

مروری بر کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های نمک‌زدایی از آب دریا

احمد فدایی^۱، یونس نوراللهی^{۲*}، فاطمه راضی آستارایی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۰۸، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۳۰)

چکیده

افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن سبب افزایش درخور توجه تقاضای آب شیرین در جهان شده است. شیرین‌سازی منابع آب در دسترس و فراوان موجود، گزینه‌ای مطلوب و توجیه‌پذیر برای پاسخ به نیاز آب آشامیدنی و مصرفی صنعت است. نمک‌زدایی آب دریا فرایندی انرژی‌بر است و با توجه به اینکه ۹۹ درصد تأسیسات نمک‌زدایی نصب‌شده از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منبع انرژی بهره می‌گیرند، عواملی همچون قیمت متغیر و پایان‌پذیری این نوع منابع انرژی، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای در کنار سایر فاکتورهای راهبردی، سیاسی و اجتماعی سبب توجه گسترده به توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان نیروی محرکه تأسیسات نمک‌زدایی شده است. پژوهش حاضر به مروری جامع بر پیشرفت‌های صورت‌گرفته در ترکیب منابع انرژی‌های تجدیدپذیر با فناوری‌های مرسوم و نوین در حوزه نمک‌زدایی آب دریا پرداخته و تمرکز آن بر تشریح فناوری‌ها و مطالعات انجام‌شده در کاربرد انرژی خورشیدی، انرژی هسته‌ای، انرژی بادی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی‌های اقیانوسی، انرژی زیست‌توده و انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی در نمک‌زدایی است. استفاده ترکیبی از دو یا چند منبع انرژی تجدیدپذیر به همراه سیستم‌های ذخیره‌ساز، راه حلی مطمئن و نویدبخش به منظور تأمین پایدار انرژی مورد نیاز نمک‌زدایی معرفی شده است. در کشور ما نیز محققان و متخصصان این حوزه در حال تلاش و پژوهش هستند.

کلیدواژگان: آب شیرین، سیستم‌های ترکیبی، منابع تجدیدپذیر، نمک‌زدایی آب دریا.

مقدمه

آب، دو سوم سطح کره زمین را پوشش داده است، با این وجود فقط سهم بسیار اندکی از این منبع خدادادی برای انسان قابل استفاده است. ۹۷ درصد منابع آبی در جهان را آب دریا تشکیل داده است [۱]. در حال حاضر، یک پنجم جمعیت جهان با معضل کم آبی روبه‌روست و یک چهارم باقی‌مانده جمعیت به‌رغم دسترسی به منابع آب، از فناوری‌های مناسب برای فرآوری و تبدیل آن به آب آشامیدنی برخوردار نیستند. پیش‌بینی شده است که ۴۰ درصد جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۰ به گونه‌ای درگیر مسئله کم آبی می‌شوند [۲]. به این منظور، تأمین منابع کافی و قابل اعتماد آب شیرین، به یکی از اولویت‌های مهم در برنامه‌های راهبردی دولت‌ها تبدیل شده است که بر رشد اقتصادی جوامع و رفاه میلیاردها انسان تأثیر می‌گذارد. بهره‌گیری از فناوری‌های نمک‌زدایی آب، ابزاری مناسب برای حفظ امنیت تأمین آب شیرین است. این موضوع سبب افزایش تصاعدی ظرفیت نصب‌شده تأسیسات نمک‌زدایی در جهان شده است، به گونه‌ای که طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ میلادی ظرفیت آب تولیدی از این روش بیش از ۶۰ میلیون متر مکعب در روز افزایش داشته است [۳]. ظرفیت کلی شیرین‌سازی آب دریا در جهان ۱۰۰ میلیون متر مکعب در شبانه‌روز است که از این ظرفیت، ۴۷ درصد در شمال آفریقا و خاورمیانه؛ ۱۸ درصد در شرق آسیا؛ ۱۲ درصد در آمریکای شمالی؛ ۱۱ درصد در اروپا و ۱۲ درصد در سایر مناطق انجام می‌پذیرد. عربستان دارای بزرگ‌ترین بازار شیرین‌سازی آب دریا است و با تولید بیش از ۱۴ میلیون متر مکعب آب در شبانه‌روز، رتبه نخست دنیا در استفاده از صنعت نمک‌زدایی را دارد. دیگر کشورهای حاشیه خلیج فارس نیز از صنعت نمک‌زدایی برای رفع نیازهای آبی خود استفاده می‌کنند. ظرفیت تولید آب شیرین در واحدهای نمک‌زدایی کشورهای امارات، کویت، قطر، بحرین و عمان به ترتیب برابر با ۳، ۹، ۱/۸، ۱/۱ و ۱ میلیون و در شبانه‌روز است [۴].

کشور ایران نیز در سال‌های اخیر در میان کشورهای دارای تنش آبی قرار گرفته است و در آینده نیز این تنش در منابع آبی کشور پررنگ‌تر خواهد شد. ظرفیت واحدهای نمک‌زدایی در حال بهره‌برداری کشور، حدود ۲۳۰ هزار متر مکعب در شبانه‌روز است که سهمی کمتر از حدود یک

درصد از ظرفیت نمک‌زدایی منطقه غرب آسیا و شمال آفریقا را دارد. طبق برنامه وزارت نیرو قرار است تا سال ۱۴۰۰، به میزان ۳۰۰ هزار مترمکعب در شبانه‌روز به ظرفیت تأسیسات نمک‌زدایی استان‌های جنوبی کشور (فارس، سیستان و بلوچستان، کهگیلویه و بویراحمد، بوشهر، کرمان، خوزستان و هرمزگان) اضافه شود. همچنین تا سال ۱۴۰۳ نیز ظرفیتی معادل ۳۰۰ هزار مترمکعب در شبانه‌روز به این میزان اضافه خواهد شد که کل آب تولیدی حاصل، حدود ۳ میلیون نفر به جمعیت تحت پوشش تأسیسات نمک‌زدایی اضافه می‌کند [۴]. این مطلب نشان می‌دهد اگرچه کشور ما در سال‌های اخیر سرعت خود را در توسعه آب شیرین‌کن‌ها افزایش داده، اما در مقایسه با سایر کشورهای همسایه همچنان در وضعیتی پایین‌تر قرار گرفته است. اجرای برنامه‌های مطرح‌شده می‌تواند کمکی شایان به توسعه این صنعت در کشور داشته باشد.

نمک‌زدایی به فرایند جداسازی نمک‌های محلول از آب دریا و یا شورآب^۱ گفته می‌شود. نمک‌زدایی مزیت‌های متعددی همچون بهره‌گیری از منابع آب موجود، تأمین آب پایدار در مناطق ساحلی و گرم و خشک و گستردگی فناوری‌ها برای کاربرد در شرایط مختلف محیطی و عملیاتی را ارائه می‌دهد. به صورت کلی، تکنیک‌های نمک‌زدایی به دو دسته روش‌های حرارتی و غشایی تقسیم شده است. در روش‌های غشایی، از خواص منحصربه‌فرد غشا همچون خاصیت گزینش یون^۲ و یا عبوردهی مولکول‌های آب و دفع ذرات نمک استفاده می‌شود. روش‌های حرارتی بیشتر مبتنی بر تغییر فاز محلول نمکی هستند [۵]. شکل ۱ فناوری‌های مرسوم و نوین در شیرین‌سازی آب دریا را نشان می‌دهد.

روش‌های مختلف نمک‌زدایی افزون بر کاربردی بودن و نکات مثبت، نکات منفی و نواقصی دارند که در تمامی این روش‌ها مشترک است. از جمله این معایب مصرف انرژی زیاد، تخلیه پساب آلوده ناشی از نمک‌زدایی به زیست‌بوم‌های آبی که سبب به خطر افتادن حیات جانوران در این مناطق می‌شود، آلاینده‌گی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های زیاد سرمایه‌گذاری تأسیسات نمک‌زدایی است

1. Brackish Water
2. Ion Selection

اقلیم وارد می‌کند. علاوه بر این، کشورهای تولیدکننده عمده نفت در خلیج فارس به آسیب‌پذیری خود در برابر بحران‌های انرژی پی برده‌اند و تلاش می‌کنند از وابستگی به منابع فسیلی بکاهند و منابع انرژی مصرفی خود را تنوع بخشند. این مسئله به مشوق اصلی برای بهره‌گیری از منابعی پاک و سازگار با محیط زیست برای نمک‌زدایی تبدیل شده است. از این‌رو، در چند دهه اخیر پژوهش‌ها و تلاش‌های تحقیقاتی درخور توجهی برای به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در نمک‌زدایی آب صورت گرفته است. شکل ۲ امکان ترکیب انرژی‌های مختلف تجدیدپذیر با فناوری‌های گوناگون نمک‌زدایی را نشان می‌دهد.

[۳]. در میان این موارد، مصرف انرژی زیاد این فرایند تأثیری معکوس در توجیه‌پذیری اقتصادی و زیست‌محیطی آن خواهد داشت. جدول ۱ میزان مصرف انرژی فناوری‌های مرسوم نمک‌زدایی را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر جدول ۱ نشان می‌دهد تأسیسات نمک‌زدایی حرارتی مصرف انرژی به مراتب بیشتر از تأسیسات با فناوری غشایی دارند [۵]. تا کنون از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع انرژی در نمک‌زدایی آب استفاده شده است. کاربرد این منابع جدا از هزینه زیاد و متغیر آنها، با انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای مانند کربن دی‌اکسید، آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به محیط زیست و

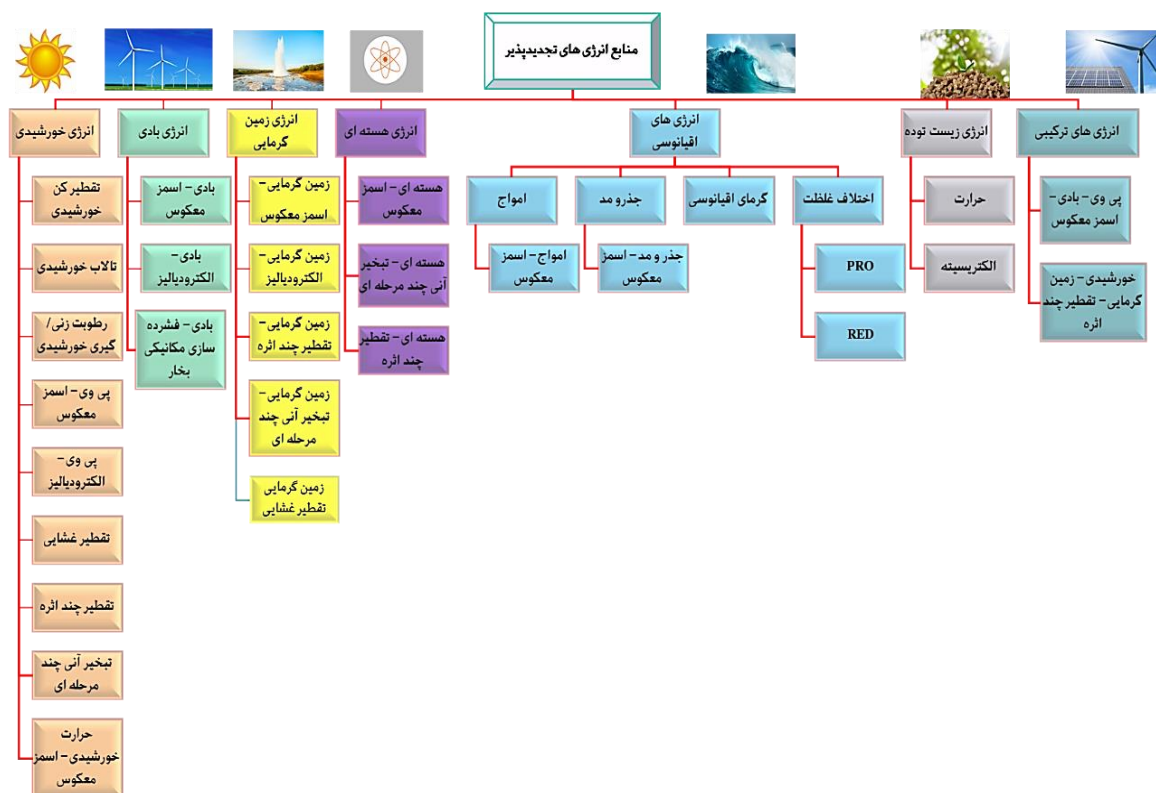


شکل ۱. فناوری‌های نمک‌زدایی

جدول ۱. مقایسه مصرف انرژی در تأسیسات نمک‌زدایی مرسوم [۵]

ویژگی	تبخیر آنی چند مرحله‌ای (MSF) ^۶	تقطیر چند اثره (MED) ^۵	فشرده‌سازی مکانیکی بخار (MVC) ^۴	فشرده‌سازی حرارتی بخار (TVC) ^۳	اسمز معکوس (RO) آب دریا	اسمز معکوس شور آب	الکترو دیالیز (ED) ^۱
ظرفیت شیرین‌سازی (m ³ /d) تأسیسات	۷۰۰۰۰ - ۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰ - ۵۰۰۰	۳۰۰۰ - ۱۰۰	۳۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	حداکثر ۱۲۸۰۰۰	حداکثر ۹۸۰۰۰	۱۴۵۰۰۰ - ۲
مصرف انرژی الکتریکی (kWh/m ³)	۵ - ۲/۵	۲/۵ - ۲	۱۲ - ۷	۱/۸ - ۱/۶	۶ - ۴ با مبدل فشار	۲/۵ - ۱/۵	۵/۵ - ۲/۶۴
مصرف انرژی حرارتی (MJ/m ³)	۲۸۲ - ۱۹۰	۲۳۰ - ۱۴۵	ندارد	۲۲۷	ندارد	ندارد	ندارد
کیفیت آب تولیدی (ppm) نمک محلول	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵۰۰ - ۴۰۰	۵۰۰ - ۲۰۰	۵۰۰ - ۱۵۰

1. Electrodialysis
2. Reverse Osmosis
3. MED-TVC
4. MED-MVC
5. Multi Effect Distillation
6. Multi Stage Flash



شکل ۲. منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده در نمک‌زدایی آب [۶]

کشور ایران با داشتن گستره وسیعی از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی، پتانسیل بسیار مناسبی برای اجرای طرح‌های نمک‌زدایی تجدیدپذیر دارد که متأسفانه تا کنون اقدامی جدی در این زمینه صورت نگرفته است.

در مقایسه با تحقیقات مروری مشابه، پژوهش حاضر با تفصیل بیشتری به کاربرد انرژی‌های اقیانوسی، زیست‌توده و انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی در صنعت نمک‌زدایی پرداخته است. در انتهای مقاله، نویسنده پس از ارائه تصویری اجمالی از وضعیت نمک‌زدایی تجدیدپذیر در جهان، پیشنهادهایی را برای پیشبرد تحقیقات آتی در این حوزه ارائه می‌دهد.

انرژی‌های تجدیدپذیر در نمک‌زدایی آب دریا انرژی خورشیدی

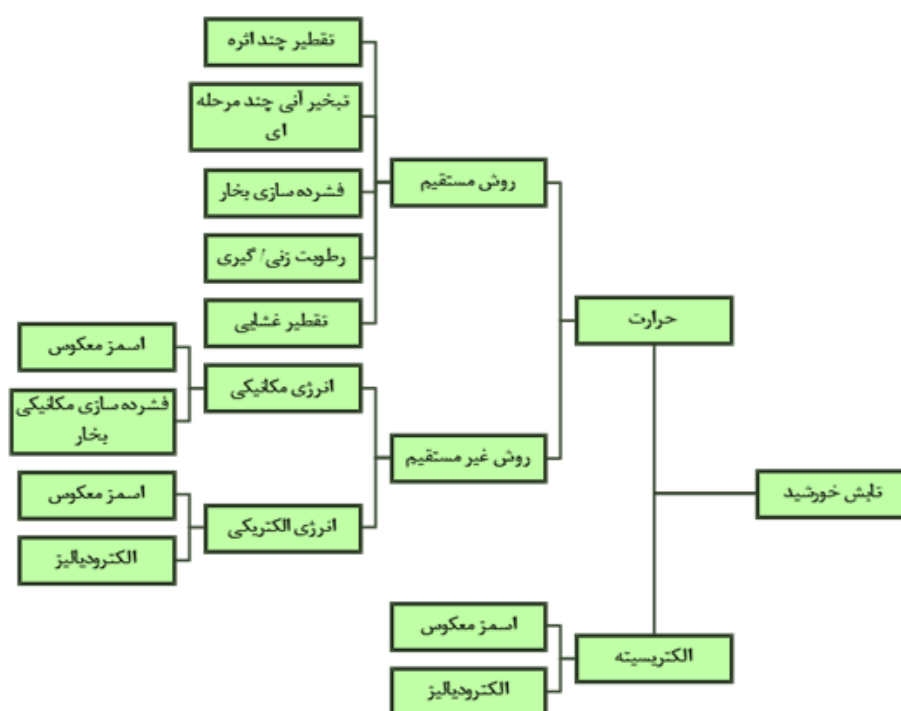
کمبود آب آشامیدنی و کشاورزی مناسب از جمله مشخصه‌های مناطق گرم و خشک است. توفیق در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به عنوان منبعی کارآمد، پاک و ارزان برای تأمین توان مورد نیاز تأسیسات

با این‌همه، تمامی این ترکیبات از نظر توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی نویدبخش نیستند. تعدادی از منابع تجدیدپذیر برای کاربردهای کوچک و آزمایشگاهی نمک‌زدایی و برخی برای ظرفیت‌های بزرگ مناسب هستند. این مسئله به عواملی همچون دسترسی به منبع، ملاحظات هزینه‌ای، زیرساخت‌ها و قوانین دولت‌ها وابسته است [۶].

در حال حاضر و به‌رغم اهمیت تجدیدپذیرها در تأمین انرژی مورد نیاز نمک‌زدایی، ظرفیت نصب‌شده تأسیسات نمک‌زدایی تجدیدپذیر در مقایسه با ظرفیت کل تأسیسات نصب‌شده در جهان بسیار اندک است. به صورت تخمینی، حدود ۱۳۰ تأسیسات نمک‌زدایی تجدیدپذیر در جهان نصب شده است که برق خورشیدی، حدود ۴۳ درصد؛ حرارت خورشیدی، ۲۷ درصد؛ انرژی بادی، ۲۰ درصد و صورت‌های ترکیبی، ۱۰ درصد کل ظرفیت نصب‌شده نمک‌زدایی تجدیدپذیر را تشکیل می‌دهد [۶]. ضرورت تولید آب شیرین با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش انکارناپذیر آن در حفظ امنیت و پایداری تأمین تقاضای آب آشامیدنی، سبب سرمایه‌گذاری درخور توجه کشورهای جهان در توسعه این فناوری شده است.

حرارتی خورشیدی (برای تولید توان) مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، انرژی الکتریکی خورشیدی شامل تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته توسط مواد سیلیکونی نیمه‌رسانا مانند سلول‌های خورشیدی^۱ است. بازده سلول‌های خورشیدی عاملی تأثیرگذار در عملکرد و هزینه سامانه‌های فتوولتائیک^۲ (PV) است [۳]. شکل ۳ امکان استفاده از انرژی خورشید در انواع فناوری‌های نمک‌زدایی را نشان می‌دهد.

نمک‌زدایی، سبب رفع معضل کمبود آب در مناطق وسیعی از جهان و به‌خصوص کشورهای با آب‌وهوای گرم و خشک در حاشیه خلیج فارس خواهد شد [۳]. روشنایی و حرارت خورشید به عنوان منابع انرژی رایگان برای هزاران سال استفاده شده است. انرژی خورشیدی به دو دسته تقسیم می‌شود: انرژی حرارتی خورشیدی و انرژی الکتریکی خورشیدی. در نوع حرارتی، انرژی تابشی خورشید ابتدا به حرارت تبدیل می‌شود و این حرارت در نیروگاه‌های



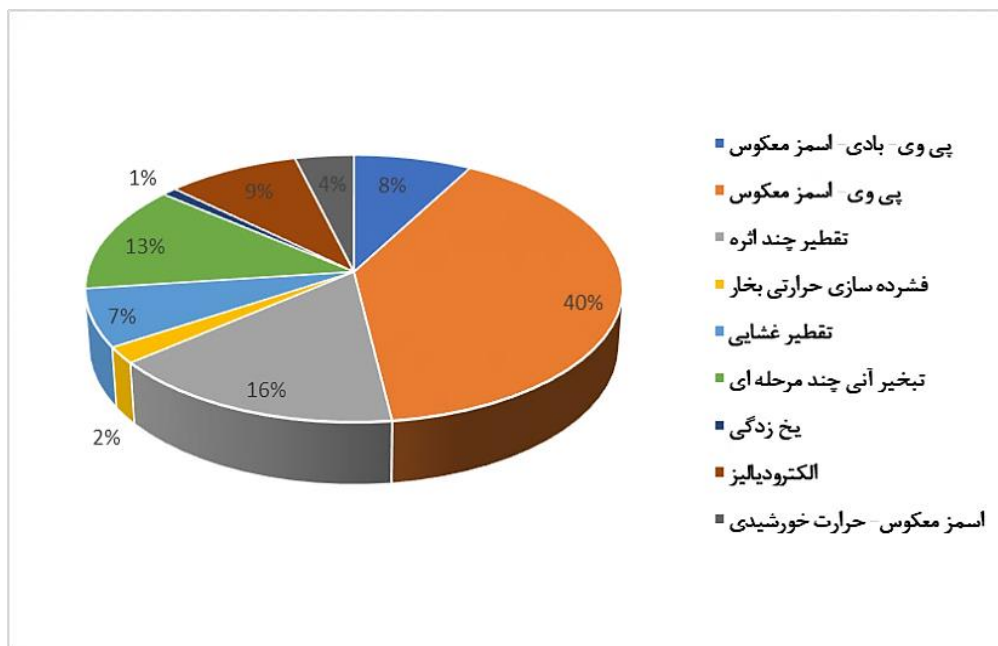
شکل ۳. کاربرد انرژی خورشیدی در نمک‌زدایی آب [۳]

چند مرحله‌ای، تقطیر چنداتره، فشرده‌سازی بخار، تقطیر غشایی و رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری را فراهم می‌کنند. علاوه بر آن، می‌توان از انرژی حرارتی خورشید برای تولید الکتریسیته استفاده کرد (از طریق سیکل رانکین آلی^۳) و از برق تولیدی برای نمک‌زدایی اسمز معکوس، الکترودیالیز و یا فشرده‌سازی مکانیکی بخار بهره برد. شکل ۴ کاربرد انرژی غیر مستقیم خورشیدی در سامانه‌های نمک‌زدایی را نشان می‌دهد. هم‌اکنون ترکیب فناوری RO با سامانه‌های فتوولتائیک، بیشترین سهم در کاربرد انرژی خورشیدی در نمک‌زدایی را دارد (بیش از ۵۰ درصد) [۳].

متناسب با روش نمک‌زدایی، انرژی خورشیدی به صورت حرارت، الکتریسیته و یا انرژی مکانیکی استفاده می‌شود. از انرژی حرارتی خورشید به طور مستقیم در تقطیرکن خورشیدی^۴ استفاده شده است که بر اساس جذب حرارت خورشید و تبخیر و تقطیر در یک مکان عمل می‌کند. همچنین، امکان استفاده غیر مستقیم از انرژی خورشیدی نیز وجود دارد، به این صورت که دریافت‌کننده‌های خورشیدی^۴ حرارت مورد نیاز برای فرایندهای نمک‌زدایی حرارتی مانند تبخیر آبی

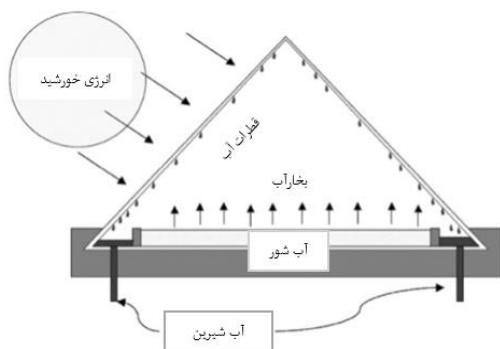
5. Organic Rankine Cycle (ORC)

1. Solar Cell
2. Photovoltaic
3. Solar Still
4. Solar Collector



شکل ۴. سهم فناوری‌های ترکیب‌شده با انرژی غیر مستقیم خورشیدی در نمک‌زدایی [۳]

تقطیرکن‌های خورشیدی می‌توانند روزانه ۳ تا ۴ لیتر آب شیرین تولید کنند. این وسیله می‌تواند برای مناطق با وسعت زیاد و هزینه زمین اندک و تقاضای محدود آب آشامیدنی استفاده شود. بازدهی تقطیرکن‌های خورشیدی به طور مستقیم به میزان نور دریافتی، دمای محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد و ابری بودن هوا و تشکیل مه روی سطح شیشه‌ای وابسته است. همچنین، بازدهی رابطه‌ای مستقیم با میزان تبخیر و رابطه‌ای معکوس با عمق حوضچه آب دارد. پوشش شیشه‌ای دستگاه باید کمترین زاویه را در فصل تابستان (با توجه به عمود تابیدن خورشید) و بیشترین زاویه را در فصل زمستان داشته باشد [۷].



شکل ۵. شمایی از نوعی تقطیرکن خورشیدی [۷]

روش‌های مستقیم

تقطیر خورشیدی

از این فناوری برای دهه‌های متوالی استفاده شده است و انواع گوناگونی دارد. دستگاه تقطیرکن خورشیدی بر اساس سیکل طبیعی آب (مشابه آنچه در اقیانوس‌ها رخ می‌دهد) عمل می‌کند. اشعه نور خورشید از محافظ نور^۱ دستگاه عبور می‌کند و روی حوضچه آب شور به دام می‌افتد. محافظ نور از یک پنل شیشه‌ای - پلاستیکی شیب‌دار تشکیل شده که بالای حوضچه آب قرار گرفته است (مشابه گلخانه). حوضچه آب معمولاً به رنگ مشکی است تا بیشترین جذب را داشته باشد. اشعه جذب‌شده در محیط دستگاه، سبب ایجاد اثر گلخانه‌ای و افزایش دمای آب شور می‌شود. بر اثر این افزایش دما و حرارت انتقال یافته، بخشی از آب تبخیر شده و بخارهای حاصل روی سطح شیب‌دار تقطیر و قطرات به سمت پایین جاری می‌شود. این قطرات توسط مسیرهای خاصی جمع‌آوری می‌شوند. این فرایند از نظر ساخت ارزان است و هزینه خورشیدی میزان کم تولید آب شیرین و بازدهی کم آنها است [۷]. شکل ۵ شمایی از یک تقطیرکن خورشیدی را نشان می‌دهد.

1. Light Shield

آب شور می‌شوند. در دهه اخیر انواع مختلفی از تالاب‌های خورشیدی برای کاربرد در سیستم‌های ترکیبی خورشیدی، کاربردهای حرارتی، تولید توان و نمک‌زدایی استفاده شده است. از تالاب‌های کوچک برای گرمایش محیطی و آب گرم مصرفی و از تالاب‌های بزرگ در فرایندهای صنعتی برای ایجاد حرارت، تولید برق و نمک‌زدایی استفاده شده است [۷].

در تالاب‌های خورشیدی، نور خورشید پس از ورود سبب گرم شدن لایه زیرین^۵ می‌شود. جریان همرفتی ایجاد شده در تالاب سبب می‌شود که دمای تالاب ثابت بماند. در حالی که دما در لایه‌های بالایی^۶ مجاور به سطح، تقریباً برابر با دمای محیط است. دما در لایه زیرین که غلظت بسیار بیشتری از نمک را دارد، به طرز درخور توجهی بیشتر است (حدود ۹۰ درجه سانتی‌گراد). تفاوت دما در تالاب می‌تواند برای شروع فرایند نمک‌زدایی استفاده شود. به این منظور، از یک سیکل رانکین آلی استفاده می‌شود که از دمای زیاد آب لایه زیرین تالاب به عنوان منبع حرارت برای نمک‌زدایی استفاده می‌کند. به‌رغم بازدهی کم این روش به علت دمای کم منبع گرم (۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد)، هزینه‌های کم این سیکل این نقیصه را جبران می‌کند. بازده متوسط تالاب‌های خورشیدی برای نمک‌زدایی ۱۰ درصد است [۷]. شکل ۶ شمایی از یک تالاب خورشیدی را نشان می‌دهد.

تولید هر متر مکعب از آب شیرین به این روش نیازمند ۴-۱ هزار متر مربع مساحت تالاب خورشیدی است. طی پژوهشی، ترکیبی نوین از تالاب خورشیدی و RO معرفی شده است [۱۲]. بازده این سیستم ۱/۵ درصد است (بازده تالاب خورشیدی ۱۵ درصد و بازده سیکل رانکین آلی ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است). تأمین پایدار آب شیرین از هر دو جنبه فنی و اقتصادی حائز اهمیت است و تالاب‌های خورشیدی پتانسیل تولید آب در کل سال، حتی طی شب و آب‌وهوای ابری را دارند [۱۳].

یکی از روش‌های افزایش بازدهی تقطیرکن‌های خورشیدی، ترکیب دریافت‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت^۱ و لوله^۲ با آنها است. از این دریافت‌کننده‌ها برای پیش‌گرم کردن آب ورودی به دستگاه استفاده می‌شود. بهره‌گیری از سیستم گردش اجباری به جای گردش طبیعی در محیط تقطیرکن سبب افزایش درخور توجه بازده دستگاه می‌شود. روش دیگر برای بهبود بازده، بازافت حرارت نهان تبخیر از طریق کاربرد مواد تغییر فاز دهنده^۳ و تنظیم بهینه جریان آب ورودی به منظور افزایش انتقال حرارت است. بیشترین بازده گزارش شده برای دستگاه تقطیرکن خورشیدی، ۵۰ درصد است. عواملی مانند خرابی عایق، تا ۱۴/۵ درصد و افزایش سرعت باد تا ۳/۶ مایل بر ساعت، تا ۲ درصد از بازدهی این دستگاه می‌کاهد [۷].

ال‌هینای و همکاران تحلیل پارامتریک جامعی را روی نوعی تقطیرکن خورشیدی دوتایی انجام دادند و بازده دستگاه را برای شرایط بهینه طراحی محاسبه کردند [۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داد دستگاه توانایی تولید آب شیرین به میزان ۴ لیتر بر متر مربع در روز را دارد. راجا سینیواسان نوعی سیستم تقطیرکن خورشیدی چندمرحله‌ای برای افزایش بازدهی پیشنهاد کرده است [۹]. به‌رغم تمامی تلاش‌های انجام شده برای افزایش بازده این دستگاه، همچنان امکان استفاده از آن برای نمک‌زدایی در مقیاس بزرگ وجود ندارد [۷].

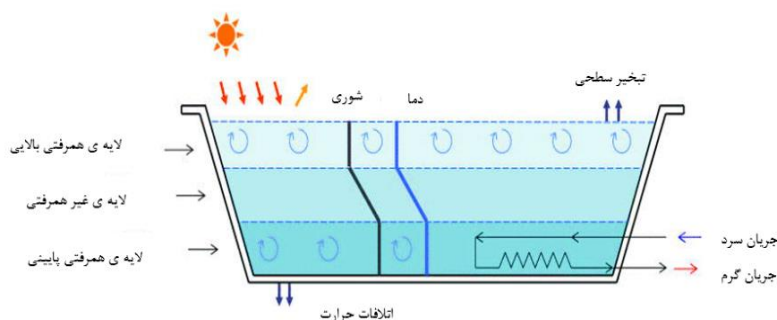
روش‌های غیر مستقیم

تالاب خورشیدی^۴

تالاب‌های خورشیدی می‌توانند به عنوان باتری (ذخیره‌ساز) های انرژی حرارتی خورشید برای نمک‌زدایی استفاده شوند. به وسیله این تالاب‌ها امکان تولید پایدار آب شیرین حتی در شب وجود دارد. یک تالاب خورشیدی با مساحت ۳ هزار متر مربع در مجاورت دریای مرده احداث شده است که توانایی تولید ۴/۳ لیتر بر روز آب شیرین را دارد [۱۰]. تالاب‌های خورشیدی بر اساس جلوگیری از ایجاد جریان همرفتی و تغییر چگالی، سبب افزایش دمای

5. Lower Convective Zone
6. Upper Convective Zone

1. Flat Plate Collector
2. Evacuated Tube Collector
3. Phase Change Material (PCM)
4. Solar Pond



شکل ۶. تالاب خورشیدی [۱۱]

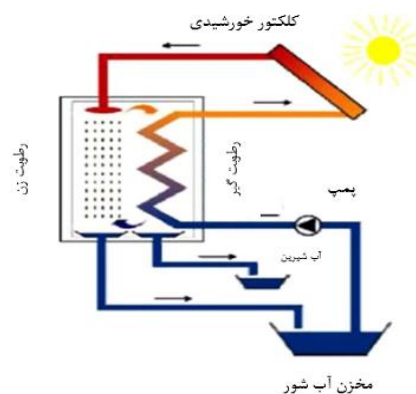
اجزای اصلی این دستگاه شامل دریافت‌کننده لوله خلأ خورشیدی، مخزن ذخیره‌ساز، پمپ سیرکولاسیون، فن و سایر تجهیزات کنترلی است [۷]. در مطالعه لاوال و همکاران [۱۴] مروری جامع بر کاربرد حرارت حاصل از منابع تجدیدپذیر (خورشیدی و زمین‌گرمایی) در نمک‌زدایی رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری خورشیدی صورت گرفته است.

فتوولتائیک - اسمز معکوس^۲

بنا بر گزارش‌ها و تحقیقات، تأسیسات اسمز معکوس که با انرژی الکتریکی خورشیدی فعالیت می‌کنند، مزیت‌های اجتماعی-اقتصادی بیشتری نسبت به انواع مرسوم اسمز معکوس دارند. در این سیستم‌ها برق تولیدی توسط سامانه خورشیدی، در پمپ‌های فشار بالای RO برای افزایش فشار آب تغذیه استفاده می‌شود. بازدهی سیستم ترکیبی PV-RO بستگی به بازدهی هر یک از اجزای آن خواهد داشت. فاکتور هزینه با بهره‌گیری از سلول‌های خورشیدی کارآمد بهینه می‌شود. از این‌رو، تحقیقات متعددی برای افزایش بازدهی، صلبیت و دوام‌آوری سلول‌های خورشیدی انجام شده است و ادامه دارد [۶]. یک شرکت اسپانیایی تحقیقاتی در زمینه توان مصرفی یک تأسیسات فتوولتائیک - اسمز معکوس با ظرفیت ۲۴۰ هزار مترمکعب بر روز انجام داده است. این تأسیسات ۵۱/۲ مگاوات توان الکتریکی مصرف می‌کند و مصرف انرژی مخصوص (مصرف انرژی به ازای یک واحد آب شیرین تولیدی) آن معادل ۴/۷۸ کیلووات ساعت بر متر مکعب است [۱۵]. سیستم‌های اسمز معکوس زیادی در سطح جهان وجود دارند که از برق خورشیدی استفاده می‌کنند. برای مثال، تأسیسات نمک‌زدایی شهر جدّه در

رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری خورشیدی^۱

نمک‌زدایی به روش رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری با استفاده از انرژی خورشیدی در پژوهش‌های متعددی در سالین اخیر مورد مطالعه قرار گرفته و ثابت شده است که این روش توانایی تولید پایدار آب شیرین با ظرفیت‌های زیاد و بازده بهینه را دارد. در این روش از دریافت‌کننده لوله خلأ به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود تا دمای آب شور تغذیه را در حد مناسبی حفظ کند. عملکرد دستگاه مشابه فرایند رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری است که در آن هوا مقدار زیادی رطوبت را در اواپراتور (رطوبت‌زن) دریافت می‌کند و در کندانسور (رطوبت‌گیر) از تقطیر بخار آب موجود در هوا، آب شیرین تولید می‌شود. حرارت دفعی از تقطیر آب در کندانسور صفحه‌ای به آب تغذیه منتقل می‌شود و دمای آن را از ۴۰ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. این آب شور پیش‌گرم‌شده باید تا دمای ورودی اواپراتور (۸۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد) به وسیله دریافت‌کننده خورشیدی حرارت داده شود [۱۳] (شکل ۷).

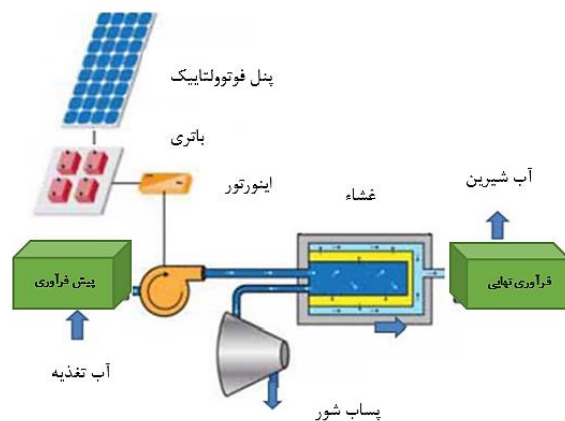


شکل ۷. دستگاه رطوبت‌زنی یا رطوبت‌گیری خورشیدی [۷]

ضمن کاهش دمای پنل‌ها و افزایش بازدهی آنها، موجب شد که مصرف انرژی سیستم نمک‌زدایی به مقدار ۲۸ درصد کاهش یابد. همچنین، شار عبوری از المان‌های غشا ۳ درصد افزایش یافت. تحقیق یادشده تأثیر مثبت افزایش دمای آب تغذیه ورودی به واحد اسمز معکوس را نشان داد. در مطالعه دیگری، بهره‌گیری از غشای آب‌دوست^۱ بهینه‌سازی شده در کنار بازیافت حرارت پنل‌ها برای گرم کردن آب تغذیه، هزینه‌های انرژی را ۴۰ درصد کاهش داده است [۶]. مونوت و همکاران از باتری برای ذخیره‌سازی انرژی در یک سیستم کارآمد مقیاس کوچک فتوولتاییک - اسمز معکوس استفاده کردند [۱۹]. نتایج پژوهش آنها بیانگر آن است که افزایش هزینه ناشی از افزودن باتری به دلیل کاهش تعداد المان‌های غشا و صرفه‌جویی ناشی از دستگاه‌های بازیافت انرژی جبران شده و مصرف انرژی مخصوص به کمتر ۳ کیلووات ساعت بر متر مکعب رسیده است. هرولد شیوه مدیریت اجزای یک سیستم فتوولتاییک - اسمز معکوس را پیشنهاد کرده است [۶]. شکل ۸ نوعی سیستم نمک‌زدایی PV-RO را نشان می‌دهد.

عربستان سعودی، اولین نوع از این تأسیسات بوده است که توانایی تولید ۱/۲ گالون بر روز آب برای تأمین آب آشامیدنی ۲۵۰ خانوار را دارد [۶]. ال سلیمانی و نایر [۱۶] گزارش دادند که برای تأسیسات اسمز معکوس با ظرفیت مشابه، به‌کارگیری برق خورشیدی نسبت به برق دیزل، اقتصادی است. در این روش قیمت آب تمام‌شده برابر با ۶/۵۲ دلار بر متر مکعب است. در صورت به‌کارگیری دیزل، این هزینه ۸/۶۸ دلار بر متر مکعب می‌شود. در اعداد گزارش شده برای مصرف انرژی مخصوص تأسیسات PV-RO تفاوت‌های زیادی از ۱/۱ تا ۱۶/۳ کیلووات ساعت بر متر مکعب مشاهده شده است. این اختلاف‌ها ناشی از تفاوت در ابعاد سیستم، نوع باتری‌ها، غلظت آب تغذیه و نوع سیستم بازیافت انرژی است [۶].

تحقیقات اندکی روی افزایش بازده سیستم ترکیبی PV-RO انجام شده است و به جای آن، بیشتر مطالعات بر افزایش بازده هر یک از سیستم‌ها به صورت جداگانه تمرکز دارند. در تحقیق خلاقانه راول و مایتی [۱۷ و ۱۸]، حرارت پنل‌های خورشیدی جذب شده و از آن برای پیش گرم کردن آب تغذیه نمک‌زدایی استفاده شد. این کار



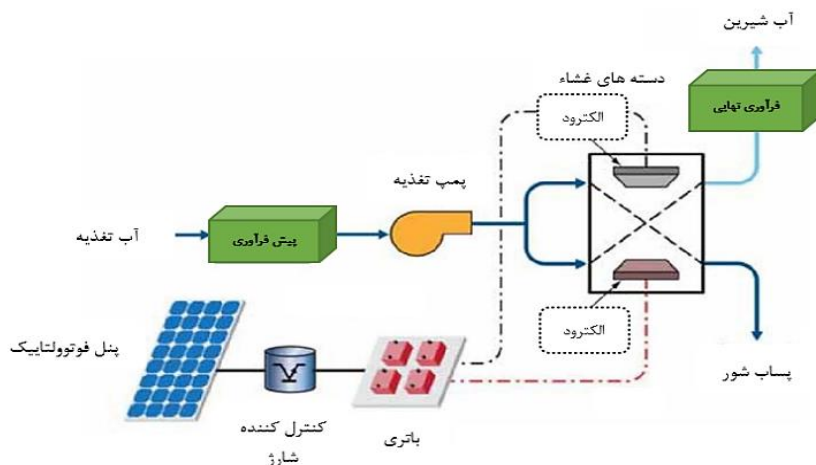
شکل ۸. سیستم نمک‌زدایی PV-RO [۲]

رساندن آن به غلظت مورد نظر است که از طریق روش ED توجیه‌پذیر نیست. در این نوع نمک‌زدایی از برق تولیدی در پنل‌های فتوولتاییک به منظور ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی مورد نیاز برای عملیات الکترودیالیز و جداسازی یون‌ها از شورآب استفاده می‌شود [۳]. شکل ۹ نوعی سیستم نمک‌زدایی PV-ED را نشان می‌دهد.

فتوولتاییک - الکترودیالیز^۲

از فناوری فتوولتاییک - الکترودیالیز برای نمک‌زدایی شورآب استفاده می‌شود و تحقیقات اندکی برای کاربرد آن در نمک‌زدایی آب دریا انجام شده است. این مسئله بیشتر ناشی از غلظت زیاد آب دریا و نیاز به مراحل متعدد برای

1. Hydrophilic
2. PV-ED



شکل ۹. سیستم نمک‌زدایی PV-ED [۳]

نتایج پژوهش آنها نشان داد افزایش دمای آب تغذیه و افزایش طول مؤثر غشا سبب افزایش جی‌او‌آر سیستم می‌شود. نوعی تأسیسات تقطیر غشایی تماس مستقیم با منبع حرارت خورشیدی در جزیره کانارا در اسپانیا برای مدت ۵ سال مورد ارزیابی قرار گرفت [۶]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مقدار تولید آب شیرین ۵ تا ۱۲۰ لیتر در روز و مصرف انرژی حرارتی مخصوص سیستم حدود ۱۴۰ تا ۳۵۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب است. کیم و همکاران [۲۳] به شبیه‌سازی تأسیسات بزرگ‌مقیاس تقطیر غشایی خورشیدی پرداختند. آنها مصرف انرژی مخصوص و حجم مخزن ذخیره مورد نیاز برای مساحت‌های مختلف دریافت‌کننده خورشیدی را بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با افزایش سطح، مصرف انرژی مخصوص کاهش می‌یابد، ولی مصرف انرژی الکتریکی به دلیل استفاده از پمپ‌های با فشار زیاد افزایش خواهد یافت. همچنین، با افزایش ظرفیت مخزن ذخیره مستقل از سطح دریافت‌کننده، میزان مصرف انرژی حرارتی مخصوص کاهش می‌یابد. بنات و همکاران [۶] به مقایسه دو تأسیسات تقطیر غشایی با ظرفیت‌های مختلف در کشور اردن پرداختند و نتیجه گرفتند که برای هر دو تأسیسات، هزینه تمام‌شده آب شیرین به نوع غشای استفاده‌شده و طول عمر تأسیسات بستگی دارد. مور و همکاران [۲۴] نتایج پژوهش خود در ارتباط با شبیه‌سازی یک تأسیسات تقطیر غشایی با گاز جاروب‌کننده با منبع انرژی حرارت خورشیدی و فتوولتاییک را گزارش کردند. هزینه آب برای این سیستم ۸۵ دلار بر مترمکعب به دست آمد. با این وجود، هزینه آب در حالت استفاده از تقطیر غشایی

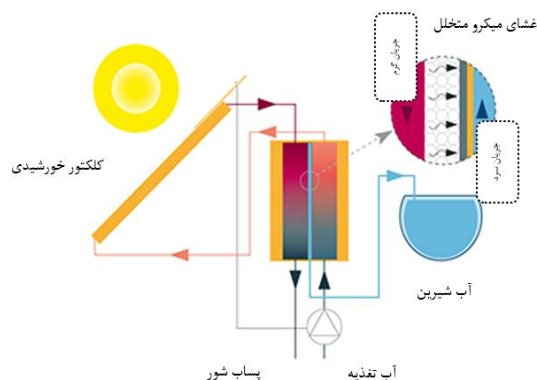
نوعی تأسیسات پایلوت PV-EDR برای نمک‌زدایی شورآب طراحی شده است که آب تغذیه را از غلظت اولیه ۳۶۰۰ ppm و دبی ۱/۶ مترمکعب بر ساعت به غلظت ۳۵۰ ppm می‌رساند. میزان بازافت آب شیرین این تأسیسات ۹۲ درصد است [۲۰]. نتایج نظری و آزمایشگاهی مطالعات نشان داده است که نمک‌زدایی به روش فتوولتاییک - الکترودیالیز تکنیکی مؤثر برای تأمین آب شیرین جوامع کوچک روستایی و دور از شبکه سراسری برق و آب در هند است [۳]. اولین سیستم کوچک‌مقیاس PV-ED را لاندستورم پیشنهاد کرد [۶]. ایشیمارو بررسی یک واحد فتوولتاییک - الکترودیالیز با ظرفیت ۲۰۰-۳۷۵ متر مکعب آب در ناکازاکی ژاپن را گزارش کرده است. بازده کلی سیستم بین ۶ تا ۸/۲ درصد است. مصرف توان سیستم از حد طراحی آن (۱/۹۲ کیلووات ساعت بر متر مکعب) کمتر است [۶].

تقطیر غشایی خورشیدی^۱

در این فناوری از انرژی حرارتی خورشید برای گرم کردن آب تغذیه استفاده می‌شود. این آب سپس در فرایند تقطیر غشایی شرکت کرده و تولید آب شیرین می‌کند. شکل ۱۰ نوعی سامانه تقطیر غشایی خورشیدی را نشان می‌دهد.

مطالعات زیادی در زمینه به‌کارگیری انرژی خورشیدی در نمک‌زدایی تقطیر غشایی انجام شده است. سامر و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای به مقایسه مدل‌های مختلف نظری بر اساس شاخص جی‌او‌آر^۲ سیستم‌های تقطیر غشایی پرداختند.

1. Solar Membrane Distillation (SMD)
2. GOR (Gain Output Ratio)



شکل ۱۰. سامانه تقطیر غشایی خورشیدی [۲۱]

دریافت‌کننده‌های خورشیدی مختلفی مانند انواع صفحه تخت، لوله‌خا، متمرکزکننده‌های سهموی خطی^۴ و نوع بشقابکی^۵ برای دریافت تابش خورشید، تبدیل آن به حرارت و سپس، انتقال حرارت به سیال عامل دریافت‌کننده به کار می‌روند [۱]. در این نوع سیستم سیال عامل خورشیدی با دمای زیاد از دریافت‌کننده خارج و به یک مبدل حرارتی (مولد بخار) وارد می‌شود تا حرارت خود را به سیال ثانویه منتقل کند و سبب تبخیر آن شود. سیال ثانویه به عنوان منبع حرارت سبب پیشرفت فرایند نمک‌زدایی MSF خواهد شد. برای محاسبه هزینه این سیستم باید هزینه‌های دریافت‌کننده‌ها، سامانه نمک‌زدایی، مبدل حرارتی، نگهداری و تعمیرات لحاظ شود.

سیستم‌های نمک‌زدایی تبخیر آبی چندمرحله‌ای خورشیدی آب شیرین را با قیمت ۱ تا ۵ دلار بر متر مکعب تولید می‌کنند. بر اساس نتایج تحقیقات، قیمت آب تمام‌شده از فناوری MSF برای آب دریا و شورآب کمتر از فناوری MED است. فرایند MSF یک روش بسیار انرژی‌بر است که آب تغذیه زیادی را طلب می‌کند. همچنین، در این روش به دلیل دمای زیاد، رسوب‌گذاری روی سطح لوله‌ها و خرابی‌های مکانیکی بارها اتفاق می‌افتد. در مقابل، این نوع تأسیسات بازده حرارتی مناسب‌تری نسبت به روش تقطیر چنداثره دارند [۱]. شکل ۱۱ نوعی سیستم تبخیر آبی چندمرحله‌ای با حرارت خورشیدی را نشان می‌دهد.

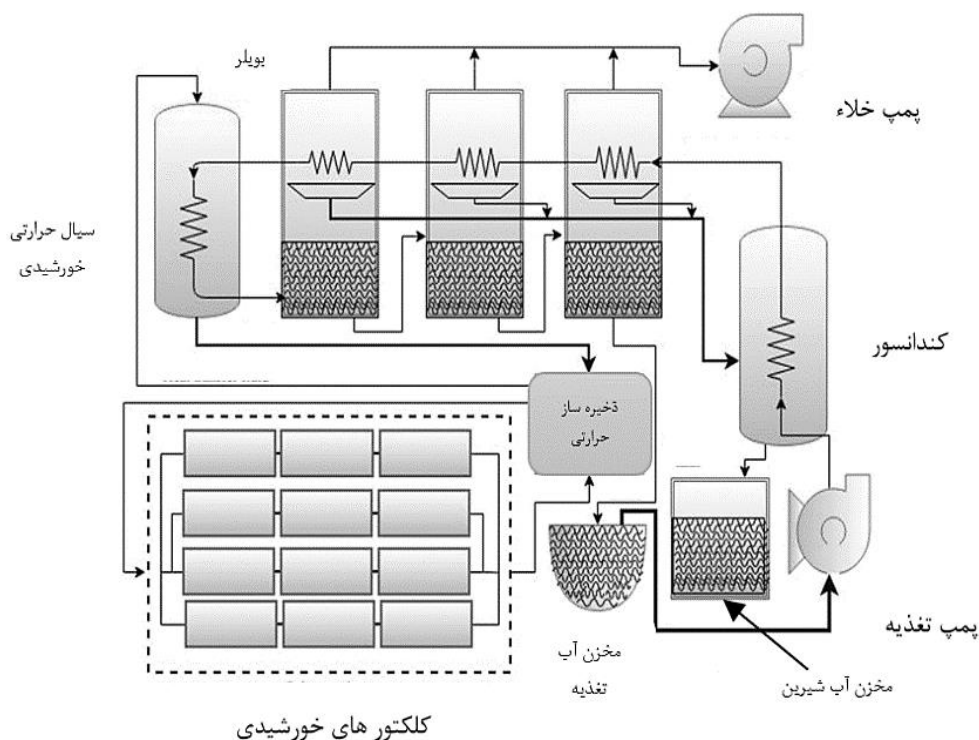
با فاصله هوایی به علت بازده بیشتر به مراتب مناسب‌تر است (۵/۱۶ دلار بر مترمکعب). کیپولینا و همکاران یک واحد تقطیر غشایی خورشیدی با فاصله هوایی را در مقیاس آزمایشگاهی توسعه دادند [۲۵]. آنها نشان دادند مصرف انرژی مخصوص به صورت خطی با افزایش دبی آب تغذیه افزایش و با افزایش دمای ورودی کاهش می‌یابد. زاراگوزا و همکاران به تحلیل عملکرد چندین مدول تجاری تقطیر غشایی در کنار انرژی خورشیدی پرداختند [۶]. مدول‌ها با دمای ورودی ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند. آنها به ارزیابی مصرف انرژی حرارتی برای شرایط مختلف عملیاتی مانند تغییر غلظت آب تغذیه، دبی آب تغذیه و دمای ورودی و خروجی پرداختند [۶]. شین و همکاران نوعی سیستم بهبودیافته نمک‌زدایی غشایی را به وسیله جاذب خورشیدی تیتانیوم/منیزیم فلئوراید بررسی کردند [۲۶]. این جاذب خورشیدی از ۵ لایه تشکیل شده است و به عنوان منبع حرارتی فرایند نمک‌زدایی عمل می‌کند. مراحل انجام پژوهش یادشده شامل ساخت جاذب خورشیدی و سپس، ترکیب آن با سیستم تقطیر غشایی تماس مستقیم بوده است. سیستم ایجادشده از جاذب خورشیدی، مدول تقطیر غشایی، پمپ سیرکولاسیون و یک چیلر برای خنک کردن آب در سمت سرد استفاده می‌کند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد در شرایط تابش ۱ سان^۱ (یک هزار وات بر متر مربع)، جاذب خورشیدی سبب می‌شود که ظرفیت جذب حرارت افزایش یابد و به دو برابر حرارت جذب‌شده در مقایسه با دریافت‌کننده‌های مرسوم برسد. اضافه کردن لایه‌های تیتانیوم سبب شده است که ظرفیت آب شیرین تولیدی تا ۱۲ درصد افزایش یابد. در شرایط محیطی، این سیستم توانایی تولید ۴/۷۸-۰/۵۱ لیتر بر متر مربع آب شیرین در روز را دارد.

تبخیر آبی چندمرحله‌ای با حرارت خورشیدی^۲

این سیستم نیازمند انرژی حرارتی خورشیدی است. انرژی حرارتی توسط یک دریافت‌کننده خورشیدی متمرکزکننده^۳ و یا غیر متمرکزکننده تأمین می‌شود و برای فرایند نمک‌زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

4. Parabolic Trough Collector
5. Dish Collector

1. Sun
2. Solar MSF
3. Concentrating Collector



شکل ۱۱. نمک‌زدایی تبخیر آبی چندمرحله‌ای با حرارت خورشیدی [۱]

محفظه با پاشش آب روی لوله‌های حاوی سیال حرارتی، آب در خارج لوله‌ها تبخیر شده و سیال داخل لوله تقطیر می‌شود. این مایع دوباره به دریافت‌کننده باز می‌گردد و سیکل ادامه می‌یابد. شکل ۱۲ چنین سیستمی را نشان می‌دهد.

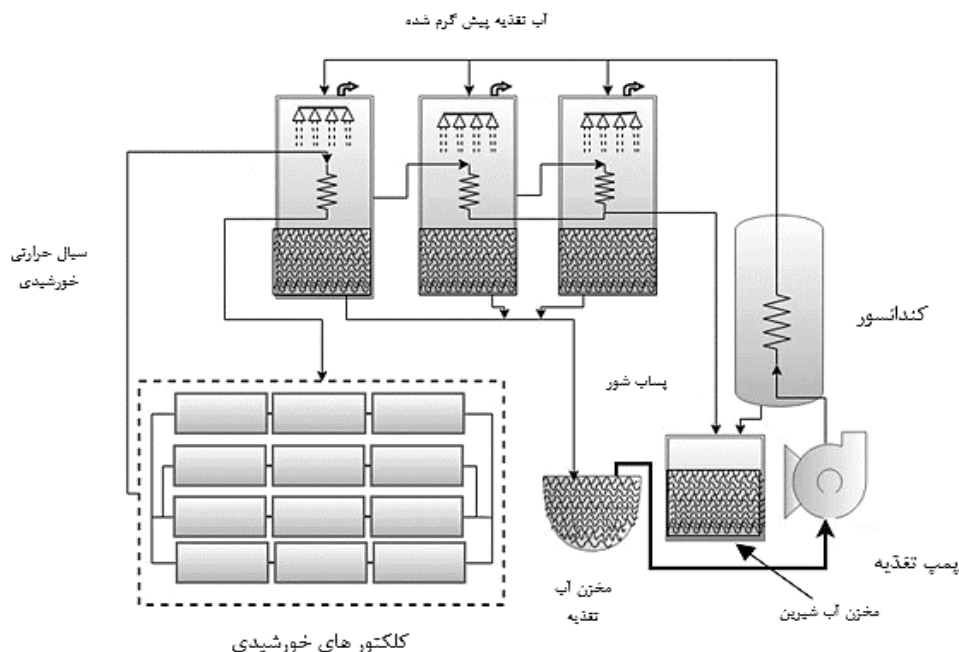
بنا بر گزارش‌ها [۲۸]، سیستم تقطیر چنداثره ترکیبی با یک تالاب خورشیدی به مساحت $0.3/0 - 0.4/0$ میلیون متر مربع، توانایی تولید 0.1 میلیون تن آب شیرین در سال را دارد. هزینه این سیستم تقریباً مشابه تأسیسات نمک‌زدایی مرسوم با این ظرفیت است. طی پژوهشی نوعی تأسیسات نمک‌زدایی MED با ظرفیت 100 متر مکعب بر روز که با انرژی خورشیدی فعالیت می‌کند، ارزیابی اقتصادی شده است [۱]. این سیستم برای برق مصرفی پمپ‌ها از دیزل استفاده می‌کند. هزینه تمام‌شده آب برای چنین تأسیساتی $8/3$ تا $9/3$ دلار بر متر مکعب است. نتایج نشان می‌دهد این تأسیسات کوچک‌مقیاس زمانی توجیه‌پذیر هستند که قیمت سوخت 10 دلار بر گالون و قیمت دریافت‌کننده خورشیدی 200 دلار بر مترمربع باشد.

مندز و همکاران طی پژوهشی نوعی سیستم تولید هم‌زمان برق و آب شیرین با منبع انرژی دودکش خورشیدی را بررسی کردند [۲۷]. در پژوهش یادشده به منظور افزایش بازده سیستم، یک سیستم نمک‌زدایی MSF اضافه شده است. همچنین، از یک سیستم ذخیره‌ساز هیدرو با توربین هیدرولیکی استفاده شده و مدل سیستم برای ۳ سناریوی مختلف (تولید فقط برق، تولید فقط آب شیرین، و تولید هم‌زمان هر دو) بررسی شده است.

تقطیر چنداثره با حرارت خورشیدی^۱

بیشتر تأسیسات نمک‌زدایی حرارتی با ظرفیت زیاد از نوع MED هستند که علت این امر، مصرف انرژی مخصوص کم و دمای عملیاتی پایین نسبت به روش MSF است [۱]. در سیستم نمک‌زدایی MED که با حرارت خورشیدی کار می‌کند، سیال عامل خورشیدی با دمای $70-80$ درجه سانتی‌گراد از دریافت‌کننده خارج شده و سپس، به محفظه (افکت^۲) اول تأسیسات نمک‌زدایی وارد می‌شود. در این

1. Solar MED
2. Effect



شکل ۱۲. نمک‌زدایی تقطیر چنداتره با حرارت خورشیدی [۱]

همچنین، از یک پمپ پیستونی محوری برای بازیافت انرژی استفاده شده است. این سیستم توانایی عملکرد پایدار در شرایط متناوب تابش خورشیدی را دارد. هزینه فرآوری آب در این سیستم بیش از نمک‌زدایی فتوولتائیک-اسمز معکوس است. انتظار می‌رود که با تجاری‌سازی این فرایند هزینه‌ها به دو سوم کاهش یابد [۳]. شکل ۱۳ شمایی از فرایند RO-ORC را نشان می‌دهد.

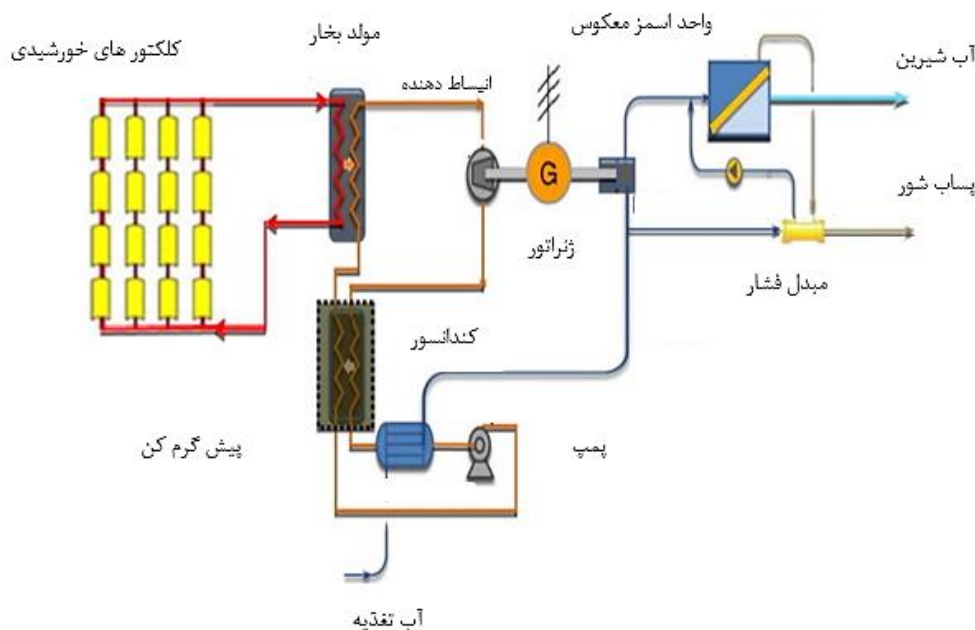
مطالعات نظری متعددی روی سیکل RO-ORC از منظر پارامترهایی همچون سیال عامل سیکل رانکین، نوع دریافت‌کننده خورشیدی و ذخیره‌ساز حرارتی انجام شده است [۳]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد مستقل از هزینه‌های زیاد این روش، میزان انتشار کربن دی‌اکسید بسیار پایین است [۲۹]. نوع بازیافت‌کننده و سیال سیکل رانکین به یکدیگر وابسته‌اند و بر عملکرد سیستم نمک‌زدایی تأثیر می‌گذارند. همچنین، تولید پایدار و پیوسته آب شیرین از طریق افزودن ذخیره‌ساز حرارتی به این فرایند محقق می‌شود [۳].

اسمز معکوس با حرارت خورشیدی^۱

در سیستم‌های RO با سیکل رانکین آلی خورشیدی (ORC)^۲، تابش خورشید توسط دریافت‌کننده‌های خورشیدی (لوله خلاً، سهموی خطی و...) جذب و به سیال دیگری (معمولاً آب با مشتقات آن) انتقال داده می‌شود. حرارت این سیال سبب تبخیر و فوق داغ شدن سیال عامل سیکل رانکین (سیال ثانویه) در یک مبدل حرارتی می‌شود. بخار حاصل در توربین سبب تولید انرژی مکانیکی مورد نیاز برای چرخش پمپ‌های فشار بالای فرایند اسمز معکوس می‌شود. در این سیستم معمولاً از تجهیزات بازیافت انرژی استفاده می‌شود. فرایندهای اصلی ترمودینامیکی سیکل یادشده شامل:

۱. تبخیر و فوق داغ شدن سیال ثانویه در فشار ثابت توسط حرارت دریافتی از سیال خورشیدی؛
۲. انبساط هم‌دمای سیال ثانویه در توربین، تولید انرژی مکانیکی و انتقال به پمپ‌های RO؛
۳. تقطیر سیال ثانویه در کندانسور در فشار ثابت؛
۴. افزایش فشار سیال ثانویه در پمپ در دمای ثابت است.

1. Solar Thermal RO
2. Organic Rankine Cycle



شکل ۱۳. نمک‌زدایی RO-ORC [۳]

می‌کند. همچنین، ترکیب راکتور حرارتی هسته‌ای با نمک‌زدایی فشرده‌سازی حرارتی بخار تحلیل شده است [۷]. میسرا در پژوهشی نقش نمک‌زدایی هسته‌ای برای تأمین آب آشامیدنی مناطق گرم و خشک بررسی را کرده است [۳۱]. پژوهش یادشده امکان ترکیب چند راکتور هسته‌ای با فناوری‌های مختلف نمک‌زدایی حرارتی را گزارش کرده است [۷]. در مطالعات اخیر امکان افزودن فناوری‌های نمک‌زدایی به نیروگاه‌های هسته‌ای موجود مورد توجه قرار گرفته است. در یک مطالعه، امکان‌سنجی ترکیب فناوری اسمز معکوس با یک نیروگاه هسته‌ای صورت گرفت [۳۲]. در مصر، از مدل فرضی پیشرفته برای تعیین پارامترهای تأثیرگذار در فرایند اسمز معکوس در ترکیب با یک راکتور هسته‌ای مشخص بهره گرفته شد [۳۳]. هزینه تمام‌شده آب شیرین تولیدی از نمک‌زدایی هسته‌ای بنا بر نوع راکتور و نوع فرایند نمک‌زدایی حدود ۰/۴ تا ۱/۸ دلار بر متر مکعب است [۷]. شکل ۱۴ نوعی سیستم ترکیبی RO-MED با منبع انرژی هسته‌ای را نشان می‌دهد.

نمک‌زدایی با انرژی هسته‌ای

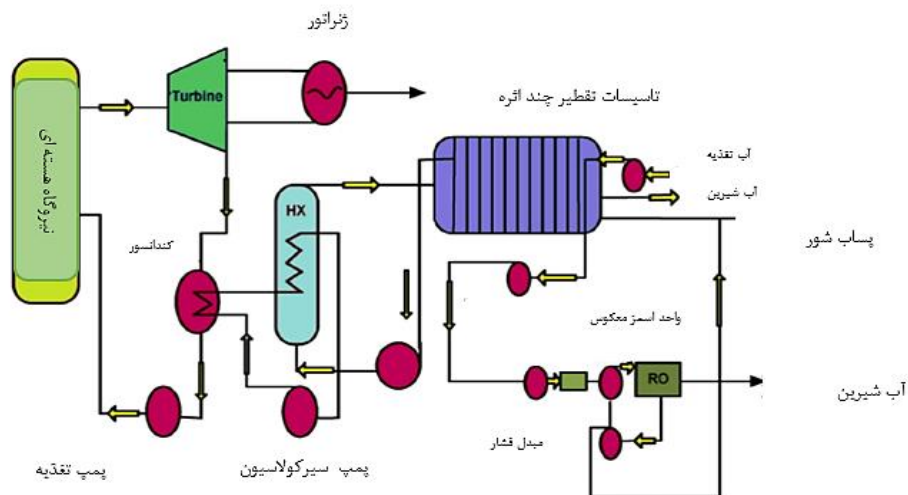
سازمان نمک‌زدایی بین‌المللی^۱ برنامه‌ریزی کرده است که ظرفیت نمک‌زدایی در جهان تا سال ۲۰۲۰ به ۱۲۰ میلیون متر مکعب در روز برسد [۷]. به همین منظور، انرژی هسته‌ای فرصت مناسبی را برای استفاده در سامانه‌های نمک‌زدایی مهیا می‌کند. هیچ‌گونه محدودیتی برای استفاده از راکتورهای هسته‌ای برای فرایند نمک‌زدایی وجود ندارد و هر نوع راکتور هسته‌ای می‌تواند برای نمک‌زدایی استفاده شود. در این سیستم از حرارت راکتور هسته‌ای و برق تولیدی نیروگاه استفاده می‌شود. هزینه نمک‌زدایی با انرژی هسته‌ای تقریباً با نمک‌زدایی فسیلی برابر است. اولین واحد نمک‌زدایی RO-MSF با انرژی هسته‌ای به عنوان منبع انرژی در هند ساخته شده است [۳۰]. این تأسیسات ظرفیت تولید ۶۳۰۰ متر مکعب آب شیرین در روز را دارد. جدول ۲ تعدادی از سایت‌های نمک‌زدایی هسته‌ای پیشرو در جهان را نشان می‌دهد [۷].

ترکیب انرژی هسته‌ای با واحدهای نمک‌زدایی با مقیاس کوچک به صورت گسترده مطالعه شده است. یک پیکربندی نوین از ترکیب یک راکتور حرارتی هسته‌ای^۲ با نمک‌زدایی دما پایین MED به همراه RO استفاده

1. International Desalination Association (IDA)
2. Nuclear Heating Reactor (NHR)

جدول ۲. تأسیسات نمک‌زدایی هسته‌ای در جهان [۷]

نام نیروگاه	مکان نیروگاه	ظرفیت برق (MW)	ظرفیت آب شیرین (m ³ /d)	فناوری نمک‌زدایی / راکتور
شوچنکو	قزاقستان	۱۵۰	۱۴۵۰۰۰-۸۰۰۰۰	LMFR-MED,MSF
ایکاتا- ۲و۱	ژاپن	۵۶۶	۲۰۰۰	PWR-MSF
اوهی- ۲و۱	ژاپن	۲×۱۵	۳۹۰۰	PWR-MSF
گنکای-۴	ژاپن	۱۱۸۰	۱۰۰۰	PWR-RO
ان دی دی پی	هند	۱۷۰	۶۳۰۰	PHWR-MSF,RO
دیابلو کانیون	آمریکا	۲×۱۱۰۰	۲۱۸۰	PWR-RO



شکل ۱۴. سیستم ترکیبی RO-MED با انرژی هسته‌ای [۷]

به حساب می‌آید. تأسیسات نمک‌زدایی اسمز معکوس که از انرژی بادی استفاده می‌کنند، به صورت مستقل و یا متصل به شبکه برق سراسری به کار می‌روند. با اینکه سیستم اسمز معکوس - بادی منفرد^۱ بدون باتری به عنوان یک راه حل اقتصادی برای تأمین آب شیرین معرفی شده است، نبود باتری و نوسانات سرعت باد سبب کاهش تولید و یا قطع آن در مواقع عدم وزش باد خواهد شد. بهره‌گیری از ذخیره‌ساز باتری و دیزل ژنراتور پشتیبان این مشکل را رفع می‌کند و تأسیسات اسمز معکوس/دیزل/بادی^۲ امکان تولید برق و آب شیرین حتی در غیاب باد را در اختیار می‌گذارد [۳۴]. طی مطالعه‌ای وزا و همکاران، نوعی تأسیسات آزمایشگاهی الکترودیالیز - بادی پیشنهاد کردند [۳۴]. جدول ۳ تعدادی از تأسیسات عملیاتی نمک‌زدایی با انرژی باد در نقاط مختلف جهان را نشان می‌دهد.

در این نوع سیستم، بخشی از برق تولیدی نیروگاه هسته‌ای برای فرایند RO استفاده می‌شود. همچنین، حرارت دفعی کندانسور سیکل توان هسته‌ای در یک مبدل حرارتی بخار مورد نیاز برای فرایند تقطیر چنداثره را تولید می‌کند. استفاده از دستگاه‌های بازیافت انرژی در خروجی تأسیسات اسمز معکوس، سبب کاهش مصرف انرژی در فرایند نمک‌زدایی می‌شود.

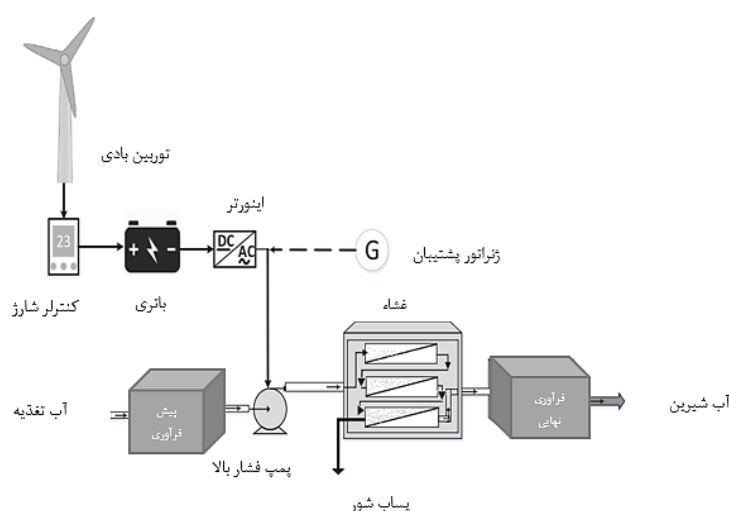
نمک‌زدایی با انرژی بادی

انرژی بادی پس از انرژی خورشیدی، پراستفاده‌ترین انرژی تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز نمک‌زدایی است. از انرژی الکتریکی و مکانیکی تولیدی مزارع/توربین‌های بادی برای تأمین توان مورد نیاز تأسیسات نمک‌زدایی استفاده می‌شود. انرژی بادی فناوری کارآمد و تجاری است و فرصتی نویدبخش برای نمک‌زدایی به‌خصوص در مناطق ساحلی که از پتانسیل باد در دسترس بیشتری برخوردارند،

1. Standalone Wind-RO
2. Wind-Diesel-RO

جدول ۳. تأسیسات فعال اسمز معکوس - بادی در جهان [۳۴]

مکان تأسیسات	سال راه‌اندازی	نوع آب تغذیه	ظرفیت شیرین‌سازی (m ³ /d)	برق بادی دریافتی (kW)	مصرف انرژی مخصوص (kWh/m ³)
اسپانیا	۱۹۸۴	آب دریا، شورآب	۲۰۰	۴۲	۵
اسپانیا	۲۰۰۲	آب دریا	۵۰۰۰	۲,۶۴	۲,۹
آلمان	۲۰۰۶	آب دریا، شورآب	آب دریا (۱۷۵-۱۴۰۰) شورآب (۳۵۰-۲۵۰۰)	۲۰۰	۲,۵-۲
اسپانیا	۲۰۱۵	آب دریا	۱۸	۱۵	۸,۴



شکل ۱۵. سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس - بادی [۳۴]

نوعی سیستم اسمز معکوس - بادی از یک توربین و ژنراتور الکتریکی، کنترل‌کننده شارژ^۱، بانک باتری، اینورتر^۲ و یک واحد RO تشکیل شده است. عملکرد این سیستم با تولید توان در توربین بادی آغاز می‌شود. الکتریسیته تولید شده باتری را شارژ می‌کند. اینورتر جریان مستقیم باتری را به متناوب تبدیل می‌کند و این جریان برای حرکت پمپ‌های فشار بالای فرایند RO و افزایش فشار آب تغذیه استفاده می‌شود. وجود ذخیره‌ساز سبب پایداری بیشتر سیستم ترکیبی شده و برق ذخیره شده برای تولید آب در زمان‌هایی که انرژی بادی وجود ندارد یا کمتر از تقاضا است، استفاده می‌شود. همچنین، کنترل‌کننده شارژ با تنظیم جریان شارژ باتری از شارژ بیش از حد و خرابی آن جلوگیری می‌کند. در این سیستم می‌توان از یک

پارک و همکاران بازدهی و هزینه تولید آب شیرین از اتصال تأسیسات اسمز معکوس به تعدادی توربین بادی کوچک در غنا را بررسی کردند [۳۵]. نتایج پژوهش آنها نشان داد استفاده از توربین بادی ۱ کیلووات اقتصادی‌ترین و کارآمدترین ترکیب است. در مطالعه‌ای دیگر رودریگز، تأثیر عوامل مختلف مانند شرایط آب‌وهوایی، طرح سایت، ظرفیت توربین، غلظت آب دریا، شرایط عملیاتی، ظرفیت تولید و هزینه RO و توربین‌های بادی بر قیمت تمام‌شده

1. Charge Controller
2. Inverter

هیدرولیکی به پمپ نمک‌زدایی منتقل می‌شود. در این سیستم از سامانه رهگیری بیشینه آب تولیدی و توان استفاده شده است تا فشار عملیاتی پمپ‌ها را تنظیم کند. آنها نتیجه گرفتند که به کارگیری سیستم رهگیری بیشینه آب تولیدی سبب افزایش ۱۰ درصد خروجی سیستم خواهد شد. در مطالعه سوبیلا و همکاران، ارزیابی فنی و اقتصادی یک سیستم RO آب دریا با ظرفیت اسمی ۱۰ هزار متر مکعب بر روز، مبتنی بر انرژی باد صورت گرفته است [۳۹]. در پژوهش یادشده سه پیکربندی مختلف توربین باد و باتری، توربین باد و دیزل ژنراتور و توربین باد و فتوولتاییک ارزیابی شده است. برای هر حالت، دو نوع سیستم اسمز معکوس استفاده شده: پمپ فشار بالا با عملکرد متغیر و سیستم نمک‌زدایی مدولار و برای هر شرایط، انرژی ائتلافی، زمان عملیات، میزان آب تولیدی و قیمت آب محاسبه شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد قیمت آب تولیدی در بازه ۱-۱/۳۵ یورو به ازای متر مکعب است و زمان عملکرد سیستم تحت انرژی تجدیدپذیر، به ۷۵ درصد طول سال برای پلنت مدولار می‌رسد. مقاله دیگری به بررسی ایده ترکیب سیستم اسمز معکوس با توربین بادی محور افقی از طریق انتقال هیدرولیکی می‌پردازد که از این طریق مراحل تبدیل انرژی را کاهش می‌دهد [۴۰]. به این منظور، دو پیکربندی (استفاده از شیر متغیر و بازیافت فشار) برای مدل در نظر گرفته شده و تأثیر مکانیزم تعامل بین روتور توربین، پمپ آب و سیستم کنترل بررسی شده است. میزان مصرف انرژی مخصوص برای حالت شیر متغیر برابر با ۶/۵-۱۲ و برای استفاده از مبدل فشار ۱-۲ کیلووات ساعت بر متر مکعب خواهد بود. پژوهش چوکساروف به مسئله تأمین آب در منطقه کریمای شمالی می‌پردازد که با مشکل کمبود آب روبه‌روست [۴۱]. در پژوهش یادشده پس از مرور سیستم‌های مختلف، یک سیستم نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی بادی فراساحل پیشنهاد شده و متغیرهای مهم طراحی سیستم ترکیبی معرفی شده است.

نمک‌زدایی با انرژی زمین‌گرمایی

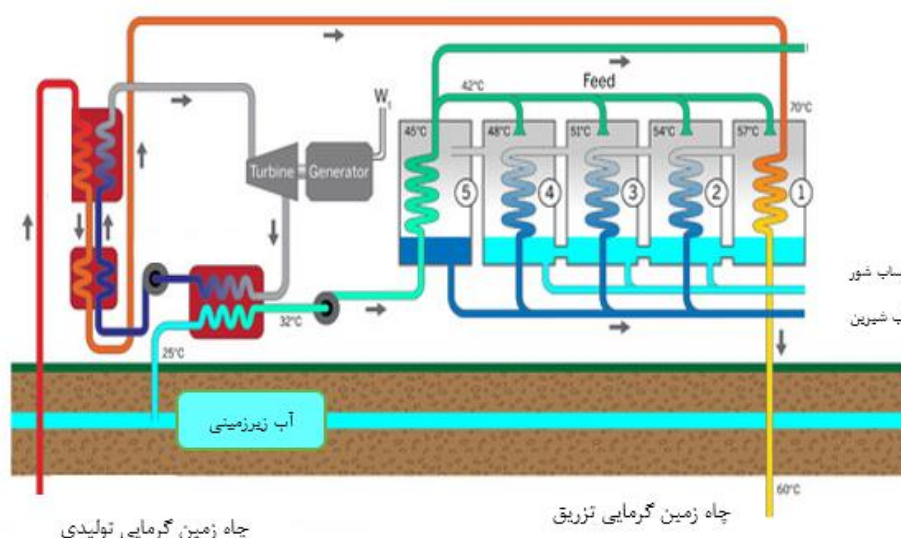
انرژی زمین‌گرمایی از گزینه‌های مهم منابع انرژی تجدیدپذیر پایدار و سازگار با محیط زیست است. بهره‌گیری از این انرژی متضمن استفاده از انرژی حرارتی آب گرم و یا

آب تولیدی را محاسبه کرده است [۳۶]. پنانته و همکاران نوعی سیستم ترکیبی نمک‌زدایی بادی را پیشنهاد کردند که با ظرفیت متغیر عمل می‌کند و ظرفیت نامی تولید آن یک هزار متر مکعب بر روز است [۷]. سگورادو و همکاران تلاش کردند با کمک سیستم‌های ترکیبی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در جزیره سینت وینسنت^۱ را افزایش دهند. نتایج پژوهش آنها مؤید آن بود که برای تولید آب شیرین جزیره باید از تأسیسات کوچک اسمز معکوس - بادی استفاده شود. همچنین، با افزایش ظرفیت مخازن ذخیره، امکان افزایش ظرفیت انرژی بادی وجود دارد [۷]. گوچک و همکاران به ارزیابی فنی و اقتصادی تولید آب شیرین با نوعی توربین بادی کوچک‌مقیاس و فناوری RO پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هزینه تولید آب از توربین بادی منفرد حدود ۲۹۶۲ تا ۶۴۵۷ دلار به ازای هر متر مکعب بر اساس ظرفیت توربین متغیر است (۶ کیلووات تا ۳۰ کیلووات). همچنین، با استفاده از توربین ۳۰ کیلووات، ۸۰ تن در سال از انتشار کربن دی‌اکسید کاسته می‌شود [۷]. باردیس و همکاران طی پژوهشی به بررسی تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و آب مصرفی و انرژی مورد نیاز جزیره لپسی در یونان پرداختند [۳۷]. سیستم بررسی‌شده از انرژی باد به عنوان منبع انرژی برای نمک‌زدایی استفاده می‌کند. نتایج بیانگر آن است که قابلیت اطمینان در تأمین آب شهری بیش از ۹۹/۹۹ درصد طی بازه مدل‌سازی است (طی جولای تا سپتامبر، این مقدار به ۹۵ درصد می‌رسد که علت آن، کاهش سرعت باد در این دوره است). همچنین، قابلیت اطمینان برای تأمین آب کشاورزی حدود ۹۰ درصد است. سیستم بررسی‌شده توانایی تأمین یک سوم انرژی الکتریکی جزیره را دارد و این مقدار با افزایش تعداد و سایز توربین‌ها افزایش می‌یابد. از نظر اقتصادی، سیستم در قیمت آب ۰/۹۶۵ دلار بر متر مکعب توجیه‌پذیر است که در مقایسه با واردات آب با قیمت ۱۲/۷۷ دلار کاملاً به‌صرفه است. در مطالعه جواد و همکاران نوعی سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس با توربین بادی استاتیکی معرفی شده است که توانایی کنترل میزان آب تولیدی را در شرایط مختلف محیطی دارد [۳۸]. در سیستم یادشده انرژی مکانیکی توربین به طور مستقیم و از طریق اتصال

1. Saint Vincent

هزینه‌های زیاد احداث نیروگاه و محدودیت تعداد مکان‌های فعال زمین‌گرمایی، از جمله نواقص بهره‌گیری از این انرژی است. همه این موارد سبب شده است که انرژی زمین‌گرمایی به عنوان گزینه مناسبی برای استفاده در فرایندهای انرژی بر مانند نمک‌زدایی آب مطرح شود [۳]. شکل ۱۶ نوعی تأسیسات نمک‌زدایی تقطیر چنداثره را که با حرارت زمین‌گرمایی فعالیت می‌کند، نشان می‌دهد.

بخار تولیدی از دمای بالای لایه‌های زیرین پوسته زمین است. این انرژی در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی و جذر و مدی مزیت‌های متعددی دارد. انرژی زمین‌گرمایی مستقل از شرایط آب‌وهوایی است، از این رو منبع انرژی پایدار است که میزان حرارتی ثابتی را تحویل می‌دهد. همچنین، سیستم‌های زمین‌گرمایی معمولاً هزینه‌های عملیاتی اندکی را تحمیل می‌کنند. از سوی دیگر،



شکل ۱۶. تأسیسات نمک‌زدایی و تولید برق با حرارت زمین‌گرمایی [۴۲]

جدول ۴. ظرفیت نصب‌شده جهانی نمک‌زدایی با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی [3]

مکان	فناوری نمک‌زدایی	نوع آب تغذیه	ظرفیت (m ³ /d)
مکزیک	MED & MSF	آب دریا	۱
یونان	MED	شورآب	۸۰
تونس	HDH	آب دریا	اطلاعات موجود نیست
آمریکا	MED/VTE	آب دریا	۱۸,۹
آمریکا	ED/VTE	آب دریا	۷۹,۵

اهداف گرمایش منطقه‌ای^۱، ایجاد سرمایش، خشک‌سازی، کشاورزی و نمک‌زدایی استفاده می‌شود [۳]. جدول ۴ تأسیسات نمک‌زدایی نصب‌شده در جهان با منبع انرژی زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای از حرارت زمین‌گرمایی برای تقطیر غشایی نوع خلأ برای سه نوع مختلف غشا استفاده شد و مصرف انرژی مخصوص فرایند با توجه به میزان تخلخل غشاها بررسی شد [۴۳]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد برای این

انرژی زمین‌گرمایی بر اساس انتالپی (دمای مخزن زمین‌گرمایی) به سه دسته انتالپی کم، انتالپی متوسط و انتالپی بالا تقسیم می‌شود. در منابع انتالپی بالا، بخار فوق داغ خروجی از چاه مستقیم برای تولید توان در توربین بخار استفاده می‌شود. در نوع انتالپی متوسط، سیال زمین‌گرمایی در یک مبدل حرارتی سبب تبخیر یک سیال ثانویه می‌شود و بخار حاصل در سیکل رانکین آلی توان الکتریکی تولید می‌کند. همچنین، از منابع دما پایین برای

سیستم یک مقدار بهینه دبی آب تغذیه وجود دارد و غشای با ۷۶/۵ درصد تخلخل بیشترین مقدار شار آب شیرین را ایجاد می‌کند. نوعی مدل ریاضی برای تعیین میزان آب شیرین تولیدی در یک تأسیسات نمک‌زدایی با حرارت زمین‌گرمایی توسعه داده شد [۳]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد حرارت‌دهی به آب دریا پایین‌تر از نقطه جوش آن سبب تولید مقادیر زیادی از بخار در فشار محیطی می‌شود که از تقطیر بخار در کندانسور آب شیرین تولید می‌شود. تحقیقات نشان داده است انرژی زمین‌گرمایی برای حرارت دادن به آب دریا در بازه ۱۱۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و تولید آب شیرین به قیمت ۰/۵ دلار بر متر مکعب مناسب است [۴۴]. در پژوهشی به ارزیابی فنی و اقتصادی به‌کارگیری انرژی زمین‌گرمایی برای تولید آب شیرین از فناوری‌های MED و RO پرداخته شده است [۳]. نتایج پژوهش یادشده بیانگر آن است که استفاده از نمک‌زدایی اسمز معکوس در این روش برای کشورهای حاشیه خلیج فارس اقتصادی‌تر است. تحقیق دیگری برای استفاده از منبع انرژی زمین‌گرمایی دما پایین با تأسیسات MED انجام شد [۴۵]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد استفاده از انرژی زمین‌گرمایی در مقایسه با حرارت خورشیدی برای این نوع نمک‌زدایی مناسب‌تر است. علاوه بر این، شار حرارتی ثابت و پیوسته ناشی از انرژی زمین‌گرمایی سبب تولید بیش از یک هزار متر مکعب آب در روز شده است که در شرایط نمک‌زدایی خورشیدی محقق نخواهد شد. یک ایده خلاقانه در ترکیب انرژی زمین‌گرمایی و نمک‌زدایی، بهره‌گیری از حرارت چاه‌های نفتی و گازی رهاشده است. این چاه‌ها به عنوان منبع حرارتی فرایند نمک‌زدایی استفاده شده و هزینه‌های تولید آب شیرین را به دلیل عدم نیاز به حفاری چاه جدید کاهش می‌دهند. مطالعه‌ای در این زمینه نشان داد استفاده از این روش برای یک تأسیسات تقطیر چنداثره سبب تولید ۵۶۵ متر مکعب آب در روز می‌شود [۴۶]. در پژوهش دیگری از یک شبیه‌سازی کامپیوتری برای تخمین میزان آب تولیدی بر اثر کاربرد انرژی زمین‌گرمایی در فرایند نمک‌زدایی رطوبت زنی/گیری استفاده شد [۴۷]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد افزایش دمای ورودی منبع زمین‌گرمایی و افزایش اختلاف دما در طول کندانسور سبب بهبود میزان تولید آب سیستم می‌شود. در مطالعه جدیدی نمونه اولیه یک واحد نمک‌زدایی تقطیر تبخیری-هوایی

۱) AEC) که از حرارت زمین‌گرمایی با دمای ۶۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌کند، بررسی شده است [۳]. سیستم یادشده انرژی نسبتاً زیادی مصرف می‌کند و با افزایش سرعت باد و دبی جرمی سیال گرم، عملکرد فرایند نمک‌زدایی کاهش می‌یابد. به‌کارگیری حرارت زمین‌گرمایی با فرایندهای RO و ORC در مطالعات پیشین ارزیابی شده است [۳]. مروری بر مطالعات انجام‌شده در به‌کارگیری انرژی چاه‌های نفتی برای نمک‌زدایی در ایران و آمریکا و بررسی پتانسیل چاه‌های نفتی در کشور لهستان (بیش از ۲ هزار چاه زمین‌گرمایی با شار حرارتی مناسب) در مطالعه تایزر و همکاران انجام شده است [۴۸]. یارقلی و همکاران از ترکیب نوعی سیکل توان کربن دی‌اکسید^۲ و گاز طبیعی مایع (LNG) و استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به عنوان منبع حرارت برای عملکرد تأسیسات نمک‌زدایی اسمز معکوس استفاده کردند [۴۹]. پس از ایجاد مدل و روابط ترمودینامیکی، بررسی انرژی پیشرفته روی اجزای سیکل صورت گرفته است. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد بیشترین بازده انرژی مربوط به ژنراتورها، کمترین بازده انرژی مربوط به هیتر معادل ۱۳/۹۱ درصد و کندانسور بیشترین میزان تخریب انرژی (۹۵۲ کیلووات) است. در مطالعه‌ای دیگر نوعی سیستم تولید هم‌زمان^۳ آب شیرین و هیدروژن با انرژی زمین‌گرمایی بررسی شده است [۵۰]. تأسیسات نمک‌زدایی از نوع رطوبت زنی/گیری است و برای تولید هیدروژن از الکترولیز غشای تبادل پروتون^۴ (PEME) استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد در بهینه‌ترین حالت، بازده انرژی سیستم برابر با ۲۲/۴۹ درصد، قیمت آب برابر با ۲/۴۹ دلار بر متر مکعب و قیمت هیدروژن برابر با ۷/۳۷ دلار بر کیلوگرم خواهد بود. انصاری و همکاران نوعی سیستم تولید هم‌زمان نوین را پیشنهاد کردند [۵۱]. سیستم بررسی شده از یک منبع زمین‌گرمایی با دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌کند و آب شیرین، هیدروژن، برق، گرمایش و سرمایش تولید می‌کند. کلمنار و همکاران فرصت‌های استفاده از منابع مختلف حرارتی (متمرکزکننده خورشیدی سهموی خطی، حرارت زمین‌گرمایی و پمپ حرارتی) برای نمک‌زدایی MED با

1. Aero-évapo-condensation

2. OCC

3. Multigeneration system

4. Proton exchange membrane electrolysis

ظرفیت ۹ هزار متر مکعب بر روز را بررسی کردند [۵۲]. نتایج پژوهش یادشده مؤید آن است که نیاز حرارتی در ۷۶ درصد طول سال توسط منبع خورشیدی و زمین‌گرایی (در عمق ۴۹۰ متر) تأمین می‌شود. همچنین، در صورت حفر چاه ۷۹۰ متری تمام نیاز حرارتی (آب ۷۰ درجه سانتی‌گراد) برای نم‌زدایی از طریق منبع زمین‌گرایی تأمین خواهد شد. استفاده از متمرکزکننده خورشیدی به صورت منفرد فقط ۹ درصد تقاضای طول سال را تأمین می‌کند که با افزودن پمپ حرارتی جذب دوگانه^۱ (DAHP) به سیستم، طول دوره کاری به ۲۹ درصد می‌رسد. طی پژوهشی نوعی سیستم نم‌زدایی اسمز معکوس با مبدل فشار که برق خود را از نیروگاه زمین‌گرایی بخار خشک^۲ دریافت می‌کند، تحلیل شد [۵۳]. در پژوهش یادشده از نرم‌افزار رزا^۳ برای مدل‌سازی تأسیسات RO و از نرم‌افزار هومر^۴ برای مدل‌سازی نیروگاه و ترکیب آن با تأسیسات نم‌زدایی استفاده شد.

نم‌زدایی با انرژی‌های اقیانوسی

انرژی‌های اقیانوسی^۵ به انواع مختلفی از انرژی‌ها گفته می‌شود که منبع و منشأ آنها آب اقیانوس‌ها و دریاها است. این انرژی‌ها شامل انرژی جنبشی جذر و مد و امواج و انرژی قابل استحصال از اختلاف غلظت آب است. در مقایسه با انرژی‌های خورشیدی و بادی که ماهیت مقطعی دارند، این نوع انرژی به صورت نسبتاً پیوسته وجود دارد و چگالی انرژی آن نیز بالاست. از این‌رو، منبع انرژی نویدبخشی برای آینده به حساب می‌آید. شناخته‌شده‌ترین انواع انرژی‌های اقیانوسی، نوع جذر و مد و امواج است که معمولاً توسط مبدل‌هایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۳]. در ادامه، به انواع انرژی‌های اقیانوسی که در نم‌زدایی آب به کار می‌روند، پرداخته شده است.

انرژی امواج^۶

کاربرد انرژی امواج در حال توسعه است و در عین حال، هزینه سرمایه‌گذاری زیاد آن چالشی بر سر راه همه‌گیری آن است. استفاده پایدار از این انرژی مستلزم کاهش هزینه

مطالعه دیویس (۲۰۰۵) به منظور ترکیب انرژی امواج با نم‌زدایی انجام شده است [۷]. نتایج پژوهش ایشان نشان داد در سواحل آفتابی و خشک، استفاده از تأسیسات نم‌زدایی که با برق تولیدی از امواج کار می‌کند، می‌تواند به طرز بهینه‌ای آب مورد نیاز کشاورزی منطقه‌ای به عرض ۰/۸ کیلومتر را تأمین کند. برای چنین اقدامی نیاز به امواج با حداقل ۱ متر طول است. استفاده از انرژی امواج به منظور نم‌زدایی تا کنون در حد آزمایشگاهی باقی مانده است. مهم‌ترین نقیصه استفاده از انرژی امواج، متغیر بودن در زمان است که چالشی بر سر پایداری در تولید آب است [۷]. نوعی تأسیسات پایلوت نم‌زدایی که از انرژی امواج استفاده می‌کند، در جزیره گاردن در استرالیا نصب شده و ستو^۷ نام دارد [۵۴]. سیستم نوین مطرح‌شده از تعداد زیادی شناور استفاده می‌کند که با استخراج انرژی الکتریکی از امواج و انتقال آن به پمپ‌های فشار بالا، سبب تولید آب شیرین در تأسیسات نم‌زدایی می‌شوند. ظرفیت تولید این سیستم ۱۵۰ متر مکعب بر روز آب شیرین است.

اولین تأسیسات تجاری انرژی امواج که به شبکه برق متصل شده در استرالیا نصب شده است [۵۵]. برق تولیدی این واحد برای فرایند نم‌زدایی استفاده شده است. با استفاده از مبدل‌های دی.ای.آی.ام^۸ (DEIM)، تولید برق به میزان ۷ کیلووات بر متر از انرژی امواج در جزیره پانتلریا در ایتالیا محقق شده است. با این کار از مصرف دیزل (۱۳۹۱ تن در سال) و انتشار کربن دی‌اکسید (۴۴۰۶ تن در سال) جلوگیری می‌شود. سالتر (۲۰۱۰) درباره مشخصات مبدل‌های انرژی امواج (ساختار و انرژی مورد نیاز) پژوهشی انجام داده است [۷]. در پژوهش دشتپور و همکاران، نوعی سیستم اسمز معکوس عمق دریا^۹ با هدف تولید آب شیرین و اجتناب از انتشار گازهای گلخانه‌ای طراحی شد [۷]. در مقاله لیجون و همکاران

1. Dual Absorption Heat Pump (DAHP)
2. Dry Steam Geothermal Power Plant
3. ROSA Software
4. HOMER
5. Ocean Energy
6. Wave Energy

7. CETO
8. DEIM Convertor
9. Deep-sea RO

اوپراتور و کندانسور و فشار خلاً محفظه بررسی شده است. نتایج مؤید آن است که افزایش دمای اوپراتور و کاهش فشار محفظه خلاً سبب افزایش میزان آب شیرین می‌شود [۳]. طی پژوهشی، نوعی سیستم تبدیل انرژی گرمایی اقیانوسی سیکل باز دوکاربرده^۳ از نظر تولید توان الکتریکی و نمک‌زدایی آب دریا بررسی شد [۵۸]. پارامترهای مختلفی همچون دبی جرمی و دمای آب گرم، دمای آب سرد و فشار خلاً اوپراتور به عنوان پارامترهای کنترل در تحلیل سیستم در نظر گرفته شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد دبی آب سرد ورودی بیشتر سبب کنترل هزینه پمپ کردن و میزان تولید آب شیرین خواهد شد. عملکرد تأسیسات نمک‌زدایی تبخیری سیفون اش^۴ که از انرژی گرمایی اقیانوس استفاده می‌کند، به صورت نظری و آزمایشگاهی تحلیل شده است [۵۹]. بخش نظری پژوهش به تحلیل انرژی هر جزء سیستم برای محاسبه بازده انرژی و تخریب انرژی پرداخته است. بخش تجربی برای اعتبارسنجی نتایج بخش نظری استفاده شده است. تأثیر متغیرهایی مانند دمای سطحی و عمق دریا و اختلاف دمای بین سطح و عمق دریا بررسی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد بازده سیستم با کاهش دمای سطح و افزایش دمای عمق افزایش می‌یابد. شکل ۱۷ شمایی از نوعی سیستم ترکیبی تولید توان الکتریکی و نمک‌زدایی با استفاده از انرژی گرمایی اقیانوسی را نشان می‌دهد.

انرژی ناشی از اختلاف غلظت آب^۵

اختلاف پتانسیل شیمیایی ناشی از اختلاف غلظت دو جریان آب سبب می‌شود که هنگام اختلاط آنها در شرایط کنترل‌شده، انرژی آزاد شود که به آن انرژی ناشی از اختلاف غلظت (SGE) می‌گویند که یک انرژی پاک، تجدیدپذیر و از نظر محیط زیستی ایمن است. این انرژی قابلیت تبدیل به الکتریسیته را خواهد داشت. از اختلاط هر متر مکعب آب شیرین با آب دریا (آب شور) معادل ۲/۳ مگاژول انرژی آزاد و بخشی از آن به برق تبدیل می‌شود [۳]. این پدیده در طبیعت در مکان‌های برخورد آب رودخانه‌ها و دریاها رخ می‌دهد و احداث نیروگاه‌های برق در این مکان‌ها برای استخراج این انرژی توجیه‌پذیر است.

توضیحات جامعی در مورد تکنولوژی‌های تولید توان از انرژی امواج، تجهیزات، انواع مبدل‌ها و مروری بر کاربرد انرژی امواج در نمک‌زدایی آمده است [۵۶].

انرژی جذر و مد^۱

انرژی جذر و مد انرژی جنبشی ناشی از بالا رفتن و پایین آمدن آب دریا بر اثر پدیده جذر و مد است. این پدیده بر اثر حرکت دوره‌ای آب در دریاها به علت تغییر فاز ماه و خورشید ایجاد می‌شود. میزان شدت جذر و مد به نیروهای کشندی خورشید، ماه، پیکربندی اقیانوس و نیروی چرخشی زمین بستگی دارد. حداقل جذر و مد زمانی رخ می‌دهد که زمین، ماه و خورشید در موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه قرار گرفته باشند و حداکثر اثر آن در هم‌راستایی سه اتفاق می‌افتد [۳]. در نمک‌زدایی به وسیله این انرژی، حرکت آب دریا سبب چرخش توربین هیدرولیکی و تولید توان در ژنراتور می‌شود. سپس، توان تولیدی در نوعی سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود.

یک فناوری نوین از انرژی جذر و مدی برای یک تأسیسات نمک‌زدایی RO استفاده کرده است [۵۷]. نتایج بیانگر آن است که سیستم ترکیبی Tidal-RO سبب کاهش ۳۱-۴۱٪ درصدی قیمت آب به نسبت تأسیسات اسمز معکوس مرسوم می‌شود. سیستم یادشده ضریب بازافت ۴۰ درصد دارد. امکان کاهش بیشتر هزینه‌ها از طریق افزایش طول عمر سیستم فراهم می‌شود.

انرژی گرمایی اقیانوسی^۲

از اختلاف دمای لایه‌های اقیانوس (دمای بسیار کم لایه‌های زیرین و دمای بالای لایه‌های سطحی) برای نمک‌زدایی و تبدیل شورآب به آب شیرین استفاده شده است. در این روش کاهش فشار در محفظه فلش (خلأ) سبب تبخیر آبی بخشی از آب می‌شود، این تبخیر آبی سبب افت دمای آب شده و آب در اوپراتور در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد تبخیر می‌شود. در ادامه، از یک کندانسور با دمای ۱۰ درجه (سیال خنک‌کن آب سرد عمق دریا است) استفاده می‌شود تا بخارها تقطیر شده و آب شیرین تولید شود. عملکرد این سیستم نمک‌زدایی با تغییر دمای

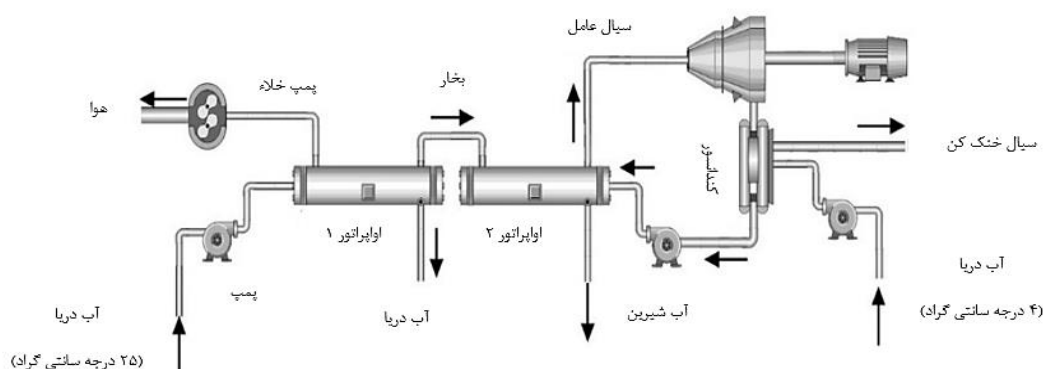
3. Dual Use Open Cycle Ocean Thermal Energy Conversion (OC-OTEC)

4. Siphon Ash

5. Salinity Gradient Energy

1. Tidal Energy

2. Ocean Thermal Energy



شکل ۱۷. سیستم تولید برق و آب شیرین با استفاده از انرژی گرمایی اقیانوسی [۶۰]

گرفته شود. در این روش از نوعی آب ثانویه مانند فاضلاب صنعتی و یا شهری تصفیه شده با غلظت کم استفاده می‌شود که سبب افزایش دبی حجمی آب تغذیه RO و کاهش غلظت و رقیق شدن آن می‌شود. در نتیجه، افزایش فشار کمتری در پمپ‌های فشار بالا مورد نیاز خواهد بود و مصرف انرژی مخصوص RO کاهش می‌یابد. شکل ۱۸ تولید برق از فرایند PRO را نشان می‌دهد.

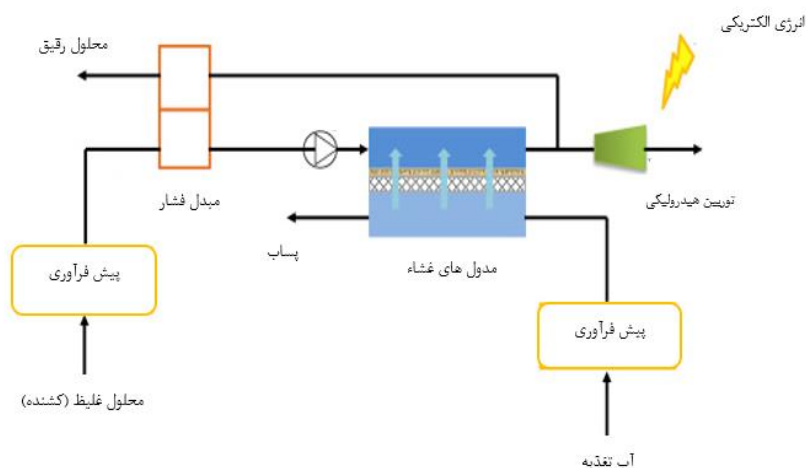
پژوهش‌های متعددی مزیت ترکیب فناوری PRO با نمک‌زدایی RO را نشان داده است. نتایج یک مطالعه کاهش ۲۰-۲۳ درصدی انرژی مصرفی و کاهش ۸/۷ تا ۲۰ درصدی هزینه‌های اولیه را نشان می‌دهد [۳]. مطالعه‌ای دیگر بیانگر افزایش ۱۸ درصدی میزان بازیافت آب شیرین و کاهش خروجی پساب تأسیسات است [۳]. پژوهشی کاهش ۱۲ تا ۱۸ درصدی مصرف انرژی را بر اساس مقادیر مختلف بازیافت گزارش کرده است. پژوهشی دیگر از این فناوری به طور هم‌زمان برای تصفیه فاضلاب و تولید برق استفاده کرده است [۳]. محاسبات ترمودینامیکی و ریاضی ثابت کرده است که یک سیستم PRO-RO توانایی عملکرد با خروجی پساب صفر^۵ را خواهد داشت [۶۲]. پژوهش دیگری نتیجه گرفته است که استفاده از غشای گلوکز تری‌استات برای این فرایند می‌تواند سبب تولید ۱/۲ کیلووات ساعت بر متر مکعب انرژی شود که معادل ۴۰ درصد نیاز انرژی برای اسمز معکوس با مقدار بازیافت ۵۰ درصد است [۶۳]. سنیتیل و همکاران گزارش دادند که ترکیب آب رقیق خروجی از PRO با آب تغذیه RO سبب بازیافت انرژی به میزان ۴۹

تخمین زده شده است که حدود ۲/۴ تا ۲/۶ تراوات انرژی SGE در سطح جهان قابل استحصال است که این مقدار برابر با مصرف انرژی الکتریکی در جهان است [۳]. برای استخراج این انرژی از روش‌های گوناگونی مانند اسمز عقب‌افتاده فشار^۱ (PRO)، الکترودیالیز معکوس^۲ (RED)، خازن دولایه الکتریکی^۳ و خازن شبه‌فارادیک^۴ بهره گرفته شده است. SGE به صورت انرژی الکتریکی در فناوری RED و به شکل انرژی مکانیکی در PRO استخراج می‌شود [۳].

PRO

در فرایند PRO دو جریان آب با غلظت‌های مختلف (آب تغذیه با غلظت کمتر و آب کشنده با غلظت بیشتر) توسط یک غشای نیمه‌عبورده از یکدیگر جدا شده‌اند. اختلاف فشار اسمزی (ناشی از اختلاف غلظت) بین دو جریان سبب می‌شود که جریانی طبیعی از آب از سمت محلول با غلظت کم به سمت غلظت بیشتر ایجاد شود و هد (ارتفاع) آب در سمت آب کشنده افزایش می‌یابد. این هد سپس به صورت فشار استاتیکی در توربین هیدرولیکی سبب حرکت توربین و تولید انرژی مکانیکی می‌شود. همچنین، امکان تولید الکتریسیته از طریق اتصال یک ژنراتور وجود دارد. آب کشنده می‌تواند پساب یک تأسیسات اسمز معکوس با غلظت ۵۶ هزار ppm تا ۶۰ هزار ppm باشد [۳]. همچنین، فرایند PRO می‌تواند به عنوان مرحله پیش‌فرآوری آب تغذیه قبل از ورود به تأسیسات اسمز معکوس به کار

1. Pressure Retarded Osmosis
2. Reverse Electrolysis
3. Electric Double-layer Capacitor
4. Faradaic Pseudo-capacitor



شکل ۱۸. فرایند تولید انرژی الکتریکی از PRO [۶۱]

پساب برای کاهش مصرف انرژی در فرایند نم‌زدایی استفاده می‌کند [۶۶]. نتایج مطالعه یادشده مؤید آن است که به‌کارگیری سیستم PRO سبب کاهش انرژی مصرفی به مقدار ۹ درصد در هر متر مکعب می‌شود. همچنین، این کار سبب کاهش غلظت پساب از ۶۶ به ۴۱ بخش در هزار (ppt) شده است. دلگادو و همکاران ۴ پیکربندی مختلف برای یک تأسیسات PRO-RO را بررسی کردند [۶۷]. در پژوهش یادشده از نرم‌افزار رزا به منظور شبیه‌سازی و انتخاب بهترین شرایط کارکردی سیکل استفاده شده است. نتایج در هر پیکربندی، برای دو حالت استفاده از فاضلاب صنعتی و یا فاضلاب شهری محاسبه شد.

RED

در این روش دو جریان با غلظت‌های کم و زیاد از میان دسته‌هایی از غشاهای گزینش‌کننده یون (گزینش‌کننده کاتیون و آنیون) عبور می‌کنند. بر اثر اختلاف غلظت دو جریان اختلاف پتانسیل الکتریکی در الکترودها ایجاد می‌شود که در صورت اتصال به بار، سبب ایجاد جریان الکتریکی خواهد شد. شدت این جریان الکتریکی به عواملی مانند تعداد دسته‌های غشا، تعداد سلول‌ها، نوع غشا، تفاوت غلظت جریان‌ها، فواصل بین سلول‌ها و دبی جریان‌ها بستگی دارد [۳]. این فناوری همچنین می‌تواند به صورت ترکیبی با انواع روش‌های نم‌زدایی غشایی به کار رود و سبب کاهش مصرف انرژی شود. شکل ۱۹ شمایی از تولید انرژی الکتریکی از RED را نشان می‌دهد.

درصد شده است [۳]. در پژوهش تانگ و همکاران از ترکیب نوعی سیستم نم‌زدایی PRO-RO (ظرفیت ۵ هزار متر مکعب بر روز) با حرارت خورشیدی استفاده شده است که سبب کاهش انرژی مصرفی در فرایند نم‌زدایی خواهد شد [۶۴]. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد:

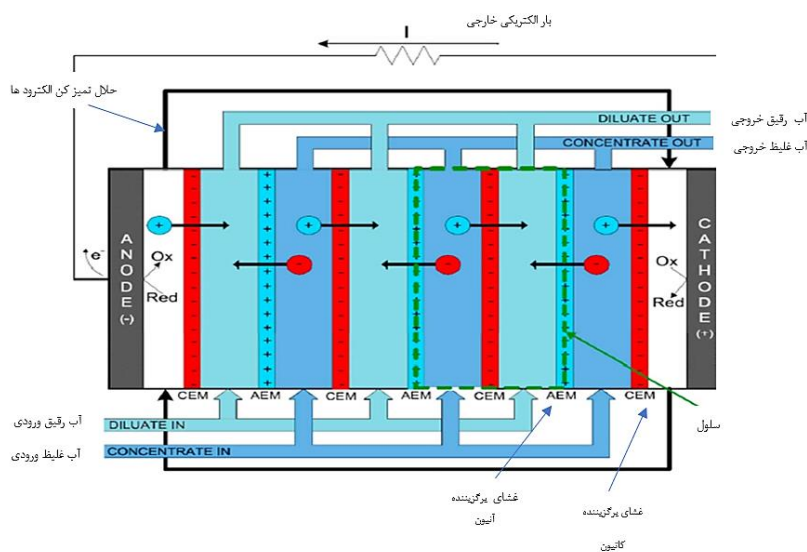
۱. مصرف انرژی مخصوص کل برابر با ۰/۳۹ کیلووات ساعت بر متر مکعب آب است که بسیار کمتر از عدد ۱/۱ کیلووات ساعت (مصرف انرژی تئوری برای اسمز معکوس مرسوم) است.

۲. بازده انرژی سیستم با افزایش دمای PRO بهبود یافته است.

۳. کاربرد هم‌زمان مبدل فشار و PRO به‌شدت مصرف انرژی الکتریکی را کاهش داده است.

شوما و همکاران به مدل‌سازی و بررسی تجربی نوعی سیستم نم‌زدایی اسمز معکوس که با PRO کوپل شده است، پرداختند [۶۵]. نتایج پژوهش آنها نشان داد آب دریا با غلظت ۳۵ گرم بر لیتر به اندازه ۱۶ وات بر متر مربع برق تولید می‌کند که برای فرایند شیرین‌سازی کافی است (حداقل ۵ وات بر متر مربع مورد نیاز است). به علاوه، این سیستم توانایی عملکرد به صورت منفرد و بدون نیاز به منبع توان خارجی را خواهد داشت. در مطالعه‌های دیگر، نوعی سیستم PRO-RO با استفاده از داده‌های تأسیسات نم‌زدایی خلیج تمپا^۱ مدل‌سازی شده است که از انرژی

1. Tempa Bay



شکل ۱۹. فرایند RED برای تولید الکتریسیته [۳]

فرایندهای پیش‌فرآوری سبب کاهش انرژی مصرفی در اسمز معکوس می‌شوند [۷۰]. مقاله می و همکاران به بررسی ترکیب سیستم نمک‌زدایی RED-ED پرداخته است [۷۱]. انرژی تولیدی در سیستم RED در نمک‌زدایی الکترودیالیز استفاده می‌شود و این سیستم به انرژی خارجی نیاز نخواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با تغییر در ساختار غشاها در سلول‌ها می‌توان عملکرد سیستم را بهبود داد. مطالعه سیستم ترکیبی RED-RO-تقطیر غشایی تماس مستقیم انجام شده است [۷۲]. به این منظور، مدل‌سازی ترمودینامیکی صورت گرفته و نتایج آزمایشگاهی از نمونه ساخته شده استخراج شده است. همچنین، بازده اگزرژی و اتلاف اگزرژی اجزای سیستم در سناریوهای مختلف در حضور و یا عدم حضور واحد RED بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که واحد RED پتانسیل بهره‌گیری از انرژی حرارتی و الکتروشیمیایی پساب با غلظت زیاد را برای تولید الکتریسیته و دستیابی به خروجی پساب صفر دارد و در مقایسه با سیستم RO پایه، مصرف انرژی مخصوص به میزان ۱۶/۶ درصد کاهش یافته است.

نمک‌زدایی با انرژی زیست‌توده^۱

انرژی حاصل از زیست‌توده، پیوسته و غیر مقطعی است. امروزه از این منبع انرژی به دو صورت عمده استفاده می‌شود:

لی و همکاران مدلی را برای ارزیابی تأثیر ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش مصرف انرژی اسمز معکوس تکوین کردند [۶۸]. آنها نشان دادند ترکیب RED-RO سبب کاهش درخور توجه برق مصرفی و کاهش پساب خروجی اسمز معکوس می‌شود. طی پژوهشی ترکیبی از فناوری‌های RED و تقطیر غشایی تماس مستقیم با اسمز معکوس بررسی شده است [۶۹]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد ولتاژ مدار باز این سیستم ۱/۵ تا ۲/۳ ولت و چگالی توان معادل ۰/۹ تا ۲/۴ وات بر متر سطح هر غشا است. علاوه بر این، نتایج مؤید آن است که به‌کارگیری RED و تقطیر غشایی سبب کاهش شدید انرژی مصرفی نمک‌زدایی و کاهش پساب خروجی به‌خصوص در شرایط استفاده از انرژی خورشیدی برای گرم کردن آب تغذیه می‌شود. کوئن و همکاران نوعی سیستم ترکیبی RED-ED را برای به‌کارگیری در یک تصفیه‌خانه پیشنهاد کردند [۳]. به‌کارگیری این سیستم علاوه بر کاهش انرژی مصرفی نمک‌زدایی سبب تولید محصولات با ارزشی همچون فنول می‌شود. فابائو طی مطالعه‌ای نشان داد غلظت آب تأثیر زیادی بر فرایند RED می‌گذارد و حد پایین غلظت بهینه برای این فرایند برابر با ۱ گرم بر لیتر و حد بالای آن ۳۰ گرم بر لیتر با دبی جریان ۶۷/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه است [۳]. پژوهش لاسروا و همکاران به شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی (میزان صرفه‌جویی در هزینه) دو سیستم ترکیبی با اسمز معکوس می‌پردازد: RED و ED که به عنوان

زیست‌توده، مبدل حرارتی هوا (برای گرم کردن هوا) و واحد نمک‌زدایی تشکیل شده است. تأثیر پارامترهای مختلفی مانند قطر سوراخ لوله، عمق ستون آب، دمای آب و دبی هوا در عملکرد آب‌شیرین‌کن بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد بهینه‌ترین شرایط کاری سیستم در دبی هوای ۰/۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه، دبی آب خنک‌کن ۰/۰۵۸ کیلوگرم بر ثانیه، دمای آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد، عمق آب ۱۷۰ میلی‌متر، و قطر سوراخ ۱ میلی‌متر به دست می‌آید. مطالعه‌ای به منظور بررسی عملکرد نوعی تقطیرکن خورشیدی تک‌شیب و چندحوضچه‌ای که با یک بویلر زیست‌توده کوپل شده، صورت گرفته است [۷۷]. این سیستم به همراه انواع مختلفی از مواد ذخیره‌ساز حرارت محسوس در نظر گرفته شده است. نتایج پژوهش یادشده مؤید آن است که این سیستم عملکرد بهتری نسبت به تقطیرکن‌های مرسوم تک‌حوضچه‌ای دارد و افزودن بویلر زیست‌توده سبب افزایش میزان تولید آب شیرین شده است.

نمک‌زدایی با انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی^۳

فقط استفاده از یک منبع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و یا بادی برای نمک‌زدایی با توجه به ناپایداری و مقطعی بودن این منابع نمی‌تواند عملکرد مطمئن، پایدار و پیوسته را تضمین کند. در این شرایط، بهترین گزینه، استفاده از ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبع انرژی فرایند نمک‌زدایی است. در این صورت، ضعف یک منبع توسط منبعی دیگر جبران خواهد شد و از مکمل بودن منابع بیش بهره‌برداری صورت می‌گیرد. این اقدام سبب افزایش قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری و بهبود جوانب اقتصادی و محیط زیستی فرایند نمک‌زدایی می‌شود [۳]. به طور مثال، انرژی تابشی خورشید طی روز در دسترس است و برای نمک‌زدایی استفاده می‌شود. از سویی، این منبع انرژی در شب در دسترس نیست و به جای آن، سرعت باد در شب بیشتر است. در چنین شرایطی تلفیق این دو منبع انرژی می‌تواند سبب عملکرد پایدار تأسیسات نمک‌زدایی شود [۳]. شکل ۲۰ نوعی سیستم ترکیبی فتوولتائیک-بادی-اسمز معکوس^۴ را نشان می‌دهد.

۱. احتراق مستقیم زیست‌توده و استفاده از حرارت حاصل از احتراق برای تولید برق و یا تأمین نیازهای حرارتی خانگی و صنعتی؛

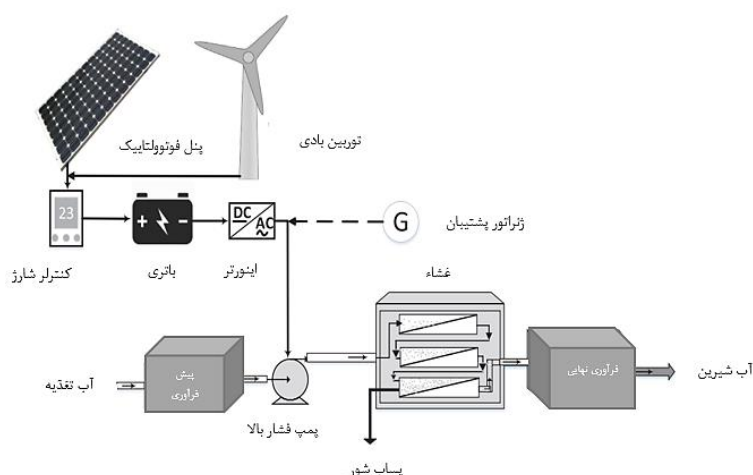
۲. تبدیل زیست‌توده به سوخت‌های سنتزی (بیواتانول و بیودیزل) و فرآورده‌های باارزش همچون گاز سنتز و بنزین در فرایند گازی‌سازی و پیرولیز.

به‌کارگیری انرژی زیست‌توده در نمک‌زدایی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، با این وجود امکان استفاده از انرژی حرارتی زیست‌توده در فرایندهای نمک‌زدایی حرارتی و یا انرژی الکتریکی حاصل از آن برای نمک‌زدایی غشایی وجود دارد. از جمله معضلات استفاده از انرژی زیست‌توده، هزینه زیاد خوراک و تأسیسات و همچنین، پیچیدگی فناوری آن است [۷۳]. علاوه بر این، استفاده از مواد غذایی برای تولید سوخت‌های زیستی و کاهش منابع غذایی بر اثر آن، سبب کاهش محبوبیت این منبع انرژی شده است.

بهبودی و همکاران به بررسی نوعی سیستم تولید هم‌زمان پرداختند که با منبع انرژی زیست‌توده و استفاده از سلول سوختی اکسید جامد^۱، توربین گازی، واحد نمک‌زدایی اسمز معکوس، گازی‌ساز و چیلر جذبی، برق، آب شیرین و سرمایش تولید می‌کند [۷۴]. نتایج پژوهش آنها نشان داد گازی‌ساز عامل اصلی بازگشت‌ناپذیری در سیستم با میزان تخریب انرژی ۱۷۹/۸ کیلووات است. همچنین، نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد بازده انرژی و قیمت واحد کل در بهینه‌ترین حالت، ۳۸/۱۶ درصد و ۶۹/۴۷ دلار بر گیگاژول است. این سیستم ترکیبی به میزان ۸۱۷/۹ کیلوگرم بر روز آب شیرین با قیمت واحد ۵۸۶/۰۹۱ دلار بر گیگاژول تولید می‌کند. مطالعه خان‌محمدی و همکاران به بررسی نوعی سیستم تولید هم‌زمان بر پایه بایومس می‌پردازد که برق، آب شیرین و آب گرم تولید می‌کند [۷۵]. تولید آب شیرین از فرایند MED صورت می‌گیرد. تحلیل حساسیت مدل نشان داد با افزایش دمای گازی‌ساز از ۹۵۰ به ۱۱۵۰ کلون، میزان تولید آب شیرین از ۱۰۶۰ متر مکعب بر روز به ۱۱۶۰ متر مکعب افزایش می‌یابد. مطالعه آزمایشگاهی نوعی سیستم نمک‌زدایی رطوبت‌زنی/رطوبت‌گیری ستون حباب^۲ بر پایه بایومس به عنوان سوخت انجام شده است [۷۶]. این سیستم از نوعی اجاق

3. Hybrid Renewable Energy
4. PV-Wind RO

1. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
2. HDH-bubble Column



شکل ۲۰. سیستم ترکیبی فتوولتاییک- بادی - اسمز معکوس [۳۴]

متعددی بیانگر آن است که استفاده از بانک باتری برای سیستم‌های نمک‌زدایی کوچک با ظرفیت ۱ تا ۵ مترمکعب در روز کافی به نظر می‌رسد، در حالی که برای تأسیساتی با ظرفیت چند ده تا چند صد متر مکعب بر روز استفاده از دیزل ژنراتور پشتیبان و یا اتصال به شبکه سراسری برق ضروری است [۳۴].

ابراهیم و همکاران به بررسی دو گزینه تکنولوژیکی برای تأمین انرژی یک تأسیسات نمک‌زدایی RO برای کشور مصر پرداخته‌اند [۷۸]. گزینه نخست، استفاده از ترکیب فتوولتاییک، انرژی بادی، باتری و دیزل ژنراتور است. گزینه دوم، استفاده از فتوولتاییک، توربین هیدروکینتیکی، باتری و دیزل ژنراتور است. از نرم‌افزار هومر به منظور تعیین بهترین ترکیب تکنولوژی و تحلیل اقتصادی استفاده شده است. بهترین حالت برای گزینه نخست، استفاده از توربین بادی با ظرفیت اسمی ۱۰ کیلووات، دیزل ژنراتور با ظرفیت ۴/۹۰ کیلووات، ۲۰ کیلووات پنل خورشیدی است. کمترین قیمت برق در این حالت ۰/۵۲۲۲ دلار بر کیلووات‌ساعت و قیمت آب ۱/۱ دلار بر متر مکعب است. برای گزینه دوم، بهترین حالت در استفاده از ظرفیت ۵ کیلووات توربین بادی، دیزل ژنراتور ۴/۹ کیلووات و ۲/۸۲ کیلووات پنل خورشیدی است. کمینه قیمت برق و آب تولیدی به ترتیب، ۰/۱۲۱۶ دلار بر کیلووات‌ساعت و ۰/۵۶ دلار بر متر مکعب است. مقاله رزک و همکاران امکان‌سنجی فنی و اقتصادی ترکیب تأسیسات RO با فتوولتاییک، دیزل و باتری برای تأمین آب منطقه دور از شبکه برق مینیا در مصر را بررسی

در چنین سیستمی انرژی الکتریکی تولیدی توسط توربین بادی و پنل خورشیدی ابتدا سبب شارژ شدن بانک باتری می‌شود. کنترل‌کننده شارژ پارامترهای شارژ و دشارژ باتری را تنظیم می‌کند. امکان قرار دادن دیزل ژنراتور پشتیبان و یا اتصال به شبکه در این سیستم برای افزایش قابلیت اطمینان وجود دارد که سبب می‌شود که در شرایط پیک بار و یا نبود یکی از منابع انرژی، برق مورد نیاز برای نمک‌زدایی توسط این واحدها تأمین شود [۳۴]. مطالعات متعددی ترکیب انرژی‌های بادی و خورشیدی برای نمک‌زدایی را بررسی کرده‌اند. کورونئوس و همکاران مدلی را برای استفاده از انرژی خورشید و باد برای شیرین‌سازی آب دریا توسعه دادند [۳]. صاحب و همکاران تحلیل فنی و اقتصادی نوعی سیستم ترکیبی فتوولتاییک - بادی و دیزل ژنراتور پشتیبان را انجام دادند [۳]. عبدالرحمی و همکاران به شبیه‌سازی و مقایسه دو سیستم ترکیبی پرداختند. یک سیستم شامل فتوولتاییک- بادی و دیگری شامل فتوولتاییک- بادی و دیزل پشتیبان است [۳]. در مطالعه‌ای دیگر تعداد مخازن هیدروژن، مساحت پنل‌ها و مساحت جاروب‌شده توربین بادی برای نوعی سیستم ترکیبی بهینه‌سازی شد [۳]. مانولوکاس و همکاران به توسعه نوعی نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی سیستم ترکیبی فتوولتاییک- باد و اسمز معکوس پرداختند [۳۴]. آنها پیکربندی‌های متفاوتی مانند بادی و خورشیدی با ذخیره‌سازی باتری و یا بدون آن و همچنین، استفاده از دیزل ژنراتور پشتیبان را بررسی کردند. نتایج تحقیقات

گرفته است [۸۳]. برق از طریق پنل فتوولتاییک، دریافت‌کننده خورشیدی و میکروتوربین بادی و آب شیرین از طریق نمک‌زدایی ترکیبی (اسمز معکوس و تقطیر غشایی) و آب گرم از طریق دریافت‌کننده لوله خلاء و پنل فتوولتاییک تأمین می‌شود. شبیه‌سازی در نرم‌افزار ترنسیس^۳ و برای روزهای مشخصی از تابستان، پاییز و زمستان برای منطقه زاراگوزای اسپانیا صورت گرفته است. نتایج پژوهش یادشده بیانگر آن است که مدل پاسخ مناسبی برای تقاضای الکتریسیته و حرارت طی روز در شرایط مختلف آب‌وهوایی ارائه می‌دهد. مطالعه کمپون و همکاران به بررسی رفتار تأسیسات الکترودیالیز با منابع انرژی فتوولتاییک - بادی از طریق شبیه‌سازی دینامیکی می‌پردازد [۸۴]. شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد روزانه و سالانه سیستم صورت گرفته است و از نرم‌افزار ترنسیس برای منابع تجدیدپذیر و از مدل توسعه داده شده در جی پرومز^۴ برای شبیه‌سازی فرایند نمک‌زدایی استفاده شده است. نتایج پژوهش یادشده مؤید آن است که این سیستم برای تأمین تقاضای آب آشامیدنی یک شهر کوچک و یا روستا مناسب است. مطالعه‌ای توجیه‌پذیری نوعی سیستم نمک‌زدایی شناور^۵ که توسط انرژی‌های خورشیدی و بادی نیاز آب منطقه ساحلی دور از شبکه راز قارب^۶ در مصر را تأمین می‌کند، بررسی کرده است [۸۵]. سیستم توسعه‌داده‌شده توانایی مناسبی در حفظ پایداری تأمین آب و بازده بالایی برای شرایط آب‌وهوایی منطقه ساحلی دارد و می‌تواند برای سایر نقاط دور از شبکه به کار رود. مقاله رزک و همکاران به بررسی فنی و اقتصادی ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر برای نمک‌زدایی با ظرفیت ۱۵۰ متر مکعب بر روز در شهر نئوم^۷ عربستان سعودی می‌پردازد [۸۶]. در پژوهش یادشده سه سناریوی مختلف مد نظر قرار گرفته و انتخاب بهترین سناریو در نرم‌افزار هومر انجام شده است. بنا بر نتایج، بهینه‌ترین پیکربندی استفاده از PV، سلول سوختی و باتری است. سیستم بهینه متشکل از ۲۳۵ کیلووات PV، ۳۰ کیلووات سلول سوختی، ۱۴۴ باتری، ۳۰ کیلووات کانورتور، ۱۳۰ کیلووات الکترولیزر و مخزن هیدروژن ۲۵ کیلوگرمی

کرده است [۷۹]. در مطالعه یادشده کمینه هزینه انرژی و ارزش فعلی خالص (NPV)^۱ برابر با ۰/۰۷۴ دلار بر کیلووات ساعت و ۲۰۷۶۷۶ دلار است. سائز بهینه سیستم به صورت ۱۲۰ کیلووات پنل خورشیدی، ۱۰ کیلووات دیزل و ۶۴ باتری و کانورتور ۵۰ کیلووات است. پژوهشی به بهینه‌سازی تولید آب و برق برای یک منطقه دور از شبکه برق در جزایر مدیترانه (جزیره ایتالیایی آستیکا) پرداخته است [۸۰]. از بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن سیاست بهینه سیستم تولید آب - برق استفاده شد. نتایج پژوهش یادشده سودمندی بهینه‌سازی در یافتن سیاست‌های بهینه کنترل تولید را با توجه به قابلیت اطمینان و پایداری سیستم نشان می‌دهد. مقاله مهرجردی و همکاران به مدل‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی نوعی سیستم تولید هم‌زمان آب - برق برای تأمین تقاضای یک جزیره دور از شبکه سراسری می‌پردازد [۸۱]. برای واحد نمک‌زدایی از گزینه‌های MSF، RO و MED استفاده شده است تا بهترین گزینه از نظر شاخص‌های فنی و اقتصادی مشخص شود. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد کاربرد سیستم ترکیبی با اسمز معکوس اقتصادی‌ترین گزینه است. این سیستم دارای بیشترین سهم از نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر (۸۸ درصد)، کمترین هزینه انرژی (۰/۱۴۵ دلار بر کیلووات ساعت) و همچنین، کمترین هزینه نگهداری و تعمیرات است. مطالعه‌ای با هدف یافتن بهینه‌ترین ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز یک واحد اسمز معکوس مستقل از شبکه برای منطقه ناواهوی آمریکا انجام شده است [۸۲]. بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب به منظور دستیابی به کمترین هزینه انرژی صورت گرفت. بهینه‌ترین پیکربندی استفاده از انرژی بادی (۲ توربین ۲ کیلووات نوع ۲)، ۱۸ پنل فتوولتاییک در زاویه تمایل^۲ ۲۵ درجه، باتری و یک دیزل ژنراتور است که هزینه انرژی این سیستم برابر با ۰/۵۲۶۹ دلار بر کیلووات ساعت می‌شود. در این سیستم با افزایش ترکیب منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها، هزینه انرژی کاهش می‌یابد. در پژوهش اوچه و همکاران از دو رویکرد تجربی و مدل‌سازی برای بررسی عملکرد نوعی سیستم تولید هم‌زمان برق، آب شیرین و آب گرم استفاده شده و اعتبارسنجی با مقایسه نتایج صورت

3. TRNSYS

4. GPRMS Model Builder

5. Floating Desalination Plant (FDP)

6. Ras Ghareb

7. Neom

1. Net Present Value

2. Tilt Angle

ابوموسی بررسی شده است [۹۰]. در پژوهش یادشده از پنل فتوولتاییک، توربین بادی، دیزل ژنراتور و باتری برای تأمین برق و برای تأمین حرارت از بویلر و حرارت اتلافی دیزل ژنراتورها استفاده شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد هزینه سرمایه‌گذاری سیستم تجدیدپذیر ترکیبی در استفاده از آب‌شیرین‌کن MSF بیشترین مقدار و در ترکیب با RO، کمترین مقدار را دارد. همچنین، مصرف انرژی فرایند RO برای تولید آب از دو روش دیگر کمتر است. غفارپور و همکاران با توجه به شوری و دمای آب زیاد و حساسیت تأسیسات اسمز معکوس به پارامترهای ورودی، برای مناطق حاشیة خلیج فارس و جزایر آن، استفاده از نمک‌زدایی حرارتی را توصیه کردند.

تحقیقاتی در زمینه به‌کارگیری انرژی خورشیدی با انرژی‌های زیست‌توده و زمین‌گرایی برای تولید محصولات مختلف در سیستم‌های تولید هم‌زمان انجام شده است. نوعی سیستم تولید هم‌زمان مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست‌توده برای تولید آب شیرین، برق، حرارت و سرمایه‌گذاری و گاز طبیعی مایع، مورد ارزیابی ترمودینامیکی و انرژی - اقتصادی قرار گرفته است [۹۱]. نتایج بهینه‌سازی سیستم بازده انرژی را ۹/۹ درصد و نرخ هزینه محصول را ۱۳/۳۲ دلار بر ساعت گزارش می‌کند. کالیسه و همکاران به ارزیابی یک سیستم تولید هم‌زمان با منبع انرژی خورشیدی و زمین‌گرایی پرداختند [۷]. سیستم یادشده شامل متمرکزکننده‌های خورشیدی، پنل فتوولتاییک، چاه زمین‌گرایی، تأسیسات نمک‌زدایی تقطیر چنددوره، چیلر جذبی لیتیم برمید و تجهیزاتی مانند مخزن و مبدل‌های حرارتی است. در مطالعه‌ای دیگر، طرح نوینی در استفاده از ترکیب انرژی حرارتی خورشید و زمین‌گرایی ارائه شده است. در این سیستم از دریافت‌کننده‌های خورشیدی و حرارت زمین‌گرایی برای تأمین گرمایش و سرمایه‌گذاری محیطی و کارکرد تأسیسات نمک‌زدایی MED بهره گرفته شد [۷].

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه تقاضای آب شیرین به‌شدت افزایش یافته و منابع آن در حال کاهش است. یک روش مؤثر در حل مشکل تأمین آب، بهره‌گیری از فناوری نمک‌زدایی برای شیرین‌سازی آب دریا و شورآب و تأمین نیاز جوامع است.

است. همچنین، مقدار NPV و هزینه انرژی به‌ترتیب ۴۳۸۶۵۷ دلار و ۰/۱۱۷ دلار بر کیلووات‌ساعت است. مطالعه دیگری به طراحی نوعی سیستم ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر که با تأسیسات RO کوپل شده است، پرداخته و سناریوهای مختلفی را با توجه به نوسانات منابع تجدیدپذیر و تقاضای متغیر آب در نظر گرفته است [۸۷] با توجه به شاخص‌های بهینه‌سازی چندهدفه (اقتصاد و محیط زیست)، سایز بهینه سیستم برای ۶ حالت محاسبه شد که در این میان، حالت پایه با ترکیب انرژی خورشیدی و بادی (۱۱۱ پنل و ۵ توربین بادی)، دارای کمترین هزینه کل سالانه (۲۱۸۰۸ دلار) است، ولی این سیستم قابلیت اطمینان مناسبی برای تأمین تقاضای ساعتی آب ندارد. پژوهش آسنسیو و همکاران به مدل‌سازی نوعی سیستم انرژی تجدیدپذیر متشکل از انرژی بادی و فتوولتاییک و تأسیسات اسمز معکوس برای جزیره قناری می‌پردازد که با مشکل کمبود آب روبه‌روست [۸۸]. این سیستم همچنین می‌تواند برق تولیدی مازاد را به شبکه برق تزریق کند. طی مطالعه‌ای امکان‌سنجی و بررسی فنی و اقتصادی سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (فتوولتاییک، باد و ژنراتور) برای تأمین نیاز تأسیسات نمک‌زدایی خودکار RO با حداکثر ظرفیت ۵۰ متر مکعب بر روز انجام شد [۸۹]. دو سناریو برای جزایر لانزاروته^۱ و فوئرتونتورا^۲ بررسی شده و از نرم‌افزار هومر برای یافتن ترکیب بهینه تجدیدپذیرها استفاده شده است. اقتصادی‌ترین گزینه برای سیستم تجدیدپذیر در جزیره لانزاروته، دارای هزینه انرژی ۰/۴۰۴ دلار بر کیلووات‌ساعت است که از یک توربین بادی ۳۰ کیلووات از نوع اف ال ۳۰، پنج کیلووات سامانه PV، ده کیلووات دیزل ژنراتور و ۱۶۰ باتری ۳۶۰ آمپر ساعت تشکیل شده است. این سیستم قادر به تأمین ۹۶ درصد نیاز الکتریکی نمک‌زدایی است. برای جزیره فوئرتونتورا، اقتصادی‌ترین گزینه، استفاده از ۳۰ کیلووات توربین بادی، ۵ کیلووات پی وی، دیزل ۱۵ کیلووات و ۲۰۰ باتری ۳۶۰ آمپر ساعتی است. مقدار هزینه انرژی این سیستم ۰/۴۷۸ دلار بر کیلووات‌ساعت است. نوعی سیستم تجدیدپذیر مستقل از شبکه برای تأمین انرژی الکتریکی مشترکین و همچنین، الکتریسیته و حرارت تأسیسات نمک‌زدایی برای تأمین آب شیرین در جزیره

1. Lanzarote
2. Fuerteventura

۳. فناوری‌های اسمز معکوس و تقطیر چنداثره فناوری‌های پیشرو در نمک‌زدایی آب هستند و مطالعات متعددی برای افزایش بازدهی و کاهش هزینه‌های آنها انجام شده است.

۴. فرایندهای نمک‌زدایی غشایی بیش از ۷۰ درصد ظرفیت تولید آب شیرین را تشکیل می‌دهند. روش RO پرکاربردترین روش نمک‌زدایی آب با ظرفیت زیاد در جهان است.

۵. استفاده از نمک‌زدایی حرارتی برای مناطقی که قیمت سوخت کم و شوری آب زیادی دارند (کشورهای خاورمیانه)، توصیه می‌شود. کیفیت آب تولیدی در این روش بالا و مستقل از ویژگی‌های آب تغذیه است.

۶. انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی‌های خورشیدی، بادی و زمین‌گرایی در ترکیب با تأسیسات نمک‌زدایی سبب ایجاد امنیت در تأمین آب و پایداری در تأمین انرژی می‌شوند. انتخاب ترکیب مناسب میان منبع انرژی تجدیدپذیر و فناوری نمک‌زدایی به عواملی همچون دسترسی به منبع، ملاحظات هزینه‌ای، زیرساخت‌ها و قوانین دولت‌ها وابسته است.

۷. پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی، حدود ۴۳ درصد؛ حرارت خورشیدی، ۲۷ درصد؛ انرژی بادی ۲۰ درصد و صورت‌های ترکیبی، ۱۰ درصد کل ظرفیت نصب‌شده نمک‌زدایی تجدیدپذیر را تشکیل می‌دهند.

۸. با توجه به مقطعی بودن و نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر و به منظور ایجاد پایداری در تولید آب شیرین در سیستم‌های نمک‌زدایی تجدیدپذیر، از ذخیره‌سازهای انرژی (ذخیره‌سازهای حرارتی و باتری) و دیزل ژنراتورهای پشتیبان در این سیستم‌ها استفاده شده است.

۹. در میان ترکیب انواع مختلف انرژی خورشیدی با فناوری‌های نمک‌زدایی، بیشترین ظرفیت مربوط به تأسیسات فتوولتائیک - اسمز معکوس است. افزایش بازده این سامانه با مدیریت قرارگیری پنل‌های خورشیدی، افزودن سامانه رهگیری خورشیدی، تمیزکاری و خنک‌کاری پنل‌ها امکان‌پذیر است.

۱۰. در مطالعات اخیر توجه زیادی به امکان ترکیب فناوری‌های نمک‌زدایی با نیروگاه‌های هسته‌ای صورت گرفته است. هزینه تمام‌شده آب شیرین تولیدی از

نمک‌زدایی آب به مقادیر درخور توجهی انرژی نیاز دارد که تا کنون بیشتر از سوخت‌های فسیلی استفاده شده است. استفاده از این سوخت‌ها با چالش‌های زیادی روبه‌روست که از جمله آنها پایان‌پذیری و قیمت متغیر حامل‌ها، توزیع غیر یکنواخت آنها در سطح جهان، دشواری و هزینه زیاد انتقال به مناطق دورافتاده و درنهایت، معضلات زیست‌محیطی ناشی احتراق آنهاست. در حال حاضر، بیشتر تأسیسات نمک‌زدایی در منطقه خاورمیانه واقع شده که مزیت فراوانی و قیمت کم حامل‌های انرژی را دارد. مصرف زیاد انرژی تأسیسات نمک‌زدایی و مشکلات ایجادشده بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی ضرورت بهره‌گیری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی مورد نیاز نمک‌زدایی را ایجاب کرده است. به کمک این منابع پاک، امکان تولید پایدار آب شیرین با هزینه‌ای کمتر نسبت به روش‌های مرسوم فراهم خواهد شد. علاوه بر این، نمک‌زدایی تجدیدپذیر مزیت واضحی برای کاربرد در مناطق دور از شبکه سراسری آب و برق خواهد داشت. به رغم سهم اندک نمک‌زدایی تجدیدپذیر در بازار جهانی در حال حاضر، تلاش‌های تحقیقاتی و اجرایی بسیاری در زمینه بهینه‌سازی و تجاری‌سازی این فناوری‌ها در حال انجام است که سبب گسترش و فراگیری آن در آینده‌ای نزدیک خواهد شد. به همین منظور و در پژوهش حاضر مروری جامع بر مبانی و تحقیقات صورت‌گرفته در حوزه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در نمک‌زدایی آب انجام شده است. یافته‌های اصلی پژوهش حاضر و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده به صورت خلاصه در پی آمده است:

۱. شیرین‌سازی آب دریا، روشی مؤثر برای تأمین آب شیرین جوامع است و در مناطقی که دسترسی به منابع آب شیرین کافی وجود ندارد، تنها روش موجود است. از طریق فناوری‌های نمک‌زدایی نیاز به احداث سد و استخراج آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب شیرین کاهش می‌یابد.

۲. به صورت کلی، بازده روش‌های مختلف نمک‌زدایی کم است و این مجموعه‌ها هزینه اولیه و عملیاتی زیادی دارند. بهینه‌سازی فناوری و بهره‌گیری از روش‌های نوین نمک‌زدایی و تجهیزات بازیافت انرژی سبب کاهش مصرف انرژی و هزینه‌ها خواهد شد.

فناوری و هزینه‌های زیاد مانع توسعه آب شیرین کن‌های مبتنی بر زیست‌توده شده است.

۱۸. کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی در نمک‌زدایی توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. در این سیستم‌ها ضعف یک منبع در تأمین توان توسط منبعی دیگر جبران خواهد شد و از مکمل بودن منابع انرژی بیش بهره‌برداری صورت می‌گیرد. ترکیب انرژی‌های خورشیدی و بادی با آب شیرین کن‌ها در قالب فناوری فتوولتاییک- توربین بادی- اسمز معکوس همراه با ذخیره‌سازها، راه حلی مطمئن برای تأمین تقاضای آب آشامیدنی مناطق دور از شبکه سراسری در تمام سال است.

۱۹. روند پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که بهره‌گیری از دو یا چند منبع انرژی تجدیدپذیر (فتوولتاییک و بادی) با نمک‌زدایی اسمز معکوس مورد توجه خاص قرار گرفته است. در این زمینه، به کاربرد ترکیبی سایر منابع به خصوص انرژی‌های اقیانوسی کمتر پرداخته شده است.

۲۰. کاربرد ترکیبی فناوری‌های PRO و RED با فرایندهای نمک‌زدایی غشایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با این وجود، ترکیب این فناوری‌ها با نمک‌زدایی‌های حرارتی مطالعه نشده است.

۲۱. معضل کمبود آب آشامیدنی به چالشی اساسی برای کشور در چند دهه اخیر تبدیل شده است. توسعه تحقیقاتی و تجاری سیستم‌های نمک‌زدایی تجدیدپذیر راه حلی نویدبخش و به صرفه برای رفع این معضل خواهد بود.

منابع

- [1]. Manju S, Sagar N. Renewable energy integrated desalination: A sustainable solution to overcome future fresh-water scarcity in India. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;73:594–609 .
- [2]. Water UN. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)(2016)(pp. 1–148). Paris, Fr United Nations World Water Dev Rep. 2016 ;
- [3]. Abdelkareem MA, El Haj Assad M, Sayed ET, Soudan B. Corrigendum to “Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants” [Desalination 435(2018) 97–113](S0011916417321306)(10.1016/j.desal.2017.11.018). *Desalination.* 2018;444:178 .

نمک‌زدایی هسته‌ای بنابر نوع راکتور و نوع فرایند نمک‌زدایی حدود ۰/۴ - ۱/۸ دلار بر متر مکعب است.

۱۱. به‌کارگیری انرژی بادی پتانسیل زیادی در نمک‌زدایی آب دریا دارد. عامل محدودکننده استفاده از این انرژی نوسانات سرعت باد است. از این‌رو، این سیستم‌ها همواره با ذخیره‌ساز باتری، دیزل، اتصال به شبکه و یا در ترکیب با سایر منابع تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی به کار می‌روند.

۱۲. انرژی زمین‌گرمایی مطلوبیت زیادی برای فرایندهای نمک‌زدایی دارد. علت این امر، دما و نرخ حرارتی نسبتاً ثابت منبع زمین‌گرمایی است که برای عملکرد پایدار و پیوسته تأسیسات نمک‌زدایی بسیار مناسب است. با این وجود، تعداد اندک مناطق مستعد زمین‌گرمایی که بتواند برای این منظور به کار رود، استفاده از این انرژی را محدود کرده است.

۱۳. کاربرد انرژی امواج در حال توسعه بوده و هزینه سرمایه‌گذاری زیاد چالشی بر سر راه تجاری شدن آن است. علاوه بر این، مسئله پایداری در تأمین آب با وجود نوسانات موجود در انرژی حاصل از امواج، از کاربرد این انرژی در نمک‌زدایی کاسته است.

۱۴. سیستم RO که از انرژی جذر و مد بهره می‌گیرد، سبب کاهش ۳۱ تا ۴۱٪ درصدی قیمت آب به نسبت تأسیسات RO مرسوم می‌شود.

۱۵. از اختلاف دمای لایه‌های اقیانوس برای تبدیل شورآب به آب شیرین استفاده شده است. دبی آب تغذیه، دمای سطح و عمق دریا و اختلاف آنها از جمله پارامترهای کلیدی طراحی این سیستم‌های نمک‌زدایی است.

۱۶. استفاده از فناوری‌های استخراج انرژی اختلاف غلظت آب (PRO و RED) روشی مؤثر و نویدبخش برای تولید توان الکتریکی و شیرین‌سازی آب دریا است. این فناوری‌ها در ترکیب با نمک‌زدایی، سبب کاهش مصرف انرژی مخصوص و مقدار پساب خروجی از این سامانه‌ها می‌شود و از تأثیرات مخرب بر زیست‌بوم‌های دریایی می‌کاهد.

۱۷. انرژی زیست‌توده به صورت حرارت و الکتریسیته امکان ترکیب با فناوری‌های نمک‌زدایی حرارتی و غشایی را خواهد داشت. با این حال محدودیت منابع، پیچیدگی

- [4]. Available from: <http://www.tccim.ir/>. Accessed 11 August 2020 [Persian]
- [5]. Al-Karaghoul A, Kazmerski LL. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013;24:343–56 .
- [6]. Nassrullah H, Anis SF, Hashaikh R, Hilal N. Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination.* 2020;491:114569 .
- [7]. Esmailion F. Hybrid renewable energy systems for desalination. *Appl Water Sci.* 2020;10[3] .
- [8]. Al-Hinai H, Al-Nassri MS, Jubran BA. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Convers Manag.* 2002;43(13):1639–50 .
- [9]. Rajaseenivasan T, Murugavel KK, Elango T, Hansen RS. A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still. *Renew Sustain energy Rev.* 2013;17:248–59 .
- [10]. Saleh A, Qudeiri JA, Al-Nimr MA. Performance investigation of a salt gradient solar pond coupled with desalination facility near the Dead Sea. *Energy.* 2011;36(2):922–31 .
- [11]. Garrido F, Soto R, Vergara J, Walczak M, Kanehl P, Nel R, et al. Solar pond technology for large-scale heat processing in a Chilean mine. *J Renew Sustain Energy.* 2012;4(5):53115 .
- [12]. Delgado-Torres AM, García-Rodríguez L. Design recommendations for solar organic Rankine cycle (ORC)-powered reverse osmosis (RO) desalination. *Renew Sustain Energy Rev.* 2012;16(1):44–53 .
- [13]. Shatat M, Riffat SB. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *Int J Low-Carbon Technol.* 2014;9(1):1–19 .
- [14]. Lawal DU, Qasem NAA. Humidification-dehumidification desalination systems driven by thermal-based renewable and low-grade energy sources: A critical review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2020;125:109817 .
- [15]. Zarzo D, Prats D. Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination.* 2018;427:1–9 .
- [16]. Al Suleimani Z, Nair VR. Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman. *Appl Energy.* 2000;65(1–4):367–80 .
- [17]. Raval HD, Maiti S. Ultra-low energy reverse osmosis with thermal energy recovery from photovoltaic panel cooling and TFC RO membrane modification. *Desalin Water Treat.* 2016;57(10):4303–12 .
- [18]. Raval HD, Maiti S. A Novel photovoltaic powered reverse osmosis with improved productivity of reverse osmosis and photovoltaic panel. *J Membr Sci Res.* 2015;1[3]:113–7 .
- [19]. Monnot M, Carvajal GDM, Laborie S, Cabassud C, Lebrun R. Integrated approach in eco-design strategy for small RO desalination plants powered by photovoltaic energy. *Desalination.* 2018;435:246–58 .
- [20]. Wright NC, Van de Zande G, Winter AG. Justification, design, and analysis of a village-scale photovoltaic-powered electro dialysis reversal system for rural India. In: *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.* American Society of Mechanical Engineers; 2015. p. V02AT03A043 .
- [21]. Available from: <https://www.mediras.eu/>. Accessed 7 August 2020
- [22]. Summers EK, Arafat HA. Energy efficiency comparison of single-stage membrane distillation (MD) desalination cycles in different configurations. *Desalination.* 2012;290:54–66 .
- [23]. Kim Y-D, Thu K, Ghaffour N, Ng KC. Performance investigation of a solar-assisted direct contact membrane distillation system. *J Memb Sci.* 2013;427:345–64 .
- [24]. Moore SE, Mirchandani SD, Karanikola V, Nenoff TM, Arnold RG, Sáez AE. Process modeling for economic optimization of a solar driven sweeping gas membrane distillation desalination system. *Desalination.* 2018;437:108–20 .
- [25]. Cipollina A, Di Sparti MG, Tamburini A, Micale G. Development of a membrane distillation module for solar energy seawater desalination. *Chem Eng Res Des.* 2012;90(12):2101–21 .
- [26]. Shin J, Lee HJ, An BM, Kim J, Cho J, Wang D, et al. Enhanced performance of a direct contact membrane distillation (DCMD) system with a Ti/MgF₂ solar absorber under actual weather environments. *Desalination.* 2020;491:114580 .
- [27]. Méndez C, Bicer Y. Integration of solar chimney with desalination for sustainable water production: A thermodynamic assessment. *Case Stud Therm Eng.* 2020;21:100687 .
- [28]. Tsilingiris PT. The analysis and performance of large-scale stand-alone solar desalination plants. *Desalination.* 1995;103[3]:249–55 .

- [29]. Salcedo R, Antipova E, Boer D, Jiménez L, Guillén-Gosálbez G. Multi-objective optimization of solar Rankine cycles coupled with reverse osmosis desalination considering economic and life cycle environmental concerns. *Desalination*. 2012;286:358–71 .
- [30]. Dittmar M. Nuclear energy: Status and future limitations. *Energy*. 2012;37(1):35–40 .
- [31]. Misra BM, Kupitz J. The role of nuclear desalination in meeting the potable water needs in water scarce areas in the next decades. *Desalination*. 2004;166:1–9 .
- [32]. Karameldin A, Shamloul MM, Shaalan MR, Esawy MH. Dynamics of reverse osmosis in a standalone cogenerative nuclear reactor (Part I: reactivity changes). *Int J Nucl Desalin*. 2007;2[3]:219–33 .
- [33]. Kavvadias KC, Khamis I. The IAEA DEEP desalination economic model: a critical review. *Desalination*. 2010;257(1–3):150–7 .
- [34]. Khan MAM, Rehman S, Al-Sulaiman FA. A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;97:456–77 .
- [35]. Park GL, Schäfer AI, Richards BS. Potential of wind-powered renewable energy membrane systems for Ghana. *Desalination*. 2009;248(1–3):169–76 .
- [36]. Garcia-Rodriguez L, Romero-Ternero V, Gomez-Camacho C. Economic analysis of wind-powered desalination. *Desalination*. 2001;137(1–3):259–65 .
- [37]. Bardis G, Feloni E, Baltas E. Simulation and Evaluation of a Hybrid Renewable Energy System for Supplying a Desalination Unit on the Island of Lipsi, Greece. *Adv Sci Eng*. 2020;12(1):1–12 .
- [38]. Jiwad FS, Taghadosi MB, Majhool AAA-K. Development of the Hydro Static Wind Turbine Powered RO System for Maximum Power Point and Maximum Permeate Flow Tracking. *Al-Qadisiyah J Eng Sci*. 2020;13(1):60–6 .
- [39]. Subiela VJ, Peñate B, García-Rodríguez L. Design recommendations and cost assessment for off-grid wind powered-seawater reverse osmosis desalination with medium-size capacity. *Desalin Water Treat*. 2020;180:16–36 .
- [40]. Jarquin-Laguna A, Greco F. Integration of hydraulic wind turbines for seawater reverse osmosis desalination. In: 2019 Offshore Energy and Storage Summit, OSES 2019. IEEE; 2019. p. 1–9 .
- [41]. Cheboxarov V V., Yakimovich BA, Abd Ali LM, Al-Rufee FM. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. *Appl Sol Energy (English Transl Geliotekhnika)*. 2019;55(4):260–4 .
- [42]. Available from: <http://geothermalresourcescouncil.blogspot.com/> . Accessed 8 August 2020
- [43]. Sarbatly R, Chiam C-K. Evaluation of geothermal energy in desalination by vacuum membrane distillation. *Appl Energy*. 2013;112:737–46 .
- [44]. Ophir A. Desalination plant using low grade geothermal heat. *Desalination*. 1982;40(1–2):125–32 .
- [45]. Bundschuh J, Ghaffour N, Mahmoudi H, Goosen M, Mushtaq S, Hoinkis J. Low-cost low-enthalpy geothermal heat for freshwater production: Innovative applications using thermal desalination processes. *Renew Sustain Energy Rev*. 2015;43:196–206 .
- [46]. Noorollahi Y, Taghipoor S, Sajadi B. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. *Geothermics*. 2017;67:66–75 .
- [47]. Mohamed AMI, El-Minshawy NAS. Humidification–dehumidification desalination system driven by geothermal energy. *Desalination*. 2009;249(2):602–8 .
- [48]. Tyszer M, Chmielowska A, Tomaszewska B. Initial recognition of the possibilities of use abandoned oil and gas wells to desalinate produced water. In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences; 2020. p. 5002 .
- [49]. Yargholi R, Kariman H, Hoseinzadeh S, Bidi M, Naseri A. Modeling and advanced exergy analysis of integrated reverse osmosis desalination with geothermal energy. *Water Sci Technol Water Supply*. 2020;20[3]:984–96 .
- [50]. Abbasi HR, Pourrahmani H. Multi-criteria optimization of a renewable hydrogen and freshwater production system using HDH desalination unit and thermoelectric generator. *Energy Convers Manag*. 2020;214:112903 .
- [51]. Ansari SA, Kazim M, Khaliq MA, Abdul Hussain Ratlamwala T. Thermal analysis of multigeneration system using geothermal energy as its main power source. *Int J Hydrogen Energy*. 2020 ;
- [52]. Colmenar-Santos A, Palomo-Torrejón E, Mur-Pérez F, Rosales-Asensio E. Thermal desalination potential with parabolic trough

- collectors and geothermal energy in the Spanish southeast. *Appl Energy*. 2020;262:114433 .
- [53]. Haj Assad M El, Al-Shabi M, Khaled F. Reverse osmosis with an energy recovery device for seawater desalination powered by Geothermal energy. In: 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2020. IEEE; 2020. p. 1–5 .
- [54]. Viola A, Franzitta V, Trapanese M, Curto D, Viola D. Nexus water & energy: A case study of wave energy converters (WECs) to desalination applications in Sicily. *Int J Heat Technol*. 2016;34(2):S379–86 .
- [55]. Alkaisi A, Mossad R, Sharifian-Barforoush A. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*. 2017;110:268–74 .
- [56]. Leijon J, Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves – A review. *Desalination*. 2018;435:161–71 .
- [57]. Ling C, Wang Y, Min C, Zhang Y. Economic evaluation of reverse osmosis desalination system coupled with tidal energy. *Front Energy*. 2018;12(2):297–304 .
- [58]. Kim AS, Kim H-J, Lee H-S, Cha S. Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condensers for adjustable power generation and seawater desalination. *Renew Energy*. 2016;85:344–58 .
- [59]. Jin Z, Ye H, Wang H, Li H, Qian J. Thermodynamic analysis of siphon flash evaporation desalination system using ocean thermal energy. *Energy Convers Manag*. 2017;136:66–77 .
- [60]. Available from: http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/otec_plants.html/ Accessed 8 November 2020.
- [61]. Touati K, Tadeo F. Pressure Retarded Osmosis as Renewable Energy Source. In: *Pressure Retarded Osmosis: Renewable Energy Generation and Recovery*. Elsevier; 2017. p. 1–54 .
- [62]. He W, Wang Y, Sharif A, Shaheed MH. Thermodynamic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination system powered by pressure retarded osmosis. *Desalination*. 2014;352:27–37 .
- [63]. Prante JL, Ruskowitz JA, Childress AE, Achilli A. RO-PRO desalination: an integrated low-energy approach to seawater desalination. *Appl Energy*. 2014;120:104–14 .
- [64]. Tong X, Liu S, Chen Y, Crittenden J. Thermodynamic analysis of a solar thermal facilitated membrane seawater desalination process. *J Clean Prod*. 2020;256:120398 .
- [65]. Tshuma I, Cord-Ruwisch R, Ela W. Hydraulic Energy Generation for RO (Reverse Osmosis) from PRO (Pressure Retarded Osmosis). In: *Proceedings of 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2020*. IEEE; 2020. p. 139–42 .
- [66]. Benjamin J, Arias ME, Zhang Q. A techno-economic process model for pressure retarded osmosis based energy recovery in desalination plants. *Desalination*. 2020;476:114218 .
- [67]. Delgado BO, Rodríguez USELG, Leader WP, Leader A, Participants ITC. Improving the performance of reverse osmosis desalination process with pressure retarded osmosis. 2019 ;
- [68]. Li W, Krantz WB, Cornelissen ER, Post JW, Verliefde ARD, Tang CY. A novel hybrid process of reverse electro dialysis and reverse osmosis for low energy seawater desalination and brine management. *Appl Energy*. 2013;104:592–602 .
- [69]. Tufa RA, Curcio E, Brauns E, van Baak W, Fontananova E, Di Profio G. Membrane distillation and reverse electro dialysis for near-zero liquid discharge and low energy seawater desalination. *J Memb Sci*. 2015;496:325–33 .
- [70]. La Cerva M, Gurreri L, Cipollina A, Tamburini A, Ciofalo M, Micale G. Modelling and cost analysis of hybrid systems for seawater desalination: Electromembrane pre-treatments for Reverse Osmosis. *Desalination*. 2019;467:175–95 .
- [71]. Mei Y, Li X, Yao Z, Qing W, Fane AG, Tang CY. Simulation of an energy self-sufficient electro dialysis desalination stack for salt removal efficiency and fresh water recovery. *J Memb Sci*. 2020;598:117771 .
- [72]. Tufa RA, Noviello Y, Di Profio G, Macedonio F, Ali A, Drioli E, et al. Energy, exergy and cost analysis of integrated membrane distillation-reverse electro dialysis system for energy-efficient seawater desalination. 2019 ;
- [73]. Amiri A, Brewer CE. Biomass as a renewable energy source for water desalination: a review. *Desalin Water Treat*. 2020;181:113–22 .
- [74]. Behzadi A, Habibollahzade A, Zare V, Ashjaee M. Multi-objective optimization of a hybrid biomass-based SOFC/GT/double effect absorption chiller/RO desalination system with CO₂ recycle. *Energy Convers Manag*. 2019;181:302–18 .

- [75]. Khanmohammadi S, Atashkari K. Modeling and multi-objective optimization of a novel biomass feed polygeneration system integrated with multi effect desalination unit. *Therm Sci Eng Prog*. 2018;8:269–83 .
- [76]. Rajaseenivasan T, Srithar K. An investigation into a laboratory scale bubble column humidification dehumidification desalination system powered by biomass energy. *Energy Convers Manag*. 2017;139:232–44 .
- [77]. Rajan AS, Raja K, Marimuthu P. Multi basin desalination using biomass heat source and analytical validation using RSM. *Energy Convers Manag*. 2014;87:359–66 .
- [78]. Ibrahim MM, Mostafa NH, Osman AH, Hesham A. Performance analysis of a stand-alone hybrid energy system for desalination unit in Egypt. *Energy Convers Manag*. 2020;215:112941 .
- [79]. Rezk H, Al-Dhaifallah M, Hassan YB, Ziedan HA. Optimization and Energy Management of Hybrid Photovoltaic-Diesel-Battery System to Pump and Desalinate Water at Isolated Regions. *IEEE Access*. 2020;8:102512–29 .
- [80]. Giudici F, Giuliani M, Castelletti A. Multi-objective optimal control of integrated water-energy systems in small off-grid islands. In: 1st IFAC Workshop on Control Methods for Water Resource Systems. 2019. p. 1–3 .
- [81]. Mehrjerdi H. Modeling and optimization of an island water-energy nexus powered by a hybrid solar-wind renewable system. *Energy*. 2020;197:117217 .
- [82]. Xu D, Acker TL. Optimal Design of a Renewable Energy System for an Off-Grid Desalination Facility on the Navajo Nation in the United States. 2019;(May .)
- [83]. Uche J, Muzás A, Acevedo LE, Usón S, Martínez A, Bayod AA. Experimental tests to validate the simulation model of a Domestic Trigenation Scheme with hybrid RESs and Desalting Techniques. *Renew Energy*. 2020;155:407–19 .
- [84]. Campione A, Cipollina A, Calise F, Tamburini A, Galluzzo M, Micale G. Coupling electro dialysis desalination with photovoltaic and wind energy systems for energy storage: Dynamic simulations and control strategy. *Energy Convers Manag*. 2020;216:112940 .
- [85]. Amin I, Ali MEA, Bayoumi S, Oterkus S, Shawky H, Oterkus E. Conceptual Design and Numerical Analysis of a Novel Floating Desalination Plant Powered by Marine Renewable Energy for Egypt. *J Mar Sci Eng*. 2020;8(2):95 .
- [86]. Rezk H, Alghassab M, Ziedan HA. An optimal sizing of stand-alone hybrid PV-fuel cell-battery to desalinate seawater at Saudi NEOM city. *Processes*. 2020;8(4):382 .
- [87]. Li Q, Loy-Benitez J, Nam KJ, Hwangbo S, Rashidi J, Yoo CK. Sustainable and reliable design of reverse osmosis desalination with hybrid renewable energy systems through supply chain forecasting using recurrent neural networks. *Energy*. 2019;178:277–92 .
- [88]. Rosales-Asensio E, García-Moya FJ, González-Martínez A, Borge-Diez D, de Simón-Martín M. Stress mitigation of conventional water resources in water-scarce areas through the use of renewable energy powered desalination plants: An application to the Canary Islands. *Energy Reports*. 2019;6:124–35 .
- [89]. Padrón I, Avila D, Marichal GN, Rodríguez JA. Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago. *Renew Sustain Energy Rev*. 2019;101:221–30 .
- [90]. Ghaffarpour R, Mozafari B, Ranjbar AM, Torabi T. Optimal Investment of a Hybrid Renewable System considering Desalination Units to Supply Electrical Energy and Drinking Water of Abu-Musa Island. *TABRIZ J Electr Eng*. 2019;49[3]:1197–210 .
- [91]. Ghasemi A, Heidarnajad P, Noorpoor A. A novel solar-biomass based multi-generation energy system including water desalination and liquefaction of natural gas system: Thermodynamic and thermoeconomic optimization. *J Clean Prod*. 2018;196:424–37 .