به غلظت‌های آب شور بالای 250 گرم در لیتر بین $5/14$ تا $7/90$ دلار به ازای هر متر مکعب متغیر است، در حالی که برای خوراک‌های با غلظت 20 و 35 گرم در لیتر، این هزینه بین $1/04$ تا $2/53$ دلار به ازای هر متر مکعب است. OARO از نظر هزینه مزیت کلی دارد و برای خوراک‌های با شوری بالا مناسب‌تر است، در حالی که LSRRO به دلیل هزینه انرژی ویژه بالای خود ($68/3$ تا $71/6$ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب در غلظت اولیه 125 گرم در لیتر) معضل دارد. همچنین، اسمز معکوس با واسطه اسمزی آبشاری (COMRO) نیاز بالایی به مساحت غشاء دارد که با افزایش غلظت خوراک افزایش می‌یابد. در نهایت، OARO توازنی بین مساحت نسبتاً پایین غشاء و SEC ارائه می‌دهد که آن را به گزینه‌ای مقرون به صرفه‌تر تبدیل می‌کند [۸۳].

¹ Levelized cost of water

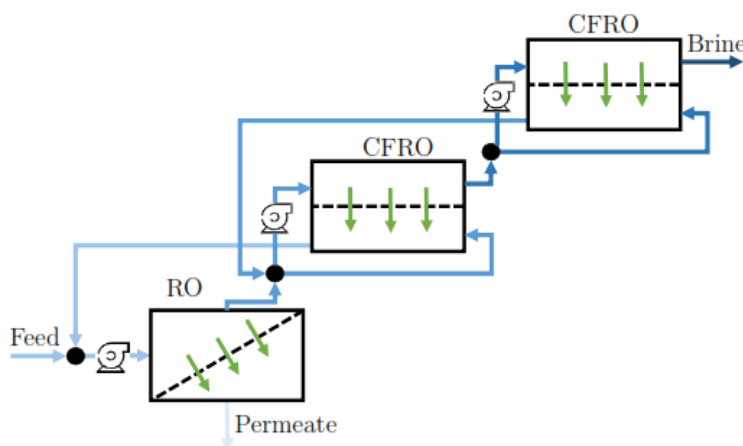
² Cascading osmotically mediated reverse osmosis (COMRO)



شکل ۱۴- تأثیر غلظت خوراک و نرخ بازیابی بر هزینه بهینه LCOW (بالا)، SEC (وسط) و تعداد مراحل (پایین) برای LSRRO، COMRO و OARO. غلظت نهایی آب شور برای هر مورد نیز نشان داده شده است (بالا، مربع‌های آبی). هزینه‌های غشاء شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و جایگزینی است. موارد پایه با جعبه سایه‌دار قرمز مشخص شده‌اند ($R = 75\%$, $C_{in} = 70 \text{ g/L}$).

[۸۳].

بو^۱ و لینهارد^۲ [۶۵] پیکربندی تقسیم جریان تغذیه را پیشنهاد دادند و با تشخیص پارامترهای موثر و فرض مساحت ثابت برای غشا، آن را برای مصرف انرژی کمینه بهینه‌سازی کردند. در این روش، جریان تغذیه به هر طبقه OARO بین جریان‌های ورودی اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود (شکل (۱۵)). جریان اولیه تغلیظ شده به طبقه OARO بعدی می‌رود و همین روند تکرار می‌شود. جریان خروجی ثانویه هر طبقه OARO به جریان تغذیه طبقه قبلی برگشت داده می‌شود. محصول آب با کیفیت در اولین طبقه که از روش RO استفاده می‌کند تولید می‌شود.



شکل ۱۵- طرح‌واره پیکربندی تقسیم جریان تغذیه [۶۵]

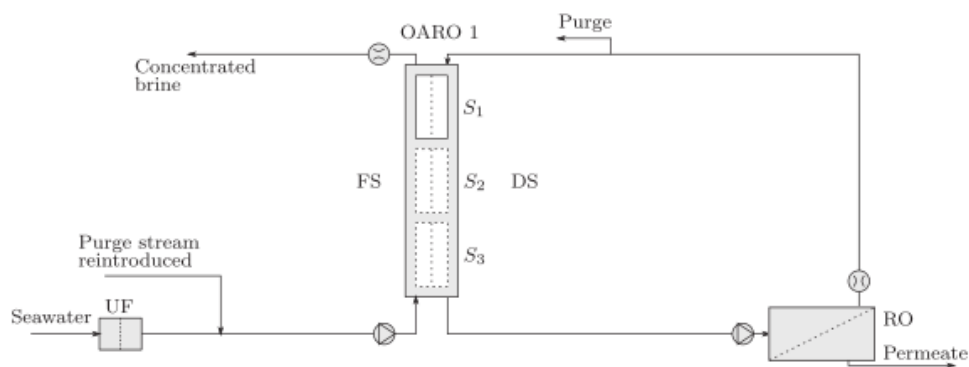
نتیجه‌ی آن این بود که برای تصفیه‌ی آب با شوری 35 g/kg به پساب با شوری 120 g/kg و 200 g/kg سیستم به ترتیب با ۳ و ۶ طبقه مقدار SEC برابر با $2/9$ و $3/9 \text{ kWh/m}^3$ است. آن‌ها همچنین تاثیر ضرایب عبور نمک و آب، بازیابی، و پارامتر ساختاری را بر تولید آنتروپی در یک واحد جداگانه‌ی OARO بررسی کردند. یافته‌ی حائز اهمیت آن‌ها، افزایش تولید آنتروپی به دلیل پلاریزاسیون غلظتی (ICP^۳) با افزایش پارامتر ساختاری بود [۶۵].

¹ Bouma

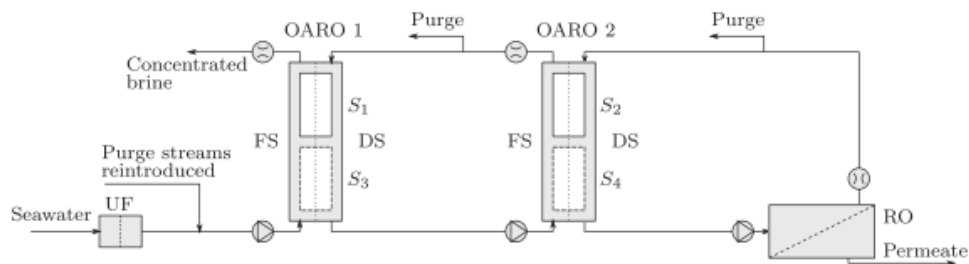
² Lienhard

³ Internal Concentration Polarisation

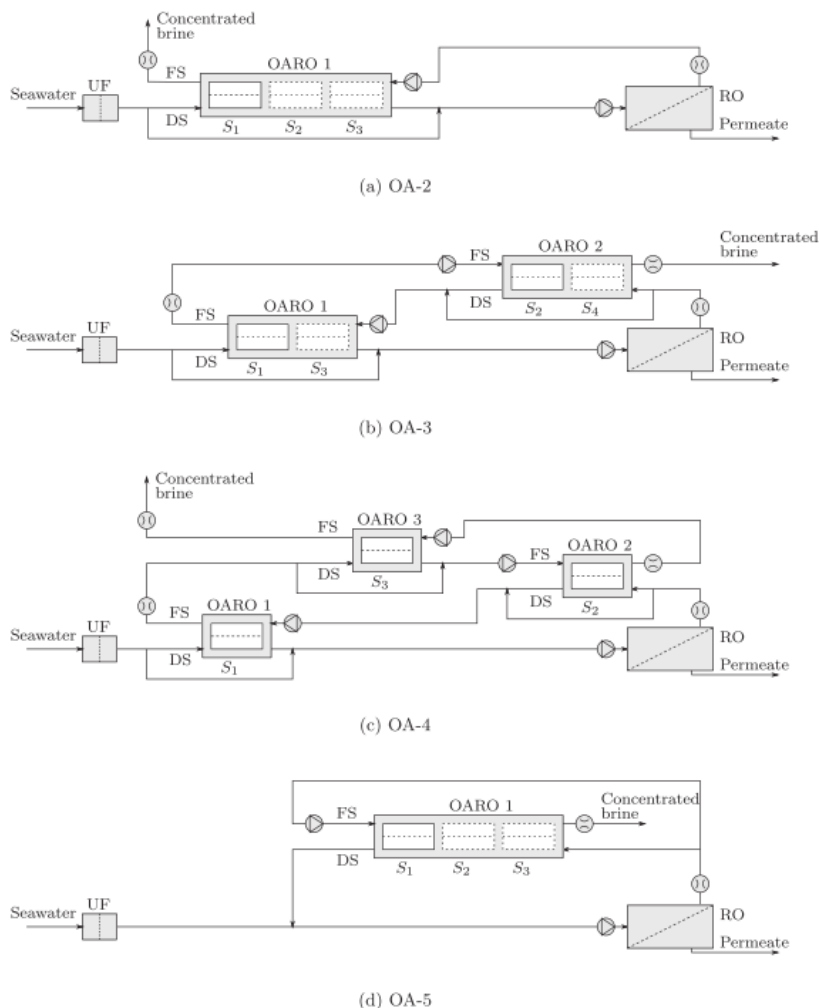
پژوهش پیترز و هانکینز [۴۹] برای تحلیل پنج پیکربندی، که پیکربندی‌های سیکل متوالی و تقسیم جریان تغذیه را در برمی‌گیرد، نشان داد برای فرآیند تغلیظ آب با شوری 35 g/l و بازیابی 77% روش تقسیم جریان تغذیه از نظر هزینه و کیفیت آب تولیدی برتر از چهار پیکربندی دیگر است. آنها همچنین واحد OARO مستقل را از نظر تاثیر نسبت جریان های اولیه و ثانویه، بازیابی، نوع غشا، و دبی حجمی جریان اولیه در هر ماژول بررسی کردند. پیکربندی‌های بررسی شده در این پژوهش در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



(a) OA-1-1

(b) OA-1-2. If this process is modelled with three stages ($T = 3$), then the third stage is either located at S_3 or S_4 .

شکل ۱۶- اولین فرآیند جریان یکپارچه OARO که بررسی شده است [۴۹].



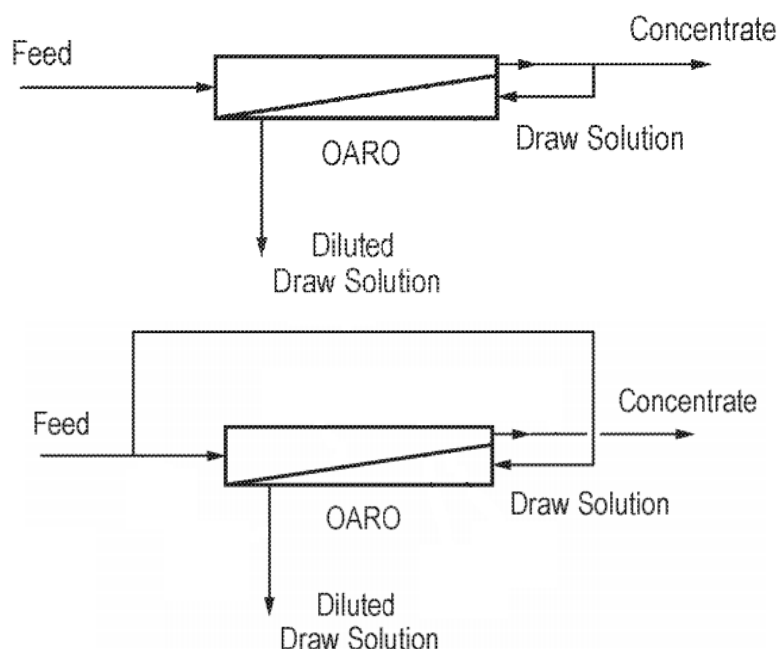
شکل ۱۷ - چهار فرآیند جریان یکپارچه OARO دیگر که بررسی شده است [۴۹].

۴- بررسی پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO

جستجوی پتنت‌ها به دو شکل انجام شد. ابتدا عبارت Osmotically Assisted Reverse Osmosis در google patent جستجو شد. این جستجو منجر به یافتن ۹ پتنت مرتبط با فناوری OARO شد که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

پتنت WO2019097261A1 به شرکت Surrey Aquatechnology Limited تعلق دارد که در زمینه جمع‌آوری، تامین و تصفیه آب فعالیت دارد. این پتنت به توسعه و بهبود فرآیند OARO می‌پردازد. در این پتنت، مخترعان

به یک تکنیک جدید اشاره می‌کنند که در آن بخشی از محلول خوراک یا محلول باقی‌مانده به سمت نفوذی اولین غشاء نیمه‌نفوذپذیر تغذیه می‌شود (شکل (۱۸)). این کار منجر به کاهش اختلاف فشار اسمزی در غشاء می‌شود و در نتیجه، فشار هیدرولیکی مورد نیاز برای ایجاد جریان حلال از محلول خوراک کاهش می‌یابد. این روش به وضوح مزایای قابل توجهی را ارائه می‌دهد، از جمله افزایش جریان عبوری از غشاء نیمه‌نفوذپذیر نسبت به حالت سنتی اسمز معکوس که تحت محدودیت‌های فشار هیدرولیکی مشابه عمل می‌کند. یکی از نقاط قوت OARO این است که اجازه می‌دهد محلول‌های خوراک با غلظت بالا در فشارهای هیدرولیکی ایمن‌تر و قابل قبول‌تری پردازش شوند، در حالی که تکنیک‌های معمول اسمز معکوس نیاز به فشارهای بالاتری دارند که ممکن است فراتر از حداکثر مجاز برای غشاءهای سنتی باشد. در کل، پتنت WO2019097261A1 بر روی بهینه‌سازی فرآیند OARO تمرکز دارد و نشان‌دهنده پیشرفت‌های مهمی در زمینه تصفیه آب و کارایی سیستم‌های اسمز معکوس است. این پتنت می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی کاربردهای صنعتی و تجاری تصفیه آب داشته باشد [۸۴].



شکل ۱۸- (بالا) تغذیه بخشی از محلول محلول باقی‌مانده و (پایین) تغذیه بخشی از خوراک به سمت نفوذی اولین غشاء

نیمه‌نفوذپذیر [۸۴]

پتنت WO2021145937A1 که به شرکت نفت عربستان سعودی تعلق دارد به طراحی و بهینه‌سازی ماژول‌های غشایی برای فرآیند تصفیه آب شور با استفاده از فشار اسمزی طبیعی می‌پردازد. این پتنت به طور خاص بر روی نحوه بهره‌برداری از فشار اسمزی طبیعی برای کاهش فشار عملیاتی و مصرف انرژی در سیستم‌های تصفیه آب تمرکز دارد. در این پتنت، توضیح داده شده است که با استفاده از طراحی خاص ماژول‌های غشایی، می‌توان به گونه‌ای عمل کرد که فشار اسمزی موجود در محلول خوراک به عنوان یک عامل کمکی در فرآیند تصفیه عمل کند. این طراحی به کاهش نیاز به فشارهای بالای عملیاتی کمک می‌کند که معمولاً در سیستم‌های سنتی اسمز معکوس مورد نیاز است. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود، بلکه امکان تصفیه محلول‌های خوراک با غلظت بالا را در فشارهای ایمن‌تر و قابل قبول‌تر فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، پتنت WO2021145937A1 به دنبال ارائه راهکارهایی برای افزایش کارایی و بهره‌وری در سیستم‌های تصفیه آب است که می‌تواند تأثیرات مثبتی بر روی هزینه‌ها و عملکرد کلی این سیستم‌ها داشته باشد. به طور خلاصه، این پتنت نمایانگر یک پیشرفت مهم در طراحی ماژول‌های غشایی برای تصفیه آب است که می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در صنعت تصفیه آب منجر شود. یکی از نوآوری‌های کلیدی این پتنت، ارائه سازوکارهایی برای کنترل دقیق جریان‌های ورودی و خروجی است. این سیستم‌ها قادرند فشارهای متفاوت در دو طرف غشا را بهینه‌سازی کرده و از نیروی اسمزی برای کاهش فشار مکانیکی مورد نیاز بهره ببرند. این به معنای حذف نمک‌ها و آلودگی‌ها با بازدهی در حدود ۶۰ تا ۹۰ درصد است، در حالی که مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های معمولی به شدت کاهش یافته است. همچنین، این پتنت مواد پیشرفته‌ای را معرفی کرده که دوام بالایی در برابر رسوب‌گذاری و تخریب شیمیایی دارند، که عمر مفید سیستم‌ها را افزایش می‌دهد [۸۵].

پتنت CN108778469B که به شرکت Special Thunder Maintains System تعلق دارد، جزئیات مهمی از فناوری OARO را توصیف می‌کند. این فناوری ترکیبی از فشار مکانیکی و اسمزی است که عملکرد غشاهای نیمه‌تراوا را بهینه‌سازی می‌کند. در این روش، یک محلول با فشار اسمزی بالا در یک طرف غشا و یک محلول با فشار اسمزی پایین‌تر در طرف دیگر قرار می‌گیرد. غشا به گونه‌ای طراحی شده که عبور آب از محلول پرغلظت به

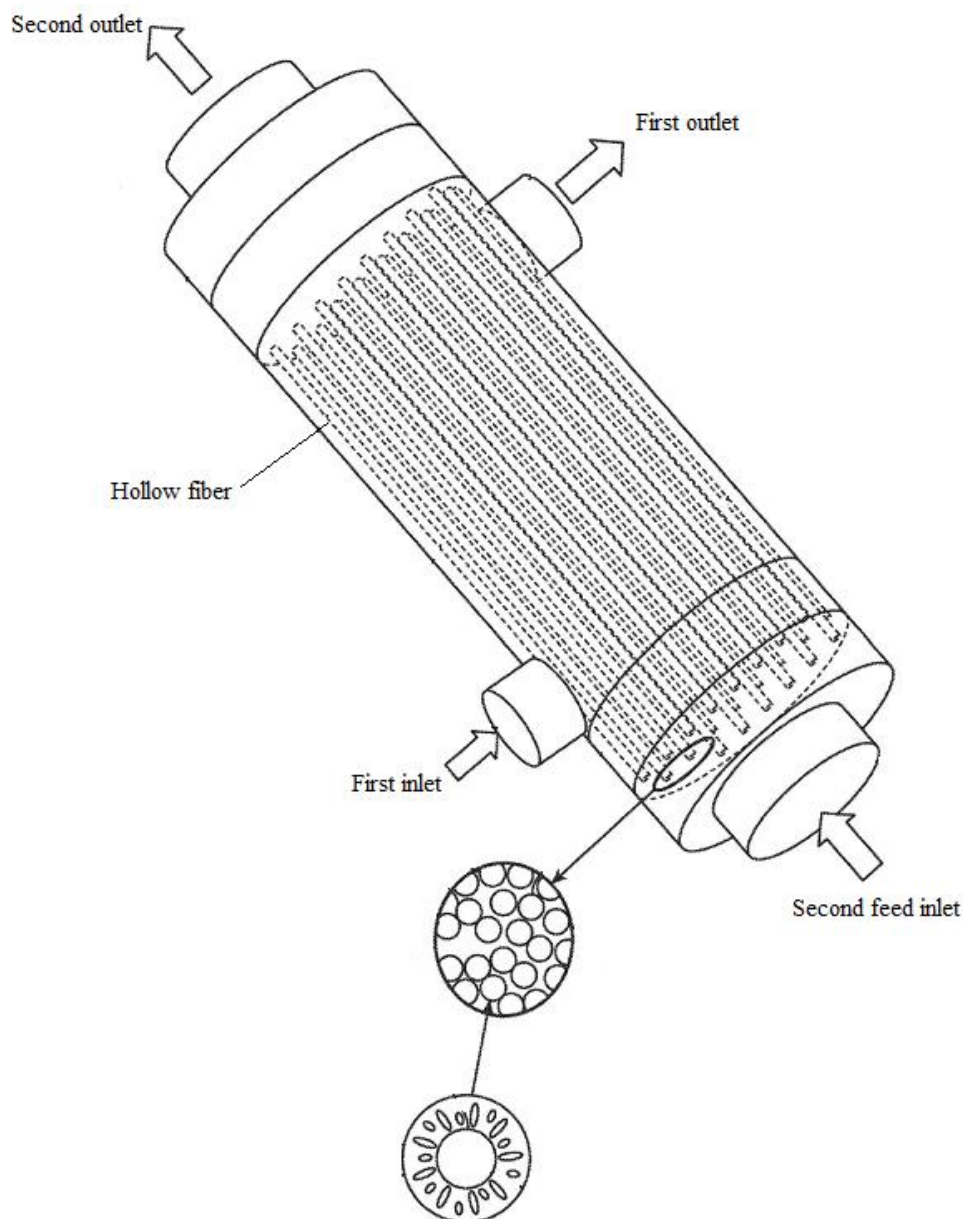
کم‌غلظت، انرژی کمتری نسبت به اسمز معکوس سنتی نیاز دارد. یکی از جنبه‌های کلیدی این فناوری استفاده از محلول دوم (با فشار اسمزی پایین‌تر) است که به عنوان تنظیم‌کننده عمل می‌کند. این محلول باعث کاهش اختلاف فشار روی غشا و بهبود بازده انرژی می‌شود. در نتیجه، سیستم می‌تواند شورابه‌هایی با غلظت بالا را با فشار مکانیکی کمتری تصفیه کند. علاوه بر این، این طراحی امکان کاهش رسوبات روی سطح غشا را فراهم می‌کند، که به افزایش عمر مفید غشا و کاهش نیاز به تمیزکاری منجر می‌شود. این سیستم می‌تواند در حالت تک‌مرحله‌ای یا چندمرحله‌ای کار کند. در حالت چندمرحله‌ای، محلول تغلیظ‌شده از مرحله اول به مرحله بعد منتقل شده و بیشتر تغلیظ می‌شود. این روش برای کاربردهایی مانند تولید آب با خلوص بالا، نمک‌زدایی از آب دریا، و مدیریت شورابه‌های صنعتی بسیار موثر است. برای مثال، در یک آزمایش، محلولی با غلظت اولیه ۱۸۰ گرم بر لیتر NaCl در چند مرحله تغلیظ شده و به غلظت‌های بالای ۲۲۵ گرم بر لیتر رسیده است.

فشار عملیاتی در سمت پرغلظت می‌تواند بین ۵۰ تا ۵۰۰۰ psi باشد، در حالی که سمت کم‌غلظت با فشاری بسیار کمتر (حتی نزدیک به صفر) کار می‌کند. این اختلاف فشار طراحی شده به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند و فرآیند را اقتصادی‌تر می‌سازد. همچنین، سیستم از ترکیبات محلول خاصی مانند نمک‌های معدنی یا ترکیبات آلی قابل حل در آب استفاده می‌کند تا فشار اسمزی را به‌طور دقیق تنظیم کند.

این فناوری همچنین برای کاربردهای پیشرفته‌تری مانند سیستم‌های ZLD که به کاهش ضایعات مایع و بازیافت آب و مواد ارزشمند نیاز دارند، مناسب است. در این سیستم‌ها، محلول‌ها تا حد اشباع تغلیظ شده و سپس وارد مرحله تبخیر یا تبلور می‌شوند. در مجموع، این پتنت روی کاهش انرژی، بهینه‌سازی فشار عملیاتی، و کاربردهای چندگانه تمرکز دارد و OARO را به عنوان روشی پیشرفته در تصفیه و مدیریت آب معرفی می‌کند [۸۶].

پتنت CN110636894A به شرکت Trevi Systems Inc تعلق دارد که در زمینه شیرین‌سازی آب با استفاده از فناوری‌های غشایی فعالیت دارد. این پتنت به بهینه‌سازی فرآیند OARO پرداخته و راهکاری نوآورانه برای کاهش انرژی مصرفی و افزایش کارایی در تصفیه آب ارائه می‌دهد. این پتنت استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا را توصیف می‌کند که امکان ایجاد تعادل بین فشار هیدرولیکی و فشار اسمزی را فراهم می‌کنند. این تعادل باعث می‌شود که

جداسازی مؤثرتر و با مصرف انرژی کمتر در مقایسه با روش‌های سنتی رخ دهد. غشاها قادر به جداسازی مؤثر آب خالص از آب‌های شور، فاضلاب‌های صنعتی یا آب دریا هستند و حتی در محیط‌هایی با غلظت بالای نمک (تا ۲۰۰,۰۰۰ ppm) عملکردی کارآمد دارند. نوآوری اصلی این پتنت در طراحی سیستم‌هایی نهفته است که از یک فشار هیدرولیکی پایین‌تر در سمت دوم غشا استفاده می‌کنند (تنها ۱ تا ۴۰ درصد فشار سمت اول) و همزمان به بازدهی بالای ۶۰ تا ۹۰ درصد در حذف نمک دست می‌یابند. طراحی‌های مختلفی برای غشاها ارائه شده است، از جمله غشاهای لوله‌ای و فیبرهای توخالی (شکل (۱۹)) که مقاومت بالایی در برابر تخریب و رسوب‌گذاری دارند. این فناوری همچنین به امکان استفاده در سیستم‌های تصفیه آب با بازیافت بالا مانند سیستم‌های زباله مایع صفر (ZLD) اشاره می‌کند که هدف آن کاهش یا حذف تولید ضایعات مایع است. این اختراع کاربرد گسترده‌ای در شیرین‌سازی آب دریا، تصفیه فاضلاب صنعتی، و بازچرخانی آب در فرایندهای صنعتی دارد. با کاهش فشار عملیاتی و انرژی مصرفی، این سیستم‌ها به کاهش هزینه‌های اجرایی کمک می‌کنند و راه‌حلی پایدار و کارآمد برای مقابله با بحران کمبود آب ارائه می‌دهند. همچنین، امکان استفاده در مراحل چندگانه تصفیه، به‌ویژه در محیط‌های با چالش‌های پیچیده، بهره‌وری این فناوری را افزایش می‌دهد [۸۷].



شکل ۱۹- طرحواره غشای لوله‌ای و الیاف توخالی استفاده شده در فرآیند OARO [۸۷].

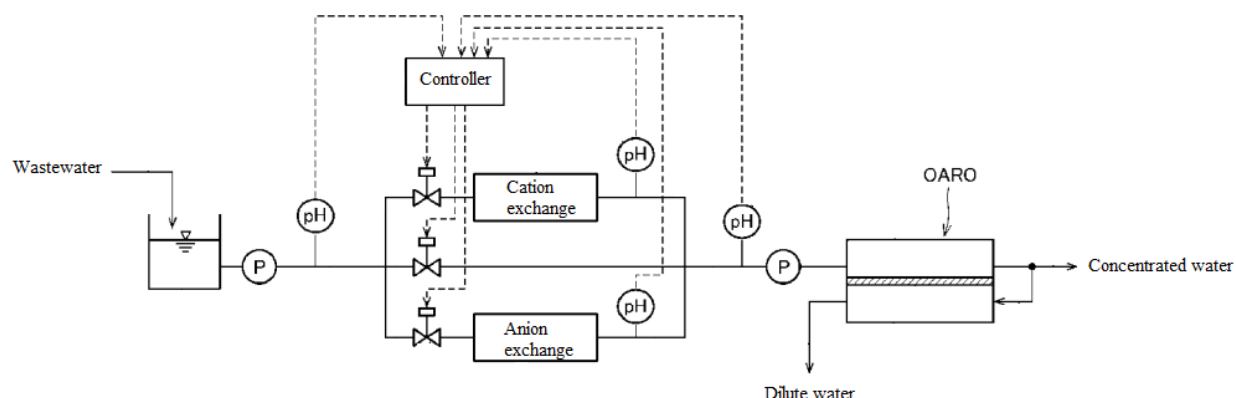
پتنت WO2022167951A1 که توسط شرکت Gradiant Corporation ثبت شده است به OARO پرداخته و بر طراحی غشاهای نیمه‌تراوای پیشرفته تمرکز دارد که برای عملکرد بهینه در سیستم‌های تصفیه آب با کمک فشار اسمزی طراحی شده‌اند. اختراع به‌ویژه بر استفاده از فشار اسمزی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی فرآیند اسمز معکوس تأکید دارد. غشاهایی که در این پتنت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌طور خاص برای مقاومت

در برابر رسوب‌گذاری و خوردگی شیمیایی طراحی شده‌اند که باعث کاهش نیاز به نگهداری و افزایش عمر مفید سیستم می‌شود. یکی از نوآوری‌های کلیدی که در این پتنت ذکر شده، استفاده از طراحی سیستم‌های چندمرحله‌ای است که در آن فشار اسمزی به‌عنوان نیروی محرکه اصلی برای جداسازی آب از محلول‌های غلیظ استفاده می‌شود. این طراحی به طور مؤثری فشار مورد نیاز در هر مرحله را کاهش داده و به این ترتیب انرژی مصرفی کاهش می‌یابد، بدون اینکه کارایی جداسازی تحت تأثیر قرار گیرد. سیستم‌های OARO به‌ویژه برای تصفیه آب‌هایی با غلظت بالای نمک مناسب هستند، و پتنت به استفاده از این فناوری در سیستم‌های بازچرخانی آب صنعتی و تصفیه فاضلاب‌ها اشاره می‌کند.

پتنت همچنین به استفاده از غشاهای جدید بر پایه پلی اتر سولفون با ویژگی‌های مکانیکی (حداقل فشار ترکیدگی داخلی ۴۰ MPa) و شیمیایی بهبود یافته پرداخته که به‌ویژه برای محیط‌های صنعتی و شیرین‌سازی آب‌های شور مناسب هستند. این غشاها به‌طور خاص برای تحمل شرایط دشوار طراحی شده‌اند و قادر به حفظ بازدهی بالا حتی در محیط‌های با فشار بالا یا غلظت زیاد مواد محلول هستند. این فناوری می‌تواند در کاربردهایی مانند تصفیه آب دریا، بازیافت آب‌های صنعتی و سیستم‌های ZLD به کار گرفته شود [۸۸].

پتنت WO2024075532A1 که توسط دانشگاه کوبه ژاپن ثبت شده است به دستگاه و روشی برای غلیظ‌سازی فاضلاب اختصاص دارد که هدف اصلی آن کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی در فرآیند تصفیه و بازیافت آب است. این فناوری به طور خاص برای حل چالش‌های مربوط به تصفیه فاضلاب با غلظت بالای مواد محلول طراحی شده و شامل یک سیستم چندمرحله‌ای است که از غشاهای پیشرفته OARO بهره می‌برد (شکل ۲۰). در این سیستم، فاضلاب ابتدا از مرحله پیش‌تصفیه عبور می‌کند، جایی که ذرات معلق و ناخالصی‌های اولیه حذف می‌شوند. سپس آب پیش‌تصفیه‌شده وارد فرآیند غلیظ‌سازی می‌شود، که در آن از غشاهایی با قابلیت عبور کنترل‌شده نمک استفاده می‌شود. این غشاها به‌طور خاص طراحی شده‌اند تا ضمن جداسازی مؤثر، حجم شورابه نهایی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. در نهایت، سیستم قادر است آب بازیافتی را برای استفاده مجدد تولید کند و شورابه

باقیمانده را به گونه‌ای مدیریت کند که امکان بازیافت مواد معدنی مانند لیتیوم فراهم شود یا به صورت ایمن تخلیه گردد.



شکل ۲۰- سیستم چندمرحله‌ای از غشاهای پیشرفته OARO [۸۹].

یکی از مزیت‌های برجسته این پتنت کاهش مصرف انرژی است که از طریق بهینه‌سازی طراحی غشا و فرآیند چندمرحله‌ای حاصل می‌شود. به عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی مانند تبخیرکننده‌ها، این سیستم تا ۵۰ درصد انرژی کمتری مصرف می‌کند و هزینه‌های سرمایه‌گذاری را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش حجم شورابه تخلیه‌شده به محیط زیست و بازیافت حداکثری آب از دیگر ویژگی‌های مهم این فناوری است که اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. با این حال، طراحی این سیستم با چالش‌هایی نیز همراه است. به دلیل غلظت بالای نمک و مواد آلاینده در آب ورودی، خطر رسوب‌گذاری و انسداد غشاها وجود دارد. این پتنت راه‌حلی برای این مسئله پیشنهاد می‌کند، از جمله استفاده از مواد مقاوم در برابر رسوب و طراحی خاص غشاها برای کاهش اثرات آلاینده‌ها. نگهداری دقیق و شست‌وشوی منظم نیز برای عملکرد پایدار سیستم ضروری است. این فناوری کاربردهای گسترده‌ای دارد، از جمله در تصفیه فاضلاب صنعتی، کاهش حجم آب تخلیه‌شده در صنایع معدنی، و بازیافت آب در فاضلاب شهری. طراحی انعطاف‌پذیر دستگاه و فرآیندهای آن، امکان تنظیم برای انواع مختلف فاضلاب را فراهم می‌کند، که آن را به گزینه‌ای جذاب برای صنایعی که به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی

نیاز دارند، تبدیل کرده است. در نهایت، این پتنت یک نوآوری کاربردی و پیشرفته در مدیریت فاضلاب است که می‌تواند نقشی اساسی در بهینه‌سازی منابع آبی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا کند [۸۹].

پتنت JP2024124112A که متعلق به صنایع آب کوریتا^۱ است به یک دستگاه و روش غلیظسازی محلول‌های آبی اشاره دارد که هدف آن بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تلفات مواد حل‌شده در فرآیند غلیظسازی است. این پتنت به طور خاص به استفاده از غشای RO و روش OARO می‌پردازد و در تاریخ ۱۲ سپتامبر ۲۰۲۴ منتشر شده است. در این پتنت، مسئله اصلی کاهش فشار عملیاتی و هزینه‌های مرتبط با غلیظسازی محلول‌های آبی با غلظت بالا مطرح می‌شود. در روش‌های سنتی، فشار بالا برای غلیظسازی ضروری است که این امر به افزایش هزینه‌ها و کاهش کارایی منجر می‌شود. اختراع ارائه شده شامل یک دستگاه غلیظسازی است که از سه نوع غشای RO با نرخ‌های مختلف جلوگیری بهره می‌برد. این ترکیب شامل یک غشای RO با نرخ جلوگیری بالا برای دریافت محلول اولیه، یک غشای RO با نرخ جلوگیری پایین برای غلیظسازی اولیه، و یک غشای OARO برای افزایش غلظت محلول نهایی است. یکی از ویژگی‌های کلیدی این پتنت کاهش فشار عملیاتی است که با استفاده از ترکیب روش‌های RO و OARO حاصل می‌شود. همچنین، دستگاه شامل واحدهای بازیابی فشار است که انرژی را از آب غلیظ‌شده بازیابی کرده و به فرآیند تغذیه بازمی‌گرداند. این امر نه تنها موجب صرفه‌جویی در انرژی می‌شود بلکه تلفات مواد حل‌شده را نیز به حداقل می‌رساند. آزمایش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که این سیستم قادر است محلول‌های آبی را از غلظت ۰/۱ wt% به بالای ۵ wt% برساند، در حالی که فشار عملیاتی لازم تقریباً نصف روش‌های سنتی است. این نوآوری می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف، به ویژه در بازیافت و مدیریت منابع آب داشته باشد. به عنوان مثال، در صنعت الکترونیک، این فناوری می‌تواند در بازیافت ایزوپروپیل الکل مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، این پتنت یک راهکار مؤثر برای کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای سنتی ارائه می‌دهد و می‌تواند به توسعه پایدار در حوزه OARO کمک کند [۹۰].

¹ Kurita

پتنت CN113950366B که متعلق به شرکت LG Chem Ltd است به افشای یک روش نوآورانه برای غلیظسازی آب با غلظت بالای نمک، به ویژه آب‌های تولیدی از میادین نفتی، می‌پردازد. این پتنت به مشکلات موجود در روش‌های سنتی تصفیه آب‌های شور و غلیظ، مانند تقطیر و سایر تکنیک‌های انرژی‌بر، اشاره کرده و نشان می‌دهد که استفاده از OARO می‌تواند به عنوان یک راه حل مؤثر مطرح شود. OARO به دلیل نیاز به وارد کردن مداوم محلول‌های نمکی و پدیده‌هایی نظیر قطبی شدن غشا، محدودیت‌هایی دارد. در این پتنت، با معرفی یک روش جدید که از غشاهای با نفوذپذیری بالا استفاده می‌کند، این مشکلات کاهش یافته و امکان غلیظسازی در فشارهای پایین‌تر فراهم می‌شود.

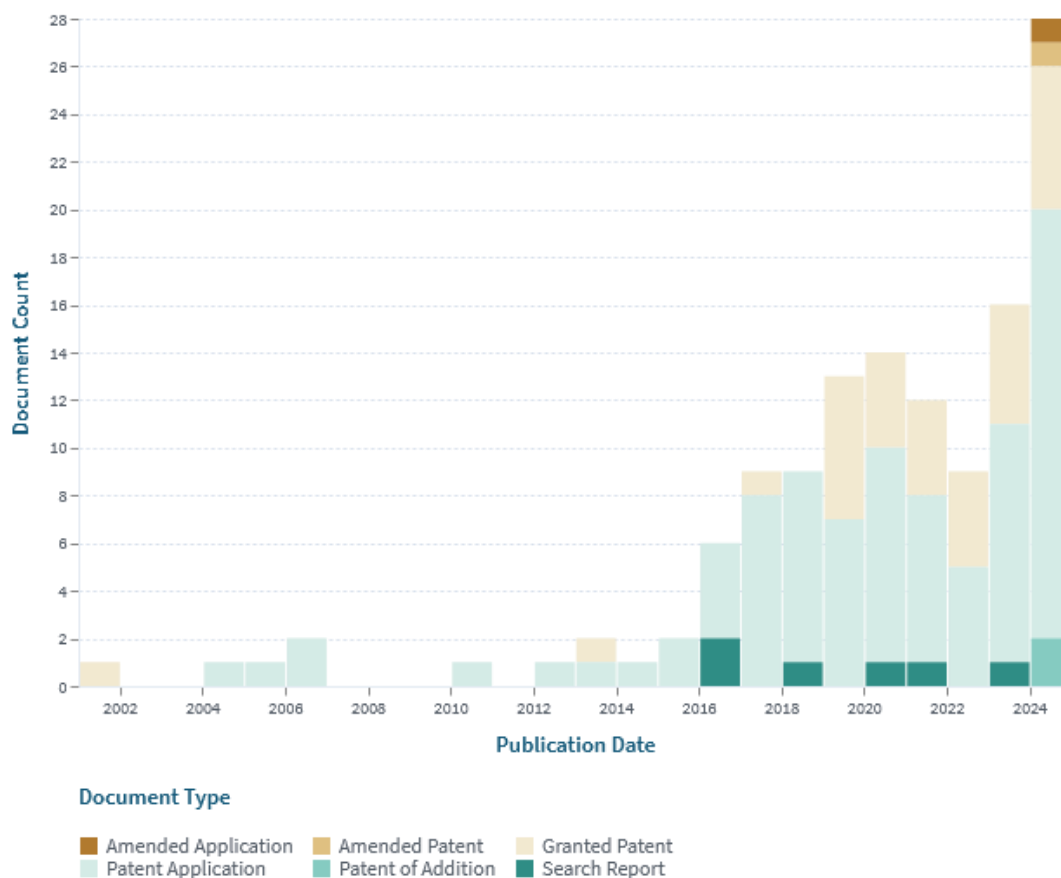
روش پیشنهادی در این پتنت شامل عبور آب با غلظت ۷۰,۰۰۰ ppm یا بیشتر از یک غشای جداسازی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر و فشار ۱۲۰۰ psi یا کمتر است. این روش به طور خاص بر کاهش نیاز به فشار بالا تأکید دارد، که معمولاً در روش‌های OARO و دیگر تکنیک‌های تصفیه آب مورد نیاز است. با استفاده از غشاهای با نفوذپذیری بالا، پتنت قادر است تا با حفظ کارایی، هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و به تولید آب با کیفیت بهتر کمک کند. همچنین، این پتنت نشان می‌دهد که با کاهش اثرات قطبی شدن غشا و نیاز به تجهیزات پیچیده برای OARO، می‌توان به یک روش پایدارتر و اقتصادی‌تر برای تصفیه آب‌های شور دست یافت. در نهایت، این پتنت نه تنها مزایای OARO را حفظ می‌کند بلکه معایب آن را نیز برطرف می‌سازد. این امر باعث می‌شود که روش پیشنهادی بتواند در شرایط عملیاتی پایین‌تر کار کند و در عین حال کارایی بالاتری داشته باشد. این نوآوری‌ها نشان‌دهنده پیشرفت قابل توجهی در فناوری تصفیه آب با غلظت بالا هستند و می‌توانند تأثیر زیادی بر روی صنعت نفت و گاز داشته باشند [۹۱].

پتنت US11999643B2 که متعلق به Battelle Memorial Institute Inc است به طور خاص روی استفاده از ماژول‌های غشایی پیشرفته تمرکز دارد که امکان بهره‌گیری از فشار اسمزی برای کاهش نیاز به فشار مکانیکی در فرآیند اسمز معکوس را فراهم می‌کنند. طراحی این سیستم‌ها به نحوی است که در غشاهای نیمه‌تراوا از فشار موجود در سمت محلول با غلظت پایین‌تر بهره گرفته می‌شود تا به انتقال مؤثر آب خالص از محلول غلیظ کمک

کند. این امر نه تنها باعث کاهش انرژی مصرفی می‌شود (مصرف انرژی این سیستم کمتر از 4 kWh/m^3 است) بلکه عملکرد را در مقایسه با سیستم‌های سنتی بهبود می‌بخشد. یکی از ویژگی‌های کلیدی این اختراع، استفاده از موادی است که مقاومت بالایی در برابر گرفتگی و رسوب‌گذاری دارند، مسئله‌ای که معمولاً یکی از چالش‌های اصلی در سیستم‌های اسمز معکوس است. در این پتنت، پارامترهای عملیاتی از جمله فشار ورودی و خروجی غشاها برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم تعریف شده‌اند. همچنین طراحی بهینه جریان‌های ورودی و خروجی به گونه‌ای انجام شده است که نرخ بازیافت آب افزایش یابد و نیاز به نگهداری سیستم کاهش پیدا کند.

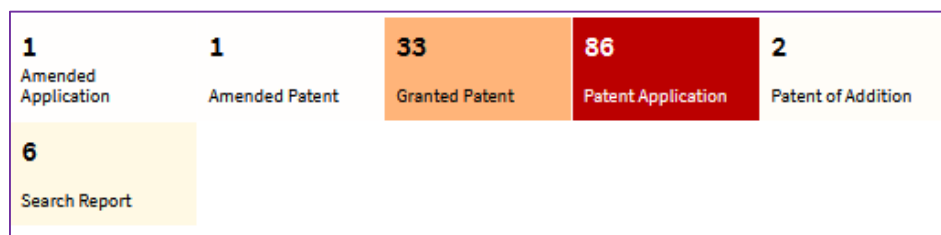
این فناوری به‌ویژه برای استفاده در تصفیه آب شور، بازچرخانی آب‌های صنعتی، و کاهش حجم مایعات زائد در سیستم‌های ZLD طراحی شده است. استفاده از روش‌های چندمرحله‌ای که در این پتنت توضیح داده شده، امکان غلظت بالاتر و بهره‌وری انرژی بیشتر را فراهم می‌کند. علاوه بر این، سیستم‌های OARO مطرح‌شده در این اختراع، می‌توانند در محیط‌هایی با غلظت‌های بسیار بالای نمک (تا بیش از $200,000 \text{ ppm}$) به صورت پایدار و کارآمد عمل کنند، که نشان‌دهنده قابلیت کاربرد در حوزه‌های صنعتی و زیست‌محیطی است [۹۲].

جستجوی پتنت‌ها در Lens.org نیز انجام شد. در این جستجو عبارت Osmotically Assisted Reverse Osmosis در عنوان، چکیده و ادعای پتنت‌ها مدنظر قرار گرفت. نتیجه‌ی جستجو تا اول ژانویه سال ۲۰۲۵، یافتن ۱۲۹ پتنت بود. شکل (۲۱) تعداد پتنت‌ها در سال‌های بین ۲۰۰۰ تا ابتدای ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد.



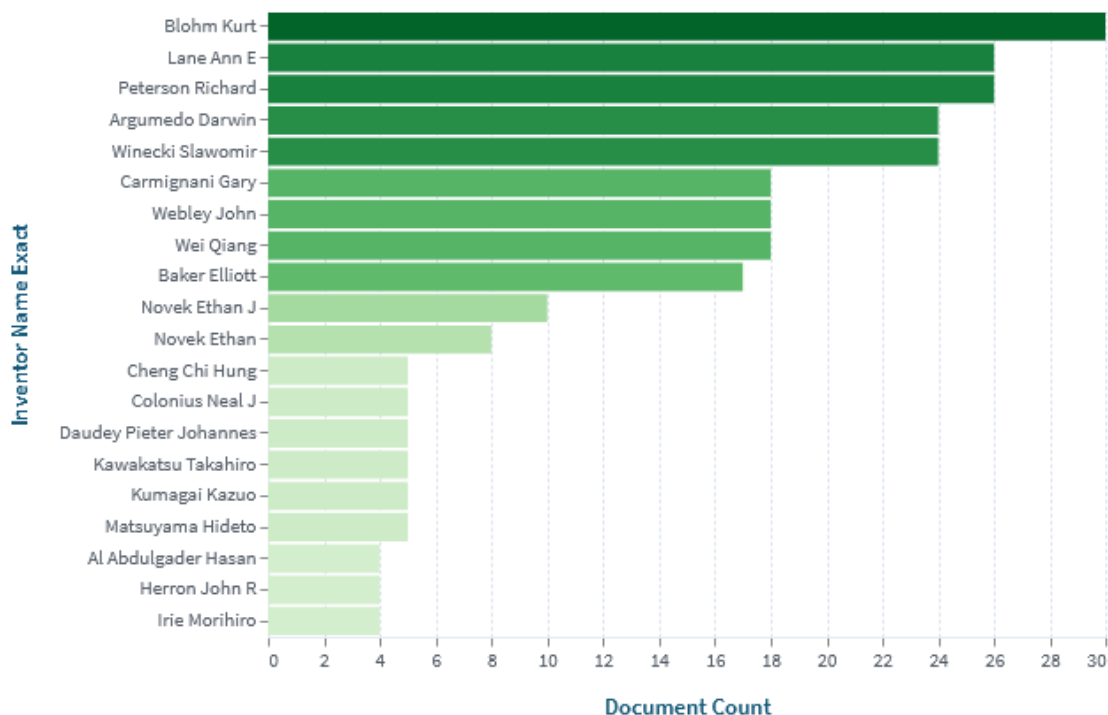
شکل ۲۱- وضعیت ثبت پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO برحسب سال انتشار (داده‌ها از Lens.org در اول ژانویه ۲۰۲۵ گرفته شده است).

شکل (۲۲) تعداد انواع سندهای پتنت در زمینه OARO را نشان می‌دهد.

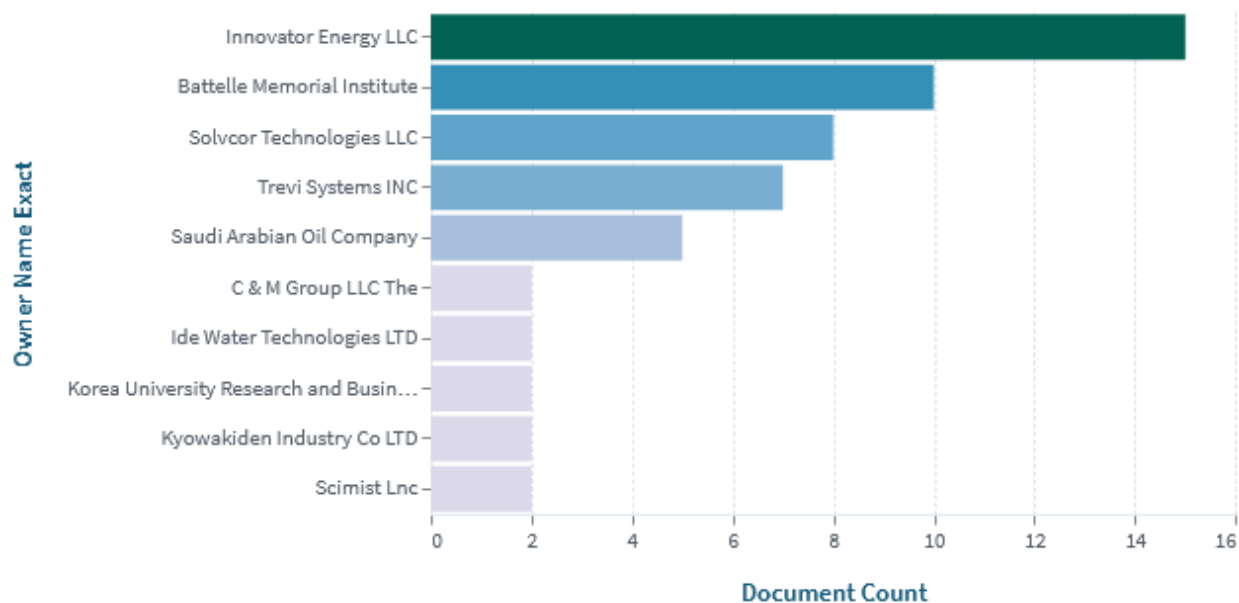


شکل ۲۲- انواع سندهای پتنت با جستجوی Osmotically Assisted Reverse Osmosis

شکل‌های (۲۳) و (۲۴) به ترتیب مخترعان و مالکان حوزه فناوری OARO را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳-مخترعان حوزه فناوری OARO



شکل ۲۴-مالکان حوزه فناوری OARO

بررسی دقیق تر ۱۲۹ پتنت نشان داد که برخی از پتنت‌های یافت‌شده فقط به حوزه RO اختصاص دارند و ادعایی در زمینه OARO در آنها دیده نمی‌شود. در نتیجه تمامی ۱۲۹ پتنت مورد پالایش قرار گرفتند و فقط آنهایی که در عنوان، چکیده و ادعانامه آنها به نوعی به OARO اشاره شده است، فهرست شدند که نتیجه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- فهرست پتنت‌های مرتبط با فناوری OARO (تاریخ جستجو: اول ژانویه ۲۰۲۵)

No.	Patent No.	Title	Inventor(s)	Year	Assignee
1	WO2023/205416A1	Systems and methods for osmotically assisted reverse osmosis configurations	John H. Lienhard Andrew T. BOUMA	2023	MIT
2	WO 2023/028281 A1	Harnessing metal ions from brines	John Lienhard Andrew BOUMA Danyal REHMAN Zi Hao Foo	2022	
3	WO2024/196945A1	Systems and methods of draw solution recovery with energy saving evaporation supporting forward osmosis membrane crystallization	John R. Herron Keith A. Lampi Edward Gerard BEAUDRY	2024	Fluid Technology Solutions (Fts), Inc.
4	WO 2020/251568 A1	Osmotically assisted cascade water desalination systems, concentrators and hybrid systems	Basel ABUSHARKH, Emre Erbil	2020	Hyrec Technologies Ltd.
5	WO 2021/061343 A1	Energy efficient process for concentrating and recovering lithium from a lithium containing brine	Kurt Blohm Jérôme LEPARC Isabelle LEMAITRE	2022	Veolia Water Solutions & Technologies Support
6	AU 2020/354294 A1 AU 2020/354294 B2	Energy efficient process for concentrating and recovering lithium from a lithium containing brine	Kurt Blohm Isabelle LEMAITRE Jérôme LEPARC	2020	
7	CN 109475818 A	The counter-infiltration system and method for multistage infiltration auxiliary	Kurt Blom Richard Peterson Ann E. Lane Slawomir Winecki Darwin Agmido	2017	Battelle Memorial Institute Inc
8	WO 2017/213992 A3 AU 2017/279509 A1 AU 2017/279509 B2 SA 518400561 B1 AU 2020/227111 A1 AU 2022/200235 B2 AU 2022/200235 C1 EP 3471862 A2 ZA 201808235 B AU 2020/227111 B2	Multistage osmotically assisted reverse osmosis system and method	Kurt Blohm Richard Peterson Ann E. Lane Slawomir Winecki Darwin Argumedo	2017	

	AU 2022/200235 A1				
9	EP 4166221 A3 CA 3024141 A1 SA 521430183 B1	Cross current staged reverse osmosis	Kurt Blohm Richard Peterson Ann. E. LANE Slawek Winecki Darwin Argumedo	2017	
10	CN 113600014 A	Purification system	Kurt Blom Richard Peterson Ann E. Lane Slawomir Winecki Darwin Agmido	2017	
11	WO 2024/075532 A1 TW 202423850 A JP 2024054676 A TW 202435954 A WO 2024/180806 A1	Wastewater concentration device and concentration method	Takahiro Kawakatsu Kazuo Kumagai Hideto Matsuyama	2023	Kurita Water Industries Ltd., Kobe University
12	WO 2016/057764 A1	Osmotic separation systems and methods	Nathan T. HANCOCK Christopher DROVER	2015	Oasys Water, Inc.
13	WO 2021/145937 A1 US 2021/0214246 A1 US 11254592 B2	Processes and systems for treating sour water to remove sulfide compounds	Guillaume Robert Jean-Francois Raynel	2020	Saudi Arabian Oil Company, Aramco Services Company
14	WO 2024/016080 A1	System and process for recovering lithium from a saltwater	Benjamin SPARROW Megan LOW Xiangchun Yin	2023	Saltworks Technologies Inc.
15	EP 4303191 A1 WO 2024/008972 A1	Process for preparing customized mineral water	Roger Chamberlin Le Dreau	2022	Seventeen Zero Sieben
16	CN 116143235 A	Novel osmosis-assisted nanofiltration-reverse osmosis combined device and application	Wu Bing Zhan Min Ma Wenhao Zheng Pengfei	2022	Nanjing University
17	EP 3570965 A4 CN 110636894 A US 2021/0275968 A1 EP 3570965 A1 US 11839853 B2	Osmotic pressure assisted reverse osmosis membrane and module	Qiang Wei Elliott BAKER John WEBLEY Gary Carmignani	2017	Trevi Systems Inc

	US 2024/0139681 A1 SA 519402264 B1 WO 2018/136077 A1				
18	SA 522440259 B1 ZA 201805788 B KR 102392316 B1 EP 3411133 A4 WO 2017/136048 A1 SA 518392144 B1 US 11198097 B2 US 2019/0054421 A1 KR 20200087271 A MX 2018009473 A	Osmotic pressure assisted reverse osmosis process and method of using the same	Qiang Wei John Webley Elliot Baker Gary Carmignani	2018	
19	CN 108778469 A	The hyperfiltration and its application method of osmotic pressure auxiliary	Q. Wei J. Webley E. Baker G. Camignani	2016	Special Thunder Maintains System Co

اختراع شماره CN108778469A به معرفی فناوری OARO می‌پردازد که البته در پتنت از نام OsARO استفاده کرده است که ترکیبی از روش‌های اسمز معکوس (RO) و اسمز مستقیم (FO) است. این فناوری با استفاده از ماژول‌های خاصی که شامل غشاهای نیمه‌تراوا هستند، بهینه‌سازی فرآیند جداسازی حلال از محلول‌های آلوده را ممکن می‌سازد. هر ماژول دارای دو محفظه است که توسط غشاء از هم جدا شده‌اند و جریان‌های مختلف محلول خوراک به این محفظه‌ها هدایت می‌شوند. یکی از ویژگی‌های کلیدی این اختراع، توانایی بازگردانی بخشی از جریان خوراک تغلیظ‌شده به محفظه‌های مختلف است. به طور خاص، بخشی از جریان خوراک تغلیظ‌شده به سمت محفظه اول و بخشی دیگر به سمت محفظه دوم هدایت می‌شود. این روش نه تنها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند، بلکه کارایی کلی سیستم را نیز افزایش می‌دهد، زیرا فشار هیدرواستاتیک و اسمزی به طور همزمان بهینه‌سازی می‌شوند. فناوری OsARO تفاوت‌های مهمی با روش‌های سنتی مانند RO و FO دارد. در روش‌های سنتی، تنها از فشار هیدرواستاتیک برای جداسازی استفاده می‌شود، اما در OsARO از ترکیب فشار هیدرواستاتیک و تنظیم دقیق اختلاف فشار اسمزی بهره گرفته می‌شود. این تفاوت باعث می‌شود فشار لازم برای عبور حلال از غشاء کاهش یابد و در نتیجه، بهره‌وری سیستم افزایش یابد. این اختراع همچنین به جزئیات چگونگی ترکیب این روش با سیستم‌های مختلف پرداخته و نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از OsARO برای تولید همزمان محلول‌های تغلیظ‌شده و حلال‌های خالص استفاده کرد. این فناوری به خصوص در زمینه تصفیه آب و بازیافت منابع آبی اهمیت دارد، زیرا می‌تواند به صورت مؤثر حلال‌های خالص را از محلول‌های آلوده جدا کند. اختراع مذکور تأکید می‌کند که استفاده از فناوری OsARO می‌تواند به کاهش نیاز به انرژی و افزایش کارایی در فرایندهای تصفیه کمک کند. این امر به ویژه در صنایع آب‌شیرین‌کن و سایر کاربردهای صنعتی که نیاز به جداسازی دقیق حلال‌ها از محلول‌ها دارند، بسیار مفید خواهد بود [۹۳].

اختراع WO2017136048A1 به فرآیند اسمز معکوس تحت فشار اسمزی (OsARO) و روش‌های استفاده از آن در تصفیه و بازیابی آب از منابع مختلف مانند آب دریا، آب شور، آب صنعتی و فاضلاب می‌پردازد. این اختراع در زمینه تصفیه آب و از بین بردن آلاینده‌ها و نمک‌ها بسیار مؤثر است و به ویژه برای سیستم‌های ZLD که در آن‌ها

باید محلول‌های غلیظ تولید شوند، مناسب است. در این سیستم، از غشای نیمه‌نفوذپذیر استفاده می‌شود که به آب (حلال) اجازه عبور از آن را می‌دهد، در حالی که نمک‌ها و آلاینده‌ها (حل‌شونده‌ها) را به‌طور مؤثر متوقف می‌کند. در فرآیند اسمز معکوس، فشار اسمزی بین دو محلول با غلظت‌های مختلف تنظیم می‌شود و در نتیجه، آب از محلول غلیظ به محلول رقیق انتقال می‌یابد. این سیستم می‌تواند با ترکیب دو مرحله‌ای (OsARO-RO) برای کاهش فشار عملیاتی و افزایش بازدهی انرژی عمل کند. استفاده از گلوکز به‌عنوان محلول کشش‌دهنده نیز از تولید محصولات جانبی سمی مثل کلر جلوگیری می‌کند. این فرآیند به‌ویژه برای تصفیه فاضلاب پزشکی که حاوی آلاینده‌های پیچیده و مواد شیمیایی خطرناک است، کاربرد دارد [۹۴].

اختراع CN116143235A روشی کارآمد را برای بازیابی آب از فاضلاب پزشکی معرفی می‌کند که با استفاده از فناوری‌های کم‌هزینه به تصفیه و بازیافت آب کمک کرده و ریسک آلودگی احتمالی ناشی از دفع فاضلاب پزشکی را کاهش می‌دهد. فاضلاب پزشکی که از بخش‌های مختلف بیمارستان‌ها مانند مراکز دیالیز، آزمایشگاه‌ها و اتاق‌های عمل تولید می‌شود، حاوی آلاینده‌های پیچیده‌ای مانند باکتری‌های پاتوژن، ویروس‌ها و فلزات سنگین است. روش‌های درمانی سنتی با چالش‌هایی نظیر نیاز به فضای زیاد، نوسانات کیفیت آب تصفیه‌شده و کارایی پایین در بازیافت آب مواجه هستند. این اختراع با ادغام فناوری‌های نانوفیلتراسیون کمکی با فشار اسمزی (OANF) و اسمز معکوس (RO) قصد دارد این مشکلات را برطرف کند. در این سیستم، از گلوکز پزشکی و فاضلاب به‌عنوان محلول کشش‌دهنده و مایع ورودی به ترتیب استفاده می‌شود که به دو طرف سیستم غشا OANF وارد می‌شوند. با اعمال فشار هیدرولیکی و تفاوت فشار اسمزی بین محلول کشش‌دهنده و مایع ورودی، سیستم OANF فاضلاب را با کارایی بالا غلیظ کرده و سموم و ضایعاتی مانند اوره، کراتینین و فلزات سنگین را از آن حذف می‌کند. سپس محلول گلوکز رقیق‌شده تحت تصفیه بیشتر با استفاده از RO قرار می‌گیرد تا آب بازیافتی و تصفیه‌شده به دست آید. این فرایند تصفیه دو مرحله‌ای به سرعت بالای تصفیه و بهبود نرخ بازیابی آب پاک کمک می‌کند.

این فناوری ترکیبی OANF-RO به حل چندین مشکل عمده در تصفیه فاضلاب پزشکی کمک می‌کند. این روش به‌طور چشمگیری دفع فاضلاب دیالیز را کاهش می‌دهد و به‌طور مؤثری فلزات سنگین مانند کروم، جیوه و سرب

را که اغلب در فاضلاب‌های آزمایشگاه‌های بالینی و دندان‌پزشکی یافت می‌شوند، حذف می‌کند. همچنین با حذف مؤثر ضایعات حاوی نیتروژن مانند اوره که معمولاً حذف آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است، بهبود می‌یابد. استفاده از گلوکز به عنوان محلول کشش‌دهنده همچنین نگرانی‌ها در مورد تولید محصولات جانبی سمی کلر، که در روش‌های الکتروشیمیایی معمول است، را از بین می‌برد. طراحی مدولار سیستم همچنین اجازه می‌دهد تا این فناوری به راحتی در محیط‌های مختلف پزشکی مقیاس‌بندی و تطبیق یابد. علاوه بر این، با بازیابی آب در نرخ بالا، این سیستم به صرفه‌جویی در منابع آب در بیمارستان‌ها کمک کرده و هزینه‌های مرتبط با دفع فاضلاب و تأمین آب را کاهش می‌دهد [۹۵].

اختراع WO2024008972A1 فرآیندی را برای تولید آب معدنی سفارشی از آب دریا معرفی می‌کند که به طور خاص به حذف و تنظیم مجدد غلظت مواد معدنی آب دریا می‌پردازد. این فرآیند شامل مراحل مختلفی است که هدف آن تولید آب معدنی با غلظت و pH مشخص است که برای مصرف انسانی یا استفاده‌های دیگر مناسب باشد. در ابتدا، آب دریا از طریق فرآیندهای نمک‌زدایی مانند اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون تصفیه می‌شود. در این مرحله، آب شور از مواد معدنی جدا می‌شود و به کمک فناوری OARO، انرژی مصرفی در این فرآیند کاهش می‌یابد. در گام بعدی، آب شور حاصل از مراحل پیشین تحت فرآیند الکترولیز قرار می‌گیرد تا غلظت برخی از مواد معدنی خاص مانند کلریدها، سولفات‌ها و کربنات‌ها افزایش یابد. این مرحله امکان تنظیم دقیق غلظت مواد معدنی مورد نظر برای تولید آب معدنی سفارشی را فراهم می‌کند. پس از آن، آب بدون مواد معدنی که در مراحل قبلی به دست آمده است، به کمک آب شور الکترولیز شده دوباره معدنی می‌شود تا غلظت و pH آن مطابق با مقادیر از پیش تعیین‌شده باشد.

آب معدنی حاصل از این فرآیند سپس از نظر میکروبیولوژیکی تصفیه می‌شود تا از هرگونه آلودگی میکروارگانیسمی پاک شود. برای این منظور از تزریق دی‌اکسید کربن و ازن استفاده می‌شود. این اقدامات نه تنها به ایمن‌سازی آب برای مصرف انسانی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند موجب تولید آب گازدار نیز گردد. در نهایت، آب معدنی سفارشی در بسته‌بندی‌های مختلف مانند شیشه، فلز یا مقوا برای استفاده‌های مختلف آماده می‌شود.

این فرآیند به طور خاص در جهت بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش آلاینده های شیمیایی طراحی شده است. از این رو، برخلاف روش های سنتی که برای تصفیه آب دریا از مواد شیمیایی آلاینده استفاده می کنند، این روش رویکردی پایدار و به صرفه دارد. آب معدنی سفارشی به دست آمده از این فرآیند می تواند در صنایع غذایی، کشاورزی، آرایشی و حتی استخرها استفاده شود. همچنین، این آب می تواند با طعم دهنده های مختلف برای تولید آب های طعم دار ترکیب شود.

این اختراع نمایانگر یک گام مهم در زمینه تولید آب معدنی با ویژگی های خاص و متناسب با نیازهای مصرف کنندگان است. فرآیندهای بهینه شده برای کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از استفاده از مواد شیمیایی مضر در کنار تطابق کامل با استانداردهای سلامت، این فناوری را به یک انتخاب عالی برای تولید آب معدنی با خواص مطلوب تبدیل کرده است [۹۶].

اختراع WO2024/016080A1 به معرفی سیستم های اسمز معکوس جزئی با جریان متقاطع پرداخته که برای تصفیه جریان های مایع با غلظت های بالای محلول مناسب است. در این سیستم ها، مراحل مختلف اسمز معکوس به صورت متوالی و با کاهش فشار اسمزی بین مراحل، عمل می کنند. این ساختار اجازه می دهد تا در فشارهای پایین تر نسبت به سیستم های سنتی، عملکرد مشابهی در جداسازی داشته باشد. سیستم شامل یک مرحله اولیه اسمز معکوس است که جریان تغذیه را دریافت و آن را به جریان رقیق شده و غلیظ تقسیم می کند. سپس، جریان رقیق شده وارد بخش میانی می شود که شامل یک یا چند مرحله اسمز معکوس است و در نهایت، جریان تصفیه شده تولید می شود. مرحله نهایی جریان تصفیه شده را دریافت و جریان بازجستی تولید می کند.

در برخی پیکربندی ها، جریان دفعی^۱ مرحله نهایی با جریان رقیق شده مرحله اولیه ترکیب شده و وارد بخش میانی می شود. همچنین، از دستگاه های بازیابی انرژی و کاهش فشار برای بهبود کارایی استفاده می شود. این سیستم ها توانایی کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی کلی را دارند.

¹ Reject stream

سیستم می‌تواند شامل مراحل پیش‌تصفیه مانند دیونیزاسیون خازنی یا اسمز مستقیم باشد و از پمپ‌های متعدد برای افزایش فشار جریان‌های مختلف بهره می‌برد. این طراحی باعث می‌شود که جریان‌های مختلف با فشارهای متفاوت مدیریت شوند و بهینه‌سازی انرژی صورت گیرد. در مجموع، این اختراع با معرفی ساختار جزئی و متقاطع، امکان تصفیه جریان‌های مایع با غلظت‌های بسیار بالا را با مصرف انرژی کمتر و کارایی بالا فراهم می‌کند، که می‌تواند در صنایع مختلفی مانند تصفیه آب و جداسازی مواد معدنی کاربرد داشته باشد [۹۷].

اختراع AU2017/279509A1 یک سیستم اسمز معکوس با جریان متقابل و آبشاری جزئی را معرفی می‌کند که برای تصفیه جریان‌های مایع طراحی شده است. این سیستم چند مرحله‌ای به گونه‌ای طراحی شده که مراحل اسمز معکوس به صورت آبشاری و با جریان متقابل قرار گرفته‌اند. این آرایش باعث کاهش اختلاف فشار اسمزی، تصفیه محلول‌های با غلظت بالای مواد محلول، و عملکرد در فشارهای پایین‌تر با راندمان جداسازی مشابه با سیستم‌های معمولی می‌شود. سیستم شامل یک مرحله ابتدایی اسمز معکوس کمکی است که جریان ورودی مایع را پردازش می‌کند. در این مرحله، جریان‌های بازیافتی و غلیظ‌شده تولید می‌شود و یک جریان رقیق شده از سمت فشار پایین خارج می‌شود. این جریان رقیق شده به بخش میانی هدایت می‌شود که شامل چندین مرحله اسمز معکوس کمکی به صورت سری است. این بخش میانی جریان را بیشتر تصفیه می‌کند و یک جریان خالص تولید می‌شود، در حالی که جریان‌های غلیظ و بازیافتی در هر مرحله مدیریت می‌شوند. در برخی پیکربندی‌ها، جریان خروجی مرحله نهایی اسمز معکوس با جریان رقیق شده از مرحله ابتدایی ترکیب شده و به بخش میانی برای تصفیه بیشتر فرستاده می‌شود. سیستم دارای سازوکارهای افزایش فشار مانند دستگاه‌های فشاردهنده و پمپ‌ها است که بهره‌وری سیستم را افزایش داده و فشارهای بهینه را برای جریان‌های مایع فراهم می‌کنند. همچنین یک سیستم بازیابی انرژی برای استفاده از انرژی خروجی‌های پرفشار مراحل میانی در نظر گرفته شده که کارایی انرژی کل فرآیند را بهبود می‌بخشد.

این سیستم ممکن است شامل روش‌های پیش‌تصفیه مانند دیونیزاسیون خازنی و اسمز رو به جلو نیز باشد تا جریان ورودی مایع قبل از ورود به مراحل اسمز معکوس آماده شود. علاوه بر این، هر مرحله اسمز معکوس کمکی

می‌تواند دارای چندین ماژول باشد که با هم جریان‌های حاصل را به جریان نهایی تصفیه شده تبدیل می‌کنند. طراحی سیستم برای مدیریت غلظت‌های مختلف مواد محلول انعطاف‌پذیر است و باعث افزایش اثربخشی کلی فرآیند تصفیه می‌شود.

همچنین، یک مرحله اسمز معکوس با فشار معکوس به عنوان بخشی از سیستم معرفی شده است که در آن جریان غلیظ پرفشار برای تولید جریان رقیق پرفشار استفاده می‌شود. این جریان رقیق می‌تواند در دستگاه‌های بازیابی انرژی یا مبدل‌های فشار استفاده شود که به افزایش کارایی سیستم کمک می‌کند. به طور کلی، این سیستم یک راه‌حل قوی و کارآمد برای تصفیه جریان‌های مایع با غلظت‌های بالای مواد محلول ارائه می‌دهد که از نظر مدیریت فشار و راندمان جداسازی مزایای قابل توجهی دارد [۹۸].

پتنت WO2023/205416A1 به بررسی سیستم‌ها و روش‌های نوآورانه در زمینه تصفیه آب و غلظت نمک می‌پردازد. این پتنت به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود فرآیندهای تصفیه آب با تمرکز بر کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی است. این پتنت به دنبال حل چالش‌های موجود در فناوری‌های تصفیه آب، به ویژه در زمینه غلظت آب نمک است. با توجه به افزایش هزینه‌های دفع آب نمک و نیاز به استخراج مواد معدنی از منابع آبی، سیستم‌های مبتنی بر غشا مانند RO و OARO به عنوان گزینه‌های مؤثر شناخته شده‌اند. این پتنت به توصیف یک سیستم جدید می‌پردازد که شامل دو واحد OARO است که به صورت سری با یکدیگر کار می‌کنند. در این سیستم، یک جریان خروجی از واحد OARO اول به دو جریان تقسیم می‌شود. یکی از این جریان‌ها وارد سمت غلیظ واحد OARO دوم می‌شود و جریان دیگر به حالت کم‌فشار وارد می‌شود. این طراحی باعث افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های انرژی می‌شود. همچنین، پتنت بر اهمیت استفاده از دستگاه‌های بازیابی انرژی تأکید دارد که می‌توانند فشار جریان‌ها را کاهش دهند و در نتیجه مصرف انرژی را کمتر کنند. این پتنت همچنین قابلیت تنظیم نسبت جریان بین دو واحد OARO را برای بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌ها معرفی می‌کند. علاوه بر این، استفاده از غشاهای خاص با ویژگی‌های مناسب برای این سیستم ضروری است تا هم نفوذپذیری بالایی داشته باشند و هم در برابر فشارهای بالا مقاوم باشند. از نظر اقتصادی، این فناوری می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۴۳ درصد کاهش

دهد و تولید آب شیرین را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. این مزایا باعث می‌شود که سیستم‌های توصیف شده در پتنت برای صنایع مختلفی مانند تصفیه آب، استخراج مواد معدنی و مدیریت آب نمک بسیار جذاب باشند [۹۹].

اختراع WO2023/028281A1 روش و سیستم جدیدی برای استخراج یون‌های فلزی هدف، مانند لیتیم، از شورابه‌ها معرفی می‌کند. در این روش، یک جریان شورابه آبی شامل یون‌های فلزی هدف و سایر یون‌های حل‌شده از طریق یک ماژول بازیابی آب که در یک طرف یک غشای نیمه‌نفوذی قرار دارد، عبور می‌کند. در این ماژول، آب از طرف دیگر غشا به داخل جریان شورابه می‌رود و باعث رقیق شدن آن می‌شود. پس از این مرحله، جریان شورابه رقیق‌شده از طریق یک ماژول جداسازی یون‌ها که به انتخاب یون‌ها بر اساس بار الکتریکی می‌پردازد، عبور داده می‌شود و در نهایت، جریان‌های غنی‌شده از یون‌های تک‌ظرفیتی و چند ظرفیتی (یون‌هایی که دارای بار الکتریکی بیشتر هستند) به دست می‌آید. یکی از این جریان‌ها حاوی غلظت بالای یون‌های فلزی هدف، مانند لیتیم، خواهد بود.

این سیستم از فناوری‌های جداسازی مبتنی بر غشا برای انتخابی کردن و تمرکز لیتیم از شورابه‌ها استفاده می‌کند. این فرآیند به ترکیب فناوری‌های مبتنی بر فشار و الکتروشیمیایی متکی است تا لیتیم با کیفیت صنعتی برای استفاده‌های عملی استخراج شود. این روش‌ها از نظر انرژی و بازدهی برای تولید لیتیم مورد نیاز در صنعت باتری بسیار کارآمد هستند. در یک مطالعه موردی که برای حالت‌های عملیاتی مختلف ارائه شده، توضیح داده می‌شود که چگونه این سیستم‌ها می‌توانند با استفاده از مراحل مختلفی مانند معکوس‌سازی اسمزی و روش‌های دیگر مانند الکترودیالیز یا نانوفیلتراسیون، به بهره‌وری بالایی در استخراج لیتیم دست یابند.

این روش همچنین از فناوری OARO بهره می‌برد که به عنوان یک فناوری برای تغلیظ شورابه‌ها، به ویژه شورابه‌هایی با محتوای نمک بسیار بالا، استفاده می‌شود. این فناوری به طور خاص توانایی تغلیظ شورابه‌ها را بدون نیاز به انرژی زیاد دارد و به‌ویژه برای استخراج لیتیم از منابع آب شور مناسب است. در این سیستم، از چندین مرحله معکوس‌سازی اسمزی و همچنین فرآیندهای دیگر برای کاهش حجم و غلظت شورابه‌ها استفاده می‌شود، که در نهایت منجر به تولید یک جریان غنی‌شده از یون‌های تک‌ظرفیتی می‌شود که شامل لیتیم است.

سیستم‌های پیشنهاد شده با استفاده از فناوری‌های مختلف غشا و الکترودیالیز قادر به جداسازی و تغلیظ لیتیم از شورابه‌ها هستند و می‌توانند با کمترین هزینه انرژی و بالاترین بازده، لیتیم را برای استفاده‌های صنعتی تولید کنند. در این سیستم‌ها، از غشاهایی استفاده می‌شود که فقط یون‌های تک‌ظرفیتی (یون‌هایی که بار الکتریکی یک‌سان دارند) را عبور می‌دهند و یون‌های چند ظرفیتی را حفظ می‌کنند، که این فرآیند باعث افزایش غلظت یون‌های هدف مانند لیتیم در جریان خروجی می‌شود. در نهایت، این روش برای تولید لیتیم با استفاده از فناوری‌های جداسازی و تغلیظ با کمترین هزینه‌های انرژی و در عین حال بالاترین بهره‌وری در استخراج لیتیم از شورابه‌ها، به یک گزینه اقتصادی و پایدار برای صنعت استخراج لیتیم تبدیل می‌شود [۱۰۰].

اختراع WO2024/196945A1 مربوط به سیستم‌ها و روش‌های بازیابی محلول‌های کشش با استفاده از تبخیر با صرفه‌جویی در انرژی و پشتیبانی از تبلور غشا اسمز مستقیم است که به کمک OARO و مواد ضد رسوب در جهت بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه نمک و آب از شورابه‌ها کار می‌کند.

در ابتدا به سیستم‌های مختلفی اشاره می‌شود که برای جدا کردن نمک‌ها از شورابه‌ها به کار می‌روند. یکی از این روش‌ها استفاده از اسمز پیشرفته غشا برای تبلور است که در آن شورابه‌ای که به حد اشباع نمک رسیده، از طریق یک غشای اسمز پیشرفته تحت فرآیند اسمز قرار می‌گیرد. در این سیستم، آب از شورابه با استفاده از اسمز از طریق غشا به محلول دیگر منتقل می‌شود و بلورهای نمک روی سطح غشا تشکیل می‌شوند. سیستم OARO در این فرآیند به عنوان یک تکنیک غشایی به کار می‌رود که به کمک آن می‌توان شورابه‌ها را به درجات بالاتر از غلظت نمک تغلیظ کرد. این سیستم با استفاده از اسمز برای کمک به فشار معکوس اسمزی عمل می‌کند. از مزایای این روش می‌توان به کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از تشکیل رسوب‌های سخت اشاره کرد.

برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، از تبخیرکننده‌های چندمرحله‌ای^۱ استفاده می‌شود. این سیستم‌ها انرژی تولید شده از بخار آب در یک مرحله را برای تبخیر در مرحله بعدی به کار می‌برند. همچنین، استفاده از تبخیرکننده‌های مکانیکی بخار بازگشتی (MVR) و بازگشت بخار حرارتی (TVR) به انرژی‌زایی بیشتر کمک می‌کند.

این ترکیب از روش‌های مختلف مانند اسمز پیشرفته غشا، اسمز معکوس کمکی و تبخیرکننده‌های با بازده بالا منجر به تولید نمک‌های با خلوص بالا و کاهش قابل توجه مصرف انرژی می‌شود. این روش‌ها همچنین می‌توانند در تصفیه آب و استخراج نمک‌های مختلف از شورابه‌ها مانند نمک کلرید سدیم (NaCl) و پتاسیم (KCl) به کار روند [۱۰۱].

پتنت WO2020251568A1 به بررسی یک سیستم نوآورانه برای استخراج یون‌های تک‌ظرفیتی مانند لیتیوم از آب‌های شور می‌پردازد. این اختراع شامل استفاده از فناوری OARO برای افزایش کارایی در فرآیندهای تغلیظ و بازیابی آب است. نقش OARO در این پتنت به‌طور خاص در بخش‌های مربوط به تغلیظ آب شور با استفاده از فرآیندهای اسمز معکوس و اسمز کمکی برجسته شده است. فناوری OARO با بهره‌گیری از یک محلول کششی که غلظت کمتری نسبت به جریان آب ورودی دارد، به کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای RO کمک می‌کند. این فناوری توانسته است مشکلات مربوط به غلظت بالای آب شور را که معمولاً در روش‌های معمولی RO رخ می‌دهد، حل کند. دستاوردهای مهم این پتنت شامل بهبود بازدهی انرژی در فرآیندهای تصفیه آب و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌باشد. این سیستم توانسته است با استفاده از OARO، نه تنها غلظت لیتیوم را به سطح قابل قبول برای استفاده‌های صنعتی برساند، بلکه مصرف انرژی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، امکان استفاده از غشاءهای انتخابی برای جداسازی دقیق یون‌ها به بهینه‌سازی بیشتر فرآیند کمک کرده است.

همچنین این پتنت شامل اطلاعات عددی مهمی درباره عملکرد و کارایی سیستم OARO است. این اطلاعات شامل مصرف انرژی و بازدهی سیستم در شرایط مختلف می‌باشد. به عنوان مثال، نتایج نشان می‌دهند که سیستم

¹ Multiple Effect Evaporators

² Mechanical vapor return

³ Thermal vapor return

OARO توانسته است مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، و این کاهش مصرف انرژی به حدود ۳/۹ کیلووات ساعت بر متر مکعب برای فرآیندهای تصفیه آب شور رسیده است. همچنین، کارایی این سیستم در کاهش غلظت آب‌های شور و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه در مقایسه با روش‌های معمولی مثل MVC نیز به صورت عددی بیان شده است. این اعداد نشان‌دهنده بهبودهای چشمگیر در کارایی انرژی و هزینه‌های عملیاتی هستند، که می‌توانند به عنوان نقطه قوت اصلی این اختراع در مرور پتنت‌ها مورد تأکید قرار گیرند. این اختراع به‌ویژه در استفاده از روش‌های نوین مانند OARO برای حل چالش‌های موجود در فرآیندهای استخراج و بازیابی یون‌های مهم از آب‌های شور، نوآوری‌های چشمگیری ارائه کرده است [۱۰۲].

اختراع افشا شده در پتنت WO2021061343A1 به یک فرآیند کارآمد برای تغلیظ و بازیابی لیتیوم از منابع آب شور می‌پردازد. این فرآیند شامل استفاده از ماژول‌های RO، OARO، و اسمز با فشار متقابل (PRO) برای بهینه‌سازی غلظت لیتیوم و کاهش مصرف انرژی است. این سیستم با بهره‌گیری از فشار اسمزی بالا و غشاءهای انتخابی لیتیوم، موفق به افزایش کارایی در جداسازی و تغلیظ لیتیوم شده است.

در ابتدا، محلول حاوی لیتیوم از طریق یک واحد اسمز معکوس پردازش می‌شود که یک کنسانتره RO تولید می‌کند. سپس این کنسانتره به دو ماژول PRO متصل به هم هدایت می‌شود که در آن‌ها از فشار اسمزی بالای جریان آب شور برای انتقال آب از کنسانتره RO به جریان آب شور استفاده می‌شود. این فرآیند، علاوه بر تغلیظ بیشتر لیتیوم، انرژی حاصل از رقیق شدن جریان آب شور را برای تولید برق از طریق توربین‌های آبی یا دستگاه‌های بازیابی هم‌فشار به کار می‌گیرد.

در مرحله بعد، کنسانتره RO که بیشتر تغلیظ شده است، به یک ماژول OARO هدایت می‌شود که در آن فشار بالا و فشار اسمزی برای انتقال آب از کنسانتره به جریان بازیافت‌شده استفاده می‌شود. این فرآیند منجر به تغلیظ بیشتر لیتیوم در کنسانتره OARO می‌شود و یک جریان رقیق‌شده ایجاد می‌کند که به مرحله قبلی PRO بازگردانده می‌شود. این روش به کاهش مصرف انرژی کمک کرده و هزینه‌های عملیاتی را به میزان قابل توجهی کاهش داده است.

یکی از مزایای اصلی این اختراع، مصرف کم انرژی در فرآیند تغلیظ لیتیوم است که منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی می‌شود. ماژول‌های PRO با استفاده از اختلاف فشار اسمزی بین جریان‌های ورودی و کششی، نه تنها به تغلیظ لیتیوم کمک می‌کنند، بلکه انرژی لازم برای فرآیند را نیز تأمین می‌کنند و به‌طور بالقوه انرژی خالص تولید می‌کنند. این نوآوری به‌عنوان یک روش بسیار کارآمد و اقتصادی برای استخراج و بازیابی لیتیوم از منابع آب شور شناخته می‌شود [۱۰۳].

اختراع CN 109475818 A، سیستمی برای تصفیه جریان‌های مایع با هدف حذف حل‌شونده‌ها و دستیابی به یک جریان خروجی خالص را شرح می‌دهد. این سیستم به ویژه برای نمک‌زدایی آب شور و غلیظ کردن آب‌های غنی از نمک مناسب است. استفاده از روش OARO که شامل چندین بخش اسمز معکوس است، یکی از نوآوری‌های این سیستم می‌باشد. این روش در مقایسه با روش‌های معمولی اسمز معکوس، با استفاده از فشار کمتر و مصرف انرژی کلی پایین‌تر، بازدهی بالاتری را ارائه می‌دهد.

در فرآیند توصیف‌شده، از غشاء نیمه‌نفوذپذیر برای اجازه عبور مولکول‌های کوچک مانند آب و جلوگیری از عبور مولکول‌ها و یون‌های بزرگ‌تر استفاده می‌شود. تفاوت در غلظت حل‌شونده‌ها در دو طرف غشاء به فشار اسمزی مرتبط است. سیستم OARO، با استفاده از فشار اسمزی بالا در طرف با غلظت بالاتر، باعث حرکت آب به سمت جریان با غلظت پایین‌تر می‌شود، که به این ترتیب یک فرآیند اسمز معکوس را بهبود می‌بخشد و نیاز به فشارهای بالاتر را کاهش می‌دهد.

این اختراع همچنین شامل روش‌هایی برای تصفیه جریان‌های مایع با کاهش فشار مورد نیاز و مصرف انرژی کلی سیستم می‌باشد. این سیستم‌ها شامل بخش‌های مختلف اسمز معکوس و تجهیزات بازیابی انرژی هستند که باعث کاهش پیچیدگی عملیاتی و افزایش بهره‌وری فرآیند می‌شوند. به طور خاص، این روش‌ها برای تصفیه جریان‌های حاوی غلظت بالای حل‌شونده‌ها، با حفظ کارایی جداسازی مشابه، بسیار مناسب هستند.

نهایتاً، این سیستم‌ها با کاهش فشار عملیاتی و استفاده از تجهیزات بازیابی انرژی مانند مبدل‌های فشار و سیستم‌های بازیابی انرژی حرارتی، به طور موثری هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند. روش‌های توصیف‌شده

به‌طور خاص برای دستیابی به جداسازی مؤثر حل‌شونده‌ها با مصرف انرژی کمتر و بهره‌وری بالاتر طراحی شده‌اند و این امر باعث می‌شود که سیستم در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی به‌کار گرفته شود [۱۰۴].

پنت CN 113600014 A مربوط به یک سیستم تصفیه آب با استفاده از فرآیند RO است که در آن از چندین مرحله اسمز معکوس به روش‌های خاص استفاده می‌شود. این سیستم به‌ویژه برای تصفیه آب شور و افزایش غلظت آب شور طراحی شده است. در این سیستم، مراحل اسمز معکوس به‌طور خاص به‌گونه‌ای ترتیب داده شده‌اند که فشار کمتری اعمال شده و مصرف انرژی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این تکنیک به‌ویژه در مقایسه با روش‌های سنتی تصفیه آب، مانند تقطیر یا بخاردهی، انرژی کمتری مصرف می‌کند.

در این سیستم، از یک غشای نیمه‌تراوا برای جداسازی مولکول‌های حل‌شده در مایع استفاده می‌شود. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند جریان‌های مایع با غلظت بالای حل‌شده را نیز تصفیه کند. در این روش، مراحل مختلف اسمز معکوس به‌طور متوالی در کنار هم قرار گرفته‌اند، به طوری که در هر مرحله فشار و انرژی کمتری لازم است، اما همچنان کارایی جداسازی مشابه روش‌های معمولی حفظ می‌شود. سیستم به‌طور خاص شامل چندین مرحله اسمز معکوس است که شامل یک مرحله اولیه، بخش میانه و یک مرحله نهایی است. در مرحله اولیه، مایعات با فشار بالا وارد شده و پس از پردازش، مایعات بازگشتی و کنسانتره تولید می‌شوند. سپس این مایعات به مرحله میانه منتقل می‌شوند که شامل چندین مرحله اسمز معکوس می‌باشد. در مرحله نهایی، جریان‌های مایع تصفیه شده از سیستم خارج می‌شوند.

این سیستم همچنین شامل تجهیزاتی برای بازیابی انرژی است که باعث کاهش مصرف انرژی در مراحل مختلف می‌شود. در برخی موارد، ممکن است از دستگاه‌های پیش‌تصفیه مانند سیستم دیونیزاسیون با ظرفیت و یا اسمز مستقیم قبل از وارد شدن مایع به سیستم تصفیه استفاده شود. همچنین، برای افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی، ممکن است از پمپ‌های خاص برای فشرده‌سازی جریان‌های مختلف مایع استفاده شود.

در نهایت، این سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند جریان‌های مایع با غلظت‌های مختلف را تصفیه کرده و انرژی کمتری مصرف کند. علاوه بر این، فشار سیستم در محدوده‌ای است که از فشارهای بسیار بالا جلوگیری می‌شود، و این باعث می‌شود که سیستم برای استفاده در انواع مایعات شوری و غلیظ مناسب باشد [۱۰۵].

پتنت WO 2016/057764 A1 به سیستم‌ها و روش‌های جداسازی اسمزی مربوط به استخراج حلال از محلول‌های مختلف پرداخته است. در اینجا، مراحل و سیستم‌هایی برای استفاده از فرآیندهای اسمزی، مانند اسمز مستقیم، برای جداسازی مواد حل‌شده از محلول‌های آبی و حداکثر کردن بازیابی حلال و یا مواد حل‌شده ارائه شده‌اند.

در ابتدا، فرآیند FO برای شیرین‌سازی آب استفاده شده است. این فرآیند شامل دو محفظه است که با غشای نیمه‌نفوذپذیر از هم جدا شده‌اند. یک محفظه حاوی آب دریا و دیگری حاوی یک محلول غلیظ است. این تفاوت غلظت باعث کشیدن آب از دریا به داخل محلول غلیظ می‌شود که در نهایت آب شیرین به دست می‌آید.

یکی از جنبه‌های این اختراع به سیستم‌هایی برای استخراج اسمزی حلال از محلول‌های مختلف مربوط است. این سیستم‌ها شامل واحدهای FO هستند که در آن‌ها حلال از یک محلول جدا می‌شود. سپس محلول رقیق از سیستم جدا شده و برای بازسازی به فرآیندهای دیگر هدایت می‌شود.

در برخی از این سیستم‌ها، از سیستم‌های جداسازی استفاده می‌شود که محلول رقیق را به محلول غلیظ تبدیل کرده و حلال جدا شده را باز می‌گرداند. این فرآیند می‌تواند شامل واحدهای معکوس اسمزی یا سایر سیستم‌های تحت فشار باشد. به این ترتیب، سیستم‌ها به طور مؤثری می‌توانند بازیابی حلال و مواد حل‌شده را به حداکثر برسانند.

در نهایت، روش‌ها و سیستم‌های پیشنهادی می‌توانند شامل پمپ‌ها و دستگاه‌های فشار اضافی برای افزایش بازده فرآیندها باشند و از طریق تنظیم فشار و فشار اسمزی، میزان بازیابی حلال‌ها و مواد حل‌شده را بهینه کنند. این سیستم‌ها می‌توانند با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش و پس‌پردازش مختلف مانند فیلتراسیون، تبادل یونی و سایر روش‌های اصلاحی کارایی خود را بهبود بخشند [۱۰۶].

اختراع WO 2024/016080 A1 به سیستم‌ها و فرآیندهای بازیابی لیتیم از آب شور با غلظت کم لیتیم (کمتر از ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) و ناخالصی‌های بالا می‌پردازد. منابع لیتیم با غلظت بالا مانند اسپودومن^۱ و آب‌های شور سدیمی به‌طور معمول برای استخراج لیتیم استفاده می‌شوند، اما این اختراع راهکارهایی برای استخراج لیتیم از منابع با غلظت پایین و ناخالصی‌های زیاد ارائه می‌دهد. فرآیند بازیابی لیتیم در این اختراع از دو مرحله اصلی استخراج مستقیم لیتیم تشکیل شده است. در مرحله اول، از فرآیندهایی مانند جذب انتخابی لیتیم، تبادل یونی لیتیم یا استخراج الکتروشیمیایی برای تولید یک محلول بازیابی لیتیم با نسبت جرم لیتیم به کل جامدات حل‌شده حداقل ۰/۰۱ استفاده می‌شود. در مرحله دوم، لیتیم از محلول بازیابی اولیه استخراج می‌شود تا محلول بازیابی لیتیم با غلظت بالاتر (حداقل ۰/۰۴) تولید گردد. این مراحل به‌طور خاص برای استخراج لیتیم از آب شور با ناخالصی‌های بالا طراحی شده‌اند.

در برخی از نسخه‌ها، فرآیند بازیابی لیتیم شامل غلیظسازی محلول‌ها با استفاده از اسمز معکوس قبل از مرحله دوم است. همچنین، ممکن است محلول‌های بازیابی با ترکیب مجدد آب شور برای افزایش کارایی فرآیند اول استفاده شوند. در ادامه، پس از مرحله دوم، محلول بازیابی لیتیم به کمک دستگاه‌های غلیظ‌کننده آب شور غلیظ‌تر می‌شود تا غلظت لیتیم به مقادیر بالای ۱۰،۰۰۰ میلی گرم در لیتر برسد. این دستگاه‌ها شامل واحدهای اسمز معکوس فشار بالا و سایر روش‌های پیشرفته غلیظسازی هستند.

به طور کلی این اختراع شامل سیستم‌هایی برای بازیابی لیتیم است که از دو واحد استخراج مستقیم لیتیم تشکیل شده‌اند، که هر کدام به‌طور جداگانه برای استخراج لیتیم از آب شور و محلول‌های بازیابی عمل می‌کنند. این سیستم‌ها ممکن است از فناوری‌هایی همچون جذب انتخابی لیتیم، تبادل یونی لیتیم و استخراج الکتروشیمیایی بهره ببرند. به‌ویژه، در این اختراع به فرآیند OARO اشاره شده که در غلیظسازی محلول‌ها به کار می‌رود تا کارایی فرآیند بازیابی لیتیم به حداکثر برسد [۱۰۷].

¹ Spodumene

۵- بازیگران گذشته و فعلی و سطح بلوغ OARO

فرآیند OARO می‌تواند در شرایط مناسب، غلظت‌های آب شور بالای ۲۰۰,۰۰۰ میلی گرم در لیتر را به‌دست آورد که این امر ۵۰ تا ۸۰ درصد بالاتر از غلظت آب شور در سیستم‌های اسمز معکوس با فشار فوق‌العاده بالا^۱ (UHP RO) است. فرآیند OARO، که شامل مجموعه‌ای از حلقه‌های متوالی است، به‌طور گسترده‌ای منتشر، بحث و آزمایش شده است. OARO یک فناوری «باز» است و نباید با اسمز مستقیم اشتباه گرفته شود. تا سال ۲۰۲۳، OARO هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده است که بخشی از آن به دلیل عدم وجود غشاهای استاندارد و تولید انبوه و همچنین پیچیدگی فرآیند است. این فناوری در یک نقطه عطف قرار دارد، زیرا تولیدکنندگان جهانی غشا اکنون در حال تولید انبوه غشاهای ترکیبی نازک و مارپیچی OARO با کیفیت تضمین‌شده هستند و نوآوری‌های تدریجی چالش‌های پیچیدگی فرآیند را حل کرده‌اند. حمایت تخصصی برای اطمینان از ادغام بدون مشکل OARO با فناوری‌های پردازش موجود ضروری است، در حالی که سلامت غشا نیز حفظ می‌شود [۵۱].

دانشگاه‌هایی مانند دانشگاه MIT، نانجینگ و دانشگاه کوبه ژاپن، مراکز تحقیقاتی مانند Battelle Memorial شکل (۲۵) شرکت‌های صنعتی کلیدی این فناوری را نشان می‌دهد. شرکت Hyrec خود را در زمینه فناوری OARO به‌عنوان یک شرکت پیشرو و رهبر معرفی کرده است.

شرکت VEOLIA با همکاری شرکت Hyrec در پروژه‌ای که در کشور اندونزی انجام داده است موفق شده است اولین واحد تجاری OARO را راه‌اندازی کند. این واحد با استفاده از فناوری‌های غشایی از جمله OARO از آب دریا، ۲۲۰,۰۰۰ تن نمک‌های گرید خوراکی در سال و ۲۷۱۲۰ مترمکعب آب شیرین در روز تولید می‌کند. برای این کار، شرکت Hyrec یک واحد آزمایشی ایجاد کرد که به دنبال تولید نمک کلرید سدیم بود و این کار را با استفاده از فرآیند تغلیظ آب نمک به کمک OARO و کریستالیزر خود در کنار محصولات و تخصص کاربردی نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس آب دریا (SWRO) شرکت VEOLIA انجام داد.

¹ Ultra High Pressure Reverse Osmosis



Fluid Technology Solutions (Fts),
Inc.



Veolia Water Solutions &
Technologies Support



Kurita Water Industries Ltd.,



Oasys Water, Inc.



Saltworks Technologies Inc.



Gradiant Corporation



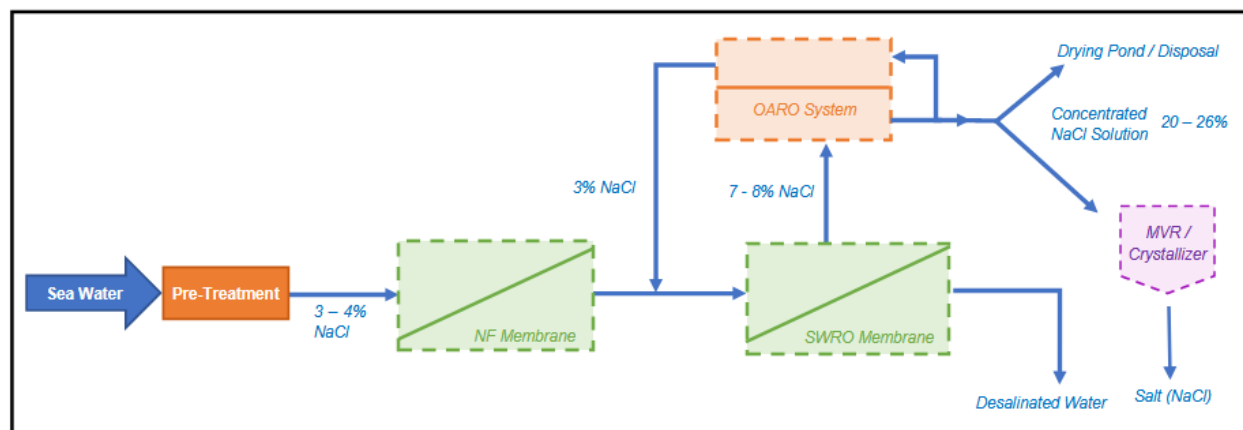
Surrey Aquatechnology



Trevi Systems Inc

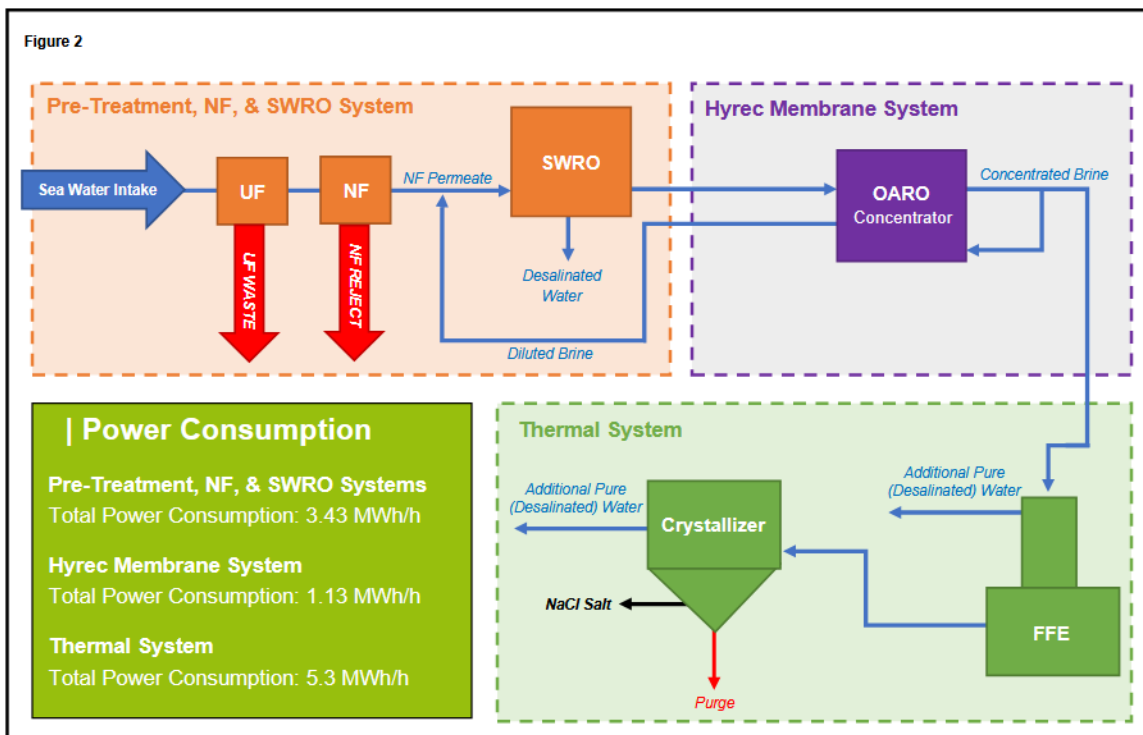
شکل ۲۵- شرکت‌های صنعتی کلیدی در زمینه فناوری OARO

راه‌اندازی این کارخانه آزمایشی در اواخر تابستان ۲۰۲۳ انجام شد و به مدت یک سال ادامه یافت تا اطمینان حاصل شود که روش به کار رفته از نظر اقتصادی قابل اعتماد است و استانداردهای کیفی تولیدکننده مواد غذایی اندونزی را برآورده می‌کند. این کارخانه آزمایشی به مدت یک سال فعالیت کرد و موفقیت‌های فنی و اقتصادی را نشان داد. تأثیرات حاصل به‌طور مورد انتظار در ایجاد تأمین پایدار و قابل اعتماد نمک با کیفیت غذایی بالا، تثبیت هزینه‌ها و در نهایت بهبود رضایت مشتری در زنجیره تأمین، از جمله برای جوامع محلی، بود. همان‌طور که در شکل (۲۶) نشان داده شده است، آب دریا به‌طور گران‌تری به حوضچه ورودی آب دریا در زیر زمین هدایت می‌شود که دارای سیستم غربالگری نوار سفر خودکار برای ساختار ورودی در بستر دریا است. پس از تزریق هیپوکلریت سدیم (NaOCl) برای ضدعفونی در این حوضچه، آب دریا به واحدهای اولترافیلتراسیون پیش‌تیمار ارسال می‌شود تا آلاینده‌هایی مانند ذرات کلوئیدی و میکروارگانیسم‌ها حذف شوند.



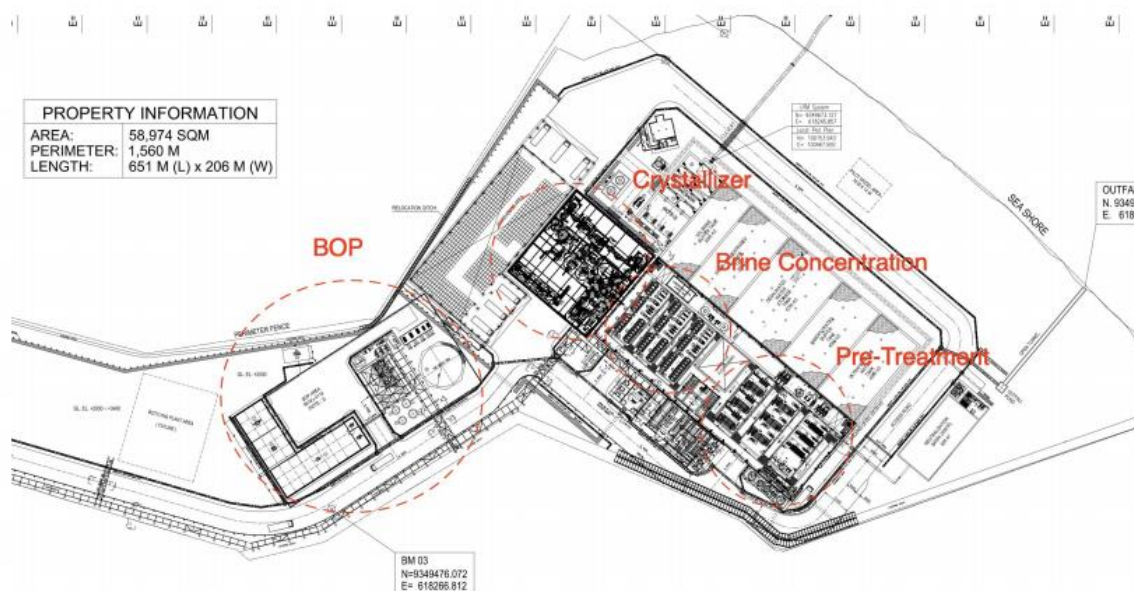
شکل ۲۶- تولید نمک گرید غذایی از آب دریا با تلفیق فناوری‌های مختلف غشایی

آب اولترافیلتراسیون شده سپس از طریق یک سیستم نانوفیلتراسیون دو مرحله‌ای آب دریا عبور می‌کند و سپس آب تراویده توسط یک سیستم اسمز معکوس دو مرحله‌ای آب دریا پردازش بیشتری می‌شود. در حالی که آب شیرین قابل استفاده از سیستم اسمز معکوس آب دریا تولید می‌شود، جریان غلیظ‌تر نیز توسط سیستم غلظت آب نمک Hyrec با فناوری OARO پردازش بیشتری می‌شود تا این جریان را تا ۱۶/۴ درصد به‌عنوان آب نمک NaCl غلیظ کند قبل از اینکه به یک سیستم حرارتی تغذیه شود. جریان رقیق شده از سیستم غلظت آب نمک Hyrec دوباره به مخزن آب تراویده‌ی نانوفیلتراسیون برگردانده می‌شود و با آب تراویده‌ی نانوفیلتراسیون آب دریا مخلوط می‌شود قبل از اینکه به سیستم اسمز معکوس آب دریا تغذیه شود. سیستم حرارتی ابتدا شامل یک تبخیرکننده فیلم پایین‌رونده است تا غلظت آب نمک را از سیستم OARO بیشتر افزایش دهد تا به حد اشباع در محلول ۲۶٪ NaCl برسد. سپس یک سیستم کریستالیزاسیون با گردش اجباری نمک با خلوص بیش از ۹۹/۵ درصد تولید می‌کند. شکل (۲۷) نمودار موازنه جرم سیستم را نشان می‌دهد.



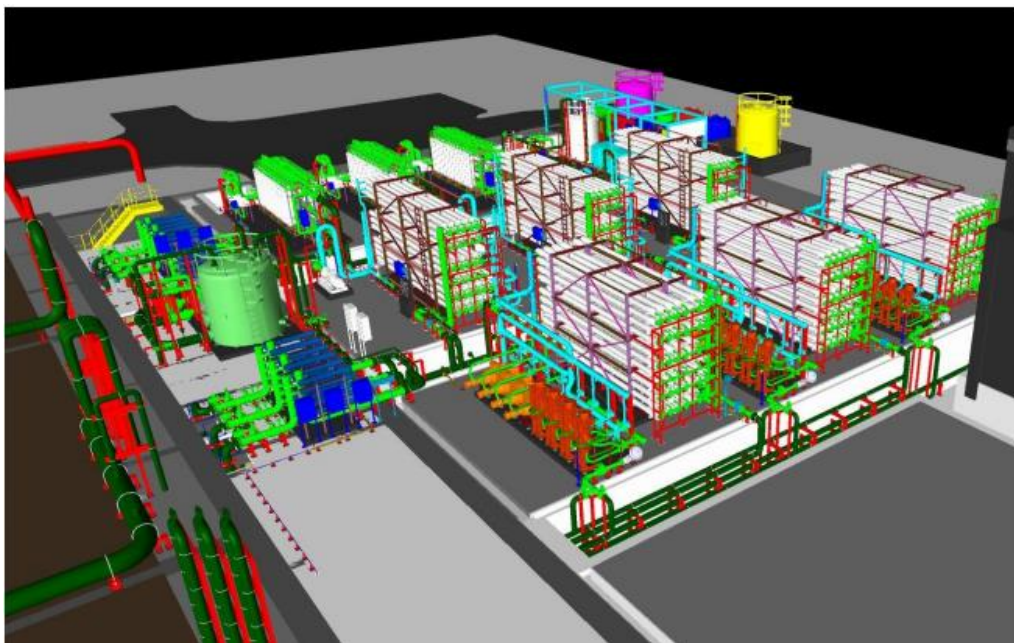
شکل ۲۷- موازنه جرم سیستم تولید نمک گرید غذایی از آب دریا

شکل (۲۸) جانمایی بخش‌های مختلف پروژه فوق را نشان می‌دهد [۱۰۸].



شکل ۲۸- جانمایی بخش‌های مختلف پروژه تولید نمک گرید غذایی از آب دریا در اندونزی [۱۰۸]

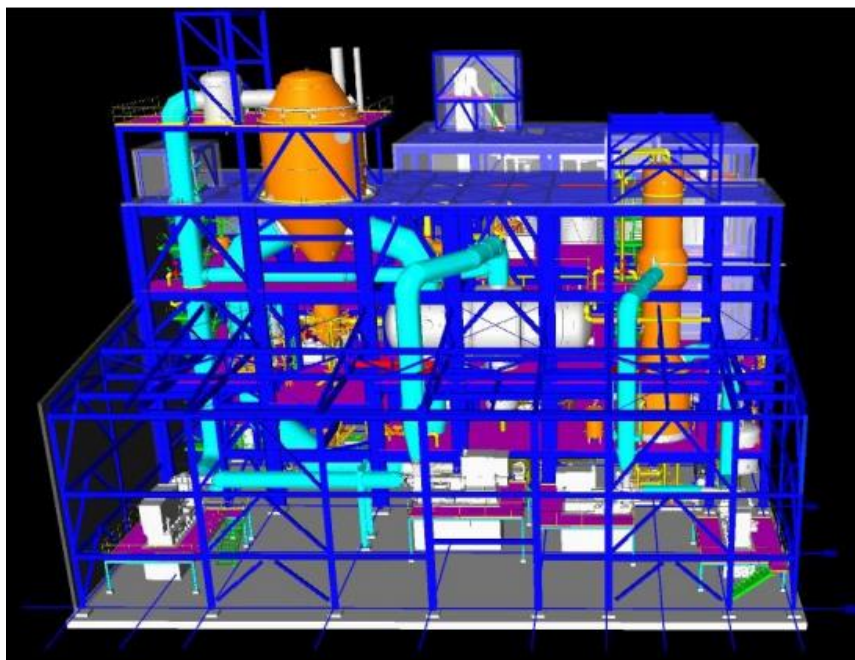
شکل‌های (۲۹) تا (۳۱) به ترتیب شبیه‌سازی واحدهای پیش‌تصفیه، تغلیظ آب شور و سیستم حرارتی در پروژه OARO اندونزی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۹- واحد پیش‌تصفیه در پروژه OARO اندونزی [۱۰۸]



شکل ۳۰- واحد تغلیظ آب نمک در پروژه OARO اندونزی [۱۰۸]



شکل ۳۱- سیستم حرارتی در پروژه OARO اندونزی [۱۰۸]

شکل (۳۲) تصاویری از مراحل ساخت و نصب واحدهای مختلف غشایی پروژه تولید نمک گرید غذایی از آب دریا در اندونزی را نشان می دهد.



شکل ۳۲- مراحل ساخت و نصب واحدهای مختلف غشایی پروژه تولید نمک گرید غذایی از آب دریا در اندونزی [۱۰۸]

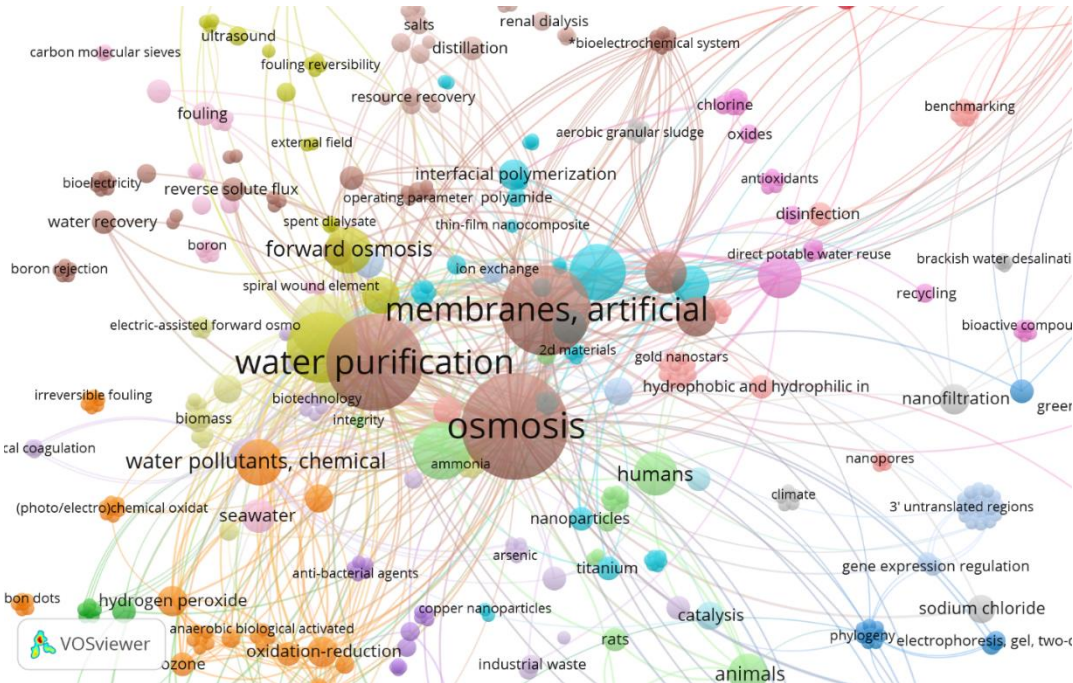
جدول (۲) پروژه‌های تجاری در نقاط مختلف دنیا را نشان می‌دهد که از فناوری OARO استفاده کرده‌اند.

جدول ۲- استفاده از فناوری OARO در پروژه‌های تجاری در نقاط مختلف دنیا [۱۰۸]

Location	Application	Industry	Feed water
East Asia	Wastewater ZLD	Coal-to-chemical	Wastewater
		Natural gas	
		Electroplating	
		Chemical	
		Oil & gas	
		Petro chemical	
		Landfill leachate	
		Produced water	
		Power plant	
	Li extraction & recovery	LiB recycle	Li-ion black mass
Southeast Asia	Salt production	Food	Deep ocean water RO brine
		Food/medical	Sea water RO brine
		Agrochemical	Wastewater
	Wastewater ZLD	Textile	
		Chemical	
	Salt production	Food	Sea water RO brine

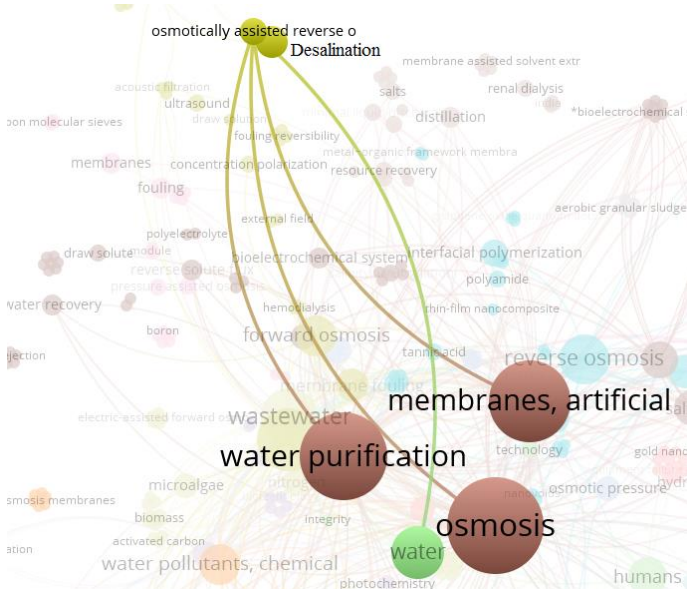
بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی در سطح جهانی به مطالعه و توسعه OARO پرداخته‌اند. این مراکز با انجام تحقیقات بنیادی و کاربردی، به پیشرفت فناوری کمک کرده‌اند.

برای بررسی دقیق‌تر مراکز دانشگاهی که بر روی فناوری OARO تحقیقات می‌کنند از نرم‌افزار VOSViewer استفاده شد. این نرم‌افزار که یک ابزار مصورسازی علم است کمک می‌کند تا محققان و مراکز تحقیقاتی برتر در هر زمینه علم مصورسازی شود. برای انجام این کار، ابتدا از پایگاه Pubmed به جستجوی مقالات مرتبط با حوزه فناوری OARO پرداخته شد. نتیجه جستجو به صورت یک فایل بانک اطلاعاتی ذخیره و در نرم‌افزار VOSViewer وارد شد. شکل (۳۳) نمودار خوشه‌ای حاصل از بررسی نرم‌افزار را تا تاریخ ۷ ژانویه ۲۰۲۵ نشان می‌دهد.



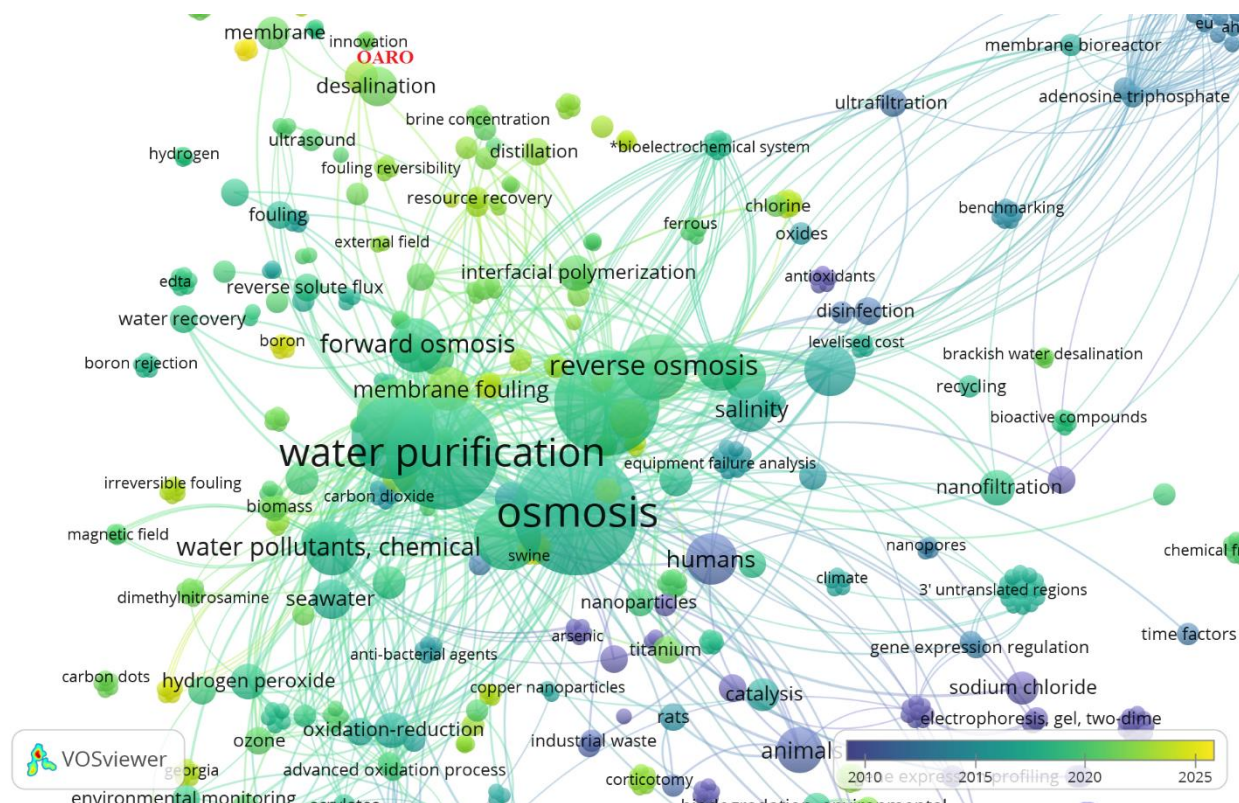
شکل ۳۳- نمودار خوشه‌ای خروجی نرم‌افزار VOSViewer حاصل از بررسی پایگاه داده حاوی OARO

همانطور که در شکل (۳۳) دیده می‌شود، در لایه‌های بیرونی نمودار خوشه‌ای اثری از فناوری OARO دیده نمی‌شود. بنابراین لایه‌های درونی خوشه‌ی فوق پیمایش شدند که نتیجه در شکل (۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۴-ارتباط فناوری OARO با سایر حوزه‌های فناوری آب

همانطور که از شکل (۳۴) دیده می‌شود، واژه کلیدی Osmotically assisted reverse osmosis با واژگان کلیدی water purification, membrane, osmosis, desalination, و water بوده است. شکل (۳۵) روند حرکت تحقیقات فناوری‌های غشایی از سال ۲۰۱۰ به سمت سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳۵) بوضوح مشخص است که فناوری OARO نیز از جمله حوزه‌هایی است که مورد توجه محققان است.

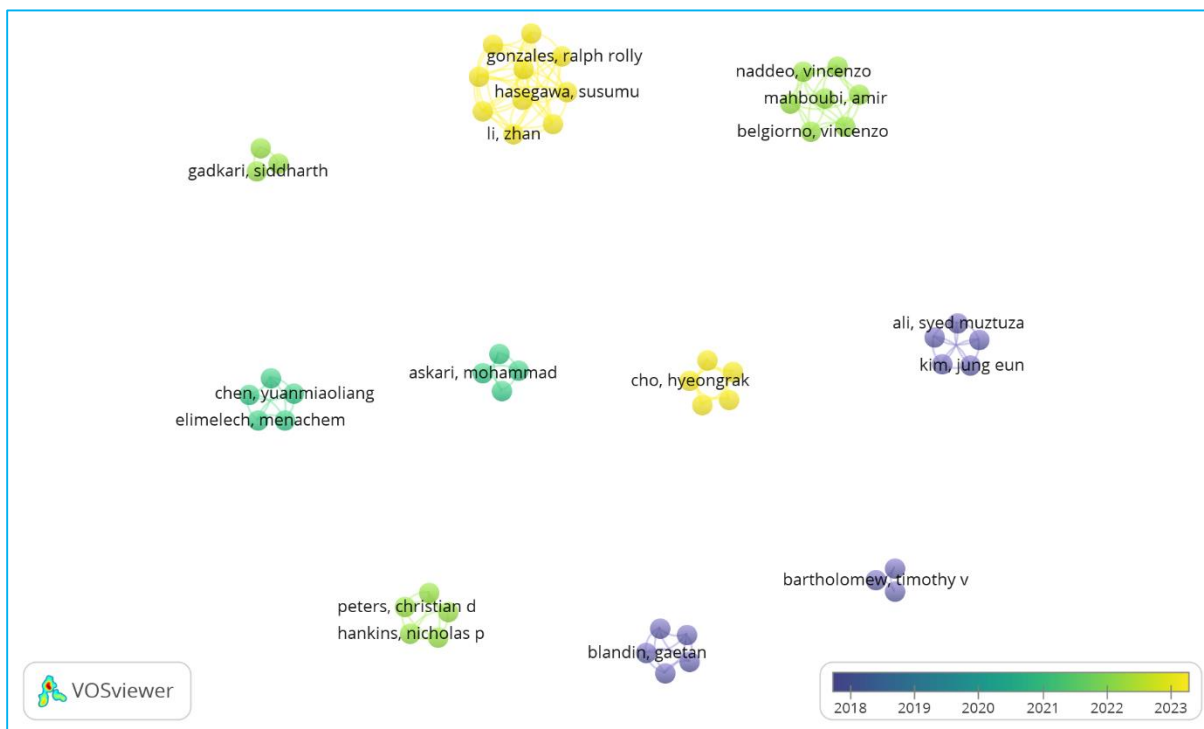


شکل ۳۵-روند حرکت تحقیقات فناوری‌های غشایی از سال ۲۰۱۰ به سمت سال ۲۰۲۵

شکل‌های (۳۶) و (۳۷) به ترتیب دانشگاه‌ها و محققانی را نشان می‌دهند که در زمینه OARO تحقیقات می‌کنند.



شکل ۳۶- دانشگاه‌های فعال در زمینه OARO



شکل ۳۷- محققان فعال در زمینه OARO

سازمان‌های دولتی نیز به عنوان بازیگران کلیدی در توسعه OARO شناخته می‌شوند. این سازمان‌ها با تأمین بودجه‌های تحقیقاتی و اجرای پروژه‌های بزرگ شیرین‌سازی آب، به رشد این فناوری کمک می‌کنند. برای مثال، پروژه‌های شیرین‌سازی آب در کشورهای خاورمیانه مانند عربستان سعودی که با بحران کمبود آب مواجه هستند، نمونه‌ای از حمایت‌های دولتی از فناوری OARO است.

فناوری OARO در حال حاضر در مراحل مختلف بلوغ قرار دارد. برخی از جنبه‌های کلیدی آن شامل تحقیق و توسعه، تجاری‌سازی و پذیرش بازار می‌باشد. تحقیقات جاری بر روی OARO نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فناوری برای افزایش کارایی سیستم‌های تصفیه آب است. مطالعات نشان داده‌اند که OARO می‌تواند تا ۷۲٪ بازیابی از خوراک شور ۳۵ g/L را فراهم کند. همچنین، مصرف انرژی پایین‌تر آن نسبت به روش‌های سنتی تصفیه آب، یکی دیگر از مزایای آن محسوب می‌شود.

تجاری‌سازی OARO هنوز در حال توسعه است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، برخی از شرکت‌ها موفق به راه‌اندازی سیستم‌های تجاری OARO شده‌اند که نشان‌دهنده قابلیت اجرایی این فناوری است. با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالا برای نصب و نگهداری تجهیزات همچنان وجود دارد. شرکت Saltworks در حال تلاش برای پیشگامی در ارائه راه‌حل‌های پایدار برای فرآوری آب و لیتیم است. این شرکت به تازگی آخرین دستاورد خود را در زمینه OARO معرفی کرده است. با تعهد به پیشرفت فرآیندهای آب‌زدایی، OARO شرکت Saltworks اکنون به صورت تجاری در دسترس است که این امر نشان‌دهنده یک پیشرفت قابل توجه در تغلیظ آب شور و بازیابی آب از سیستم‌های RO می‌باشد. راه‌حل‌های OARO شرکت Saltworks می‌توانند غلظت آب شور را تا ۸۰٪ افزایش دهند و هزینه و انرژی کمتری نسبت به تبخیرکننده‌ها ارائه دهند. شرکت Saltworks با نوآوری در محدودیت‌های OARO، سیستم را ساده کرده و آن را با فناوری نظارت بر سلامت غشای پیشرفته و هوشمند خودتمیزکننده ترکیب کرده است. این پیشرفت همچنین با کمک تولیدکنندگان بزرگ غشای RO که غشاهای کامپوزیتی نازک پیچیده را برای کاربردهای OARO عرضه می‌کنند، تسهیل شده است. OARO این شرکت برای

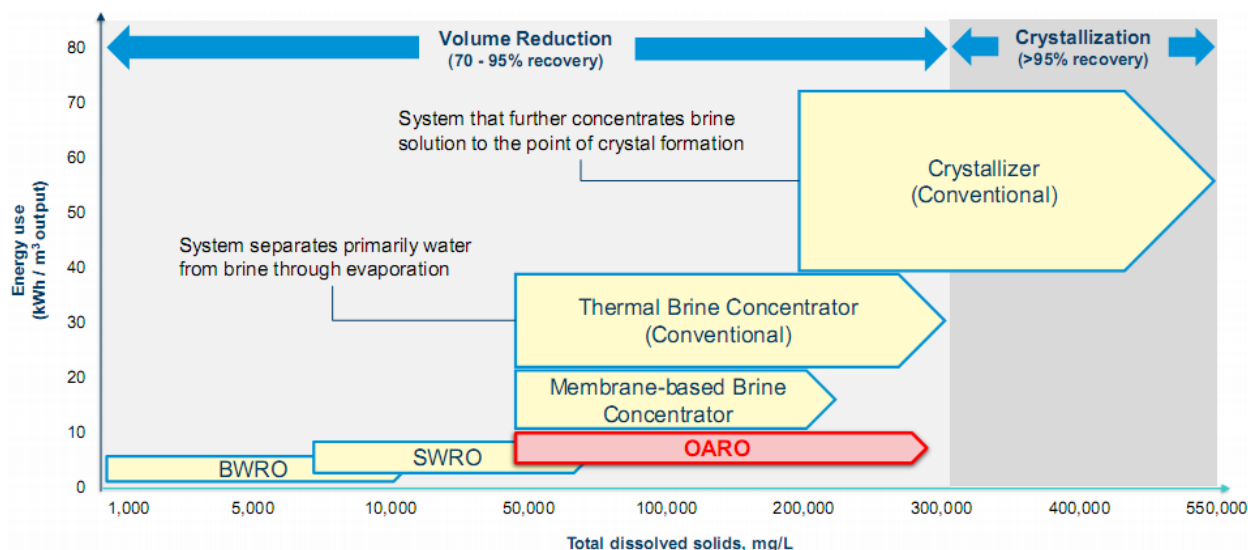
حمایت از نیاز صنعت رو به رشد لیتیم به تغلیظ آب شور و بازیابی آب با هزینه مؤثرتر در مقیاس بزرگ‌تر از سیستم‌های آب‌زدایی صنعتی سنتی طراحی شده است.

۶- پیش‌بینی آینده فناوری

با توجه به بحران کمبود آب در بسیاری از مناطق جهان، پذیرش بازار برای فناوری OARO رو به افزایش است. کشورهای خاورمیانه، شمال آفریقا و برخی مناطق آسیا بیشترین نیاز را به این فناوری دارند. فناوری OARO به‌عنوان یک فناوری نوین در تصفیه آب دارای پتانسیل بالایی برای حل مشکلات کمبود آب است. با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه طراحی غشاها و سیستم‌های مربوطه صورت گرفته است، انتظار می‌رود که استفاده از این فناوری در آینده افزایش یابد. همکاری میان دانشگاه‌ها، صنعت و دولت‌ها می‌تواند نقش مهمی در تسریع توسعه و پذیرش OARO ایفا کند. همچنین با توجه به گسترش اتومبیل‌های الکتریکی و هیبریدی، پیش‌بینی شده است که استفاده از لیتیوم برای تولید گسترده‌ی باتری‌های لیتیومی به شدت افزایش یابد و این مستلزم استخراج لیتیوم از شورابه‌های معدنی و نفتی است. با توجه به تجربه موفقیت‌آمیز فناوری OARO در استحصال لیتیوم از شورابه‌ها، پیش‌بینی می‌شود این فناوری بتواند جایگاه ویژه‌ای در فناوری‌های استحصال لیتیوم پیدا کند. در پایان، فناوری OARO نقطه عطفی برای فناوری‌های غلیظ‌سازی و تصفیه به شمار می‌رود. OARO یک آرایش نوآورانه از اجزای موجود در زنجیره تأمین صنعتی است که نشان‌دهنده راهی کوتاه برای تجاری‌سازی کامل با هزینه رقابتی است. هرچند که آلودگی و سلامت غشا هنوز توانایی این فناوری را در برخورد با آب ورودی خشن محدود می‌کند، نوآوری در این بخش باید منجر به ایجاد سیستم‌های مقاوم‌تر در آینده نزدیک شود. اما در حال حاضر، توجه دقیق به شیمی آب ورودی کلید یک سیستم OARO با کارایی انرژی و هزینه مناسب است.

در حالی که OARO به‌طور گسترده‌ای در بخش تصفیه آب استفاده نمی‌شود، این فناوری به‌مدت طولانی پتانسیل زیادی برای بهبود اقتصادی سیستم‌های غلظت غشایی-آب شور داشته است. مطابق شکل (۳۸)، فرآیند OARO

در مقایسه با روش‌های تبلورسازی سنتی، تغلیظ‌کننده‌های حرارتی آب نمک، تغلیظ‌کننده‌های غشایی آب نمک، اسمز معکوس آب دریا و اسمز معکوس آب نمک (BWRO) به لحاظ بازده مصرف انرژی برتری دارد [۵۱].



شکل ۳۸-مقایسه فناوری‌های مختلف تغلیظ آب نمک به لحاظ مصرف انرژی [۱۰۸]

فناوری OARO می‌تواند غلظت‌های آب شور کلرید سدیم بالای ۲۰۰,۰۰۰ میلی گرم در لیتر را به دست آورد، در حالی که غلظت آب شور در سیستم‌های اسمز معکوس با فشار فوق العاده بالا (UHPRO) تنها ۱۳۰,۰۰۰ میلی گرم در لیتر است. این افزایش در قابلیت غلظت آب شور به هزینه‌های اضافی از نظر پیچیدگی فرآیند و نیازهای انرژی نسبت به فرآیندهای سنتی اسمز معکوس می‌انجامد. این فناوری نسبت به ترکیب‌های سنتی اسمز معکوس و تبخیرکننده‌ها کمتر شناخته شده است، که عمدتاً به دلیل کمبود تأمین غشا و عدم وجود نصب‌های واقعی و کامل است. اما OARO بالاخره به مرحله تجاری‌سازی نزدیک می‌شود که ناشی از تقاضای بازار از صنعت لیتیوم برای غلظت‌دهنده‌های غشایی-آب شور در مقیاس بزرگ‌تر است [۵۱].

¹ Brine water reverse osmosis

تولیدکنندگان پیشرو غشا مانند دوپونت^۱ و نیتو هیدرانوتیک^۲، ارائه‌دهنده غشاهای OARO با کیفیت حرفه‌ای هستند. نوآوری‌های تدریجی در کنترل فرآیند که پیچیدگی فرآیند را کاهش می‌دهد، امکان بازیابی انرژی هیدرولیکی را فراهم می‌کند و سلامت و حفاظت از غشا را تضمین می‌کند.

در مقایسه با تبخیرکننده‌ها، چالش‌ها، محدودیت‌ها و ملاحظات فناوری OARO در حالی که در استحصال لیتیوم استفاده می‌شود، به راحتی قابل دفاع است و این به دلیل خلوص بالا و خاصیت کم رسوب‌گذاری شورابه‌ی حاوی لیتیوم است. نتایج و کاربردهای OARO در سایر آب‌های ورودی صنعتی ممکن است متفاوت باشد. مانند تمام فناوری‌ها، OARO نیز محدودیت‌هایی دارد. غشاهای، بر خلاف تبخیرکننده‌ها، بیشتر در معرض آلودگی غیرقابل برگشت، رسوب و آسیب دائمی ناشی از تمیز کردن شیمیایی مکرر هستند. علاوه بر این، با دستیابی به غلظت‌های بالای آب شور از طریق OARO، نسبت مواد جامد محلول کل به آلودگی‌ها و مواد آلی نیز افزایش می‌یابد. این امر خطر آلودگی‌های آلی و بیولوژیکی را تشدید می‌کند. بنابراین، مهندسی صحیح و حفظ سلامت غشا باید در نظر گرفته شود. شرکت‌های توانمند حفاظت، نگهداری، نظارت و خودمراقبتی غشا را در تمام سیستم‌های RO خود پیاده‌سازی می‌کنند و از بهترین شیوه‌ها، تشخیص پیشرفته، روندها و فناوری‌های خودتمیزکننده مانند پلتفرم XtremeRO Saltworks استفاده می‌کنند. با توجه به سلامت غشا، OARO پتانسیل بالایی برای غلیظ کردن آب‌های صنعتی دارد که شامل برخی موارد از صنعت نفت و گاز می‌شود، جایی که کاهش حجم و اهداف بازیابی آب می‌تواند با یک سیستم غشایی کم‌هزینه‌تر نسبت به یک تبخیرکننده محقق شود. با این حال، نباید تبخیرکننده‌ها را نادیده گرفت. تصمیمات سفارشی و آگاهانه باید بر اساس تحلیل و تخصص فنی اتخاذ شود. تبخیرکننده‌ها سطوح انتقال حرارت و جرم فلزی قوی‌تری را ارائه می‌دهند و فرآیند ساده‌تری نسبت به OARO دارند، علاوه بر اینکه قابلیت‌های بالاتری در غلظت آب شور دارند (هرچند با هزینه بیشتر). تبخیرکننده‌هایی مانند Saltworks' SaltMaker مزایای بیشتری دارند زیرا سیستم‌های هوشمند تمیز کردن رسوب و ضد رسوب در

¹ DuPont

² Nitto Hydranautics

آن‌ها تعبیه شده است. در نهایت، هیچ تصمیم واحدی برای بهترین غلیظ‌کننده آب شور برای آب‌های صنعتی وجود ندارد. پروژه‌ها باید مطالعه‌ای آگاهانه درباره گزینه‌ها انجام دهند و در صورت عدم وجود داده‌های مقایسه‌ای، آزمایش‌های پایلوت را نیز در نظر بگیرند. همچنین عواملی مانند ظرفیت، شیمی آب ورودی و فرآیندهای پیش‌تصفیه باید توسط یک کارشناس بررسی شود تا مشخص شود آیا OARO باید به جای یک تبخیرکننده استفاده شود یا بالعکس [۵۱].

۷- نگاه مراکز تحلیلی مانند گارتنر به فناوری

نتایج جستجو نشان می‌دهد که در وبسایت گارتنر به طور خاص به فناوری OARO پرداخته نشده است. اطلاعات موجود در نتایج بیشتر به فناوری RO و کاربردهای آن مربوط می‌شود و به نظر نمی‌رسد که OARO به عنوان یک موضوع مستقل در این منابع ذکر شده باشد.

۸- ارتباط فناوری OARO با فناوری نانو

فناوری OARO به عنوان یکی از روش‌های نوین در تصفیه شورابه‌ها، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب، کاهش پساب، و دستیابی به هدف بازیابی حداکثری آب دارد. با این حال، کارایی این فناوری در عمل می‌تواند با چالش‌هایی از جمله گرفتگی غشا، محدودیت‌های فشار عملیاتی، و کاهش شار در طول زمان مواجه شود. در این میان، فناوری نانو به عنوان ابزاری کلیدی برای ارتقای عملکرد سیستم‌های غشایی، به ویژه در فرآیندهای نوینی مانند OARO شناخته شده است. استفاده از نانومواد در طراحی غشاها، امکان بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی غشاها را فراهم کرده و موجب افزایش دوام، بهره‌وری و پایداری فرآیندهای جداسازی غشایی می‌شود [۱۰۹].

افزون بر این، فناوری نانو این پتانسیل را دارد که موانع کلیدی موجود در اجرای صنعتی OARO، از جمله هزینه‌های بالا، عمر محدود غشا، و کارایی پایین در شرایط عملیاتی سخت را کاهش دهد. مطالعات متعددی در زمینه غشاهای اسمزی نشان داده‌اند که نانوذرات از طریق افزایش آبدوستی، اصلاح بار سطحی، و ارتقای ساختار منافذ، می‌توانند موجب بهبود عملکرد غشا و کاهش گرفتگی سطحی شوند [۱۰۹، ۱۱۰].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو در سیستم‌های OARO، استفاده از نانوکامپوزیت‌ها برای ساخت یا اصلاح لایه‌های غشایی است. نانوکامپوزیت‌های غشایی، ترکیبی از ماتریس‌های پلیمری با نانوذرات معدنی یا کربنی‌اند که موجب بهبود خواصی نظیر آبدوستی، مقاومت مکانیکی، و خاصیت ضد گرفتگی می‌شوند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزودن نانوذراتی مانند TiO_2 ، ZnO ، SiO_2 ، گرافن اکسید (GO) و نانوذرات نقره به غشاهای پلیمری، عملکرد آن‌ها را در برابر رسوب‌گذاری، گرفتگی زیستی و کاهش شار به‌طور معناداری بهبود می‌دهد [۱۱۱]. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن نانوکامپوزیت TiO_2 /گرافن کاهش‌یافته (rGO) به لایه فعال پلی‌آمید غشاهای اسمزی، باعث افزایش شار آب و کاهش نفوذ معکوس نمک (reverse salt diffusion) می‌شود که این عوامل منجر به بهبود عملکرد غشا و کاهش تجمع آلاینده‌ها می‌گردد [۱۱۲]. همچنین، استفاده از نانوذرات ZnO و TiO_2 در ماتریس‌هایی مانند PES یا PVDF، ضمن افزایش مقاومت شیمیایی، باعث تقویت خواص ضد باکتریایی و پایداری حرارتی غشا می‌شود [۱۱۳].

همچنین ترکیبات هیبریدی مانند Ag/GO و $\text{TiO}_2/\text{graphene}$ در مقایسه با نانوذرات ساده عملکرد بهتری در محیط‌های واقعی تصفیه آب از خود نشان داده‌اند و در کاهش رشد بیوفیلم و حفظ شار پایدار مؤثر بوده‌اند [۱۱۴]. مهندسی نانوساختارها در طراحی غشاهای OARO افزون بر استفاده از نانوذرات در قالب افزودنی، یکی دیگر از رویکردهای فناورانه، طراحی ساختارهای نانویی در لایه‌های غشا است. این روش شامل ایجاد منافذ با اندازه نانو، طراحی لایه‌های متقارن یا نامتقارن با کنترل دقیق بر مورفولوژی، و استفاده از تکنیک‌های لایه‌نشانی نانویی برای افزایش کارایی جداسازی است. غشایی که با روش‌های نانوساخت طراحی می‌شوند، معمولاً دارای تخلخل بالا،

مسیرهای نفوذ یکنواخت‌تر و مقاومت مکانیکی بهتری هستند. این مزایا به‌ویژه در برابر چالش‌های رایج OARO، نظیر فشار اسمزی معکوس و نرخ پایین شار، مؤثر واقع می‌شوند.

برای مثال، استفاده از نانوفیبرهای الکتروریسی شده به‌عنوان بستر یا تقویت‌کننده در ساخت غشا، منجر به کاهش ضخامت لایه فعال، افزایش سرعت انتقال جرم، و در نتیجه بهبود شار و کاهش انرژی مصرفی شده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که این غشاهای نانوفیبری می‌توانند در فرآیندهای اسمزی با فشار پایین عملکرد بسیار مؤثری داشته باشند [۱۰۹].

افزون بر این، روش‌هایی مانند ساخت غشاهای با لایه نانویی فوق‌نازک، طراحی غشاهای چندلایه با نانوپوشش انتخاب‌پذیر، و استفاده از فناوری‌های پلاسما یا نانوب‌گریزکننده‌ها نیز در جهت کاهش گرفتگی و افزایش انتخاب‌پذیری جداسازی توسعه یافته‌اند. برای مثال، مروره‌های اخیر نشان می‌دهند که استفاده از لایه‌های فیلم نازک نانویی و نانوپوشش‌هایی مانند DLC می‌تواند آبدوستی غشا را بهبود داده و گرفتگی را کاهش دهد – به‌طوری که شار را از حدود ۸ به $65 \text{ L/m}^2\text{h}$ افزایش داده‌اند [۱۱۵، ۱۱۶].

مطالعات موردی و پروژه‌های صنعتی در سطح جهانی نشان می‌دهند که به‌کارگیری فناوری نانو در بهبود عملکرد غشاهای اسمزی، به‌ویژه در RO و FO، در حال صنعتی‌سازی است. به‌عنوان نمونه:

- LG Chem با فناوری Thin-Film Nanocomposite (TFN) و محصول تجاری $\text{NanoH}_2\text{O}^{\text{TM}}$ RO membranes، موفق به دستیابی به راندمان حذف نمک ۹۹/۸۹٪ و کاهش عبور نمک تا ۴۵٪ نسبت به فناوری‌های پیشین شده است؛ این غشاها در بیش از ۱/۵ میلیارد لیتر در روز بزرگ‌مقیاس به‌کار گرفته شده‌اند [۱۱۷].

- Toray Industries با بهره‌گیری از فناوری نانو، لایه‌نشانی چندلایه با کنترل ساختار در مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی و فوتونیک، غشاهای RO با تولید آب ۷۰٪ بیشتر و مصرف انرژی پایین‌تر توسعه داده است [۱۱۸، ۱۱۹].

این تجربیات صنعتی معتبر، الگویی مناسب برای توسعه نسل جدید غشاهای OARO با ویژگی‌های نانوپایه به‌شمار می‌روند.

در ایران نیز پژوهش‌های پیشرفته‌ای در زمینه نانوکامپوزیت‌ها برای غشاهای RO انجام شده است؛ برای نمونه یک غشا مبتنی بر PET-TFN با افزودن نانوذرات TiO_2 را گزارش شده که با شار $75 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ و ظرفیت حذف نمک $99/8\%$ ، عملکرد بسیار بالا و ویژگی‌های عالی ضد گرفتگی را نشان داده است. اگرچه تاکنون پژوهش مستقیمی درباره غشاهای OARO منتشر نشده، اما این دستاوردها در RO بیانگر پتانسیل واقعی برای به‌کارگیری فناوری نانو در تولید غشاهای OARO نانوپایه در ایران هستند.

ظرفیت بومی‌سازی و توسعه صنعتی با توجه به پیشرفت‌های علمی کشور در حوزه نانو و وجود زیرساخت‌هایی چون شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در تولید غشا و مواد اولیه نانو، امکان بومی‌سازی فناوری غشاهای OARO مبتنی بر نانو در کشور فراهم است. این موضوع علاوه بر کاهش وابستگی به واردات، موجب ایجاد اشتغال تخصصی، افزایش کیفیت تصفیه فاضلاب‌های صنعتی، و توسعه صادرات خدمات فنی-مهندسی خواهد شد.

از جمله فرصت‌های بومی‌سازی می‌توان به تولید غشاهای نانوکامپوزیتی با مواد اولیه داخلی، طراحی خطوط تولید نیمه‌صنعتی در مقیاس نانوپایلوت، و توسعه واحدهای صنعتی تصفیه آب با بهره‌گیری از غشاهای OARO اصلاح‌شده اشاره کرد. هم‌افزایی میان بخش دانشگاه، صنعت و نهادهای سیاست‌گذار در این حوزه می‌تواند به توسعه زنجیره تأمین فناوری نانو در بخش آب کشور منجر شود.

پیشنهاد می‌شود پروژه‌های پژوهشی مشترک بین دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و دستگاه‌های اجرایی در این حوزه تعریف شده و در قالب طرح‌های نانوپایلوت به اجرا درآیند. همچنین حمایت از تجاری‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی غشاهای نانوپایه OARO می‌تواند مسیر توسعه صنعتی این فناوری در کشور را هموار سازد.

نانوساختارها و نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده در طراحی این غشاهای OARO، می‌توانند به‌طور مستقیم بر کاهش گرفتگی، افزایش شار، بهبود مقاومت شیمیایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی تأثیرگذار باشند. بهره‌گیری

هدفمند از ظرفیت‌های فناوری نانو در توسعه و بومی‌سازی این فناوری می‌تواند ایران را به یکی از بازیگران فعال در حوزه فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب تبدیل کند.

۹- جمع‌بندی کاربردی و تحلیل راهکارها

برای تحلیل نظام‌مند نقش فناوری نانو در بهینه‌سازی فرآیند OARO، ابتدا باید چالش‌های فنی این فناوری شناسایی و با راهکارهای نانومقیاس به‌طور تطبیقی بررسی شوند. فناوری نانو ابزارهای متعددی را برای مقابله با محدودیت‌های عملیاتی مانند گرفتگی غشا، فشار بالا و افت عملکرد بلندمدت فراهم می‌کند. همچنین در سطح ساختاری، امکان تقویت خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی غشاها را فراهم می‌سازد. در جدول (۳)، چالش‌های کلیدی فرآیند OARO، تبعات عملیاتی آن‌ها، راهکارهای پیشنهادی مبتنی بر فناوری نانو، و سازوکارهای مؤثر هر راهکار به‌صورت تطبیقی ارائه شده‌اند. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی سیستم‌های صنعتی مبتنی بر OARO نانوپایه مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳- تحلیل تطبیقی چالش‌های فنی فرآیند OARO و راهکارهای پیشنهادی مبتنی بر فناوری نانو

چالش فنی در فرآیند OARO	تبعات عملیاتی	راهکارهای پیشنهادی مبتنی بر نانو	سازوکار اثر نانو
گرفتگی غشا (Fouling)	کاهش شار، افزایش هزینه نگهداری	استفاده از نانوکامپوزیت‌های ضد رسوب مانند TiO_2/GO , Ag, ZnO	افزایش آبدوستی، خاصیت ضد میکروبی، کاهش چسبندگی آلودگی
محدودیت فشار عملیاتی	آسیب‌پذیری مکانیکی غشا، افت راندمان	استفاده از نانو الیاف تقویت‌کننده یا نانوپوشش‌های مکانیکی	افزایش استحکام مکانیکی و تحمل فشار بالا
پایداری شیمیایی پایین	تخریب غشا در محیط‌های خورنده	افزودن نانوذرات مقاوم شیمیایی مانند SiO_2 , TiO_2	افزایش مقاومت در برابر pH و اکسیدکننده‌ها
افت شار در طول زمان	کاهش عملکرد در بلندمدت	مهندسی ساختار نانویی در لایه فعال (مثل نانوپوشش‌های فوق نازک)	کاهش ضخامت مؤثر، بهبود انتقال جرم
هزینه بالای غشاهای پیشرفته	محدودیت در تجاری‌سازی	ساخت غشاهای نانوپایه با مواد اولیه بومی	کاهش هزینه تولید، ارتقای دوام و عملکرد اقتصادی

مراجع

1. Guppy, L., et al., *Global water crisis: The facts*. Hamilton, UNU-INWEH, 2017.
2. He, C., et al., *Future global urban water scarcity and potential solutions*. Nature Communications, 2021. **12**(1): p. 4667.
3. Kitamori, K., et al., *OECD environmental outlook to 2050: the consequences of inaction*. 2012, OECD.
4. James, C.A., et al., *Revisiting recycled water for the next drought; a case study of South East Queensland, Australia*. Utilities Policy, 2023. **84**: p. 101626.
5. Pang, H., et al., *Demonstrating removal credits for contaminants of emerging concern in recycled water through a reverse osmosis barrier—A predictive framework*. Water Research, 2023. **244**: p. 120427.
6. Ward, F.A., *Integrating water science, economics, and policy for future climate adaptation*. Journal of Environmental Management, 2023. **325**: p. 116574.
7. Hou, C., et al., *Impacts of regional water shortage information disclosure on public acceptance of recycled water—evidences from China's urban residents*. Journal of Cleaner Production, 2021. **2** :78p. 123965.
8. Salehi, M., *Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis*. Environment International, 2022. **158**: p. 106936.
9. Wijesiri, B., A. Liu, and A. Goonetilleke, *Impact of global warming on urban stormwater quality: From the perspective of an alternative water resource*. Journal of Cleaner Production, 2020. **262**: p. 121330.
10. Hristov, J., et al., *Reuse of treated water in European agriculture: Potential to address water scarcity under climate change*. Agricultural Water Management, 2021. **251**: p. 106872.
11. Jones, E., et al., *The state of desalination and brine production: A global outlook*. Science of the Total Environment, 2019. **657**: p. 1343-1356.
12. Panagopoulos, A., *Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022. **176**: p. 108944.
13. de Nicolás, A.P., et al., *Reject brine management: Denitrification and zero liquid discharge (ZLD)—Current status, challenges and future prospects*. Journal of Cleaner Production, 2022. **381**: p. 135124.
14. Yaqub, M. and W. Lee, *Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review*. Science of the total environment, 2019. **681**: p. 551-563.
15. Panagopoulos, A. and K.-J. Haralambous, *Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery—Analysis, challenges and prospects*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020. **8**(5): p. 104418.
16. Chen, Q.-B., et al., *Near-zero liquid discharge and reclamation process based on electrodialysis metathesis for high-salinity wastewater with high scaling potential*. Desalination, 2022. **525**: p. 115390.
17. Panagopoulos, A., *Beneficiation of saline effluents from seawater desalination plants: fostering the zero liquid discharge (ZLD) approach—a techno-economic evaluation*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021. **9**(4): p. 105338.
18. Tong, T. and M. Elimelech, *The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions*. Environmental science & technology, 2016. **50**(13): p. 684.6855-6

19. Cipolletta, G., et al., *Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment*. Journal of Environmental Management, 2021. **300**: p. 113681.
20. Panagopoulos, A. and V. Giannika, *Comparative techno-economic and environmental analysis of minimal liquid discharge (MLD) and zero liquid discharge (ZLD) desalination systems for seawater brine treatment and valorization*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, :53 .2022p. 102477.
21. Wu, J., et al., *Reverse osmosis membrane compaction and embossing at ultra-high pressure operation*. Desalination, 2022. **537**: p. 115875.
22. Schwantes, R., et al., *Techno-economic comparison of membrane distillation and MVC in a zero liquid discharge application*. Desalination, 2018. **428**: p. 50-68.
23. Elsaid, K., et al., *Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020. **8**(5): p. 104099.
24. Mistry, K.H., et al., *Entropy generation analysis of desalination technologies*. Entropy, 2011. **13**(10): p. 1829-1864.
25. Bartholomew, T.V., et al., *Osmotically assisted reverse osmosis for high salinity brine treatment*. Desalination, 2017. **421**: p. 3-11.
26. Tsai, J.-H., et al., *Membrane-based zero liquid discharge: Myth or reality?* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017. **80**: p. 192-202.
27. Zhang, X. and Y. Liu, *Reverse osmosis concentrate: An essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability*. Chemical Engineering Journal, 2021. **421**: p. 127773.
28. Lee, S., et al., *Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects*. Desalination, 20 :454 .19p. 104-111.
29. Khan, M., et al., *A better understanding of seawater reverse osmosis brine: Characterizations, uses, and energy requirements*. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2021. **4**: p. 100165.
30. Missimer, T.M. and R.G. Maliva, *Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls*. Desalination, 2018. **434**: p. 198-215.
31. Davenport, D.M., et al., *High-pressure reverse osmosis for energy-efficient hypersaline brine desalination: current status, design considerations, and research needs*. Environmental Science & Technology Letters, 2018. **5**(8): p. 467-475.
32. McConnon, D.J., *The effect of very high hydraulic pressure on the permeability and salt rejection of reverse osmosis membranes*. 2015, Massachusetts Institute of Technology.
33. Davenport, D.M., et al., *Thin film composite membrane compaction in high-pressure reverse osmosis*. Journal of membrane science, 2020. **610**: p. 118268.
34. Wang, J. and X. Liu, *Forward osmosis technology for water treatment: Recent advances and future perspectives*. Journal of Cleaner Production, 2021. **280**: p. 124354.
35. Wu, X., et al., *State-of-the-art and opportunities for forward osmosis in sewage concentration and wastewater treatment*. Membranes, 2021. **11**(5): p. 3.05
36. Kim, J., et al., *Evaluation of ethanol as draw solute for forward osmosis (FO) process of highly saline (waste) water*. Desalination, 2019. **456**: p. 23-31.
37. Peters, C.D. and N.P. Hankins, *The synergy between osmotically assisted reverse osmosis (OARO) and the use of thermo-responsive draw solutions for energy efficient, zero-liquid discharge desalination*. Desalination, 2020. **493**: p. 114630.
38. Anderson, W.V., et al., *Forward osmosis–membrane distillation process for zero liquid discharge of flue gas desulfurization wastewater*. Energy & Fuels, 2021. **35**(6): p. 5130-5140.

39. Ahunbay, M.G., *Achieving high water recovery at low pressure in reverse osmosis processes for seawater desalination*. Desalination, 2019. **465**: p. 58-68.
40. Ahunbay, M.G., S.B. Tantekin-Ersolmaz, and W.B. Krantz, *Energy optimization of a multistage reverse osmosis process for seawater desalination*. Desalination, 2018. **429**: p. 1-11.
41. Chong, T.H., S.-L. Loo, and W.B. Krantz, *Energy-efficient reverse osmosis desalination process*. Journal of Membrane Science, 2015. **473**: p. 177-188.
42. Chong, T.H., et al., *Energy-efficient reverse osmosis desalination: Effect of retentate recycle and pump and energy recovery device efficiencies*. Desalination, 2015. **366**: p. 15-31.
43. Jeong, K., M. Park, and T.H. Chong, *Numerical model-based analysis of energy-efficient reverse osmosis (EERO) process: Performance simulation and optimization*. Desalination, 2019. **453**: p. 10-21.
44. Chong, T.H. and W.B. Krantz, *Process economics and operating strategy for the energy-efficient reverse osmosis (EERO) process*. Desalination, 2018. **443**: p. 70-84.
45. Shamlou, E., et al., *Optimization-based modeling and analysis of brine reflux osmotically assisted reverse osmosis for application toward zero liquid discharge systems*. Desalination, 2022. **539**: p. 115948.
46. Mo, Z., et al., *How split-feed osmotically assisted reverse osmosis (SF-OARO) can outperform conventional reverse osmosis (CRO) processes under constant and varying electricity tariffs*. Desalination, 20 :530 .22p. 115670.
47. Al-Amoudi, A.S., et al., *Dual brine concentration for the beneficial use of two concentrate streams from desalination plant-concept proposal and pilot plant demonstration*. Desalination, 2023. **564**: p. 116789.
48. Al-Najar, B., et al., *Pressure and osmotically driven membrane processes: A review of the benefits and production of nano-enhanced membranes for desalination*. Desalination, 2020. **479**: p. 114323.
49. Peters, C.D. and N.P. Hankins, *Osmotically assisted reverse osmosis (OARO): Five approaches to dewatering saline brines using pressure-driven membrane processes*. Desalination, 2019. **458**: p. 1-13.
50. Chong, Y., et al., *Review of modeling methodologies and state-of-the-art for osmotically assisted reverse osmosis membrane systems*. Desalination, 2024: p. 117893.
51. [cited 2024 28.12]; Available from: <https://www.saltworkstech.com/articles/oaro/>.
52. بنی، ع.ن.، طراحی سیستم شیرین سازی آب با بازیابی بالا با استفاده از روش های غشایی، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۰۰، دانشگاه صنعتی شریف.
53. Arnal, J., et al., *Concentration of brines from RO desalination plants by natural evaporation*. Desalination, 2005. **182**(1-3): p. 435-439.
54. Ogunbiyi, O., et al., *Sustainable brine management from the perspectives of water, energy and mineral recovery: A comprehensive review*. Desalination, 2021. **513**: p. 115055.
55. Morillo, J., et al., *Comparative study of brine management technologies for desalination plants*. Desalination, 2014. **336**: p. 32-49.
56. Loganathan, P., G. Naidu, and S. Vigneswaran, *Mining valuable minerals from seawater: a critical review*. Environmental Science: Water Research & Technology, 2017. **3**(1): p. 37-53.
57. Reig, M., et al., *Concentration of NaCl from seawater reverse osmosis brines for the chlor-alkali industry by electrodialysis*. Desalination, 2014. **342**: p. 107-117.
58. Casas, S., et al., *Seawater reverse osmosis brines as a new salt source for the chlor-alkali industry: Integration of NaCl concentration by electrodialysis*. Solvent Extraction and Ion Exchange, 2012. **30**(4): p. 332-322.

59. Chen, X. and N.Y. Yip, *Unlocking high-salinity desalination with cascading osmotically mediated reverse osmosis: energy and operating pressure analysis*. Environmental science & technology, 2018. **52**(4): p. 2242-2250.
60. Subramani, A. and J.G. Jacangelo, *Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review*. Separation and Purification Technology, 2014. **122**: p. 472-489.
61. Sanmartino, J., et al., *Treatment of reverse osmosis brine by direct contact membrane distillation: Chemical pretreatment approach*. Desalination, 2017. **420**: p. 79-90.
62. Mericq, J.-P., S. Laborie, and C. Cabassud, *Vacuum membrane distillation of seawater reverse osmosis brines*. Water research, 2010. **44**(18): p. 5260-5273.
63. Salmón, I.R. and P. Luis, *Membrane crystallization via membrane distillation*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018. **123**: p. 258-271.
64. Wang, Z., et al., *Minimal and zero liquid discharge with reverse osmosis using low-salt-rejection membranes*. Water research, 2020. **170**: p. 115317.
65. Bouma, A.T., *Split-feed counterflow reverse osmosis for brine concentration*. Desalination, 2018. **445**: p. 280-291.
66. Jamil, S., S. Jeong, and S. Vigneswaran, *Application of pressure assisted forward osmosis for water purification and reuse of reverse osmosis concentrate from a water reclamation plant*. Separation and Purification Technology, 2016. **171**: p. 182-190.
67. Blandin, G., et al., *Validation of assisted forward osmosis (AFO) process: Impact of hydraulic pressure*. Journal of membrane science, 2013. **447**: p. 1-11.
68. Shaffer, D.L., et al., *Forward osmosis: where are we now?* Desalination, 2015. **356**: p. 271-284.
69. Qin, M., et al., *Comparison of energy consumption in desalination by capacitive deionization and reverse osmosis*. Desalination, 2019. **455**: p. 100-114.
70. Campione, A., et al., *Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications*. Desalination, 2018. **434**: p. 121-160.
71. Gopi, G., G. Arthanareeswaran, and A. Ismail, *Perspective of renewable desalination by using membrane distillation*. Chemical Engineering Research and Design, 2019. **144**: p. 520-537.
72. Tow, E.W. and R.K. McGovern, *Raising forward osmosis brine concentration efficiency through flow rate optimization*. Desalination, 2015. **366**: p. 71-79.
73. Elimelech, M. and W.A. Phillip, *The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment*. science, 2011. **333**(6043): p. 712-717.
74. McGovern, R.K., *On the potential of forward osmosis to energetically outperform reverse osmosis desalination*. Journal of Membrane Science, 2014. **469**: p. 245-250.
75. Choi, B.G., et al., *Pilot-scale evaluation of FO-RO osmotic dilution process for treating wastewater from coal-fired power plant integrated with seawater desalination*. Journal of Membrane Science, 2017. **540**: p. 78-87.
76. Chang, H., et al., *On-site treatment of shale gas flowback and produced water in Sichuan Basin by fertilizer drawn forward osmosis for irrigation*. Environmental science & technology, 2020. **54**(17): p. 10926-10935.
77. Shaffer, D.L., et al., *Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: Improved product water quality for potentially less energy*. Journal of membrane science, 2012. **415**: p. 1-8.
78. Ban, S.-H., et al., *Comparative performance of FO-RO hybrid and two-pass SWRO desalination processes: Boron removal*. Desalination, 2019. **471**: p. 114114.
79. Thiel, G.P., et al., *Energy consumption in desalinating produced water from shale oil and gas extraction*. Desalination, 2015. **366**: p. 94-112.

80. Wang, Z., et al., *Comparison of energy consumption of osmotically assisted reverse osmosis and low-salt-rejection reverse osmosis for brine management*. Environmental Science & Technology, 2021. **55**(15): p. 10714-10723.
81. Fritzmann, C., et al., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*. Desalination, 2007. **216**(1-3): p. 1-76.
82. Park, K. and D.R. Yang, *Cost-based feasibility study and sensitivity analysis of a new draw solution assisted reverse osmosis (DSARO) process for seawater desalination*. Desalination, 2017. **422**: p. 182-193.
83. Atia, A.A., N.Y. Yip, and V. Fthenakis, *Pathways for minimal and zero liquid discharge with enhanced reverse osmosis technologies: Module-scale modeling and techno-economic assessment*. Desalination, 2021. **509**: p. 115069.
84. Anton STALLINGER, B.J.M., TzeYen CHIU, Michael Robert BEDFORD, Peter George NICOLL, *Solvent separation*. 2019.
85. Raynel, G.R.J.-F., *Processes and systems for treating sour water to remove sulfide compounds*. 2021.
86. Q·魏J, 韦., 贝克G, 卡米格纳尼, *Osmotic pressure assisted reverse osmosis process and method of use*. 2022.
87. Q·魏E, 贝., 韦伯利G, 卡米格纳尼, *Osmotic pressure assisted reverse osmosis membrane and module*. 2022.
88. Looh Tchuin Choong, L.C., Chung TAI-SHUNG, Mohammed ASKARI, *Strong hollow-fiber membranes for saline desalination and water treatment*. 2022.
89. 孝博 川勝, 和.熊., 秀人 松山, *Wastewater concentration device and concentration method*. 2024.
90. 孝博 川勝, 和.熊., 秀人 松山, *Apparatus and method for concentrating aqueous solution*. 2024.
91. 朴钟范, 李., 高永勋, 申荣俊, *Method for concentrating high salinity raw water*. 2024.
92. Kurt Blohm, R.P., Ann E. Lane, Slawomir Winecki, Darwin Argumedo, *Cross current staged reverse osmosis*. 2.024
93. Q·魏, J.韦., E·贝克, G·卡米格纳尼, *The hyperfiltration and its application method of osmotic pressure auxiliary*. 2016.
94. Qiang Wei, J.W., Elliott BAKER, Gary Carmignani, *Osmotic pressure assisted reverse osmosis process and method of using the same*. 201.6
95. 吴兵, 占., 马文豪, 郑鹏飞, *Novel osmosis-assisted nanofiltration-reverse osmosis combined device and application*. 2022.
96. DREAU, R.C.L., *Process for preparing customized* 2022.
97. Benjamin SPARROW, M.L., Xiangchun Yin, *System and process for recovering lithium from a saltwater*, 2023.
98. Darwin Argumedo, K.B., Ann E. Lane, Richard Peterson, Slawomir Winecki, *Multistage osmotically assisted reverse osmosis system and method*. 2017.
99. John H. Lienhard, A.T.B., *Systems and methods for osmotically assisted reverse osmosis configurations*. 2023.
100. John Lienhard, A.B., Danyal REHMAN, Zi Hao Foo, *Harnessing metal ions from brines*. 2022.
101. John R. Herron, K.A.L., Edward Gerard BEAUDRY, *Systems and methods of draw solution recovery with energy saving evaporation supporting forward osmosis membrane crystallization*. 2024.
102. Basel ABUSHARKH, E.E., *Osmotically assisted cascade water desalination systems, concentrators and hybrid systems*. 2019.
103. Kurt Blohm, J.L., Isabelle LEMAITRE, *Energy efficient process for concentrating and recovering lithium from a lithium containing brine*. 2020.

104. 库尔特·布洛姆, 理.彼., 安·E·莱恩, 斯瓦沃米尔·威内基, 达尔文·阿格米多, *The counter-infiltration system and method for multistage infiltration auxiliary*. 2017.
105. 库尔特·布洛姆, 理.彼., 安·E·莱恩, 斯瓦沃米尔·威内基, 达尔文·阿格米多, *Purification system*. 2017.
106. Nathan T. HANCOCK, C.D., *Osmotic separation systems and methods*. 2015.
107. Benjamin SPARROW, M.L., Xiangchun Yin, *System and process for recovering lithium from a saltwater*. 2023.
108. Nakao, T., *Innovative Brine Concentration using Osmotically Assisted Reverse Osmosis (OARO) Process and Advanced Hollow Fiber Membrane*. 2023, Toyobo MC Corporation.
109. Ahmed, M.A., S.A. Mahmoud, and A.A. Mohamed, *Nanomaterials-modified reverse osmosis membranes: a comprehensive review*. RSC advances, 2024. **14**(27): p. 18879-18906.
110. Zhao, S., et al., *Engineering antifouling reverse osmosis membranes: A review*. Desalination, 2021. **499**: p. 114857.
111. Mousa, S.A., H. Abdallah, and S. Khairy, *Low-cost photocatalytic membrane modified with green heterojunction TiO₂/ZnO nanoparticles prepared from waste*. Scientific Reports, 2023. **13**(1): p. 22150.
112. Shawky, A.M., et al., *Effect of titanium oxide/reduced graphene (TiO₂/rGO) addition onto water flux and reverse salt diffusion thin-film nanocomposite forward osmosis membranes*. Environmental Science and Pollution Research, 2024. **31**(16): p. 24584-24598.
113. Petukhov, D.I., et al., *Graphene Oxide Surface Modification of Reverse Osmosis (RO) Membrane via Langmuir–Blodgett Technique: Balancing Performance and Antifouling Properties*. Membranes, 2024. **14**(8): p. 172.
114. Wang, N., et al., *Application of nanomaterials in antifouling: A review*. Nano Materials Science, 2024.
115. Kiamehr, Z., M. Shafiee, and B. Shokri, *Improving physico-chemical properties and antifouling of nanofiltration membranes using coating DLC nanostructures*. arXiv preprint arXiv:2401.09142, 2024.
116. Nambi Krishnan, J., et al., *Review of thin film nanocomposite membranes and their applications in desalination*. Frontiers in Chemistry, 2022. **10**: p. 781372.
117. *Water Tech's Best of the Decade, LG Chem's TFN Technology*. 2025; Available from: https://www.lgwatersolutions.com/media-center/news/3210/?utm_source=chatgpt.com.
118. Shimura, H., *Development of an advanced reverse osmosis membrane based on detailed nanostructure analysis*. Polymer Journal, 2022. **54**(6): p. 767-773.
119. TORAY MEMBRANE TECHNICAL ARTICLES. 2025; Available from: https://www.water.toray/knowledge/article/?utm_source=chatgpt.com.