مروری بر روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی با استفاده از سیستم‌های خورشیدی، موارد کاربردی و مزایا و معایب هر روش

صدف محبی [۱]، علی ماشاء اله کرمانی [۲*]، رضا شهبازی [۳]

۱. دانشجو دکترا مهندسی مکانیک بیوسیستم - انرژی های تجدید پذیر، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران (sdf.mohebi@ut.ac.ir)
۲. استادیار،گروه فنی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران (amkermani@ut.ac.it)
۳. دانشجو دکترا مهندسی مکانیک بیوسیستم - انرژی های تجدید پذیر، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران (shahbazi.reza36@ut.ac.ir)

چکیده

آب یکی از نیازهای اساسی انسان است و با رشد روزافزون جمعیت و منابع آب شیرین محدود در جهان مشکلات عدیده ای برای انسان پیش آورده است. خاور میانه یکی از مناطقی است که در دهه اخیر رشد اقتصادی و رشد جمعیت زیادی داشته است. با کاهش منابع آب زیرزمینی در این منطقه، نمک‌زدایی از آب و تولید آب شیرین به یک استراتژی حیاتی برای حفظ روند توسعه پایدار تبدیل شده است. روش‌های متداولی برای این کار وجود دارد که بر مبنای استفاده از منابع مختلف انرژی طبقه‌بندی‌های مختلفی دارد. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انواع و مکانیزم‌های متفاوت دارند. دو روش کلی مستقیم و غیرمستقیم برای استفاده از انرژی خورشیدی در فرایند آب شیرین‌کنی وجود دارد. هر کدام از این روش‌ها نیز طبقه‌بندی‌های متعددی دارند که می‌توان به روش تقطیر خورشیدی، روش رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی (HDH)، آب شیرین‌کنی چنداثری (MED)، آب شیرین‌کنی ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)، روش کمپرسور بخار حرارتی (VCD)، الکترودیالیز و اسمز معکوس اشاره کرد. استفاده از انرژی خورشیدی برای نمک‌زدایی به یک جایگزین مناسب به عنوان منبع انرژی تبدیل شده است. در حالت کلی تحقیقات بیشتر و جامع تری برای توسعه سیاست‌های نمک‌زدایی و راهبردهای مقابله با کمبود آب مورد نیاز است. این مطالعات باید شامل فرآیند طراحی جامع شامل فن‌آوری‌های مختلف نمک‌زدایی از آب شور و بهینه‌سازی از نقطه‌نظر هزینه و مصرف انرژی باشند.

کلمات کلیدی:
آب شیرین کنی چنداثری، آب شیرین‌کنی، ناگهانی چندمرحله ای، روش کمپرسور بخار، الکترودیالیز، اسمز معکوس

***نویسنده مسئول**

مطالعه و بررسی استفاده از روش‌های مختلف آب‌شیرین‌کنی خورشیدی جهت تامین بخشی از آب مورد نیاز مصرفی (مروری)

۱. مقدمه

آب یکی از نیازهای اساسی هر موجود زنده روی زمین است و منابع و کیفیت آن به دلیل خشکسالی، تغییرات اقلیمی و آلودگی‌ها کاهش یافته است. ۹۷ درصد از آب موجود در جهان، آب شور و بقیه آب شیرین است. در کشاورزی دو سوم از آب‌های شیرین در دسترس استفاده می‌شود [۲۶]. بنابراین تولید آب شیرین یک چالش اساسی برای توسعه پایدار است. این مساله با رشد جمعیت جهان، اهمیت بیشتری پیدا می کند. از آنجایی که منابع فراوان آب شور از جمله آب دریا در سراسر جهان موجود هستند، روش‌های مختلف آب‌شیرین‌کنی به عنوان یک روش قابل‌اعتماد برای تولید آب آشامیدنی از آب شور، مرکز توجه قرار گرفته است. میزان قابل توجهی از انرژی مورد نیاز که برای روش‌های مختلف نمک‌زدایی استفاده می‌شود، بیشتر بر پایه سوخت‌های فسیلی هستند. این موضوع باعث افزایش نگرانی‌ها در رابطه با انتشار گازهای گلخانه‌ای و منابع محدود سوخت‌های فسیلی و تهدید روند توسعه پایدار شده است. بنابراین، استفاده از منابع تجدیدپذیر به یک روند رو به رشد در صنعت نمک‌زدایی تبدیل شده‌است. منابع اصلی انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی خورشیدی، باد و انرژی زمین گرمایی هستند. به نظر می‌رسد که انرژی خورشیدی مهم‌ترین راه‌حل برای این مشکل باشد چون به طور قابل اطمینانی در مناطق با سطوح پایین آب شیرین فراوان است. ترکیب منابع قدرت پایدار با تکنولوژی نمک‌زدایی معمولی یک روش منطقی برای ایجاد آب تازه در بسیاری از مناطق جهان است [۲۲].

حتی مناطق نزدیک به دریا و اقیانوس‌ها ممکن است تحت‌تاثیر کمبود آب شیرین قرار بگیرند. خاور میانه یکی از مناطقی است که در دهه اخیر رشد اقتصادی سریع و رشد جمعیت زیادی داشته است. با کاهش منابع آب زیرزمینی در این منطقه، نمک‌زدایی از آب به یک استراتژی حیاتی برای حفظ روند توسعه پایدار تبدیل شده است. حدود ۵۰ درصد از ظرفیت نمک‌زدایی جهان در خاور میانه نصب شده است. این مقدار به حدود ۵۰ میلیارد متر مکعب در سال می‌رسد که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به ۱۵۰ میلیارد متر مکعب برسد. انرژی خورشیدی در این منطقه به طور قابل اطمینانی در دسترس است و به جای سوزاندن سوخت‌های فسیلی، به یک کاندید مناسبی برای تامین برق به کارخانه‌های نمک‌زدایی تبدیل شده است. پیش‌بینی می‌شود که در طی دو دهه، انرژی خورشیدی به ارزان‌ترین فن‌آوری نمک‌زدایی برای آب تصفیه‌شده تبدیل خواهد شد. علاوه بر این، ۱ کیلومتر مربع از تمرکز کارخانه نمک‌زدایی خورشیدی ایجاد شده در صحراهای این منطقه، پتانسیل تولید ۶۰,۰۰۰ لیتر آب شیرین در سال را دارند [۱۷، ۹].

آلودگی‌های مختلفی در آب وجود دارد آلوده شده‌است. مشخصه و تاثیرات بعدی کاهش کیفیت آب مانند آلودگی‌های فیزیکی که باعث تغییر رنگ، کدری، مزه، بو و غیره می‌شود و آلودگی‌های شیمیایی ناشی از اسیدیته و مواد معدنی هستند. آلودگی‌های زیستی شامل جلبک‌ها، میکروارگانیسم‌های بیماری زا، انگل و غیره هستند. بنابراین، از بین بردن چنین آلودگی‌ها یکی از چالش‌های اساسی در دهه‌های اخیر است [۲۶].

کشور ایران در کمربند خشک زمین قرار گرفته است. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی به میزان قابل توجهی در معرض تهدید کمبود آب قرار دارد. گرجیان و قبادیان [۱۶] گزارشی از وضعیت بحران آب در ایران را ارائه کردند و سپس پیشنهاد کردند که نمک‌زدایی از انرژی خورشیدی به عنوان راه حل پایدار برای غلبه بر این بحران مورد بررسی قرار گیرد. تقریبا ۷۰ درصد از ایران پوشیده از آب و هوای خشک و نیمه‌خشک است. همچنین پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۲۱، سرانه آب موجود به ۸۰۰ متر مربع در سال می‌رسد، که کم‌تر از استاندارد جهانی ۱۰۰۰ متر مکعب برای یک سال است. این تهدید بسیار بزرگی است. در حال حاضر حدود ۱۲۰ میلیون متر مکعب آب شیرین سالانه از طریق نمک‌زدایی در ایران تولید می‌شود. تقریبا کل تولید با استفاده از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شوند. بهره‌برداری از منابع انرژ ی تجدید پذیر برای نمک‌زدایی، به ویژه انرژی خورشیدی به دلیل فراوان بودن و بسیار در دسترس بودن در ایران، ثابت کرده که راه مطمئنی به سوی راه‌حل پایدار برای بحران کمبود آب در کشور است [۲۲].

اغلب واحدهای نمک‌زدایی بر پایه دو فناوری، غشا و تقطیر وجود دارند. تکنیک‌های نمک‌زدایی غشایی عبارتند از: اسمز معکوس (RO) الکترودیالیز، غشای تقطیر (MD) و غیره هستند و نمک‌زدایی از کمپرسور بخار (VCD) روش‌های معمول تحت طبقه‌بندی به عنوان فرایندهای نمک‌زدایی حرارتی هستند [۲۷].

این مقاله مروری بر روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی خورشیدی داشته و مزایا و محدودیت‌های هر یک از روش‌ها را ارائه کرده است. خلاصه‌ای از کارکرد هر یک از این روش‌ها همراه با تصاویر مربوط به آن ارائه شده است.

۲. روش‌ها

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انواع و مکانیزم‌های متفاوت دارند و به دو گروه تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای تقسیم می‌شوند. سیستم‌های تک حلقه‌ای بازدهی بیشتری نسبت به سیستم‌های دوحلقه‌ای دارند، اما میزان تخریب و خوردگی در آنها زیاد است که با توجه به گرانی تجهیزات خورشیدی، استفاده از سیستم‌های تک حلقه‌ای برای استفاده طولانی مناسب نیستند. خود دسته‌بندی تک مرحله‌ای روش‌های فعال و غیرفعال دارد. در روش فعال جابجایی سیال به وسیله پمپ و فن صورت می‌گیرد و برای حجم مخزن‌های بزرگتر مناسب است. اما در روش غیر فعال جابجایی سیال به وسیله اختلاف چگالی و از نوع طبیعی است. انواع آب شیرین‌کن‌های غیرفعال شامل حوضچه‌ای، پلکانی، فیتیله‌ای، دودکشی و اضطراری هستند. در کارکرد کلی یک آب شیرین‌کن عواملی چون مدت زمان کارکرد سیستم، شدت و مدت تشعشع، ساختار سیستم آی شیرین‌کن (فعال، غیرفعال)، نوع مبدل حرارتی، نوع سیستم تقطیر و دمای عملکردی سیستم، تغییرات دبی و نوع سیال حامل، دما و دبی آب ورودی به سیستم، تاثیرگذار هستند. [1]

۲.۱ استفاده از انرژی خورشیدی برای سیستم‌های آب شیرین‌کنی

بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در آب‌شیرین‌کن‌ها، برای تبدیل انرژی خورشید به دمای بالا است. این درجه‌حرارت بالا برای تولید بخار و یا دلیل دیگری استفاده می‌شود. از انرژی خورشیدی می توان برای راه‌اندازی سیستم نمک‌زدایی از طریق یک سلول فتوولتاییک استفاده کرد که اشعه خورشیدی را مهار می‌کند [۲۹]. گرمای مبتنی بر خورشید توسط کلکتورهای خورشیدی یا با تمرکز بر روی آینه سهموی و یا غیر متمرکز مانند، دریاچه‌های خورشید محور (حوضچه‌های خورشیدی) برای سیستم تبخیر در فرآیند نمک‌زدایی استفاده قرار می‌شوند [۱۲]. انواع روش های استفاده از انرژی خورشیدی در فرایند آب شیرین‌کنی وجود دارد.

۲.۱.۱ روش مستقیم

در این روش تولید مستقیم بخار و چگالش بخار در همان دستگاه رخ می‌دهد. استفاده از روش مستقیم متداول بوده و نیاز به ارزیابی انرژی بالا ندارند. ساخت و کارایی تجهیزات آن ساده‌تر است. بنابراین برای نمک‌زدایی و تولید آب شیرین برای مصارف خانگی و شبکه‌های کوچک عملی‌تر هستند [۱٤].

۲.۱.۲ روش غیر مستقیم

روش غیر مستقیم خورشید برای کارخانه نمک‌زدایی شامل دو واحد مجزای کلکتور خورشیدی و واحد نمک‌زدایی است. انواع مختلفی از کلکتورهای خورشیدی همراه با سیستم نمک‌زدایی حرارتی، مثل تقطیر غشا، MED، کمپرسور بخار (VC)، ناگهانی چند مرحله‌ای استفاده می‌شوند. ترکیبی از MSF یا MED با یک کلکتور خورشیدی، هزینه فرآیند را کاهش می‌دهد [۱۲]. رایج‌ترین کاربرد برای ظرفیت‌های بسیار بزرگ استفاده از سیستم‌های غیرمستقیم نمک‌زدایی خورشیدی است. در رابطه با استفاده از انرژی گرمایی، طبقه‌بندی کلکتورهای کننده‌های حرارتی خورشیدی مختلف به ردیابی حرکت خورشید و دمای عملیاتی بستگی دارد: (الف) کلکتورهای خورشیدی ثابت مثل کلکتورهای صحفه تخت، متمرکزکننده‌های سهموی ترکیبی و کلکتورهای لوله‌ای خلایی که حرکت برای ردیابی خورشید ندارند و در سطوح دمایی بین ٤۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند، (ب) ردیابی تک محوری مانند کلکتورهای سهموی افقی و کلکتورهای فرسنل خطی که در دمای بین ۱۲۵ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند و (ج) ردیابی دو محوری مانند دیش‌های سهموی و سیستم‌های گیرنده مرکزی که دمای کاری آنها بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس عمل می‌کنند [۲٤]. در شکل ۱ نمای کلی از انواع روش‌های کلی آب شیرین‌کنی خورشیدی نشان داده شده است.

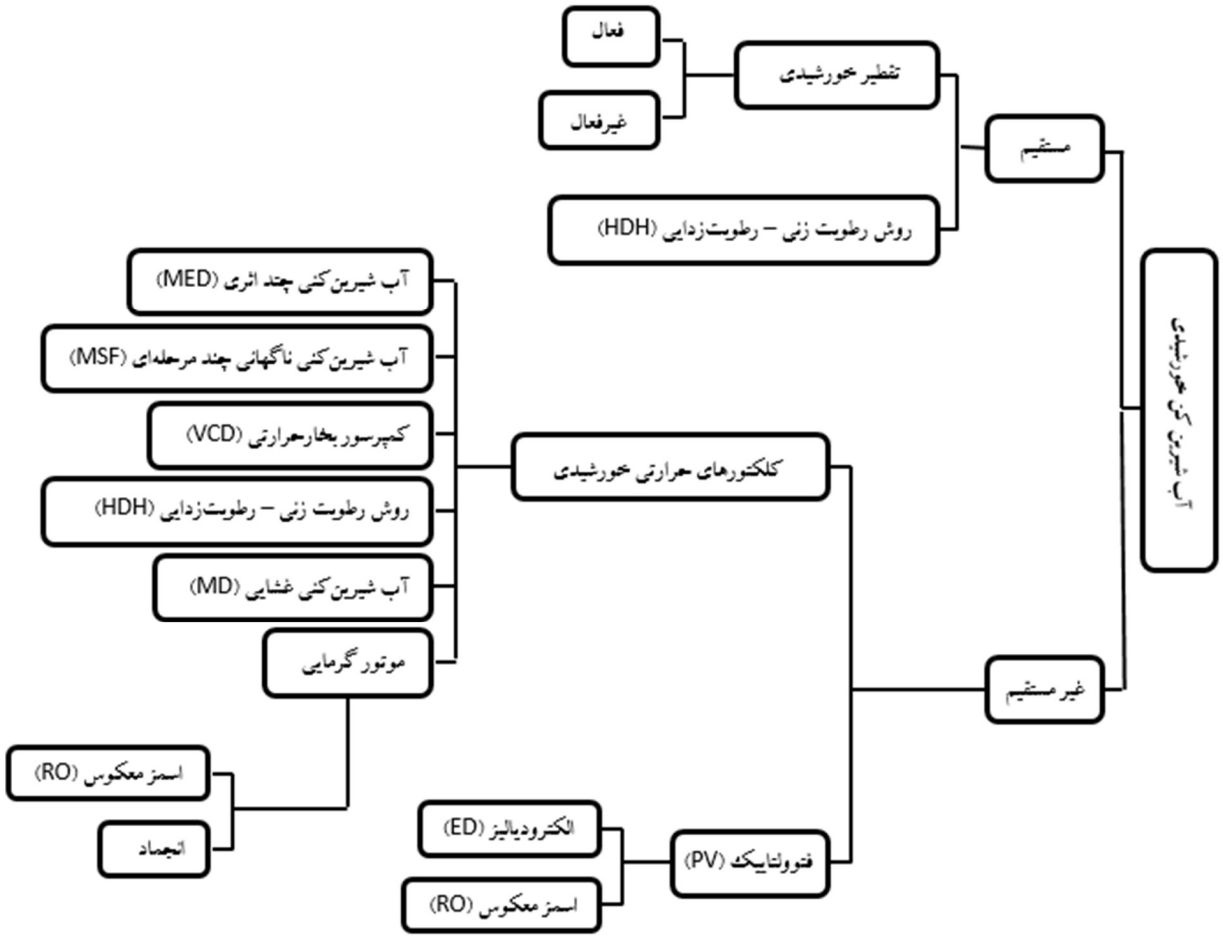
لازم است به این نکته اشاره شود که در نمک‌زدایی غیر مستقیم خورشیدی می توان از کلکتورهای با تمرکز دمایی بالاتر برای تولید برق و در فرایندهای نمک‌زدایی یا تامین برق مورد نیاز واحدهای نمک‌زدایی حرارتی استفاده کرد [۳۰].

کالوگیرو [۲۰] فرآیند نمک‌زدایی اسمز معکوس با استفاده از انرژی خورشیدی را مورد مطالعه قرار داد که انرژی الکتریکی، از کاربرد مستقیم PV یا غیر مستقیم توسط کلکتورهای های خورشیدی مختلف تولید می‌شود.

کارایی سیستم نمک‌زدایی از PV - RO با در نظر گرفتن روش‌های مختلف مانند نصب سیستم‌های ردیابی انرژی، تنظیم زاویه پنل و سیستم‌های تمیز کردن خودکار برای آرایه‌های PV می‌تواند بهبود یابد.

قاضی و فوزی [۱۵] در رابطه با فن‌آوری نمک‌زدایی غشایی با استفاده از یک غشای نسبتا نفوذپذیر برای تولید آب شیرین مطالعه کردند. این غشا یک لایه نازک از مواد متخلخل است که عبور مولکول‌های آب از طریق آن را مجاز می‌کند، در عین حال به یون‌های بزرگ‌تر و نامطلوب و مولکول‌هایی مانند، فلز، باکتری‌ها و نمک‌ها اجازه عبور نمی‌دهد. غشای مورد استفاده برای تولید آب شیرین می‌تواند طبیعی یا مصنوعی باشد. انواع مختلف مواد مورد استفاده برای تولید غشا، پلیمری یا غیر پلیمری از قبیل استات، سلولز، سرامیک، فلزات و غیره هستند.

پراجاباتی و همکاران [۲۶] روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی را مورد بررسی قرار دادند و مشخصه‌های مختلف آنها را از نقطه نظر مصرف انرژی و کیفیت آب و موارد دیگر ارزیابی کردند. این نتیجه حاصل شد که برای تولید آب شیرین، فرایندهای حرارتی شامل روش‌های MSF، MED، MCV، انرژی بیشتری را مصرف می‌کنند. آنها همچنین میزان آلاینده‌های تولید شده از روش‌های مختلف را نیز مقایسه کردند و بیشترین آلاینده تولید شده مربوط به روش MSF و MED و آلاینده حاصل از روش اسمز معکوس کمتر بود. آنها این عامل را بیان کردند که کاهش آلاینده‌ها با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر امکان‌پذیر خواهد بود.



شکل ۱. نمای کلی روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی خورشیدی [۲۲]

منتظری و همکاران [۳] استفاده از متمرکزکننده سهموی خطی را در آب شیرین‌کن خورشیدی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از متمرکز کننده باعث افزایش دمای آب ورودی تا ۵۹ درجه و به عبارت دیگر استفاده از متمرکز کننده بطور میانگین موجب افزایش ۵۹٪ دمای آب می‌شود و درنتیجه راندمان دستگاه نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش دمای آب سهم انتقال حرارت تبخیری بیشتر می‌شود.

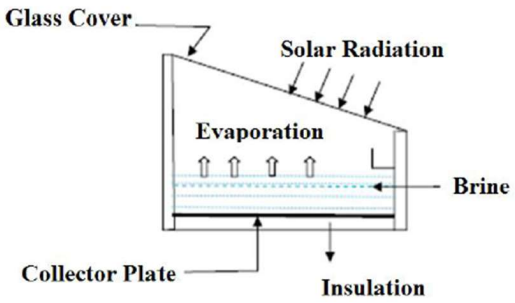
فن‌آوری‌های مختلف خورشیدی را می‌توان برای نمک‌زدایی استفاده کرد و مقالات بسیاری روش‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند. آسایش و همکاران [۷] طراحی یک نیروگاه دودکش هیبریدی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که اگر ناحیه کلکتور تا قسمتی توسط حوضچه نمک‌زدایی تحت پوشش قرار گیرد، تاثیر بیشتری دارد. کساییان و همکاران [۲۲] مقالات در ارتباط با نمک‌زدایی اسمزی را هم با روش اسمز رو به جلو و هم اسمز معکوس که با انرژی خورشیدی کار می کنند، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشتر تحقیقات با روش اسمز معکوس خورشیدی با پنل های فتوولتاییک

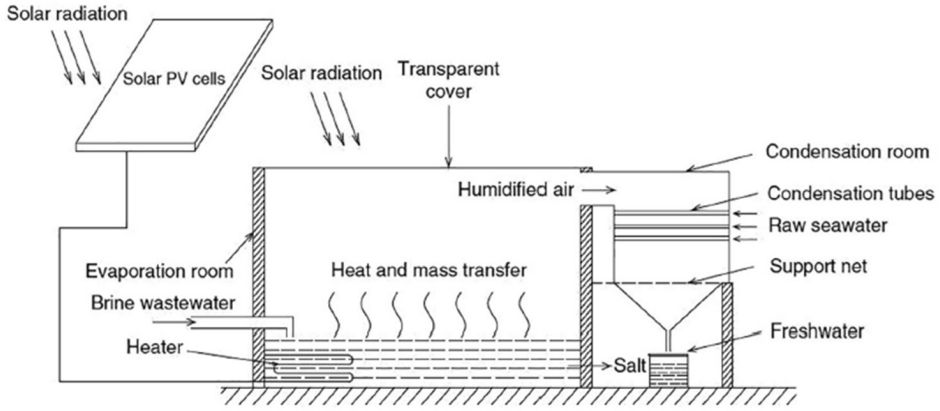
انجام می‌شود، در حالی که کلکتورهای خورشیدی می توانند به طور قابل توجهی عملکرد مدول‌های آب شیرین-کنی آب‌شور را افزایش دهند. دلگادو و رودریگز [۱۱] در یک اقدام مشابه توصیه‌های طراحی را برای روش اسمز معکوس خورشیدی توسط چرخه رانکین ارایه کردند که بر این اساس پتانسیل موثرترین فن‌آوری برای نمک‌زدایی از آب دریا و آب شور در مقیاس‌های کوچک وجود دارد. ایوب و مالیب [۸] نیز توسعه تجهیزات نمک‌زدایی را با استفاده از انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار دادند و تحقیقات انجام‌شده بر روی روش‌های افزایش تولید آب و کاهش هزینه‌های کلی را بررسی کردند. علاوه بر این، ابوجذار و همکاران [۵] چگونگی تاثیر پارامترهای طراحی بر پتانسیل بهره‌وری یک واحد نمک‌زدایی خورشیدی را بررسی کردند و به جنبه‌های زیست‌محیطی به عنوان پارامترهای بسیار موثر در این زمینه اشاره کردند.

کایبل و اِل‌سعید [۱۹] یک دستگاه HDD هیبریدی را بررسی کردند که شامل یک واحد HDH و فرآیند تک مرحله‌ای تبخیر شده توسط یک لوله آب خورشیدی نانوسیال بود. نتایج بدست‌آمده نشان داد که با بهره‌وری اشعه خورشید، نرخ جریان هوا و دمای آب افزایش پیدا می‌کند. بازده کلکتور برای گرم‌کن هوای خورشیدی و هیتر آب خورشیدی به ترتیب ٥٦ ٪ و ٥٥ ٪ به دست آمد.

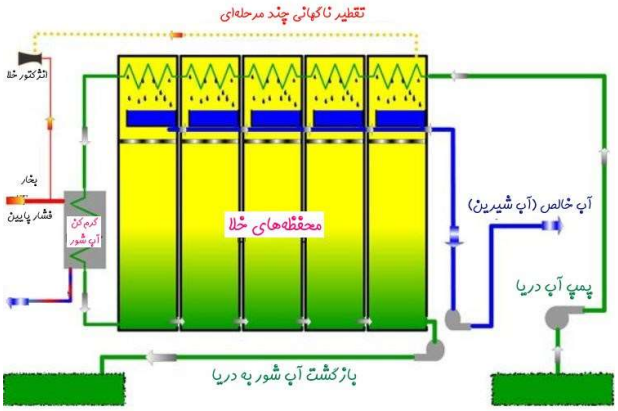
در جدول ۱ روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی و نیز تصاویر هر یک به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول ۱: توضیحات و تصاویر روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی

نام روش	توضیحات	تصویر
تقطیر خورشیدی	آب در اثر گرم شدن به روش گلخانه‌ای در محفظه تبخیر شده و بخارات آن در سطح شیشه بالایی چگالش یافته و در جهت شیب سطح به پایین لغزیده و جمع‌آوری می‌شوند [۲].	 [۲]
روش رطوبت‌زنی – رطوبت زدایی (HDD)	در این روش، آب شور به طور مستقیم و یا غیر مستقیم گرم شده و به بخار آب تبدیل می‌شود و رطوبت هوای محیط را کاهش می‌دهد. سپس از طریق عبور از یک واحد رطوبت‌زدایی آب شیرین متراکم شده تولید می‌کند [۲۲].	

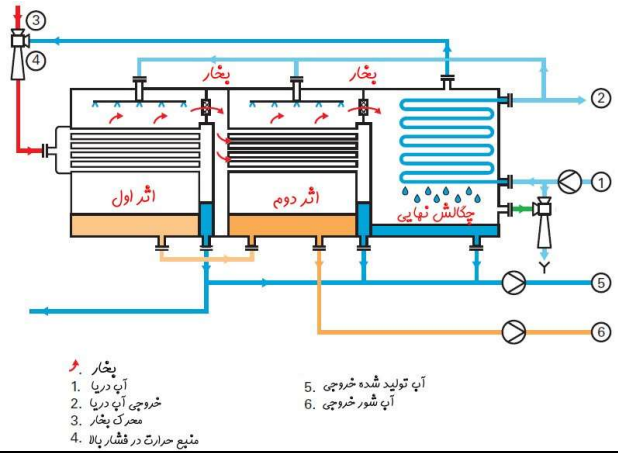


روش ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)



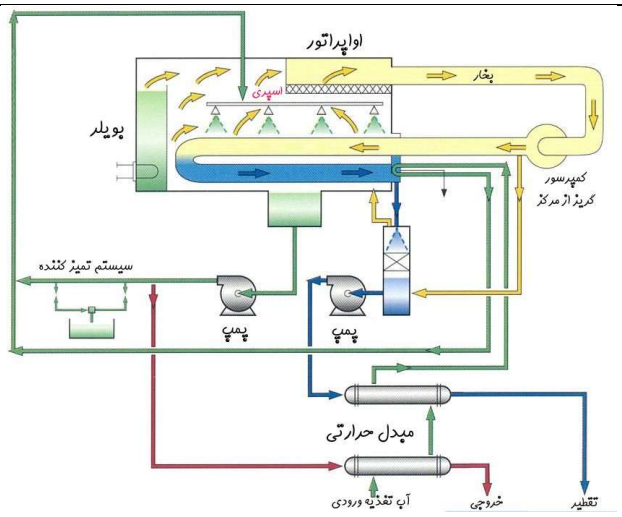
اصل اساسی در این روش، گرم کردن آب اقیانوس با استفاده از انرژی گرمایی و بخار تولید شده از آب شور به دلیل کاهش ناگهانی فشار تا حدود ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس است که آب دریا وارد محفظه خلاء می‌شود. بخار فشرده‌سازی شده به عنوان آب خالص بازیابی می‌شود. روش MSF به خصوص زمانی که آب دریا با جامدات معلق، فلزات سنگین، نفت، گاز و موارد دیگر آلوده شده باشد، ترجیح داده می‌شود [۱۳].

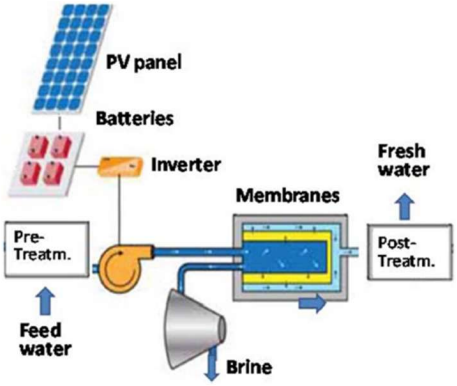
روش چند اثری (MED)



این روش یک فرآیند ترمودینامیکی شامل حدود ۲ تا ۲۰ آرایش به نام اثر هستند. هر اثر تحت فشار و دمای پایین کار می‌کنند. استاندارد اصلی این روش کاهش فشار در آرایش اثرات است یا می‌توانیم بگوییم که بخار تولید شده در MED به دلیل جذب انرژی گرم توسط آب شور است [۶].

روش کمپرسور بخار حرارتی (VCD)	در این روش فرایند تبخیر آب دریا یا آب شور از طریق تبادل گرمایی با یک بخار متراکم شده، انجام می‌شود. بسته به شرایط می‌توان از این فرایند در کنار فرایندهای دیگر استفاده کرده یا به صورت مستقل مورد بهره برداری قرار گیرد. با متراکم کردن بخار، فشار و دمای آن افزایش می‌یابد. از انرژی گرمایی ذخیره شده در بخار متراکم می‌توان برای تبخیر استفاده کرد. امروزه این فرایند یکی از فرایندهای پرکاربرد در نیروگاه‌ها و صنایع مختلف است. این فرایند یعنی تقطیر تراکمی بخار، ظرفیت کمی دارد و آب شیرین اندکی را تامین می‌کند و به صورت رایج در هتل‌ها، استراحتگاه‌ها و حتی کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
روش اسمز معکوس (ROD)	وقتی دو محلول با غلظت‌های متفاوت از غشای نیمه نفوذپذیر از هم جدا می‌شوند وقتی فشار هیدرواستاتیک به حدی بالاتر از فشار اسمزی در سمت متمرکز باشد، جریان مواد نامحلول از طرف متمرکز به سمت ضعیف غشا حرکت می‌کند. به این طریق، آب خالص برخلاف دفع آلاینده‌ها از آب در فن‌آوری اسمز معکوس، از آلودگی جدا می‌شود [۲۷]. اسمز معکوس فن‌آوری برای نمک‌زدایی بزرگ‌تر در مقیاس بزرگ‌تر در حدود ۱۸ کیلو وات ساعت بر متر مکعب است.

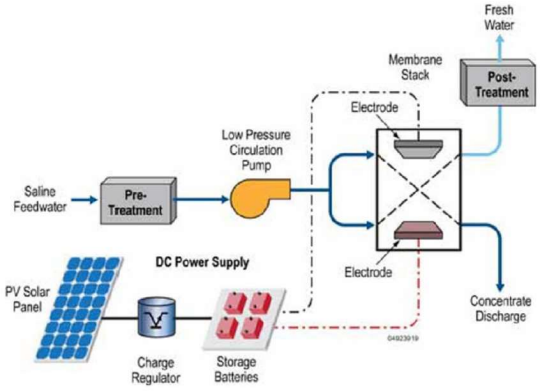




[٤]

الکترودیالیز (ED)

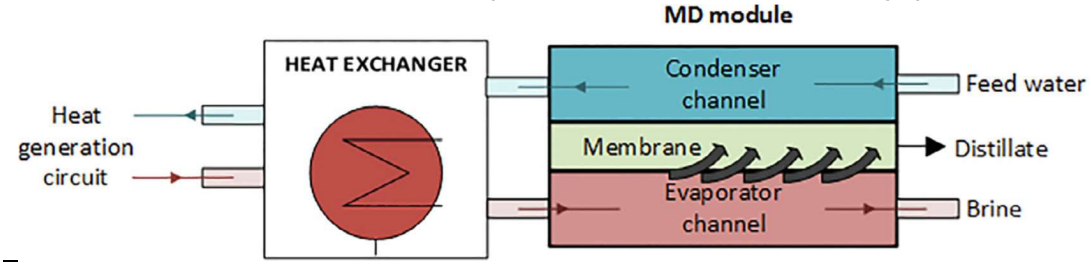
در این روش فلز سدیم (Na^+) با عبور جریان مستقیم با کمک الکترودهای جنس پلاستیک سخت و انعطاف‌پذیر، از آب شور (آب اقیانوس) خارج می‌شود. این فرآیند در فشار اتمسفری رخ می‌دهد. بخش‌های اصلی شامل فرآیند پیش‌تیمار، جفت غشا، پمپ، چارچوب انرژی جریان مستقیم و سیستم پس‌تیمار هستند [۱۲].



[٤]

روش تقطیر غشایی (MD)

آب شور ابتدا از طریق کانال چگالنده ماژول پمپاژ می‌شود. نرخ جریان تغذیه با توجه به محدودیت‌های طراحی ماژول، محدوده عملیاتی محدودی بین ٤٠٠ و ٦٠٠ لیتر بر ساعت دارد. در ادامه سیال ورودی از مبدل حرارتی عبور می‌کند و در آنجا با استفاده از مایع چرخشی که از میدان خورشیدی بیرون می‌آید، گرم می‌شود. سپس از طریق کانال حرارتی ماژول گردش می‌کند. دمای ورودی گرمایی بین ٦٠ تا ٨٠ درجه سلسیوس متغیر است. اختلاف دمایی که در هر دو طرف کانال‌ها ایجاد می‌شود، اختلاف فشاری را ایجاد می‌کند که مولکول‌های بخار را از کانال بخار به کانال چگالنده هدایت می‌کند. در نهایت، در این کانال حرارتی به دنبال فرآیند تغلیظ شدن مولکول‌های فرار طریق غشا غیر آب دوست و متخلخل عبور می‌کنند، در حالی که مولکول‌های غیر فرار به شکل آب‌نمک رد می‌شوند [۱۸]



در جدول ۲ نیز تشریح روش‌های مختلف و مزایا و معایب هر یک ارائه شده است.

جدول ۲: روش‌های مختلف آب شیرین‌کنی و مزایا و محدودیت‌های آنها [۲٦]

نام روش	مزایا	محدودیت‌ها
تقطیر خورشیدی	• هزینه عملیاتی کم • کیفیت خوب آب شیرین تولید شده • در دسترس بودن مواد برای ساخت آن • برای مصارف خانگی	• نیاز به محیط عملیاتی بزرگتر • بهره‌روی کم • برای تولید آب شیرین با ظرفیت بالاتر مناسب نیست

روش رطوبت‌زنی – رطوبت زدایی (HDD)	• هزینه عملیاتی و نصب کمتر • انعطاف‌پذیری بیشتر • مناسب برای عملیات غیرمتمرکز • با هر منبع انرژی کار می‌کند	• هزینه کلی آب شیرین تولید شده بیشتر است • نیاز به الزامات بیشتر
روش ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)	• ظرفیت عملیاتی در مقیاس بزرگتر • و متداول بودن کاربرد آن • عدم تاثیر شوری آب بر روند فرایند و هزینه آن • کیفیت بالای آب شیرین تولید شده • عدم نیاز به پیش‌تیمار • این روش را به سادگی می‌توان با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیب کرد.	• نرخ بازیابی کم • مصرف بالای انرژی • هزینه نصب بالاتر • نیاز به شرایط کاری خاص • نیاز به حرارت دهی به آب قبل از شروع کار • مشکلات خوردگی در صورت استفاده از تجهیزات نامناسب • تجهیزات سنگین‌تر
روش چند اثری (MED)	• سطوح مصرف انرژی حرارتی کمتر • کیفیت بالای آب شیرین تولید شده • حذف بهتر مواد آلی و معلق موجود در آب • عدم تاثیرپذیری این فرایند از شوری آب ورودی • عدم نیاز به پیش‌تیمار • و مشابه با روش MSF به سادگی با منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیب می‌شود.	• نرخ بازیابی کم • هزینه بالای تجهیزات و روند کاری • نیاز به حرارت‌دهی به آب قبل از شروع عملیات • تجهیزات سنگین‌تر • مشکلات خوردگی • نیاز به الکتریسیته برای پمپ خلا
روش کمپرسور بخار حرارتی (TVC)	• مصرف انرژی کمتر • بهره‌وری بیشتر • کیفیت بالای آب شیرین تولید شده • مناسب برای ظرفیت‌های کمتر • تاثیر کمتر بر روی محیط زیست	• هزینه‌ی کلی تولید آب شیرین بیشتر است.
روش اسمز معکوس (ROD)	• عملیات در دمای محیط و مصرف انرژی کمتر • استفاده از مواد پلاستیکی و غیر فلزی با بهره‌وری بالاتر • غشا به جز نمک، دیگر آلودگی‌های وجود در آب را نیز حذف می‌کند • در مقیاس خانگی و نیمه صنعتی کاربرد دارد • آب شیرین تولید شده در این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، کیفیت بالاتری دارد.	• نیاز به پمپ با فشار بالا • ضرورت پیش‌تیمار قبل از شروع فرایند، • هزینه بالای آن • عمر کوتاه تجهیزات (۲ تا ٤ سال) • باقی ماندن باکتری‌ها در غشا در نتیجه طعم و بوی آب شیرین تغییر پیدا می‌کند.

الکترودیالیز (ED)	• نرخ بازیابی بالای آن (۸٤ تا ۹٤ درصد) • عمر بالای غشا (۷ تا ۹ سال) • نیاز به فشار پایین • مصرف انرژی آن نه به حجم آب بلکه به نمک استخراجی از آن بستگی دارد • در تیمار اولیه آن مواد شیمیایی کمتری استفاده می‌شود	• عدم حذف آلودگی‌ها و مواد یونی اشاره کرد که این موارد در مرحله پس‌تیمار حذف می‌شوند • غشاها نیز باید به صورت مکرر تمیز شوند • بهره‌وری کمتر به دلیل نیاز به انرژی الکتریکی	
روش تقطیر غشایی (MD)	• فشار کاری پایین • توسعه نیروگاهی • بیشتر بخش‌های آن از پلاستیک ساخته شده • کیفیت بالاتر آب شیرین • شوری آب ورودی تاثیری درعملیات یا هزینه ندارد • عدم نیاز به پیش‌تیماری	• مقاومت کم غشا • سطح غشای بیشتر به دلیل نیروی محرک پایین • نیاز حرارتی بالا • هزینه‌های بالای غشا • در صورتی که مواد مناسب استفاده نشده باشد، احتمال خوردگی در این روند افزایش می‌یابد	

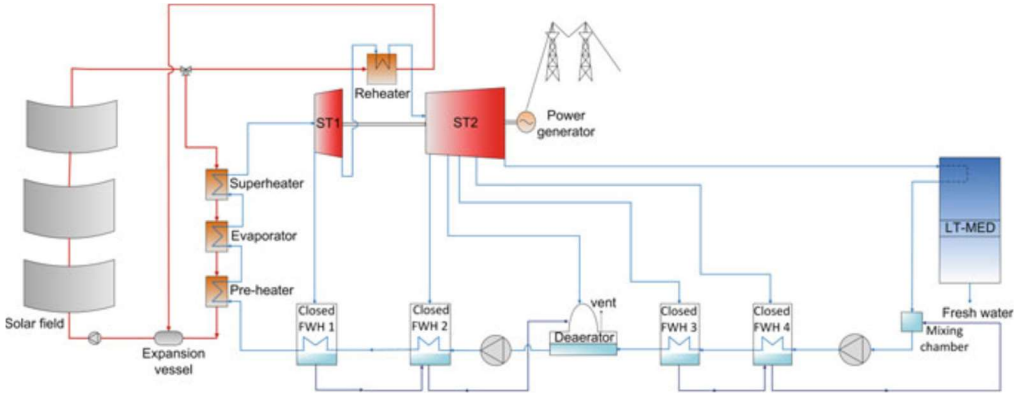
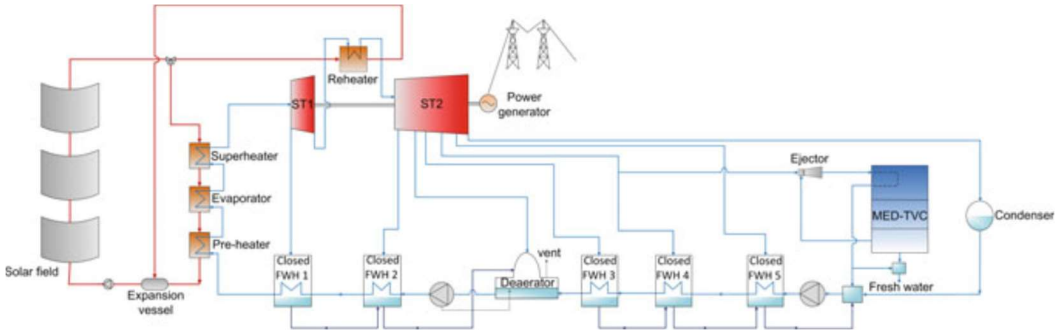
واحدهای نمک‌زدایی مبتنی بر روش الکترودیالیز به طور موثر در سراسر جهان کار می‌کنند که بیشتر آن‌ها در ایالات‌متحده (حدود ۳۱ درصد)، در حدود ۲۳ درصد در کشورهای خاور میانه، و حدود ۱۵ درصد در اروپا قرار دارند نیاز انرژی در روش الکترودیالیز با استفاده از انرژی خورشیدی، به خصوص پنل‌های فتوولتاییک کاهش می‌یابد [٤].

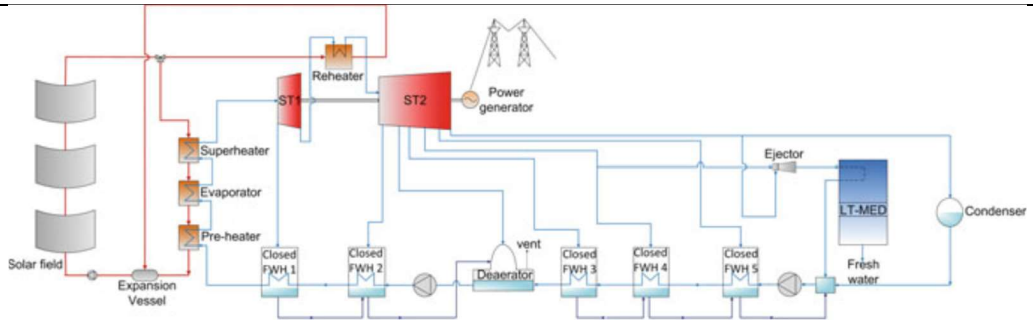
۲.۲. نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز و آب شیرین‌کن

ترکیب نیروگاه‌های متمرکز خورشیدی (CSP) و فرایندهای نمک‌زدایی به علت ماهیت ذاتی موجود بین هر دو سیستم، بسیار مورد توجه است. استفاده از تجهیزات مشترک و استفاده بیشتر از گرمای فرآیند در نیروگاه‌های CSP این ادغام را بسیار جذاب می‌کند. مزایای این ترکیب فرایندها شامل کاهش هزینه تولید برق و نمک‌زدایی در مقایسه با نیروگاه‌های مستقل، با استفاده بهتر از زیرساخت مشترک و اقتصاد مقیاس توربین بخار، صرفه اقتصادی نیروگاه‌های ترکیبی توسعه پیدا می‌کند. همچنین، می‌توان اختلافات ناشی از کمبود آب و انرژی و خطرات اقتصادی مربوط به افزایش هزینه منابع انرژی تجدید ناپذیر را کاهش داد [۲٤].

انتخاب بهترین گزینه به عوامل بسیاری از جمله نسبت توان مورد نیاز به نرخ آب، هزینه انرژی سوخت، فروش برق، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و الزامات محلی که باید به هنگام انتخاب مناسب‌ترین ترکیب مورد توجه قرار گیرند، بستگی دارد. مورد مهم دیگر هزینه زمین و در دسترس بودن نیروگاه‌های متمرکز خورشیدی در نزدیکی دریا است.

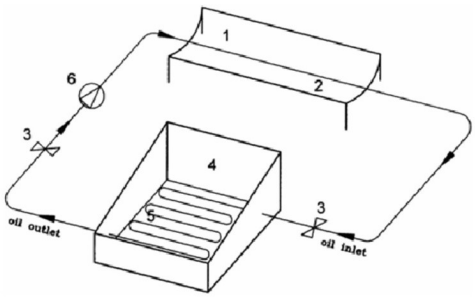
جدول ۳: سیستم‌های نمک‌زدایی در ترکیب با نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز [۲۴]

نام روش	توضیحات	شکل
روش چند اثری با دمای کاری پایین (LT-MED)	به منظور راه‌اندازی نیروگاه نمک‌زدایی بخار اگزوز از توربین استفاده می‌شود و بدین ترتیب، انرژی‌ای که در خنک کردن چرخه قدرت به هدر می‌رود، برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود. در هر دو حالت عملیات، چرخه قدرت از کاهش کارایی در این چیدمان به خاطر درجه‌حرارت بالاتر مورد نیاز در کارخانه MED (حدود ۷۰ درجه سانتی گراد)در اولین مورد، و به خاطر استفاده از بخار فشار بالا از چرخه، در مورد دوم، رنج می‌برد.	
روش چند اثری در ترکیب با کمپرسور بخار حرارتی (MED -TVC)	در مورد دوم، یک تخلیه کننده بخار به نیروگاه MED متصل می‌شود که بازدهی حرارتی واحد نمک‌زدایی را افزایش می‌دهد و بخشی از بخار کم‌فشار با استفاده از بخار پرفشار استخراجی تامین می‌شود. با توجه به موقعیت تخلیه کننده بخار، یک مکان بهینه برای هر فشار بخار وجود دارد که بازدهی حرارتی MED-TVC را حداکثر می‌کند و ناحیه انتقال حرارت را به حداقل می‌رساند.	
روش ترکیبی چند اثری همراه با کمپرسور بخار حرارتی در دمای پایین (LT-MED-TVC)	در این حالت بخشی از بخار اگزوز و بخار استخراج‌شده از توربین به ترتیب بخار به عنوان بخار ورودی و بخار محرک در تخلیه‌کننده استفاده می‌شود که برای تامین توان نیروگاه چند اثری با دمای پایین، فشار بخار متوسط تولید می‌کند.	

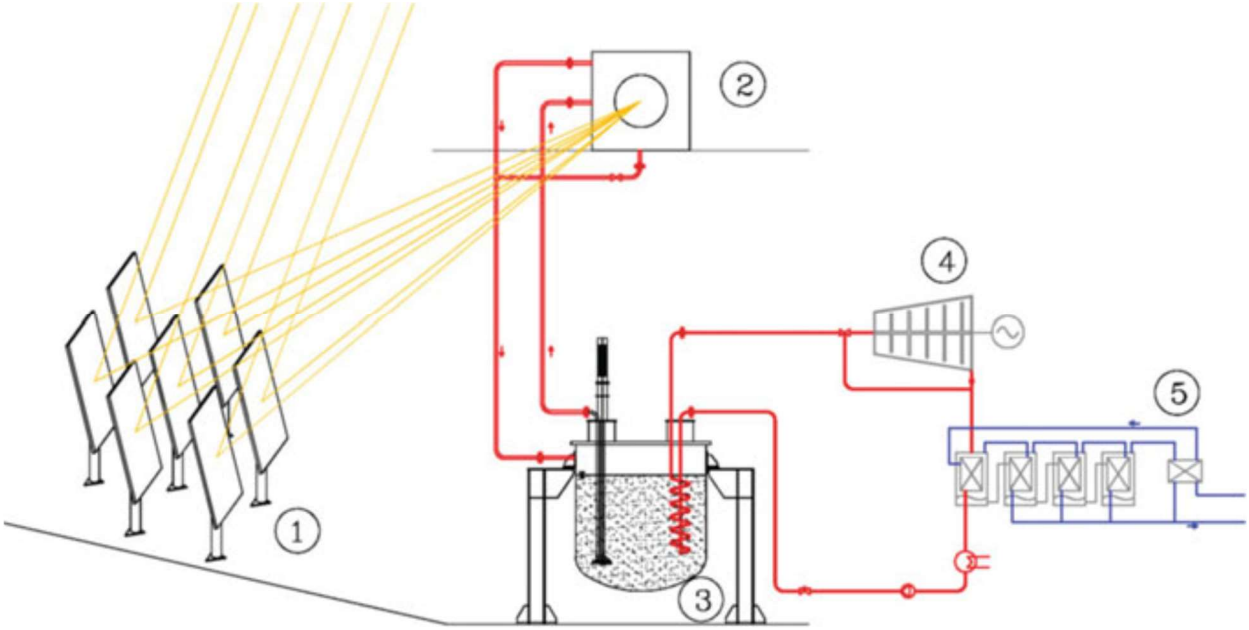


روش متمرکزکننده خورشیدی سهموی خطی

شکل سهموی متمرکز کننده، باعث می شود تابش برخوردی به دهانه متمرکز ننده، روی سطح کوچک دریافت کننده متمرکز شوند. عملکرد متمرکزکننده‌ها بیشتر تحت تاثیر سامانه ردیاب خورشیدی است. سامانه ردیاب باید متمرکز کننده‌ها را در طول روز حرکت دهد تا آن ها را بر روی اشعه های خورشید متمرکز نگه دارد تا بازده بالاتری به دست آید. این انواع گردآورنده های خورشیدی، به سبب کاهش سطح افت گرما، دمای بالاتری در مقایسه با گردآورنده های صفحه تخت به دست می آورند [۳].



فن‌آوری CSP در اکثر موارد به دلیل کاربرد بهتر و عملکرد اثبات شده در نیروگاه‌های واقعی، به صورت سهموی در نظر گرفته می‌شود. یکی از بیشترین پتانسیل‌ها در زمینه هزینه‌های تولید برق و آب، گیرنده مرکزی به ویژه در مناطق با بالاترین سطح تابش خورشیدی است. از سوی دیگر، یک ترکیب مناسب با توجه به سطح دما می‌تواند نیروگاه متمرکز خورشیدی فرسنل همراه با یک واحد MED - TVC باشد. نمونه‌ای از نیروگاه‌های ترکیبی متمرکز خورشیدی با روش نمک‌زدایی چند اثری، مرکز میدانی PROTEAS است که شامل سیستم گیرنده مرکزی هلیوستات برای دریافت انرژی خورشید است و انرژی دریافت شده در نمک‌های مذاب ذخیره می‌شود، چرخه رنکین برای تولید الکتریسیته و واحد نمک‌زدایی چنداثری است [۲٤].



شکل ۲. نمای کلی نیروگاه ترکیبی MED - TVC شامل: (۱) میدان هلیوستات، (۲) گیرنده مرکزی، (۳) مخزن ذخیره نمک مذاب، (٤) توربین بخار و (٥) واحد نمک‌زدایی MED [۲۵]

۳. نتیجه‌گیری

در تمام طول دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در روش نمک‌زدایی آب دریا صورت‌گرفته است که به کاهش اساسی هزینه‌های تولید آب دست یافته‌است. این امر موجب تشویق بیشتر و پیشرفت کسب وکار در سراسر کره زمین به خصوص در مناطق خشک جهان شده است. استفاده از انرژی خورشیدی برای نمک‌زدایی به یک جایگزین مناسب به عنوان منبع انرژی تبدیل شده است. این مساله می‌تواند راه‌حل پایداری برای حل مشکلات کمبود آب و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، به ویژه در مناطق با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی مثل ایران باشد. در حالت کلی تحقیقات بیشتر و جامع تری برای توسعه سیاست‌های نمک‌زدایی و راهبردهای مقابله با کمبود آب مورد نیاز است. این مطالعات باید شامل فرآیند طراحی جامع شامل فن‌آوری‌های مختلف نمک‌زدایی از آب شور و بهینه‌سازی از نقطه‌نظر هزینه و مصرف انرژی باشند.

٤. مراجع:

۱. **باقری اسفه، ح.، رستم زاده، ر.، رستم زاده، م.، ۱۳۹۸. بررسی سیستم‌های مختلف آب شیرین کن خورشیدی.، مجله علمی مهندسی مکانیک ۲۸ (۱)، ص ۳٤ – ۲٤.**

۲. **حسینی، س. ش.، فرهادی، م.، صدیقی، ک. ۱۳۹٦. مطالعه آزمایشگاهی سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از PCM و متلاطم‌سازهای جریان.، مجله مهندسی مکانیک مدرس، تهران، دانشگاه تربیت ۱۱ (٦)، ص ۱۲۷-۱۱۷.**

۳. منتظری، م.، بناکار، ا.، عماد، م.، رحیمی، ع.، ۱۳۹۳. استفاده از متمرکز کننده سهموی خطی در آب شیرین کن خورشیدی. اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی.

4. Abdelkareem, M. A., Haj Assad, M., Sayed, E. T., and Soudan, B., 2018. Recent Progress in the Use of Renewable Energy Sources to Power Water Desalination Plants. Desalination 435, p 97–113.
5. Abujazar M. S. S., Fatihah S., Rakmi A. R., Shahrom M. Z., 2016. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: a review. Desalination, 385, p 178–93.
6. Al-Karaghouli, A., and Lawrence L. K., 2013. Energy Consumption and Water Production Cost of Conventional and Renewable-Energy-Powered Desalination Processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24: p 343–56.
7. Asayesh M, Kasaeian A, Ataei A., 2017. Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation. Energy Convers Manage, 150: p 72–80.
8. Ayoub GM, Malaeb L. 2012. Developments in solar still desalination systems: a critical review. Crit Rev Environ Sci Technol, 42: p 2078–112.
9. Badran, A., Murad, S., Baydoun, E., Daghir, N., 2017. Water, energy & food sustainability in the middle east: the sustainability triangle. Water, energy food sustain middle east sustain triangle.
10. Bamufleh, H., Faissal A., Hassan M. B., and Mahmoud M. E., 2017. Optimization of Multi-Effect Distillation with Brine Treatment via Membrane Distillation and Process Heat Integration. Desalination 408:110–18.
11. Delgado-Torres A. M., García-Rodríguez L. 2012. Design recommendations for solar organic Rankine cycle (ORC)-powered reverse osmosis (RO) desalination. Renew Sustain Energy Rev, 16, 44–53.
12. Eltawil, M. A., Zhengming, Zh., Yuan, L., 2009. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9): 2245-62.
13. Ghaffour, N., Jochen B., Hacene M., and Mattheus F. A. G., 2015. Renewable Energy-Driven Desalination Technologies: A Comprehensive Review on Challenges and Potential Applications of Integrated Systems. Desalination, 356, 94–114.
14. Garcia-Rodriguez, L,. 2003. Renewable energy applications in desalination: state of the art. Solar Energy, 75:381–393.
15. Ghazi A. E., and Fawzi, N., 2003. Design Consideration of RO Units: Case Studies. Desalination, 153(1–3):p 281–286.
16. Gorjian, S., & Ghobadian, B., 2014. Feasibility of Using Solar Energy for Seawater Desalination in Iran. Proceedings of the 2nd International Conference on Green Technology & Ecosystem for Global Sustainable Development Putrajaya, Malaysia.
17. Gorjian S., Ghobadian B., 2015. Solar desalination: a sustainable solution to water crisis in Iran, Renew. Sustain. Energy Rev. 48, p 571–584.
18. Juan D. Gil, J.D. Álvarez, Lidia Roca, J.A. Sánchez-Molina, Manuel Berenguel, F. Rodríguez. 2019. Optimal thermal energy management of a distributed energy system

comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse, Energy Conversion and Management, v 198.
19. Kabeel. A. E., El-Said EMS. 2014. A hybrid solar desalination system of air humidification, dehumidification and water flashing evaporation: Part II. Experimental investigation. Desalination, 341:p 50–60.
20. Kalogirou, S. A,. 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. Progress in Energy and Combustion Science, 31: 242–281.
21. Kasaeian A, Rajaee F, Yan WM. 2019. Osmotic desalination by solar energy: a critical review. Renew Energy, 134, 1473–90.
22. Kasaeian, A., Babaei, S., Jahanpanah, M., Sarrafha, H., Sulaiman Alsagri, A., Ghaffarian, S., Yan W.M., 2019. Solar humidification-dehumidification desalination systems: A critical review, Energy Conversion and Management, v 201.
23. Noreddine, G., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., and Goosen. 2015. Renewable Energy-Driven Desalination Technologies: A Comprehensive Review on Challenges and Potential Applications of Integrated Systems. Desalination 356: p 94–114.
24. Palenzuela P., Alarcón-Padilla D.C. 2019. Concentrating Solar Power and Desalination Plants. In: Polo J., Martín-Pomares L., Sanfilippo A. (eds) Solar Resources Mapping. Green Energy and Technology. Springer, Cham.
25. Papanicolas CN, Bonanos AM, Georgiou MC et al .2016. CSP cogeneration of electricity and desalinated water at the Pentakomo field facility. In: AIP conference proceedings
26. Prajapati, M., Shah, M., Soni, B., Parikh, S., Sircar, A., Balchandani, S., Thakore, S., Tala, M., 2021. Geothermal-solar integrated groundwater desalination system: Current status and future perspective, Groundwater for Sustainable Development, v 12.
27. Shah, D., Panchal, M., Sanghvi, A. et al. 2020. Holistic review on geosolar hybrid desalination system for sustainable development. Appl Water Sci, 10, 155.
28. Shaffer, D. L., Ngai Y. Y., Jack G., and Menachem E., 2012. Seawater Desalination for Agriculture by Integrated Forward and Reverse Osmosis: Improved Product Water Quality for Potentially Less Energy. Journal of Membrane Science, 415–416:1–8.
29. Shatat, M., Worall M., Riffat S., 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: review. Sustainable Cities Societies, 9:67–80.
30. Srithar, K., Rajaseenivasan, T., 2018. Recent fresh water augmentation techniques in solar still and HDH desalination – a review. Renew Sustain Energy Rev, 82:p 629–644.

Studying and investigating the use of different desalination methods based on solar power to provide a portion of the fresh water - a review

Sadaf Mohebi[1], Ali Mashaallah Kermani[2*], Reza shahbazi[3]
1. PhD Student in Mechanical of Biosystem Engineering - Renewable Energy, Aburaihan campus, University of Tehran, Tehran, Iran (shahbazi.reza36@ut.ac.ir)
2. Assistant Professor, Technical Department, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran (amkermani@ut.ac.ir)
3. PhD Student in Mechanical of Biosystem Engineering - Renewable Energy, Aburaihan campus, University of Tehran, Tehran, Iran (sdf.mohebi@ut.ac.ir)

Abstract

Water is one of the basic human needs and has many problems with the increasing population growth and freshwater resources in the world. The Middle East is one of the areas that have been faced into economic growth and population growth in the last decade. With the depletion of groundwater resources in the region, water desalination and freshwater production have become a critical strategy for maintaining sustainable development. There are common methods which is based on the use of different energy sources. desalination has different kinds and mechanisms. There are two direct and indirect methods for using solar energy in the process of desalination. Each of these methods has numerous categories which can be used in solar distillation, Humidification - Dehumidification (HDH), Muliti Effect desalination (MED), Multi Stage Flash desalination (MSF), Vapor compressor desalination (VCD), Electrodialysis (ED) and Reverse Osmosis (RO). Desalination based on solar energy has become a suitable alternative as a source of energy. In general, more and more research is needed to develop desalination policies and strategies to deal with water shortages. These studies should include a comprehensive design process including different water desalination techniques and optimal use of energy and energy consumption.

Key words: Multi Effect desalination (MED), Multi Stage Flash desalination (MSF), Vapor compressor desalination (VCD), Electrodialysis (ED), Reverse Osmosis (RO)

*Corresponding author
amkermani@ut.ac.ir