



Zero Liquid Discharge (ZLD): A Review on Novel Approaches in Water Recovery from Unconventional Water Resources

S. Shokrollahzadeh^{1*}, M. T. Fouladvand²

1- Professor of Chemical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology

2- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology

Email: shokrollahzadeh@irost.ir

Abstract

Water scarcity will become one of the biggest global challenges in the coming years and all available unconventional water resources must be used to produce water. Zero liquid discharge as an emerging system to minimize effluent (especially brines) and maximize water recovery from wastewater has been used by researchers and industries in recent years. Thermal evaporation is known as a common method for zero liquid discharge. However, the use of conventional and novel membrane processes of reverse osmosis, membrane distillation, forward osmosis, and electrodialysis in combination with thermal systems and crystallizers have been recently considered to reduce the volume of wastewater and influent flow rate of the thermal systems. In this article, after a brief introduction of thermal and membrane zero liquid discharge systems, the conducted research to improve the economics of these systems using thermal-membrane hybrid processes is reviewed. By comparing the performance of each of them, the potential and limitations of these systems have been explained. Although the use of zero liquid discharge systems increases the initial investment, operating costs, and water cost, due to the lack of water resources in water stress areas and also the harmful environmental effects caused by wastewater discharge, it can be expected to be widely exploited in the near future. It is a necessary solution for the sustainable management of unconventional water resources.

Received: 11 April 2022

Accepted: 16 April 2023

Page Number: 7-26

Keywords:

Water Recovery,
Unconventional Waters,
Thermal Processes,
Membrane Processes,
Process Economy

Please Cite this Article Using:

Shokrollahzadeh, S., & Fouladvand, M. T. (2024). Zero Liquid Discharge (ZLD): A Review on Novel Approaches in Water Recovery from Unconventional Water Resources. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(130), 7-26, [In Persian].



سامانه تخلیه مایع صفر (ZLD): مروری بر رویکردهای نوین در بازیابی آب از منابع آبی نامتعارف

سهیلا شکراللهزاده^{۱*}، محمدتقی فولادوند^۲

۱- استاد مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

پیام نگار: shokrollahzadeh@irost.ir

چکیده

کمبود منابع آب در سال‌های آتی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل خواهد شد و به همین دلیل می‌باید از تمامی منابع آبی نامتعارف در دسترس استفاده کرد. تخلیه مایع صفر به‌عنوان یک سامانه نوظهور برای به حداقل رساندن پساب (به‌ویژه پساب‌های شور) و بیشینه کردن بازیابی منابع آب، در چند سال اخیر توجه پژوهشگران و واحدهای صنعتی را جلب کرده است. اگرچه، تبخیر حرارتی به‌عنوان روش متداول تخلیه مایع صفر شناخته شده است، در سالیان اخیر استفاده از فرایندهای غشایی متداول اسمز معکوس و فرایندهای جدید تقطیر غشایی، اسمز مستقیم و الکترودیالیز در ترکیب با روش‌های حرارتی و بلورسازها جلب توجه کرده است تا با کاهش حجم پساب، شدت جریان ورودی به سامانه‌های حرارتی کاهش یابد. در این مقاله، پس از معرفی اجمالی سامانه‌های تخلیه مایع صفر حرارتی و غشایی، تحقیقاتی گسترده - که به‌منظور بهبود عملکرد و اقتصاد این سامانه‌ها با استفاده از فرایندهای ترکیبی از جمله ترکیب روش‌های حرارتی- غشایی در دست انجام است - مرور شده است. با مقایسه عملکرد هر یک از آن‌ها، ظرفیت و محدودیت‌های این سامانه‌ها بررسی شده است. اگرچه، استفاده از سامانه‌های تخلیه مایع صفر باعث افزایش سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی و در نتیجه، قیمت آب تولیدی خواهد شد، ولی به دلیل کمبود منابع آبی در مناطقی با تنش آبی و نیز آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از تخلیه پساب‌ها، می‌توان انتظار داشت که در آینده نزدیک به‌عنوان راهکاری ضروری برای مدیریت پایدار منابع آبی نامتعارف به بهره‌برداری برسد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

شماره صفحات: ۷ تا ۲۶

کلیدواژه‌ها:

بازیابی آب از پساب،

آب‌های نامتعارف،

فرایندهای حرارتی،

فرایندهای غشایی،

اقتصاد فرایند

* تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی

استناد به مقاله:

شکراللهزاده، سهیلا، و فولادوند، محمدتقی. (۱۴۰۲). سامانه تخلیه مایع صفر (ZLD): مروری بر رویکردهای نوین در بازیابی آب از منابع آبی نامتعارف، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۲(۱۳۰)، ۷-۲۶.

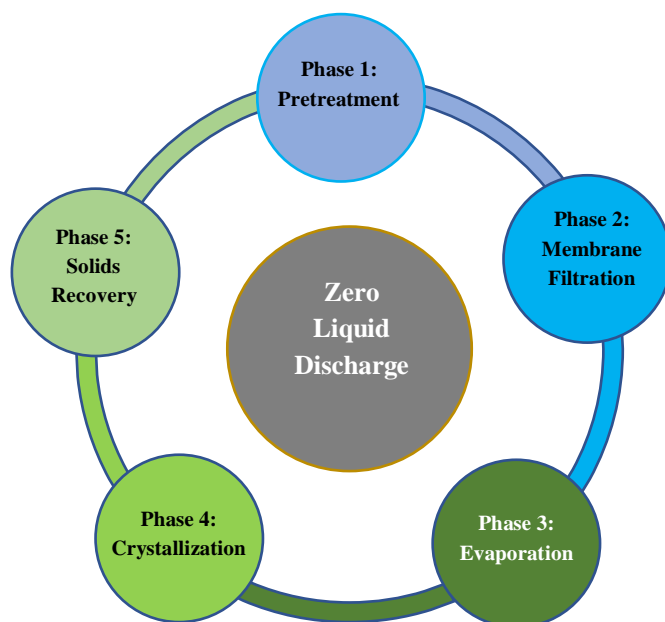
روند فزاینده شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع موجب افزایش مصرف منابع آب در سراسر جهان شده است. این موضوع به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در جهان تبدیل شده و تهدیدی برای کیفیت آب، امنیت و رشد اقتصادی محسوب می‌شود [۱ و ۲]. تصفیه‌نشده آب، آسب‌رسانی به سلامت انسان می‌شود. در گذشته، فرایندهای تصفیهٔ پساب از جمله جداسازی فازی، رسوب‌دهی، فیلتراسیون، اکسایش شیمیایی یا بیوشیمیایی، جذب سطحی و فرایندهای غشایی تنها برای دفع ایمن پساب‌ها به کار می‌رفتند [۳ و ۴]. در حالی که امروزه بازیافت آب از اهداف اصلی سامانه‌های پالایش پساب است و براساس فرایندهای مختلفی به‌انجام می‌رسد [۵ و ۶]. صنایع می‌باید از راهکارهای مدیریت پایدار آب برای بازیابی پساب‌ها بهره‌برند تا از یک طرف میزان مصرف آب را کاهش دهند و از طرف دیگر آلودگی منابع آبی دریافت‌کننده پساب را کم کنند. به همین دلیل، بازیابی پساب‌های صنعتی و شورابه‌ها به یکی از زمینه‌های مهم تحقیق و پژوهش تبدیل شده است [۷ و ۸]. در چند سال اخیر، بازیابی منابع آبی از راه فناوری تخلیهٔ مایع صفر (ZLD) ^۱ در حال گسترش است و به حداکثر رساندن بازیابی آب از پساب‌های شور و به حداقل رساندن حجم پساب‌ها، راه‌حلی ارزشمند در مدیریت آب و تصفیهٔ پساب‌های صنعتی محسوب می‌شود [۸]. علاوه‌بر این، سیاست‌های سخت‌گیرانه و وضع مقررات زیست‌محیطی، افزایش ارزش آب شیرین و افزایش هزینه‌های دفع پساب موجب فزونی تلاش‌ها برای توسعهٔ سامانه‌های ZLD شده است. فناوری ZLD به‌صورت یک چرخهٔ بسته در نظر گرفته می‌شود و اگر فرایند تصفیه به‌درستی انجام شود و امکان استفادهٔ مجدد از آب حاصل وجود داشته باشد، هیچ‌گونه پسابی از سامانه تخلیه نمی‌شود. این مسئله موجب حذف ریسک آلوده شدن آب‌های پذیرنده به‌وسیلهٔ تخلیهٔ پساب و هم‌چنین به حد اکثر رساندن بهره‌وری مصرف آب می‌شود [۹]. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، سامانهٔ ZLD متشکل از چندین فاز عملیاتی است که می‌توان آن‌را به پیش‌تصفیه، جداسازی غشایی، تبخیر، بلورسازی

و بازیافت پسماندها تقسیم کرد، اگرچه، لزوماً همهٔ این عملیات برای هر نوع پسابی به‌کار برده نخواهد شد. در سامانه‌های ZLD علاوه‌بر در نظر گرفتن خروجی سامانه، محدودهٔ شوری پساب ورودی نیز باید مد نظر قرار گیرد [۱۰]. با وجود مصرف انرژی بالاتر، سامانهٔ ZLD می‌تواند محرک نوآوری در به حد اقل رساندن مصرف آب در صنعت باشد [۱۱]. این سامانه می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پایدار در مدیریت پساب در نظر گرفته شود و به‌همین دلیل در کشورهای توسعه‌یافته مانند ایالات متحدهٔ آمریکا و اروپا و نیز در اقتصادهای رو به گسترش هند و چین، به‌سرعت در حال رشد است [۱۲].

در سامانه‌های رایج ZLD، فرایندهای حرارتی به‌عنوان عملیات پایه به‌کار برده می‌شود. آنچه پس از تصفیهٔ پساب در پساب باقی می‌ماند ترکیباتی است که باعث شوری آن می‌شوند که در این سامانه‌ها باید از آب جدا شوند. بدین ترتیب، اغلب این سامانه‌ها به‌منظور بازیابی آب از شورابه‌ها (به‌عبارت دیگر نمک‌زدایی) به‌کار برده می‌شوند. پساب ابتدا وارد تغلیظ‌کنندهٔ شورابه ^۲ شده، بخشی از آب آن بخار و آب حاصل پس از میعان جمع‌آوری و از نو استفاده می‌شود. باقی‌ماندهٔ جریان مایع وارد بلورساز ^۳ شورابه ^۴ می‌شود تا با تبخیر بخش دیگری از آب، مواد جامد محلول به‌صورت بلور جدا شوند. مادهٔ جامد به‌دست‌آمده یا دفع می‌شود و یا به‌عنوان محصول جانبی در سایر کاربردها به‌کار می‌رود. با وجود موفقیت‌آمیز بودن این سامانه‌ها، ولی به‌دلیل مصرف بالای انرژی، پژوهشگران به‌دنبال روش‌های جای‌گزین با مصرف انرژی کمتر هستند. در حالی که استفاده از فناوری اسمز معکوس (RO) ^۵ در ترکیب با روش‌های حرارتی می‌تواند کارایی سامانه ZLD را از نظر انرژی در مقایسه با سامانه‌های حرارتی، افزایش دهد، اما تنها برای آب‌هایی با میزان شوری محدود قابل استفاده است. در چند سال اخیر، روش‌های جدید غشایی در سامانه‌های ZLD استفاده شده‌اند که از جملهٔ آن‌ها می‌توان به تقطیر غشایی ^۶ (MD)، اسمز مستقیم ^۷ (FO) و الکترودیالیز ^۸ (ED) اشاره کرد [۱].

2. Brine Concentrator
3. Crystallizer
4. Brine
5. Reverse Osmosis (RO)
6. Membrane Distillation (MD)
7. Forward Osmosis (FO)
8. Electrodialysis (ED)

1. Zero-Liquid Discharge (ZLD)



شکل ۱. چرخه فرایند ZLD.

Figure 1. ZLD process cycle.

سامانه‌های تخلیه مایع صفر دارای برتری‌های فراوانی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان موارد ذیل را نام برد [۱۰]:

- ۱) کاهش اثرات زیست‌محیطی با به حد اقل رساندن تولید پساب
- ۲) صرفه‌جویی اقتصادی در مدیریت پساب‌ها
- ۳) کاهش مصرف آب با استفاده مجدد از آب تولیدشده در فرایند
- ۴) افزایش انعطاف‌پذیری در مدیریت پساب
- ۵) نیاز به فضای کوچک باتوجه به مدولار^۳ بودن سامانه به‌ویژه در مقایسه با حوضچه‌های تبخیری
- ۶) کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌دلیل امکان استفاده از حرارت ثانویه تولیدشده در سایر فرایندها
- ۷) صرفه‌جویی در مصرف مواد شیمیایی

۳. سامانه‌های ZLD

چنان‌که گفته شد، اغلب سامانه‌های ZLD موجود مبتنی بر فرایندهای حرارتی هستند. سامانه‌های حرارتی که در سراسر دنیا به‌کار گرفته می‌شوند، به‌دلیل مصرف انرژی زیاد، از جنبه اقتصادی مطلوب نیستند و از طرفی تشکیل رسوب بر روی تجهیزات در این سامانه‌ها، باعث کاهش سرعت انتقال حرارت و کاهش کارآمدی

در این مقاله، مروری بر پیشرفت‌های اخیر در سامانه‌های ZLD حرارتی، غشایی و ترکیب حرارتی-غشایی با در نظر گرفتن برتری‌ها و محدودیت‌های هر یک و با تأکید بر فرایندهای نوین انجام شده است. علاوه بر آن، وضعیت کنونی کاربرد این سامانه‌ها در نقاط مختلف جهان، مرور و چالش‌ها و دورنمای آینده آن ارائه شده است.

۲. کاربردها و برتری‌های سامانه ZLD

از عمده کاربردهای تخلیه مایع صفر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

- ۱) بازیابی آب از پساب‌های صنعتی مختلف همچون صنایع نساجی، زغال‌سنگ، مواد شیمیایی، صنایع غذایی و غیره
- ۲) بازیابی آب از شورابه‌های تولیدی واحدهای نمک‌زدایی همچون اسمز معکوس
- ۳) بازیافت زیرآب^۱ برج‌های خنک‌کننده در صنایع سنگین و نیروگاه‌ها
- ۴) سامانه‌های تصفیه پساب شهری
- ۵) تصفیه پساب نیروگاه‌ها و واحدهای گوگردزایی گازهای دودکش (FGD)^۲

1. Blowdown
2. Flue Gas Desulfurization (FGD)

3. Modular

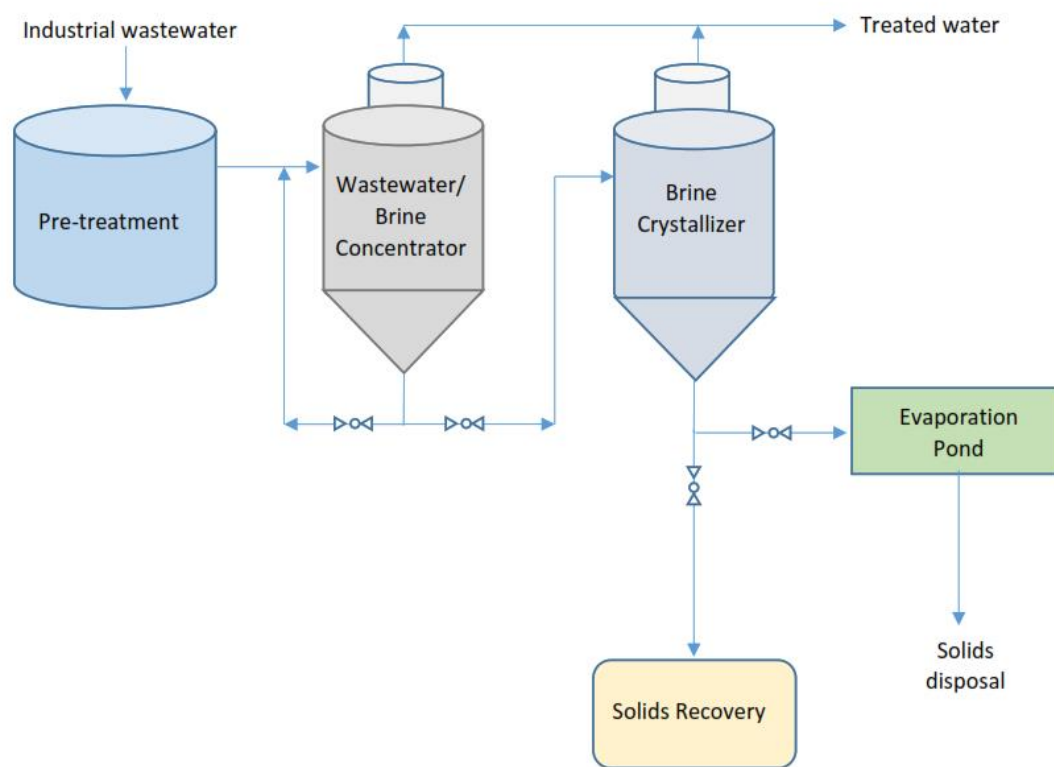
سپس، جریان ورودی پساب در چند مرحله تبخیر و تغلیظ می شود و حسب مورد از بلورساز شورابه برای بازیابی نمک موجود در آن استفاده می شود. با انجام این مراحل، آب تبخیرشده بازیابی می شود و می تواند باز استفاده شود. مواد جامد یا شورابه حاصل نیز یا به عنوان محصولات جانبی قابل استفاده، بازیابی می شوند و یا به حوضچه های تبخیر فرستاده می شوند تا پس از انجام فرایندهای لازم، دفع شوند [۱].

در صورتی که پساب موجود از نوع شورابه باشد از تغلیظ کننده های (تبخیرکننده های) آب شور و اغلب از راه فرایند فشرده سازی مکانیکی بخار (MVC)^۵ که یک فناوری نمک زدایی از آب های شور است، استفاده می شود. بدین ترتیب که دوغاب شورابه از درون لوله های مبدل حرارتی تغلیظ کننده به حرکت درمی آید و از

سامانه ZLD می شود. همین موضوع باعث شده است که فناوران به دنبال ترکیب روش های حرارتی و غشایی باشند. بنابراین، در این بخش تمرکز اصلی بر معرفی سامانه های ZLD با بهره گیری از فرایندهای متداول و نوظهور غشایی است.

۱-۳ سامانه های ZLD حرارتی

فرایندهای اصلی مورد استفاده در این سامانه شامل پیش تصفیه^۱، تغلیظ شورابه در تبخیرکننده های حرارتی، بلورسازی شورابه و به دنبال آن بازیابی مواد جامد و تبخیر باقی مانده شورابه در حوضچه های تبخیری^۲ است (شکل (۲)) [۱۳]. در عملیات پیش تصفیه، فرایندهای متعددی مانند فیلتراسیون، تنظیم pH، هواگیری^۳ و استفاده از ضد رسوب (آنتی اسکالانت^۴) بر روی پساب انجام می شود تا قابلیت رسوب گذاری در تجهیزات به حداقل برسد.



شکل ۲. نمودار جریان ZLD حرارتی برای بازیافت آب از پساب ها/شورابه های صنعتی [۱۳].

Figure 2. Thermal ZLD flow diagram for water recycling from industrial effluents [13].

- | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|----------------|-----------------|
| 1. Pre-Treatment | 2. Evaporation Ponds | 3. De-Aeration | 4. Anti Scalant |
| 5. Mechanical Vapor Compression (MVC) | 6. Slurry | | |

گرمای نهان^۱ تولیدشده به وسیله بخار آب فوق گرم^۲ برای تبخیر دوغاب شورابه استفاده می‌شود [۱۴]. در درون تغلیظ‌کننده، شکل گرفتن یک لایه نازک از دوغابی که بر روی لوله‌های حرارتی ریزش می‌کند سبب بهبود سرعت انتقال گرما می‌شود. همین امر باعث می‌شود که میزان مصرف انرژی کمپرسور بخار کاهش یابد و میزان بازیابی گرما نیز از راه مبدل‌های حرارتی افزایش یابد [۱۵]. فشرده‌سازی مکانیکی بخار (MVC) انرژی چشم‌گیری تا حدود $39-20 \text{ kWh/m}^3$ مصرف می‌کند [۱۶ و ۱۷]. به‌منظور جلوگیری از پوسیدگی یا خوردگی سامانه‌های MVC، در ساخت آن‌ها از مواد بر پایه تیتانیوم و استیل زنگ‌نزن استفاده شده که همین موضوع منجر به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری^۳ می‌شود.

پس از آن شورابه تغلیظ‌شده برای بازیابی بیشتر وارد بلورساز می‌شود که عملکرد آن مشابه با عملکرد تغلیظ‌کننده شورابه است. سپس شورابه در حالی که تحت فشار به چرخش در آورده شده، به‌درون یک مبدل حرارتی غوطه‌ور پمپ می‌شود تا از رسوب لوله‌های مبدل حرارتی جلوگیری شود. به‌دلیل شوری و گران‌روی بیشتر آب خوراک، میزان مصرف انرژی در بلورساز برابر با 52 تا 66 kWh/m^3 است که این مقدار تقریباً سه برابر مقدار انرژی مصرف‌شده در تغلیظ‌کننده است [۱۶]. هرچند، سایر فناوری‌های نمک‌زدایی حرارتی مانند تقطیر چندمرحله‌ای (MED)^۴ و تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF)^۵، به‌طور گسترده در نمک‌زدایی از آب دریا استفاده شده‌اند، اما کاربرد آن‌ها در سامانه‌های ZLD در هیچ پروژه صنعتی تاکنون گزارش نشده است.

استفاده از حوضچه‌های تبخیر که از انرژی خورشیدی برای تبخیر آب بهره می‌برند، می‌تواند یک گزینه ارزان برای بلورسازهای شورابه باشد؛ به‌ویژه در مناطقی که حجم آب کم و قیمت زمین ارزان باشد [۱۸]. از طرف دیگر، چنانچه زمین ارزان نباشد، حوضچه‌های تبخیر می‌توانند گزینه گران‌تلفی شوند؛ به‌عنوان مثال، هزینه تهیه زمین و ساخت حوضچه‌های تبخیر مربوط به طرح‌های ZLD در لاس‌وگاس آمریکا تقریباً سه‌برابر مجموع هزینه‌های تغلیظ‌کننده و بلورساز شورابه حساب شد [۱۹]. نکته دیگر آن که از راه حوضچه‌های تبخیر هیچ‌گونه آبی بازیابی نمی‌شود که بتواند باعث افزایش میزان بهره‌وری آب شود.

1. Latent Heat
2. Superheated Water
3. Capital cost
4. Multiple Effect Distillation (MED)
5. Multi Stage Flash Distillation (MSF)

۳-۲ سامانه‌های ZLD مبتنی بر غشا

سامانه‌های ZLD ابتدایی، تنها بر پایه فرایندهای حرارتی بنا شده بودند و پس از مدتی سامانه‌های غشایی به آن‌ها اضافه و به‌طور گسترده‌ای استفاده شدند که در ادامه بدان‌ها اشاره خواهد شد.

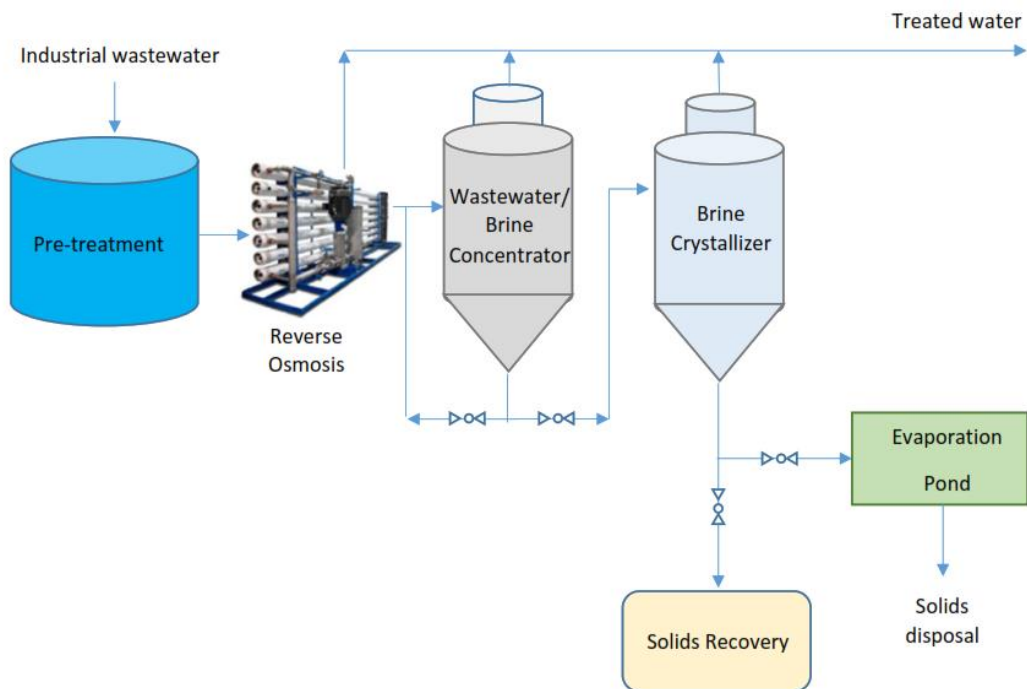
۳-۲-۱ سامانه‌های ZLD ترکیبی حرارتی-اسمز معکوس

اسمز معکوس یک فناوری غشایی است که به‌خوبی جای خود را در صنعت بازیابی پساب و نمک‌زدایی از آب‌های شور باز کرده است. نیروی محرکه اسمز معکوس، استفاده از فشار هیدرولیکی برای گذر آب از میان یک غشای نیمه‌تراواست. با ترکیب فناوری اسمز معکوس و سامانه‌های حرارتی ZLD می‌توان حجم ورودی پساب یا شورابه را که به تغلیظ‌کننده و بلورساز وارد می‌شود، کم کرد که سبب کاهش مصرف انرژی و حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی می‌شود (شکل (۳) [۱۳]).

میزان انرژی مصرف‌شده در اسمز معکوس برای رسیدن به ۵۰ درصد بازیابی آب در فرایند نمک‌زدایی از دریا تقریباً برابر با 2 kWh/m^3 نسبت به آب تولیدی است که این مقدار خیلی کمتر از مقداری است که در بلورساز و تغلیظ‌کننده مصرف می‌شود [۲۰]. تحقیقات نشان داده است که این سامانه ترکیبی در شرایطی مقرون‌به‌صرفه است که پساب ورودی به سامانه اسمز معکوس دارای شوری کم تا میزان 7000 mg/L باشد [۱۵ و ۲۱]. بنابراین، پساب پیش از ورود به فرایندهای حرارتی، به‌وسیله اسمز معکوس تغلیظ می‌شود تا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی به حداقل برسد. نتیجه مطالعات پیشین نشان داده است که در صورت استفاده از اسمز معکوس در یک واحد نمک‌زدایی در مقایسه با ترکیب تغلیظ‌کننده-حوضچه تبخیر می‌توان حدود ۵۸ الی ۷۵ درصد در مصرف انرژی و ۴۸ تا ۶۷ درصد در هزینه‌های تصفیه صرفه‌جویی کرد [۲۲].

باید توجه داشت که فناوری اسمز معکوس نسبت به میزان شوری دارای محدودیت‌هایی است و ممکن است دچار مشکلاتی نظیر رسوب‌گذاری و گرفتگی غشایی شود که این محدودیت‌ها سبب کاهش شار آب و طول عمر غشاها در سامانه‌های ZLD می‌شود.

بنابراین، برای رفع این موارد باید در فرایند پیش‌تصفیه از روش‌هایی مانند تنظیم pH و تبادل یونی برای حذف ترکیبات رسوب‌گذار بهره برد. از طرفی، استفاده بیش از حد از مواد شیمیایی در عملیات



شکل ۳. نمودار جریان سامانه ZLD ترکیبی حرارتی-اسمز معکوس [۱۳].
 Figure 3. Flow diagram of hybrid thermal-reverse osmosis ZLD system [13].

صنعتی تصفیه پساب به کار گرفته شده است. به عنوان مثال می توان به پروژه های که در نیروگاه تبدیل ذغال به مایع^۴ در چین با ظرفیت ۲۳۰۰ مترمکعب در ساعت انجام شده، اشاره کرد [۲۳]. حد شوری جریان آب ورودی به اسمز معکوس خیلی کمتر از حد شوری ورودی به تغلیظ کننده شورابه (تا ۲۵۰۰۰ mg/L) است. این بدان معنی است که در سامانه های تخلیه مایع صفر، اسمز معکوس معمولاً قبل از تغلیظ کننده شورابه قرار می گیرد. بنابراین، گسترش فناوری های جدیدی که بتواند به اندازه اسمز معکوس کارآمد و اقتصادی باشد، از اهداف مهم در تحقیقات سامانه های تخلیه مایع صفر محسوب می شود [۲۶-۲۴].

محدودیت شوری آب ورودی به اسمز معکوس، موجب ظهور سایر فرایندهای غشایی مانند تقطیر غشایی (MD)، اسمز مستقیم (FO) و الکترو دیالیز (ED) به عنوان جایگزین هایی در سامانه های تخلیه مایع صفر را فراهم کرده است، تا به همراه اسمز معکوس بتوانند پساب ورودی را بیشتر تغلیظ کنند. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده، شورابه اسمز معکوس قبل از ورود به بلورساز شورابه یا حوضچه تبخیر، به وسیله فرایندهای نام برده تا مقادیر بیشتر تغلیظ

پیش تصفیه می تواند سبب تولید پسماندهای جامد اضافی شود که این امر در نهایت هزینه عملیاتی را افزایش می دهد. در برخی موارد، استفاده از اولترافیلتراسیون (UF)^۱ می تواند به عنوان یک فناوری مقرون به صرفه برای پیش تصفیه به کار گرفته شود. در تحقیقی، سامانه ZLD به همراه اسمز معکوس برای تصفیه آب های زیرزمینی که دارای ظرفیت رسوب گذاری^۲ بالاتری است با میزان نمک حل شده برابر با ۲۱۳۰۰ mg/L، استفاده شد. در این آزمایش مشاهده شد که پیش تصفیه با اولترافیلتراسیون، بیشتر مواد جامد معلق، آهن و تقریباً ۵۰ درصد از روغن و چربی موجود در آب ورودی را حذف کرد و در نتیجه موجب کارایی بیشتری اسمز معکوس شد [۲۳].

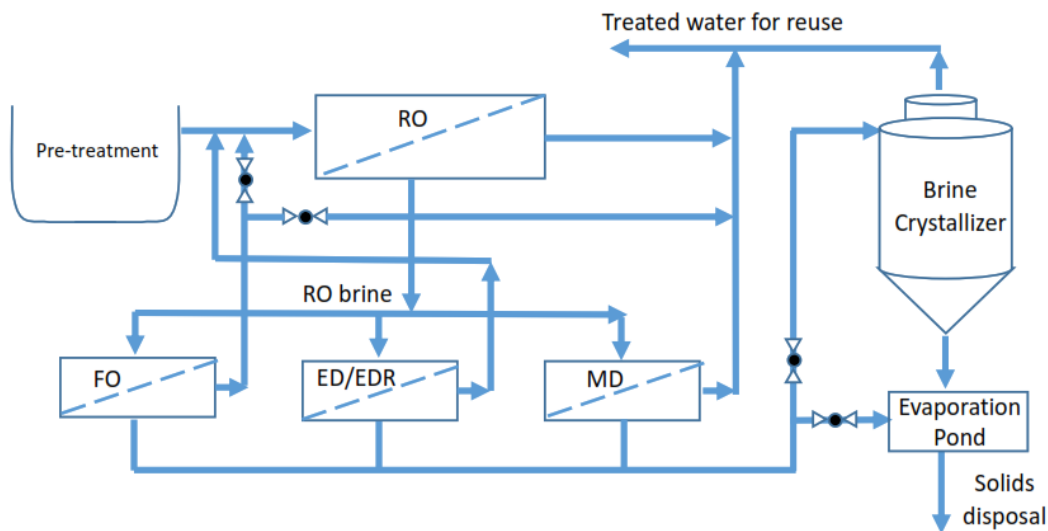
یکی از نوآوری هایی که اخیراً در نمک زدایی از آب های شور انجام شد، فناوری اسمز معکوس با کارایی بالا^۳ است که میزان رسوب گذاری غشا در آن کمتر است و با استفاده از ترکیب روش های موجود در فرایند پیش تصفیه می تواند به بازایی بالاتر آب برسد. این روش در چندین سامانه تخلیه مایع صفر استفاده شده و در مقیاس های

1. Ultrafiltration (UF)
 2. Scaling
 3. High Efficiency Reverse Osmosis (HERO)

4. Coal-to-Liquids

تولید آب در آن‌ها متفاوت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هم‌چنان کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به اسمز معکوس است، اگرچه، همان‌گونه که گفته شد از نظر شوری خوراک ورودی دارای محدودیت است. فناوری‌های تقطیر غشایی و اسمز مستقیم می‌توانند برای نم‌زدایی از آب و پساب‌هایی با شوری تا بالاتر از ۲۰۰۰۰۰ mg/L به کار برده شوند.

می‌شود و بدین ترتیب این فرایندها می‌توانند جای‌گزین تبخیرکننده حرارتی شوند. در این شرایط، بخشی از آب موجود در پساب ورودی به آن‌ها بازیابی شده، شورابه خروجی از آن‌ها می‌تواند به بلورساز یا حوضچه تبخیر هدایت شود [۱۳]. مقایسه فناوری‌های غشایی با فناوری حرارتی MVC به صورت خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است. هریک از فناوری‌ها دارای محدودیت‌هایی از نظر شوری خوراک و گرفتگی غشایی است و میزان سرمایه‌گذاری و هزینه‌های



شکل ۴. نمودار جریان سامانه‌های ZLD برپایه غشایی [۱۳].

Figure 4. Membrane-based ZLD flow diagram [13].

جدول ۱. برتری‌ها و محدودیت‌های فناوری‌های مختلف در سامانه‌های ZLD [۱].

Table 1. Advantages and limitations of different technologies used in ZLD systems [1].

Tech.	Advantages	limitations	Energy kWh/m ³
MVC	High salinity limit >200,000 mg/L	High capital and operational costs	20-25
RO	Energy-efficient	Limited salinity; Scaling	1.5-2.5
MD	High salinity limit >200,000 mg/L	Low flux and recovery; Limited area of application	22-67
FO	High salinity limit >200,000 mg/L; Requires low-grade heat; Less fouling	Low flux at high salinity; Reverse solute flux; Limited use	21
ED/EDR	Salinity limit >100,000 mg/L; Less fouling	High energy consumption	7-15

مانع عبور آب به سمت دیگر غشا می‌شود. در تقطیر غشایی به‌طور معمول غشاهای میکرومخلخل آب‌گریز استفاده می‌شود که جنس آن‌ها معمولاً از پلی‌تترافلوروئتیلن، پلی‌پروپیلن، یا پلی‌وینیلیدین دی‌فلوراید است. این غشاها مقاومت اندکی در برابر انتقال جرم و رسانایی گرمایی پایینی دارند و از هدررفت گرما جلوگیری می‌کنند، در برابر تخریب شیمیایی مقاومت بالایی دارند و در دماهای خیلی بالا پایداری حرارتی خوبی از خود به نمایش می‌گذارند. تقطیر غشایی ظرفیت بالایی برای استفاده در ZLD دارد، اما همچنان باید تحقیقات بیشتری پیرامون آن در مقیاس بزرگ و در شرایط متفاوت برای تصفیهٔ پساب در صنایع مختلف انجام گیرد. در صورتی‌که بتوان از گرمای اتلافی استفاده کرد، این فرایند امکان تغلیظ اقتصادی پساب شور را تا حد اشباع دارد [۲۷]. در این فرایند، انتقال جرم با ترکیبی از انتقال مولکولی و انتقال نفوذ نادن انجام می‌شود و واکنش‌های بنیادی که در این فرایند انتقال جرم و گرما انجام می‌گیرند، به تفصیل در پژوهش‌ها بحث و بررسی شده‌اند [۱ و ۲۸]. شکل (۵) طرحوارهٔ سامانهٔ ZLD ترکیب‌شده با MD را نشان می‌دهد که در آن پساب‌ها و شورابه‌های تولیدی صنایع مختلف در فرایند تقطیر غشایی، تغلیظ و بخشی از آب موجود در پساب بازیابی می‌شود و باقی‌ماندهٔ آن وارد بلورساز می‌شود تا نمک موجود در آب به‌صورت جامد بازیافت شود [۲۹].

پساب ورودی معمولاً از ۶۰ تا ۹۰ °C گرم می‌شود و اختلاف دمای میان پساب داغ و آب تراوش‌یافتهٔ سردتر^۲ سبب ایجاد اختلاف فشار بخار در دو سوی غشا می‌شود و در نتیجه نیرو محرکه‌ای برای شار بخار آب ایجاد می‌شود. در روش تقطیر غشایی تماس مستقیم^۳، نفوذ و تراوش بخار آب در تماس مستقیم با غشا قرار می‌گیرد و بخار آب بر روی یک سطح کندانس^۴ که در تماس مستقیم با غشا نیست، جمع می‌شود [۳۰-۳۲].

از نظر تئوری، کمترین مقدار انرژی مورد نیاز برای نمک زدایی آب دریا با استفاده از روش تک‌عبوری تقطیر غشایی تماس مستقیم با بازیابی گرمایی برابر با $27/6 \text{ MJ/m}^3$ از آب تولیدی در دمای آب ۶۰ °C است. این مقدار خیلی بالاتر است از انرژی مصرف‌شده به‌وسیلهٔ اسمز معکوس که برابر با $3/8 \text{ MJ/m}^3$ از آب تولیدی است.

در مقایسه با اسمز معکوس، فرایندهای الکترودیالیز (ED/EDR) قادر به تغلیظ شورابه‌هایی با میزان نمک بیش از 10000 mg/L با مصرف انرژی $7-15 \text{ kWh/m}^3$ است (جدول (۲)). اگرچه، در مقادیر نمک پایین‌تر هزینهٔ تخمینی حذف نمک با فرایند الکترودیالیز بالاتر است. به‌علاوه، در بسیاری از موارد استفاده از سامانهٔ تنها یا تک‌مرحله‌ای برای دستیابی به شرایط ZLD مناسب نیست. بنابراین، ساختار چندمرحله‌ای به‌عنوان یک گزینه مطرح می‌شود؛ ولی این مسئله باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد شد. کاربرد الکترودیالیز به‌همراه اسمز معکوس در سامانه‌های ZLD باعث افزایش محدودهٔ شوری اسمز معکوس می‌شود و هزینه‌های مصرف انرژی را در مقایسه با سامانه‌های تغلیظ حرارتی شورابه کاهش می‌دهد [۱۳].

جدول ۲. کاربردهای سامانه‌های ZLD بر پایهٔ الکترودیالیز [۱۳].

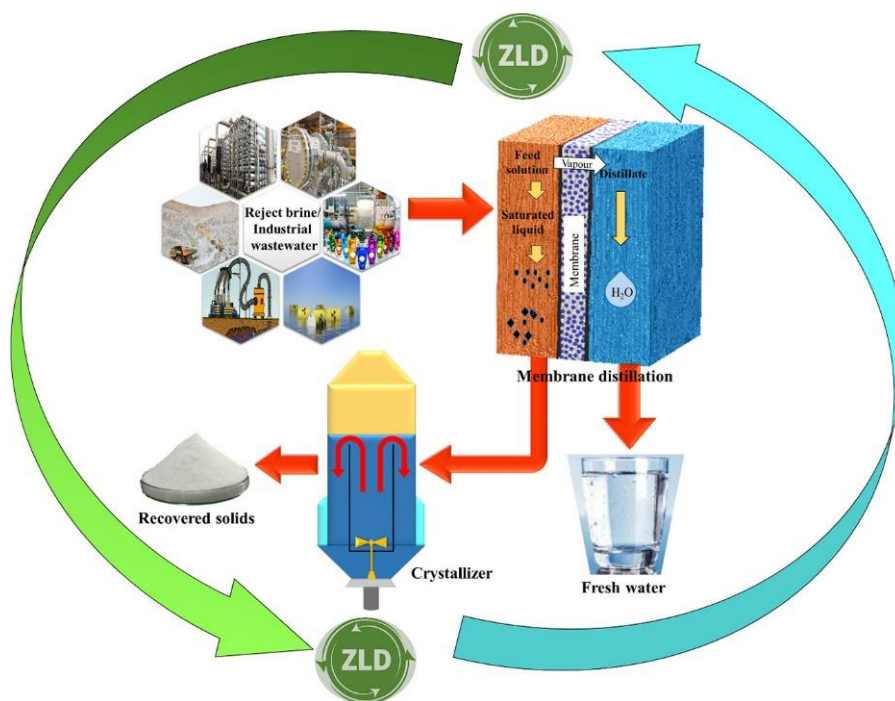
Table 2. Applications of ED/EDR incorporated ZLD systems [13].

Process	Application	Energy (kWh/m ³)	Recovery (%)
ED	RO brine	7-8	97-98
EDR-RO	Basal aquifer water	8.1/RO, 14.5/EDR	77-85
ED-EDR	Coal mine brine	9.4-14.4	80
ED-EDR	Coal mine brine	7.8-14.4	85
EDR-RO	Brackish water	12.4	80-90
ED	Seawater desalination	6.6-8.7	-
EDR-RO	Brackish water	5-6	88
MD-EDR	Simulated brine	0.9-2.4	92
RO/EO/MED	Dyeing wastewater	24.6	97
EDR	Chemical industry	-	89
ED	Domestic wastewater	-	100

۳-۲-۳ سامانه‌های ZLD در ترکیب با تقطیر غشایی

در فرایند تقطیر غشایی (MD)، جداسازی حرارتی از راه غشایی آب‌گریز با تخلخل بسیار بالا انجام می‌شود که تنها به بخار آبی که در اثر اختلاف دما در دو طرف غشا تولید شده، اجازهٔ عبور داده و

1. Knudsen
 2. Colder Permeate
 3. Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)
 4. Condensation surface



شکل ۵. طرحواره سامانه ZLD بر پایه تقطیر غشایی [۲۹].

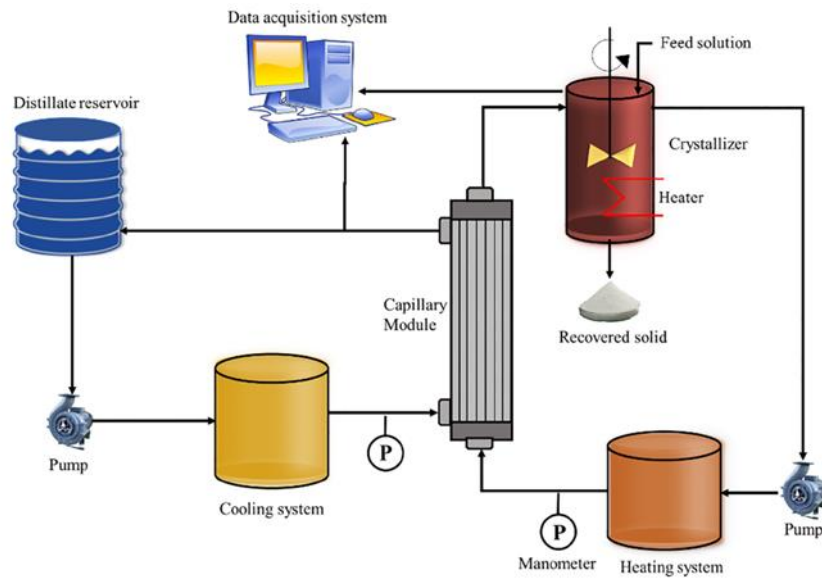
Figure 5. Schematic diagram of MD-based ZLD system [29].

به عنوان سامانه ZLD برای بازیافت آب و مواد جامد موجود در شورابه‌های غلیظ بهره برد. هم‌چنین برای نمک‌زدایی آب دریا، تصفیه نانوفیلتراسیون، تصفیه شورابه اسمز معکوس و پساب صنعتی استفاده کرد که به صورت طرحواره در شکل (۶) نشان داده شده است. در این سامانه، بخار آب از راه غشای آب‌گریز میکروحفزه از سمت خوراک به سمت دیگر نفوذ می‌کند. نیرو محرکه می‌تواند اختلاف دما یا فشار در دو سوی غشا باشد. حرارت‌دهی خوراک باعث افزایش نیرو محرکه انتقال بخار می‌شود. به دلیل این نیرو محرکه، محلول بلور شونده به تدریج تغلیظ می‌شود و به شرایط ترمودینامیکی برای تشکیل هسته یا توسعه بلورها می‌رسد. نوع پیکربندی غشا، تبلور را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا پیکربندی‌های مختلف باعث ایجاد نیرو محرکه متفاوت می‌شود. در دمای یکسان خوراک، با اعمال خلأ در سمت محصول گردان فشاری بالاتر برای بخار به دست می‌آید و باعث افزایش شار محصول و تبلور بیشتر می‌شود. به علاوه، ضرایب انتقال جرم و حرارت بالاتری نیز به دست می‌آید، اگرچه ممکن است باعث افزایش گرفتگی و رسوب‌گذاری غشا شود [۳۰].

در تقطیر غشایی مقدار زیادی انرژی برای بازیابی آب نیاز است، البته مصرف انرژی حرارتی در تقطیر غشایی را نمی‌توان به صورت مستقیم با دیگر فناوری‌ها مانند اسمز معکوس یا الکترودیالیز که نیرو محرکه آن‌ها الکتریسیته است مقایسه کرد؛ زیرا میزان بازدهی تولید الکتریسیته از انرژی حرارتی به دما وابسته است [۳۳ و ۳۴]. روش تقطیر غشایی بسته به نوع فرایند، پساب مورد نظر و ضخامت غشا می‌تواند کاربردهای زیادی داشته باشد. با این حال، بسیاری از کاربردهای اخیر هم‌چنان در آزمایشگاه‌ها و یا در مرحله آزمایشی در مقیاس کوچک هستند. در تحقیقی در کالیفرنیا، روش تقطیر غشایی را در سامانه ZLD در یک مطالعه آزمایشگاهی و در مقیاس کوچک برای بررسی میزان تغلیظ بیشتر پساب اسمز معکوس آب‌های شور زیرزمینی آزمایش کردند و توانستند بیش از ۹۸ درصد از آب را بازیابی کنند. در حال حاضر، به دلیل سرعت نسبتاً پایین بازیابی آب و برخی محدودیت‌های فنی، هنوز کاربرد صنعتی از تقطیر غشایی در طرح‌های ZLD گزارش نشده است [۳۵ و ۳۶].

اخیراً بلورساز تقطیر غشایی (MCR)^۱ به عنوان یک فناوری ترکیبی نوظهور مطرح شده که با ترکیب تقطیر غشایی و تبلور می‌توان از آن

1. Membrane Distillation Crystallization (MDCr)



شکل ۶. طرحواره سامانه بلورساز تقطیر غشایی [۳۰].

Figure 6. Schematic of Membrane Distillation Crystallization (MCR) system [30].

به وسیله غشای نیمه تراوا به سمت محلول کهنده حرکت می کنند و در مرحله دوم، آب خالص از محلول کهنده رقیق شده بازیابی می شود تا دوباره استفاده شود و آب جدا شده به مصارف مورد نظر برسد. در یک سامانه ZLD بر پایه اسمز مستقیم، پساب ورودی وارد فرایند اسمز مستقیم می شود تا بخشی از آب آن بازیابی شود، سپس برای تغلیظ و بازیابی بیشتر آب و جداسازی فرآورده جانبی نمک، وارد بلورساز می شود [۳۸-۴۱]. شکل (۸) پایه سامانه ZLD مبتنی بر فرایند غشایی FO را برای تصفیه پساب گوگردزدایی گازهای دودکش نشان می دهد که برای اولین بار در جهان در سال ۲۰۱۷ در نیروگاه برق چانگزینگ به وسیله شرکت اوسیس واتر^۲ آمریکا در چین انجام شد. این سامانه ZLD راه اندازی شد. ابتدا از اسمز معکوس استفاده شد تا پساب های مختلط حاصل از سولفورزدایی گاز حاصل از احتراق در دودکش ها (FGD) و جریان زیر آب برج خنک کن را تا میزان ۶۰۰۰ mg/L تغلیظ کند. در نهایت نیز شواریه اسمز مستقیم به بلورساز فرستاده می شود تا غلظت آن افزایش یابد و بلورهای نمک از آن جدا شود. این فرایند موجب تولید آب با غلظت حل شونده کمتر از ۱۰۰ mg/L می شود، تا از نو استفاده شود [۴۲].

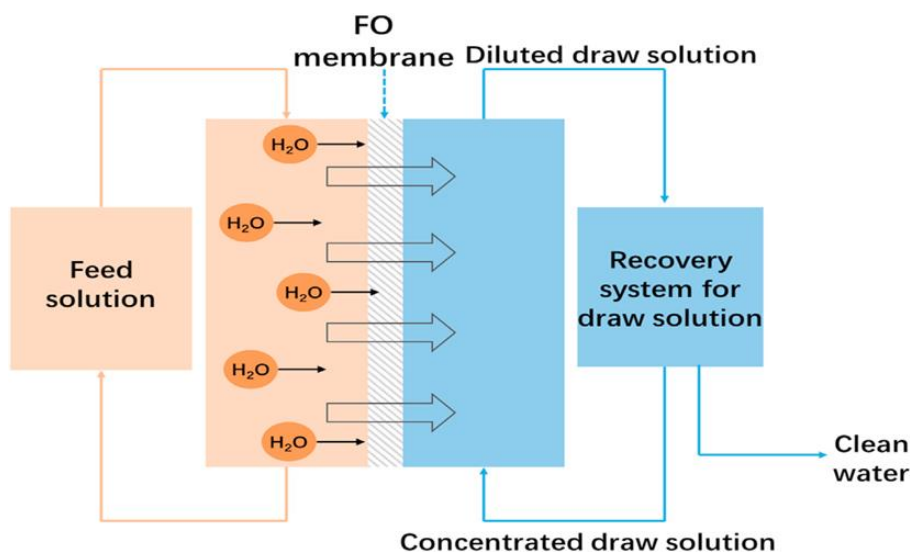
برتری تقطیر غشایی این است که قادر به تصفیه آب هایی با شوری بالاست که امکان نمک زدایی آن ها به وسیله سامانه اسمز معکوس وجود ندارد. علاوه بر این، در مقایسه با دیگر فناوری ها، فرایندی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است، به ویژه زمانی که انرژی با کیفیت پایین استفاده می شود. افزون بر این، می تواند در دما و فشار پایین نیز عمل کند و کمترین تمایل به رسوبدهی را دارد [۳۷].

۳-۲-۳ سامانه های ZLD در ترکیب با اسمز مستقیم

در فرایند غشایی اسمز مستقیم به دلیل اختلاف فشار اسمزی دو سوی غشا، مولکول های آب خوراک به صورت خودبه خودی از میان یک غشای نیمه تراوا به سمت دیگر غشا که حاوی محلولی با فشار اسمزی بالاتر است، حرکت می کنند. این غشا اجازه عبور مولکول های آب خالص را می دهد و از عبور مولکول های نمک و سایر املاح ممانعت می کند. در فرایند اسمز مستقیم، محلولی با فشار اسمزی بالا که به عنوان محلول کهنده^۱ شناخته می شود، به عنوان عامل محرک برای ایجاد شار آب استفاده می شود. همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده، فرایند اسمز مستقیم در دو مرحله انجام می شود: در مرحله اول، مولکول های آب از محلول خوراک

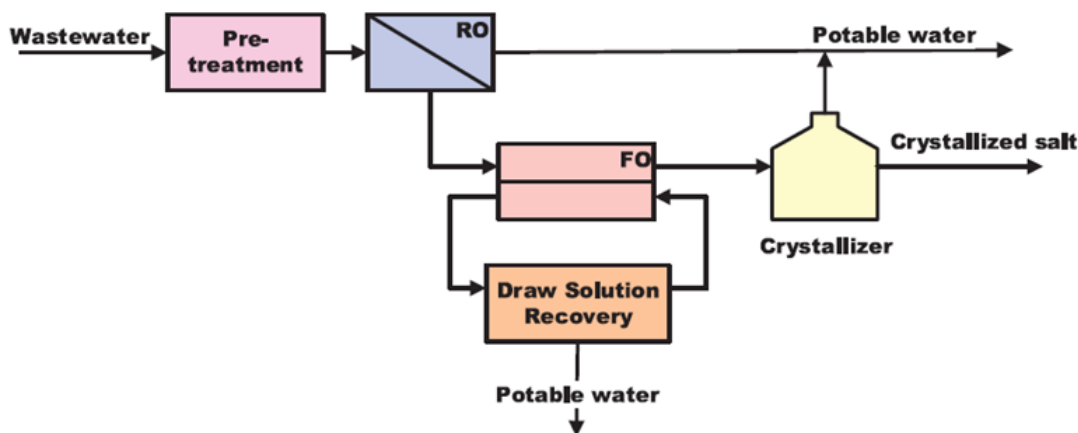
2. Oasys Water

1. Draw Solution



شکل ۷. طرحواره فرایند اسمز مستقیم [۴۰].

Figure 7. Schematic of the FO process[40].



شکل ۸. دیاگرام جریان سامانه ZLD مبتنی بر اسمز مستقیم [۴۲].

Figure 8. Flow diagram of FO-based ZLD system[42].

غشاهای تبادل یونی اجازه عبور انتخابی یون‌های مخالف را می‌دهند؛ اما از حمل یون‌های موافق ممانعت می‌کنند. کاتیون‌ها از میان غشاهای تبادل کاتیون، عبور و به سمت کاتد که دارای بار منفی است، حرکت می‌کنند؛ در همین حین آنیون‌ها در جهت مخالف به حرکت در می‌آیند و از میان غشاهای تبادل آنیون به سمت آن‌د حرکت می‌کنند. در نتیجه، دو جریان رقیق با مقدار نمک ناچیز و شورابه غلیظ تولید می‌شود [۴۳-۴۵]. به منظور کاهش رسوب گذاری غشاهای، در فواصل زمانی معین، قطبیت الکترودها معکوس می‌شود که به این

۲-۴ سامانه‌های ZLD در ترکیب با الکترودیالیز فرایند الکترودیالیز، نتایج مناسبی در تصفیه و نمک زدایی از آب‌های سطحی و زیرزمینی داشته است. از این فرایند می‌توان در سامانه‌های ZLD به منظور پیش تصفیه و پیش تغلیظ شورابه قبل از ورود آن به بلورساز تبخیری^۱ استفاده کرد. در الکترودیالیز (ED)، تبادل یونی غشایی برای حذف یون‌های محلول در آب انجام می‌شود، بنابراین، نیرو محرکه آن پتانسیل الکتریکی است.

2. Salt-Depleted

1. Evaporative Crystallizer

است که کاربرد آن را محدود می کند. شکل (۱۰) مقایسه انرژی مصرف شده به ازای واحد حجم آب تولیدی در فرایندهای مختلف مورد استفاده در سامانه های نمک زدایی و ZLD را برحسب شوری خوراک نشان می دهد. مقایسه انرژی مصرفی نشان داده که فرایندهای اسمز معکوس آب دریا (SWRO)^۲ با بازیابی ۵۰ درصد آب از خوراک، کمترین میزان مصرف انرژی ویژه (SEC)^۳ را با حدود $1/56 \text{ kWh/m}^3$ دارد [۲۰]. مصرف انرژی ویژه با افزایش نرخ بازیابی افزایش می یابد؛ زیرا در این حالت، فشار بر آب خوراک باید بیشتر از فشار اسمزی محلول باشد تا بتواند آب را از راه غشا عبور دهد. از سوی دیگر، همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده، استفاده از الکترودیالیز دارای طیف گسترده ای از مصرف انرژی از حدود ۳ تا 850 kWh/m^3 با توجه به نوع خوراک و شرایط فرایندی برای آب هایی با شوری محدود تا حدود 100000 mg/L است. مصرف انرژی با توجه به غلظت های خوراک و جریان های خروجی غلیظ و رقیق تغییر می کند، زیرا اختلاف غلظت بزرگ بین جریان رقیق و غلیظ می تواند باعث کاهش زیاد در بازدهی شود و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می یابد [۴۸]. استفاده از انرژی های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و باد می تواند باعث کاهش انرژی مصرفی شود [۴۹].

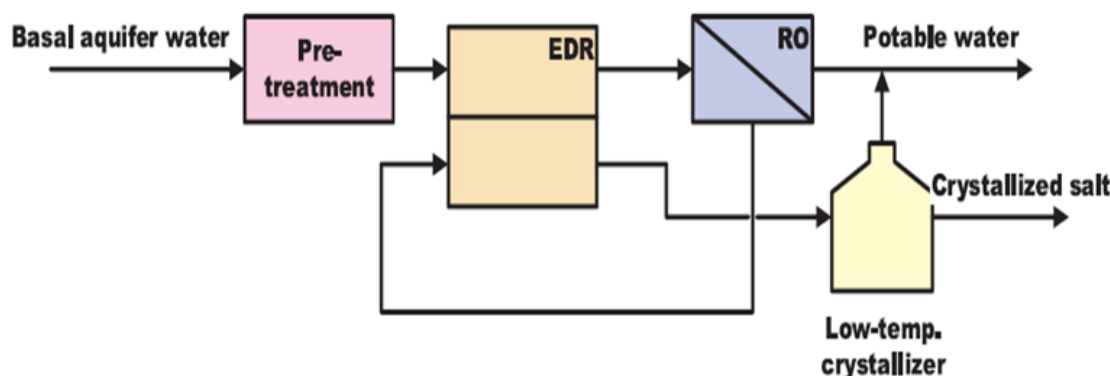
پدیده الکترودیالیز معکوس^۱ (EDR) گفته می شود. در این فرایند، به پیش تصفیه کمتری در مقایسه با روش اسمز معکوس نیاز است. فرایندهای ED و EDR قادر به تغلیظ آب ورودی تا شوری بیش از 100000 mg/L هستند. یک سامانه تک مرحله ای الکترودیالیز در بسیاری از موارد برای دستیابی به شرایط تخلیه مایع صفر مناسب نیست؛ بنابراین، می توان از سامانه چند مرحله ای استفاده کرد. همچنین، نشان داده شده که بهره گیری از ED و EDR به همراه اسمز معکوس در سامانه تخلیه مایع صفر، مصرف انرژی را در مقایسه با سامانه هایی که از تغلیظ کننده حرارتی شورابه استفاده می کنند، کاهش می دهد [۴۶].

در یک مطالعه آزمایشگاهی، با هدف افزایش بازیابی آب در اسمز معکوس و حذف کلسیم و منیزیم، از سامانه ترکیبی ZLD به کمک EDR به همراه بلورساز در دمای پایین برای تصفیه آب زیرزمینی با ظرفیت ۵۰ متر مکعب در روز استفاده شد. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده به جای نرم کردن آب با آهک معمولی و تبادل یونی، از EDR به عنوان یک فرایند پیش تصفیه قبل از اسمز معکوس استفاده شده و نتایج نشان داد که این فرایند در افزایش بازیابی آب در سامانه اسمز معکوس تأثیری مثبت دارد [۴۷].

۴. اقتصاد سامانه های ZLD

۴-۱ مصرف انرژی فرایندهای مختلف در ZLD

مصرف بالای انرژی در سامانه های ZLD هم چنان یک مسئله مهم



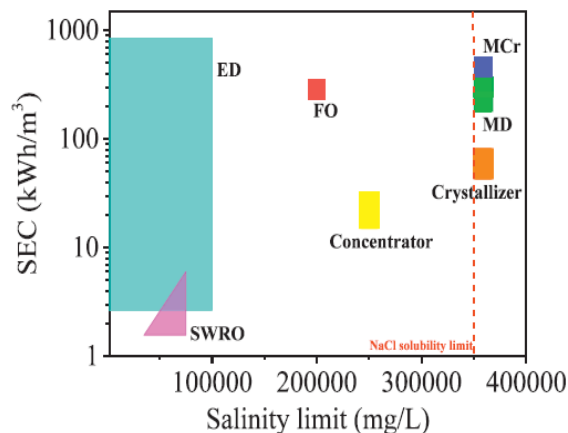
شکل ۹. سامانه تصفیه ZLD مبتنی بر روش ترکیبی EDR-RO-Crystallizer [۴۲].

Figure 9. Schematic of a ZLD purification system via EDR-RO- hybrid crystallizer [42].

1. Electrodiagnosis Reversal (EDR)

2. Seawater Reverse Osmosis (SWRO)

3. Specific Energy Consumption (SEC)



شکل ۱۰. مقایسه مصرف ویژه انرژی فرایندهای مختلف مورد استفاده در سامانه‌های ZLD نسبت به شوری آب [۴۲].

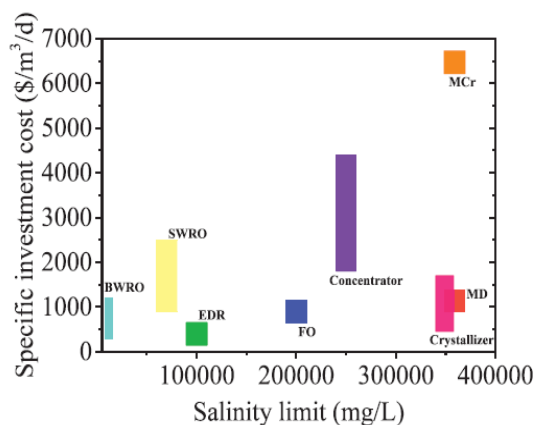
Figure 10. Comparison of specific energy consumption of different processes used in ZLD systems in relation to water salinity [42].

تغلیظ‌کننده‌های شورابه (با $1800-4400 \text{ } \$/\text{m}^3/\text{d}$) کمتر هستند. فناوری‌های غشایی را می‌توان برای محدوده شوری از آب دریا تا حدود 200000 mg/L مناسب در نظر گرفت، ولی زمانی که شوری خوراک از این حد فراتر می‌رود، اگرچه هزینه‌های متداول حرارتی کمی بیشتر از تقطیر غشایی است، ولی همچنان گزینه اول در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا روشی کاملاً توسعه یافته است [۴۲].

بلورسازهای غشایی یکی دیگر از کاربردهای تقطیر غشایی است که می‌تواند در مقایسه با بلورسازهای متداول که در آن‌ها تبخیر حلال و تبلور در یک مکان اتفاق می‌افتد، کنترل بهتری بر روی گرادیان دما داشته باشد؛ زیرا این دو فرایند در مکان‌های متفاوتی رخ می‌دهد و در نتیجه نرخ تبلور در آن سریع‌تر است [۵۰].

۲-۴ هزینه‌های سرمایه‌گذاری در ZLD

مقایسه هزینه‌های سرمایه‌گذاری فرایندهای غشایی و حرارتی مختلف ZLD با توجه به ظرفیت تولید و محدوده شوری آب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که پیداست، هزینه سرمایه‌گذاری اکثر فرایندها کمتر از $3000 \text{ } \$/\text{m}^3/\text{d}$ است، در حالی که هزینه سرمایه‌گذاری بلورسازهای غشایی (MCr) با اختلاف چشم‌گیری از دیگر فرایندها، در حدود $6500 \text{ } \$/\text{m}^3/\text{d}$ است. این اختلاف به این دلیل است که MCr یک فرایند نسبتاً جدید نسبت به سایر فرایندهای غشایی نظیر اسمز معکوس است و چالش‌های آن بررسی، تحلیل و بازنگری نشده است. سایر فرایندهای غشایی با سرمایه‌گذاری زیر $2000 \text{ } \$/\text{m}^3/\text{d}$ از هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای



شکل ۱۱. مقایسه هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بین فرایندهای مختلف مورد استفاده در سامانه‌های ZLD [۴۲].

Figure 11. Comparison of the investment costs among different processes used in ZLS systems [42].

1. Membrane Crystallization (MCr)

۵. تجربه‌های اخیر جهان در سامانه‌های ZLD

به دلیل افزایش قوانین سخت‌گیرانه درباره تصفیه پساب‌ها و کمبود آب در برخی مناطق باعث افزایش تقاضا برای استفاده مجدد و بازیابی آب شده است. شرکت‌های امریکایی، اروپایی و به تازگی چینی و هندی در زمینه طراحی و ساخت سامانه‌های ZLD برای صنایع مختلف فعال هستند. طبق مقررات زیست‌محیطی کشور چین، تمامی نیروگاه‌های زغال سنگ و صنایع شیمیایی چین، ملزم شده‌اند که از سامانه‌های ZLD استفاده کنند. در کشور هند نیز، تمامی صنایع آلاینده که میزان پساب بالاتر از محدوده مشخصی داشته باشند ملزم به استفاده از این سامانه‌ها در تصفیه پساب خود هستند. در سالین اخیر به استفاده از سامانه‌های ZLD با کاربرد فناوری‌های نوین توجه بیشتری شده که در ادامه به چند نمونه اشاره می‌شود. در سال ۲۰۲۰ با هدف نمک زدایی آب با کمینه مصرف انرژی در ایالت آلبرتای کشور کانادا سامانه ZLD مبتنی بر فرایند اسمز مستقیم در مقیاس نیمه‌صنعتی با ظرفیت ۱۵ مترمکعب در روز برای بازیابی آب از پساب‌های صنعت نفت و گاز راه‌اندازی شد (شکل ۱۲)). شرکت انجام‌دهنده پروژه Forward Water Technology (FWT) بود که از غشای فیبر توخالی اسمز مستقیم شرکت دانمارکی آکواپورین استفاده کرد که باعث حداقل شدن شار معکوس نمک شد [۵۱].



شکل ۱۲. پایلوت پلنت ZLD مبتنی بر فرایند اسمز مستقیم [۵۱].

Figure 11. ZLD Pilot plant based on Forward osmosis process [51].

در سال ۲۰۱۸ کشور چین اولین سامانه ZLD مبتنی بر فناوری اسمز مستقیم را در نیروگاه تولید برق با سوخت زغال سنگ در

استان ژجیانگ به‌وسیله شرکت Oasys Water تأسیس کرد. در همین سال، یک نیروگاه با سوخت زغال سنگ در شمال غربی شانگهای چین راه اندازی شد که بازیابی پساب آن بر پایه فرایند رطوبت‌زن-رطوبت‌زا (HDH)^۱ است. این سامانه قادر است پساب‌های واحد گوگردزدایی از دودکش‌های با شدت آلودگی زیاد را برای استفاده مجدد تصفیه کند که میزان بازیابی در آن بیش از ۹۰ درصد گزارش شده است [۵۲ و ۵۳].

شرکت Egyptian Ethylene Derivatives Company (ETHYDCO) مصر در سال ۲۰۱۶ قراردادی را با شرکت آکواتک امضا کرد تا برای مرکز تولید مشتقات نفتی خود در دانشگاه الکساندریا، یک مرکز تصفیه آب راه‌اندازی کند که این تسهیلات شامل اولین کارخانه تخلیه مایع صفر یکپارچه بود. این طرح در سال ۲۰۱۷ در فهرست نهایی دریافت جایزه سالانه آب جهانی قرار گرفت [۵۴-۵۶].

در سال ۲۰۱۸ شرکت GEA که همکار شرکت Mass Challenge سوئیس بود، یک سامانه هیبریدی ZLD با ظرفیت ۱۱۰ مترمکعب در ساعت برای مرکز تولید مولیبدن شرکت راه‌اندازی کرد. این سامانه شامل بخش پیش‌تصفیه و تغلیظ با اسمز معکوس بود و تغلیظ مرحله‌ای محلول از راه یک تبخیرکننده فیلم ریزی انجام می‌شد. سپس، فشرده‌سازی مجدد بخار به‌صورت مکانیکی و در نهایت تبلور و جداسازی مواد جامد محلول، انجام و آب خالص برای استفاده مجدد تولید می‌شد [۵۷].

در سال ۲۰۱۳ یک سامانه ZLD در پاکستان راه اندازی شد که هدف از آن تصفیه پساب نساجی و شیمیایی با ۸۰ درصد بازیابی بود [۵۸]. همچنین، یک واحد نیمه‌صنعتی در استکهلم سوئد، سامانه آزمایشی دیگری برای تست در مقیاس کوچک در جدّه عربستان سعودی و یک واحد نیمه‌صنعتی دیگر در دوحه قطر، در حال فعالیت هستند [۵۹-۶۱].

۶. فعالیت‌های انجام‌شده در ایران

بررسی منابع انتشار یافته در ایران نشان می‌دهد که در کشورمان نیز به مسئله ضرورت بازیابی حداکثری آب از منابع نامتعارف آب توجه شده و حدود یک دهه است که پژوهشگران به تحقیق در زمینه سامانه‌های ZLD پرداخته‌اند و برخی شرکت‌های طراحی و مهندسی بنابه ضرورت به دنبال توسعه فناوری این سامانه‌ها هستند؛ هرچند

1. Humidification-Dehumidification (HDH)

تعداد آن‌ها اندک است. از آنجایی که برای نمک‌زدایی از آب‌های شور و دریا در ایران معمولاً از اسمز معکوس استفاده می‌شود، عمده فعالیت‌ها در زمینه استفاده از ZLD برای بازیابی بیشینه آب از تجهیزات اسمز معکوس است. چنانچه بتوان بازیابی آب را در دستگاه‌های اسمز معکوس افزایش و مقدار پساب شور آن را کاهش داد، می‌توان هزینه‌های تبخیرکننده در سامانه ZLD را کاهش داد. طبق مطالعه، به‌ازای افزایش بازده اسمز معکوس از ۸۰ تا ۹۰ درصد، در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد در هزینه‌های سامانه ZLD پس از اسمز معکوس صرفه‌جویی می‌شود [۶۲].

در مطالعه‌ای که برای استفاده مجدد از پساب شور آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در شهرستان لار برای افزایش بازیابی آب در اسمز معکوس به انجام رسید، از راهکار حذف عناصر مزاحم کلسیم، منیزیم، باریم و سیلیس در آب استفاده شد. این عناصر در درصدهای بالاتر بازیابی آب، باعث آسیب غشای پلیمری می‌شود. در این تحقیق، برای نرم‌کردن آب ورودی، به‌کار بردن ترکیب فرایندهای جذب بر بستر کربنات کلسیم و ترسیب شیمیایی با ترکیبات قلیایی با نسبت بهینه از آلومینات سدیم و محلول سود بهترین نتیجه را ارائه داد. چنین نتیجه گرفته شد که از این روش می‌توان برای حذف ترکیبات رسوب‌گذار در مراحل میانی اسمز معکوس استفاده کرد و درصد بازیابی آب را در طراحی آن افزایش داد [۶۳]. همین گروه پژوهشی، در تحقیقات پیشین خود برای استفاده، بستر سیال بلوری با آلومینای فعال [۶۴] و فرایند بستر سیال بلوری با افزودن هیدروکسید سدیم [۶۵] را توصیه کرده بودند؛ زیرا کیفیت آب ورودی و پساب شور تعیین‌کننده نوع فرایند پیشنهادی است.

شرکت‌های بزرگ نیز به‌صورت بازیابی آب از منابع آبی نامتعارف موجود پی برده‌اند و به‌صورت فزاینده به‌دنبال توسعه فناوری‌های مرتبط با ZLD هستند. به‌عنوان مثال، طرح‌هایی در زمینه احداث واحد ZLD به‌منظور بازیابی و استفاده از پساب شور تولیدی واحد اسمز معکوس و احداث واحد HERO برای افزایش بازدهی واحد بازیافت در پالایشگاه نفت اصفهان به انجام رسیده است [۶۶]. هم‌چنین، در تصفیه پساب صنعتی به‌منظور استفاده مجدد آب حاصله در پالایشگاه گاز بیدبلند خلیج فارس، از فرایندهای پیش‌تصفیه به‌منظور حذف عوامل رسوب‌گذار بر روی غشا،

اولترافیلتراسیون برای حذف ذرات، اسمز معکوس برای شیرین‌سازی پساب و سامانه تبخیری برای بازیابی آب از پساب شور واحد اسمز معکوس استفاده خواهد شد و گفته شده که خروجی واحد ZLD، آب و نمک با رطوبت ۵ درصد خواهد بود [۶۷]. تعدادی از شرکت‌های طراحی و مهندسی داخل کشور درصدد دست‌یابی به دانش فنی سامانه‌های ZLD اند که عمدتاً شامل سامانه‌های حرارتی هستند.

۷. نتیجه‌گیری

سامانه‌های ZLD به‌عنوان یک راهکار ضروری برای مدیریت و استفاده بهینه از پساب‌های صنعتی و بازیافت آب محسوب می‌شوند که می‌توانند بازیابی آب را از منابع آبی نامتعارف در سراسر جهان افزایش دهند. همان‌گونه که در این مطالعه مرور شد، سامانه‌های ZLD مبتنی بر غشا و یا ترکیبی غشایی-حرارتی در مقایسه با فرایندهای حرارتی به‌دلیل عوامل اقتصادی، محبوبیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند؛ اگرچه، فناوری‌های غشایی نوظهور شامل MD، FO و ED/EDR که در ترکیب با RO برای تغلیظ پساب‌ها استفاده می‌شوند، چندان گسترش نیافته‌اند. بنابراین، باید تحقیقات بیشتری در مقیاس‌های آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی درباره آن‌ها انجام شود تا زمینه کاربرد صنعتی آن‌ها فراهم شود. هم‌چنین، می‌توان با استفاده از تبخیرکننده‌های فشار پایین، به‌دلیل کاهش مصرف انرژی، هزینه‌های عملیاتی سامانه ZLD حرارتی را کاهش داد. مطالعات انجام‌شده در ایران، بیشتر در زمینه سامانه‌های حرارتی و یا در ترکیب با اسمز معکوس بوده‌است و کاربرد فرایندهای غشایی نوظهور در سامانه‌های ZLD کمتر مرکز توجه بوده‌است، اگرچه، تحقیقات پایه در این زمینه در سطح دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌های کشور آغاز شده‌است. مصرف انرژی بالا و هزینه‌های سرمایه‌گذاری زیاد سامانه‌های ZLD مانع از توسعه گسترده آن‌ها شده و تنها در مناطقی که قوانین محیط زیستی سختگیرانه اعمال می‌شود، به‌کار برده می‌شوند. شرکت‌های بسیاری در جهان و تعداد کمی در ایران، به‌دنبال طراحی تجهیزات این‌گونه سامانه‌ها هستند که موفقیت آن‌ها در ایجاد نوآوری برای طراحی تجهیزات با بازدهی بالا و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی نهفته است. در پایان، ذکر این نکته ضروری است که یکی از عوامل مهم

مراجع

- [1] Tong, T., & Elimelech, M. (2016). The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6846-6855. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01000>.
- [2] Leal Filho, W., Azul, A. M., Brandli, L., Özuyar, P. G., & Wall, T. (Eds.). (2020). *Zero hunger*. Cham: Springer International Publishing.
- [3] Cheremisinoff, P. N. (2018). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. Routledge, p. 481.
- [4] Mo, J., Yang, Q., Zhang, N., Zhang, W., Zheng, Y., & Zhang, Z. (2018). A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 227, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.069>.
- [5] Eslamian, S., & Eslamian, F. A. (Eds.). (2017). *Handbook of Drought and Water Scarcity: Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water*. CRC Press.
- [6] Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>.
- [7] Grant, S. B., Saphores, J. D., Feldman, D. L., Hamilton, A. J., Fletcher, T. D., Cook, P. L., ... & Marusic, I. (2012). Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 337(6095), 681-686. <https://doi.org/10.1126/science.1216852>.
- [8] Mays, L. W. (2010). *Water Resources Sustainability*, Second edition, McGraw-Hill, New York, p. 13.
- [9] Byers, B. (1995). Zero discharge: A systematic approach to water reuse. *Chemical Engineering*, 102(7), 96.
- [10] Barrington, D. J., & Ho, G. (2014). Towards zero liquid discharge: the use of water auditing to identify water conservation measures. *Journal of Cleaner Production*, 66, 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.065>.
- [11] Lens, P., Pol, L. H., Wilderer, P., Asano, T. (2002). Water recycling and resource recovery in industry: analysis, technologies and implementation. First edition, IWA publishing, p. 228,
- [12] Lanny, W., The Global Push for Zero. <https://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-30/issue-1/technology-case-studies/the-global-push-for-zero.html>, available in 16 October (2018).
- [13] Yaqub, M., & Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 681, 551-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>.

پیش‌برنده در توسعه سامانه‌های تخلیه مایع صفر در کشورهای پیشرفته، به‌روزرسانی مقررات زیست‌محیطی برای ممانعت از تخلیه پساب‌ها به محیط زیست بوده‌است، مسئله‌ای که در کشورمان نیز باید اهمیت بیشتری بیابد.

جدول واژه‌های اختصاری

واژه اختصاری	واژه لاتین	واژه فارسی
ZLD	Zero Liquid Discharge	تخلیه مایع صفر
RO	Reverse Osmosis	اسمز معکوس
MD	Membrane Distillation	تقطیر غشایی
FO	Forward Osmosis	اسمز مستقیم
ED/EDR	Electrodialysis/ Electrodialysis Reversal	الکترودیالیز/الکترودیالیز برگشتی
FGD	Flue Gas Desulfurization	گوگردزدایی گاز دودکش
MVC	Mechanical Vapor Compression	فشرده‌سازی مکانیکی بخار
MED	Multiple Effect Distillation	تقطیر چندمرحله‌ای
MSF	Multi Stage Flash Distillation	تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای
UF	Ultrafiltration	اولترافیلتراسیون
HERO	High Efficiency Reverse Osmosis	اسمز معکوس با کارایی بالا
DCMD	Direct Contact Membrane Distillation	تقطیر غشایی تماس مستقیم
MDCr	Membrane Distillation Crystallization	تبلور تقطیر غشایی
SWRO	Seawater Reverse Osmosis	اسمز معکوس آب دریا
SEC	Specific Energy Consumption	مصرف انرژی ویژه
MCr	Membrane Crystallization	تبلور غشایی
HDH	Humidification- dehumidification	رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا

- [14] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>.
- [15] Shaffer, D. L., Arias Chavez, L. H., Ben-Sasson, M., Romero-Vargas Castrillón, S., Yip, N. Y., & Elimelech, M. (2013). Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: drivers, technologies, and future directions. *Environmental Science & Technology*, 47(17), 9569-9583. <https://doi.org/10.1021/es401966e>.
- [16] Burbano, A., & Brankhuber, P. (2012). Demonstration of membrane zero liquid discharge for drinking water systems: A literature review. *WERF 5T10*.
- [17] McGinnis, R. L., Hancock, N. T., Nowosielski-Slepowron, M. S., & McGurgan, G. D. (2013). Pilot demonstration of the NH₃/CO₂ forward osmosis desalination process on high salinity brines. *Desalination*, 312, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.032>.
- [18] Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. *Water Research*, 75, 164-187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032>.
- [19] Stanford, B. D., Leising, J. F., Bond, R. G., & Snyder, S. A. (2010). Inland desalination: Current practices, environmental implications, and case studies in Las Vegas, NV. *Sustainability Science and Engineering*, 2, 327-350. [https://doi.org/10.1016/S1871-2711\(09\)00211-6](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00211-6).
- [20] Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), <https://doi.org/10.1126/science.1200488>.
- [21] Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>.
- [22] Bond, R., & Veerapaneni, S. (2007). Zero Liquid Discharge for Inland Desalination. AWWA Research Foundation, AWWA.
- [23] Loganathan, K., Chelme-Ayala, P., & El-Din, M. G. (2016). Pilot-scale study on the treatment of basal aquifer water using ultrafiltration, reverse osmosis and evaporation/crystallization to achieve zero-liquid discharge. *Journal of Environmental Management*, 165, 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.019>.
- [24] Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2014). Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. *Separation and Purification Technology*, 122, 472-489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.004>.
- [25] Bond, R., & Veerapaneni, S. (2008). Zeroing in on ZLD technologies for inland desalination. *Journal-American Water Works Association*, 100(9), 76-89.
- [26] TOSHIBA, Solutions for industrial water treatment zero liquid discharge (ZLD) with HERO™. <https://www.toshiba.co.jp/sis/en/environment/solution/s2/zld.htm>, available in 16 December (2021).
- [27] Bush, J. A., Vanneste, J., & Cath, T. Y. (2016). Membrane distillation for concentration of hypersaline brines from the Great Salt Lake: Effects of scaling and fouling on performance, efficiency, and salt rejection. *Separation and Purification Technology*, 170, 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.028>.
- [28] Winter, D. (2015). *Membrane distillation: A thermodynamic, technological and economic analysis*. Shaker Verlag.
- [29] Yadav, A., Labhasetwar, P. K., & Shahi, V. K. (2022). Membrane distillation crystallization technology for zero liquid discharge and resource recovery: Opportunities, challenges and futuristic perspectives. *Science of The Total Environment*, 806, 150692. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150692>.
- [30] Camacho, L. M., Dumée, L., Zhang, J., Li, J. D., Duke, M., Gomez, J., & Gray, S. (2013). Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications. *Water*, 5(1), 94-196. <https://doi.org/10.3390/w5010094>.
- [31] Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. *Water Research*, 75, 164-187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032>.
- [32] Tijing, L. D., Choi, J. S., Lee, S., Kim, S. H., & Shon, H. K. (2014). Recent progress of membrane distillation using electrospun nanofibrous membrane. *Journal of Membrane Science*, 453, 435-462. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.11.022>.
- [33] Lin, S., Yip, N. Y., & Elimelech, M. (2014). Direct contact membrane distillation with heat recovery: Thermodynamic insights from module scale modeling. *Journal of Membrane Science*, 453, 498-515. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.11.016>.
- [34] Al-Obaidani, S., Curcio, E., Macedonio, F., Di Profio, G., Al-Hinai, H., & Drioli, E. (2008). Potential of membrane distillation in seawater desalination: thermal efficiency, sensitivity study and cost estimation. *Journal of Membrane Science*, 323(1), 85-98.
- [35] Martinetti, C. R., Childress, A. E., & Cath, T. Y. (2009). High recovery of concentrated RO brines

- using forward osmosis and membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 331(1-2), 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.06.006>.
- [36] Tufa, R. A., Curcio, E., Brauns, E., van Baak, W., Fontananova, E., & Di Profio, G. (2015). Membrane distillation and reverse electro dialysis for near-zero liquid discharge and low energy seawater desalination. *Journal of Membrane Science*, 496, 325-333. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.09.008>.
- [37] Alkhudhiri, A., Darwish, N., & Hilal, N. (2012). Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, 287, 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.027>.
- [38] Shaffer, D. L., Werber, J. R., Jaramillo, H., Lin, S., & Elimelech, M. (2015). Forward osmosis: where are we now?. *Desalination*, 356, 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.031>.
- [39] OasysWater, I., Changxing power plant debuts the world's first forward osmosis-based zero liquid discharge application. <https://www.wateronline.com/doc/changxing-power-plant-debuts-the-world-s-first-forward-osmosis-based-zero-liquid-discharge-application-0001>, available in 20 October (2017).
- [40] Wang, J., & Liu, X. (2021). Forward osmosis technology for water treatment: Recent advances and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124354>.
- [41] Li, X., He, T., Dou, P., & Zhao, S. (2017). Forward osmosis and forward osmosis membranes. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, First edition, Elsevier publication, p. 96.
- [42] Tsai, J. H., Macedonio, F., Drioli, E., Giorno, L., Chou, C. Y., Hu, F. C., ... & Tung, K. L. (2017). Membrane-based zero liquid discharge: Myth or reality?. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.06.050>.
- [43] Turek, M., Dydo, P., & Klimek, R. (2005). Salt production from coal-mine brine in ED-evaporation-crystallization system. *Desalination*, 184(1-3), 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.047>.
- [44] Xu, T., & Huang, C. (2008). Electro dialysis-based separation technologies: a critical review. *AIChE Journal*, 54(12), 3147-3159. <https://doi.org/10.1002/aic.11643>.
- [45] US Department of the Interior Bureau of Reclamation, "Evaluation and selection of available processes for a zero-liquid discharge system for the Perris, California, Ground Water Basin". Desalination and Water Purification Research Program. Rep. No. 149, (2008).
- [46] McGovern, R. K., Weiner, A. M., Sun, L., Chambers, C. G., & Zubair, S. M. (2014). On the cost of electro dialysis for the desalination of high salinity feeds. *Applied Energy*, 136, 649-661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.050>.
- [47] Loganathan, K., Chelme-Ayala, P., & El-Din, M. G. (2015). Treatment of basal water using a hybrid electro dialysis reversal-reverse osmosis system combined with a low-temperature crystallizer for near-zero liquid discharge. *Desalination*, 363, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.020>.
- [48] Ortiz, J. M., Sotoca, J. A., Expósito, E., Gallud, F., García-García, V., Montiel, V., & Aldaz, A. (2005). Brackish water desalination by electro dialysis: batch recirculation operation modeling. *Journal of Membrane Science*, 252(1-2), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.11.021>.
- [49] Malek, P., Ortiz, J. M., & Schulte-Herbrüggen, H. M. A. (2016). Decentralized desalination of brackish water using an electro dialysis system directly powered by wind energy. *Desalination*, 377, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.023>.
- [50] Curcio, E., & Drioli, E. (2005). Membrane distillation and related operations-a review. *Separation and Purification Reviews*, 34(1), 35-86. <https://doi.org/10.1081/SPM-200054951>.
- [51] Forward Water Technologies' industrial scale pilot plant is demonstrating low energy ZLD, <https://www.forwardosmosistech.com/update-forward-water-technologies-industrial-scale-pilot-plant-is-demonstrating-low-energy-zld>, available in 10 September (2022).
- [52] World first for zero liquid discharge (2016). *Filtration+Separation*, 53: 20-22.
- [53] Zero liquid discharge plant has been commissioned in China, <https://www.pollutionequipmentnews.com/6157-2> available in 10 November (2018).
- [54] Marlett, M., Zero to hero ZLD potential for the power industry. <https://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-29/issue-1/technology-case-studies/zero-liquid-discharge-zld/zero-to-hero-zld-potential-for-the-power-industry.html>, available in 15 February (2017).
- [55] Corporation, A. I. Aquatech ZLD project shortlisted for 2017 global water award, industrial water project of the year. <https://www.aquatech.com/news/aquatech-zld-project-shortlisted-2017-global-water-award-industrialwater-project-year>, available in 11 November (2017).
- [56] Alexandria University, Eco-natural model for wastewater treatment: innovative ecological design treatment approach for the reuse of wastewater in the western desert of Egypt. <https://www.susana.org/en/knowledgehub/projects/database/details/454>, available in 4 November (2019).

- [57] GEA, Zero liquid discharge for environmental protection. <https://www.gea.com/en/news/insights/2018/zero-liquid-discharge-environmentalprotection.jsp> available in 6 November (2018).
- [58] Archroma Pakistan, Archroma Pakistan – saving water passionately. <https://fp.brecorder.com/2016/08/2016080170755>, available in 7 November (2018).
- [59] XZERO, Everything to zero. <https://www.xzero.se/en/the-xzero-system>, available in 20 March (2019).
- [60] Draper, K., Waste water treatment and biochar. *Biochar Journal*, www.biochar-journal.org/en/ct/81, available in 26 October (2016).
- [61] Vera, V., Unfair trading practices in the food supply chain. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2018\)_621831](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2018)_621831), available in 5 March (2018).
- [62] Akbarzadeh, A., Lotfi, M., Obareshi, M. (2017). A review of ZLD technology with an emphasis on economic estimates, 16th National Congress of Chemical Engineering of Iran, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2-4 Bahman, In Persian.
- [63] Noshadi, M., & Afsari, M. (2020). Determination of optimum ZLD process for wastewater reuse of reverse osmosis systems (Case Study: reverse osmosis system of Lar city). *Iranian Water Researches Journal*, 14(2), 131-143, In Persian.
- [64] Sheibanifar, M., & Noshadi, M. (2016). Determine the Optimal ZLD Process for Reuse of Reverse Osmosis Effluent. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(84), 63-74.
- [65] Noshadi, M., Kazemizadeh, M (2015). Determination of optimum ZLD process for reuse of reverse osmosis effluent (case study: reverse osmosis of Lar city). *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 39: 575588.
- [66] Implementation of environmental projects in Isfahan Refinery, *Donya Eqtesad*, No. 5460, News No. 386858, <https://donya-e-eqtesad.com>, available in 10 September (2022).
- [67] Persian Gulf Bidboland gas refinery project, <https://absunwater.com/fa/projects/persian-gulf-bidboland-gas-refining-co/zld>, available in 12 October (2022).