

# روش‌های نمک‌زدایی در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی

مصطفی محمودی<sup>۱</sup>، جاماسب پیرکندی<sup>۲</sup>، امیر عبدالهی<sup>۳</sup>

۱ استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، mostafamahmoodi@mut.ac.ir

۲ استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶

## چکیده

ایران با میزان بارش متوسط سالیانه کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر کشوری است کم‌باران که با معضل کم‌آبی روبروست. متأسفانه علاوه بر این معضل، پراکندگی مناطق پر باران آن به‌نحوی است که به‌جز مناطق حاشیة دریای خزر و نقاط کوهستانی ایران، میزان بارش سالیانه بسیار اندک است و این کم‌آبی به‌خصوص در مناطق کوچک و دورافتاده نمود پیدا می‌کند. همچنین در بسیاری از این مناطق، به‌دلیل کمبود آب و تخلیة سفره‌های زیرزمینی طی سالیان اخیر میزان شوری آب افزایش یافته است. مناطق دیگری نیز به منابع آب شور دریا دسترسی دارند و در عین‌حال به شبکه توزیع و تصفیة آب دسترسی ندارند. بنابراین توسعه واحدهای نمک‌زدایی در مقیاس کوچک برای ایران ایده‌ای مناسب است. در این مقاله به بررسی فناوری‌های نمک‌زدایی خورشیدی پرداخته می‌شود و با استفاده از نتایج تحقیق، نمونه‌های عملیاتی آن برای استفاده توصیه می‌گردد.

## واژگان کلیدی

نمک‌زدایی، آب‌شیرین‌کن، خورشیدی، مقیاس کوچک

### ۱. مقدمه

توسعة فناوری‌های نمک‌زدایی، ظرفیت حل مشکل یادشده را فراهم آورده است. براساس آمار منتشرشده توسط انجمن بین‌المللی نمک‌زدایی، تا سال ۲۰۱۳ م، بیش از ۸۰ میلیون متر مکعب آب شیرین در روز از منابع آب شور موجود در جهان به‌دست آمده که بیش از ۳۰۰ میلیون نفر از این آب‌های شیرین به‌دست آمده به‌طور مستقیم استفاده می‌کنند [۳]. مطابق با همین آمار، به‌منظور تولید این میزان آب شیرین در روز، بیش از ۱۷۰۰۰

امروزه نیاز به آب شیرین، به‌دلیل صنعتی‌شدن و نیز افزایش استانداردهای زندگی بشر روزبه‌روز در حال افزایش است. به‌طور طبیعی، ذخایر آب شیرین در دسترس، که کمتر از ۳ درصد کل آب‌های زمین است، قادر به تأمین آب شیرین مورد نیاز بشر نیست [۱]. سازمان ملل متحد تخمین زده است که تا سال ۲۰۲۵ م، نزدیک به یک میلیارد و هشتصد میلیون نفر در سراسر جهان در معرض کمبود آب شدید قرار خواهند گرفت [۲]. خوشبختانه

کم‌آبی روبروست. متأسفانه علاوه بر این معضل، پراکندگی مناطق پرباران آن به‌نحوی است که به‌جز مناطق حاشیة دریای خزر و نقاط کوهستانی، میزان بارش سالیانه بسیار اندک می‌باشد و این مسئله کم‌آبی به‌خصوص در مناطق کوچک و دورافتاده نمود پیدا می‌کند. در ایران، هنوز آب بسیاری از مناطق روستایی و محروم تصفیه نمی‌شوند. این مسئله به‌خصوص در بعضی مناطق روستایی - که از قنات، چشمه و چاه در تأمین آب استفاده می‌کنند - بسیار زیاد است. همچنین در بسیاری از این مناطق به‌دلیل کمبود آب و تخلیة سفره‌های زیرزمینی طی سال‌های اخیر، میزان شوری آب افزایش یافته است. مناطق دیگری نیز به منابع آب شور دریا دسترسی دارند و در عین‌حال به شبکه توزیع و تصفیه آب دسترسی ندارند. بنابراین توسعه واحدهای نمک‌زدایی مقیاس کوچک برای ایران ایده مناسبی است (شکل ۲). علاوه بر این، استفاده از واحدهای نمک‌زدایی کوچک مقیاس، حتی در مناطق شهری ایران که در حال حاضر دسترسی به شبکه توزیع آب وجود دارد، در صورت داشتن توجیه اقتصادی می‌تواند مناسب باشد؛ زیرا مشکل کم‌آبی در سال‌های آتی حتی در شهرهای بزرگ نیز نمود پیدا خواهد کرد.

واحد نمک‌زدایی به‌کار گرفته شده است که عمده این واحدها، واحدهایی در مقیاس بزرگ با میزان تولید بالای آب در روز می‌باشند (شکل ۱). بخشی از این واحدها نیز متشکل از واحدهای کوچک مقیاس است که البته درصد کمی از کل واحدها را شامل می‌شود. در جوامع روستایی و مناطق کم‌آب کشورهای در حال توسعه، واحدهای نمک‌زدایی در مقیاس کوچک می‌تواند نقشی بسیار کلیدی و مهم در بهبود کیفیت زندگی بخش مهمی از جمعیت جهان داشته باشد. به‌طور کلی برای بسیاری از مردم، به‌خصوص آنهایی که در این‌گونه جوامع زندگی می‌کنند، انتظار برای ساخت و راه‌اندازی شبکه توزیع و تصفیه آب، مشکل بهداشت و کمبود آب آنها را حل نمی‌کند. به‌طور کلی انتقال آب شیرین به چنین مناطقی یکی از مشکلات بزرگ تلقی می‌شود. راه‌اندازی آب‌شیرین‌کن‌های صنعتی بزرگ در این مناطق هزینه‌های بسیاری تحمیل نموده، به‌نحوی که چنین طرح‌هایی را غیراقتصادی می‌نماید. بنابراین باید در پی راه‌کاری دیگر بود. یک راه‌کار مناسب برای این جمعیت می‌تواند به‌کارگیری واحدهای مقیاس کوچک نمک‌زدایی باشد. ایران با میزان بارش متوسط سالیانه کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر کشوری است کم‌باران که با معضل



شکل ۲. یک سیستم نمک‌زدایی مقیاس کوچک خورشیدی [۴]



شکل ۱. یک سیستم نمک‌زدایی در مقیاس صنعتی [۳]

گلخانه‌ای می‌شوند. این مسئله محققان را به یافتن راه‌های جدیدی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی ترغیب کرده است. در واقع چنانچه نمک‌زدایی با انرژی‌های تجدیدپذیر یکپارچه شده، همچنین روش دفع آب شور مناسبی در آن به‌کارگرفته شود، می‌تواند به‌صورت سازگار با محیط زیست عمل کند. انرژی‌های تجدیدپذیر متعارف برای نمک‌زدایی، انرژی‌های خورشیدی، باد و زمین‌گرمایی می‌باشند که در میان این

به‌طور کلی، فناوری نمک‌زدایی به انرژی بالایی نیاز دارد و در صورت استفاده از سوخت‌های فسیلی، آثاری منفی بر محیط زیست دارد. سالیانه نزدیک به ده هزار تن نفت برای تولید  $1000 \text{ m}^3/\text{d}$  آب شیرین مورد نیاز است [۵]. از طرفی، آب شور تخلیه‌شده از واحدهای نمک‌زدایی، تهدیدی جدی برای ادامه زندگی آبزیان دریایی می‌باشد. واحدهای نمک‌زدایی متعارف، که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، موجب نشر گازهای

انرژی‌ها، انرژی خورشیدی حدود ۵۷ درصد بازار واحدهای نمک‌زدایی برمبنای انرژی‌های نو را به‌خود اختصاص داده است [۶]. کشورهای با سوخت فسیلی غنی مانند کشورهای حوزه خاورمیانه (از جمله ایران) و کشورهای عربی، به‌تازگی توجه خود را به‌سمت استفاده از انرژی خورشیدی با هدف تولید آب‌شیرین برمبنای روش‌های سازگار با محیط زیست معطوف کرده‌اند. در این مقاله سعی بر این است که با مرور مطالعات انجام‌شده در زمینه فناوری‌های نمک‌زدایی موجود و همچنین فناوری‌های نو و بررسی ظرفیت و بازده واحدهای نمک‌زدایی ساخته‌شده که از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند، بهترین واحد نمک‌زدایی انتخاب شود.

## ۲. سیستم‌های نمک‌زدایی مستقیم

در این بخش، انواع سیستم‌های نمک‌زدایی مستقیم بررسی می‌شوند.

### ۱-۲. نمک‌زدایی تقطیر خورشیدی

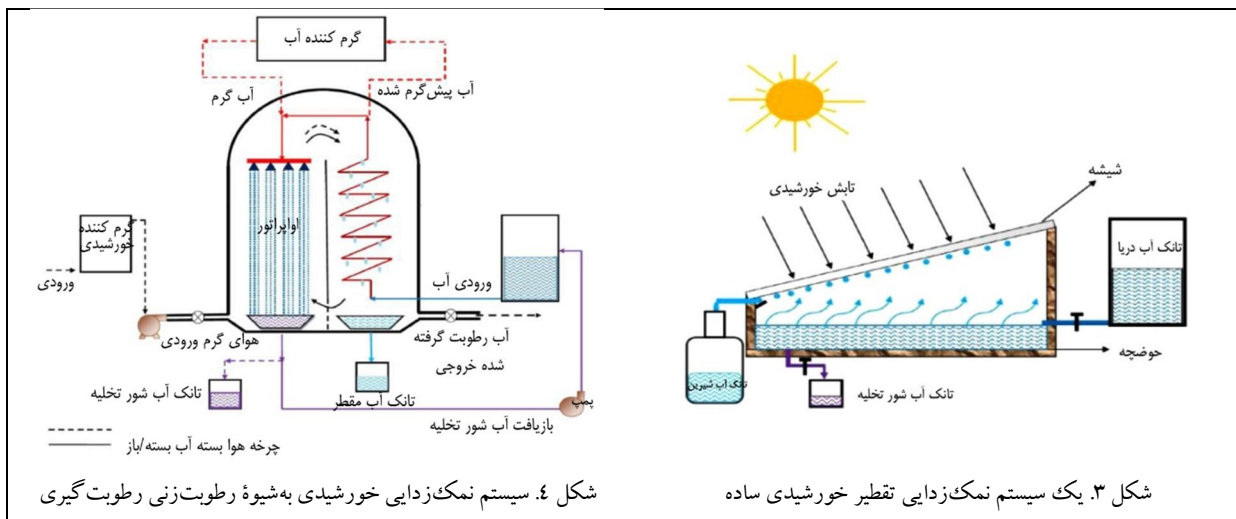
سیستم نمک‌زدایی تقطیر خورشیدی<sup>۱</sup>، که از دسته سیستم‌های نمک‌زدایی مستقیم است، شامل حوضچه‌ای سیاه پرشده از آب شور تا عمقی مشخص است. این حوضچه تحت پوشش شیشه‌ای شیب‌دار قرار دارد تا فرایندهای انتقال تشعشعات خورشیدی و چگالش را تسهیل بخشد. تشعشعات خورشیدی پس از ورود به حوضچه باعث گرم‌شدن سطح سیاه و آب درون آن می‌شود و در نتیجه پس از آن تبخیر رخ می‌دهد. به‌دلیل اختلاف فشار و دما، بخار آب ایجادشده روی سطح شیشه‌ای شیب‌دار، چگالیده شده و در انتهای سطح جمع‌آوری می‌شود. نمایی از این واحد نمک‌زدایی در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطالعات گسترده‌ای به‌صورت نظری و تجربی درباره این سیستم نمک‌زدایی انجام شده است که نشان می‌دهد که آب مقطر به‌دست آمده از آن دارای کیفیت بسیار بالایی است و در عین حال مقدار به‌دست آمده از واحد ساده آن، در محدوده  $2-3 \text{ l/m}^2/\text{d}$  می‌باشد. در واقع در یک واحد ساده آن برای تبخیر کردن ۱ لیتر آب در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد حدود  $2/4 \times 10^6$  ژول انرژی لازم است. میانگین‌گیری در طول ۲۴ ساعت، این میزان انرژی قادر به بیشینه تبخیر  $9 \text{ l/m}^2/\text{d}$  می‌باشد. اما در واقعیت با توجه به تلفات حرارتی و در نظرگرفتن بازده بیشینه ۳۰ تا ۴۰ درصد این واحدها، میزان واقعی تولید آب در بازه

$3 \text{ l/m}^2/\text{d}$  تا ۲ خواهد بود. بنابراین با تعیین آب آشامیدنی موردنیاز در روز برای هر شخص، ۲ تا ۳ متر مربع از فضا برای این واحد نیاز است که بنابراین برای یک خانه با ۵ سکنه، ۱۰ تا ۱۵ متر مربع فضا لازم است که فراهم‌کردن چنین فضایی روی بام خانه اگرچه سخت است، اما معمولاً ممکن است. اما چنانچه قرار باشد این واحد نمک‌زدایی آب آشامیدنی نترات بیشتری را تأمین کند، مشکلی به نام کمبود فضا پدیدار می‌شود که استفاده از این سیستم را به‌خصوص در محیط‌های شهری و حتی در مناطق دورافتاده، امکان‌ناپذیر و غیراقتصادی می‌کند. مطالعات زیادی برای بالابردن بازده و ظرفیت واحد نمک‌زدایی تقطیر خورشیدی انجام شده است. در این مطالعات نشان داده شده است که در یک واحد تقطیر خورشیدی، استفاده از کلکتورهای صفحه‌تخت [۸]، کلکتورهای لوله‌خا<sup>۲</sup>، کلکتورهای بشقابی متمرکزکننده<sup>۳</sup>، استخر خورشیدی<sup>۴</sup>، توربین باد [۹]، آئینه‌های تقویت‌کننده و واحدهای تهویه مطبوع منجر به افزایش ظرفیت آب مقطر به‌دست آمده می‌شود، اگرچه هزینه اولیه سیستم نیز افزایش می‌یابد. برای نمونه نشان داده شده است که با استفاده از کلکتورهای بشقابی متمرکزکننده میزان آب مقطر به‌دست آمده برابر با  $6/7 \text{ l/m}^2/\text{d}$  لیتر خواهد شد که افزایش قابل توجه حدود ۲۵۰ درصدی نسبت به سیستم معمولی دارد و بازده آن نیز نسبت به سیستم معمولی دو برابر می‌شود. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از استخر خورشیدی نیز میزان آب مقطر تولیدی به  $6-7 \text{ l/m}^2/\text{d}$  خواهد رسید [۱۰]. نکته دیگری که در واحدهای نمک‌زدایی تقطیر خورشیدی وجود دارد، این است که ماده سازنده پوشش شیشه‌ای و شیب آن و همچنین عمق آب و پوشش جاذب نیز تأثیر زیادی بر میزان آب مقطر تولیدی دارد. علاوه بر این، در مطالعه تجربی که در سال ۲۰۱۰ م درباره آرایش‌های مختلف واحد تقطیر خورشیدی انجام شد، نشان داده شد که آرایش هرمی شکل پوشش شیشه‌ای روی سیستم منجر به بیشینه‌شدن آب مقطر تولیدی می‌شود. همچنین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده<sup>۵</sup> و استفاده مجدد از گرمای نهان چگالش با استفاده از مراحل متعدد نیز سبب بهبود عملکرد چگالش می‌شود [۱۱]. پوشاندن سطح حوضچه با فوتوکاتالیزورهایی<sup>۶</sup> چون  $\text{CuO}$ ،  $\text{PbO}_2$  و  $\text{MnO}_2$  و همچنین به‌کارگیری وسایل تولیدکننده حرارت مانند ظروف برمی و یدی موجب بهبود قابل توجهی در عملکرد دستگاه می‌شود.

## ۲-۲. نمک‌زدایی خورشیدی به‌شیوهٔ رطوبت‌زنی رطوبت‌گیری

ایدهٔ اصلی پشت سیستم نمک‌زدایی خورشیدی به‌شیوهٔ رطوبت‌زنی رطوبت‌گیری، این است که ظرفیت حمل رطوبت توسط هوا، با افزایش دما افزایش می‌یابد. در این سیستم، وقتی هوای گرم‌شده که به‌صورت طبیعی یا اجباری به گردش درآمده و با اسپری شدن در اوپراتور در تماس با آب شور قرار می‌گیرد، مقدار مشخصی بخار آب از آب شور به‌دست می‌آید که می‌توان در کندانسور آن را

بازیابی کرد. چهار نوع پیکربندی اصلی نمک‌زدایی خورشیدی به‌شیوهٔ رطوبت‌زنی رطوبت‌گیری عبارت‌اند از: سیکل آب باز - هوا بسته، سیکل آب بسته - هوا باز، سیکل آب باز - هوا باز و سیکل آب بسته - هوا بسته. در سیکل آب بسته، آب شور تخلیه‌شده از اوپراتور با آب تغذیه مخلوط می‌شود. اما در سیکل آب باز، آب شور، در هر مرحله از فرایند، از سیستم دفع می‌شود. شماتیک بیان‌کننده سیکل آب باز و آب بسته در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳. یک سیستم نمک‌زدایی تقطیر خورشیدی ساده

شکل ۴. سیستم نمک‌زدایی خورشیدی به‌شیوهٔ رطوبت‌زنی رطوبت‌گیری

در مطالعهٔ انجام‌شده، این سیستم با سیکل آب باز - هوا بسته نسبت به حالات دیگر به صورت بهینه‌تر عمل می‌کند و میزان آب مقطر تولیدی نیز بیشتر خواهد بود [۱۲]. به‌طور کلی، نرخ آب مقطر تولیدی از یک واحد نمک‌زدایی به‌شیوهٔ رطوبت‌زنی - رطوبت‌گیری، بسیار وابسته به دبی و دمای آب تغذیه و نیز دمای هوای ورودی بوده و با پیش‌گرم‌کردن آب و هوا افزایش می‌یابد [۱۳]. همیشه مقدار بهینه‌ای برای دبی جریان آب ورودی به‌منظور خشک کردن هوا وجود دارد که در این حالت بیشینه نرخ انرژی حرارتی برای مقدار مشخصی از دمای آب بازیابی می‌شود. همچنین با افزایش تعداد مراحل نیز نرخ انرژی حرارتی بازیابی شده افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل اقتصادی این سیستم نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند برای ظرفیت‌های کوچکتر بسیار مناسب‌تر و رقابتی‌تر باشد.

## ۲-۳. دودکش خورشیدی

دودکش خورشیدی، انرژی حرارتی خورشیدی را ابتدا به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و سپس انرژی جنبشی با استفاده از یک

توربوژنراتور درون دودکش به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. اجزای اصلی یک دودکش خورشیدی عبارت‌اند از: کلکتورهای خورشیدی با قطر بزرگ، توربین، ژنراتور و دودکش بلند. کلکتورهای مورد استفاده عمدتاً از جنس شیشه یا ورق‌های پلاستیکی‌اند که به‌صورت گلخانه عمل می‌کنند (شکل ۵). به این صورت که گرما را به دام می‌اندازند، بنابراین زمین زیر کلکتورها گرم می‌شود. در نتیجه اختلاف دمایی بین دمای محیط و دمای هوای درون دودکش ایجاد می‌شود که موجب حرکت هوای گرم درون دودکش به‌سمت بالا می‌شود. انرژی جنبشی هوای گرم درون دودکش موجب چرخش توربین قرار گرفته در پایین دودکش شده و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. سیستم یکپارچه شده متشکل از بستر سنگی ذخیره انرژی و حوضچهٔ سیاه حلقوی می‌باشد. در این حوضچه، آب شور قرار گرفته و سطح آن توسط شیشه‌ای شیب‌دار پوشش داده شده است و در زیر کلکتورهای دودکش خورشیدی قرار گرفته است. تشعشعات خورشیدی سبب گرم‌شدن آب و هوا شده و در نتیجه باعث تبخیر آب شور می‌شود که در نهایت این آب تبخیر شده منجر به تولید آب شیرین

می‌شود و همچنین با عبور از دودکش خورشیدی باعث تولید توان نیز می‌شود. اگر این نیروگاه به مدت ۸ ساعت در روز کار کند، قیمت آب تولیدی از آن به نسبت سیستم‌های دیگر تولید آب شیرین پایین‌تر است. در مقایسه با دودکش خورشیدی معمولی، دودکش‌های خورشیدی شیبدار کارآمدتر هستند و می‌توان انرژی الکتریکی بهتری از آنها گرفت [۱۴].

### ۳. سیستم‌های نمک‌زدایی غیرمستقیم

در فرایندهای غشایی، آب قابل شرب، از آب شور (آبی است که میزان نمک در آن از آب شیرین بیشتر و از آب دریا کمتر باشد)، با عبور ملکول‌های آب (در اسمز معکوس) یا یون‌های آب (در الکترودیالیز) از غشاهایی تحت تأثیر فشار بالا (بالا تر از فشار اسمزی) یا تحت تأثیر پتانسیل الکتریکی به دست می‌آید. در این سیستم، میزان شوری آب تغذیه، نقش کلیدی را در میزان آب شیرین به دست آمده ایفا می‌کند. مدل‌های مختلف فرایندهای غشایی خورشیدی، در ادامه آمده است.

#### ۳-۱. نمک‌زدایی اسمز معکوس خورشیدی

اسمزی معکوس فرایند نمک‌زدایی تحت تأثیر فشار است که در آن، آب تغذیه تحت تأثیر فشار و به اجبار از غشاء عبور می‌کند. اگر فشار مورد استفاده بیشتر از فشار اسمزی باشد، آب شیرین

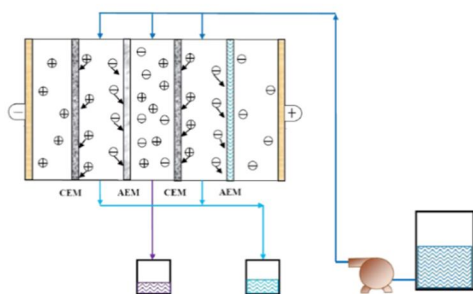
پس از عبور از غشاء در لوله‌ای جمع‌آوری شده و آب شور باقیمانده نیز تخلیه می‌شود. میزان بازیابی آب شیرین برای یک واحد اسمزی معکوس برای آب شور دریا در حدود ۲۵ تا ۴۵ درصد بوده و برای آب لب‌شور، در حدود ۹۰ درصد می‌باشد (شکل ۶). میزان انرژی مورد نیاز برای فرایند اسمزی معکوس به خواص غشاء و میزان شوری آب تغذیه بستگی دارد. بخش‌های اصلی یک سیستم اسمزی معکوس عبارت است از ماژول‌های غشاء، پمپ‌های فشار بالا، منبع انرژی و سیستم بازیابی انرژی.

#### ۳-۲. الکترودیالیز خورشیدی

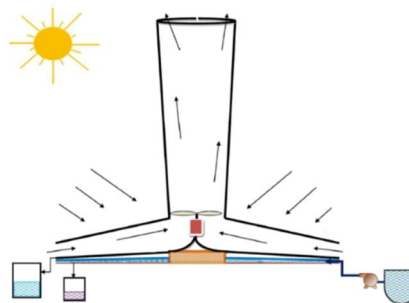
الکترودیالیز فرایند جداسازی نمک از آب شور است. یک واحد نمک‌زدایی الکترودیالیز شامل بخش‌های کوچکتري است که با آب دریا پر و با غشاهای تبادل آنیون و کاتیون از هم جدا شده‌اند. وقتی قطب DC بین کاتد و آند اعمال می‌شود، یون‌های منفی از غشاهای تبادل آنیون عبور و یون‌های مثبت از غشاهای تبادل کاتیون عبور می‌کنند و تعداد یون‌ها در یک بخش ویژه افزایش یافته و به‌عنوان آب شور تخلیه از سیستم خارج می‌شوند. قطب معکوس هر ۲۰ دقیقه اعمال می‌شود تا از رسوب نمک‌ها در غشاها جلوگیری کند. اصول کارکرد یک سیستم الکترودیالیز در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس خورشیدی [۱۴]



شکل ۷. سیستم نمک‌زدایی الکترودیالیز خورشیدی



شکل ۵. نمک‌زدایی از نوع حوضچه‌ای ترکیبی با دودکش خورشیدی

بازده سیستم صفحات فتوولتائیک و بازده کل سیستم به ترتیب بین ۱۰/۵-۶/۸ درصد و ۸/۲-۶ درصد متغیر است. همچنین نرخ آب تولیدی بین  $200 \text{ m}^3/\text{d}$  و  $375 \text{ m}^3/\text{d}$  متغیر است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله انواع سیستم‌های نمک‌زدایی بررسی شدند. در سیستم تقطیر خورشیدی، آب مقطر به دست آمده دارای کیفیت بسیار بالایی است، اما مقدار به دست آمده از واحد ساده آن در مقایسه با مساحت مورد نیاز واحد، در محدوده بسیار کمی است و بازده آن نیز پایین می‌باشد. برای سیستم رطوبت‌زنی رطوبت‌گیری، اگرچه تجزیه و تحلیل اقتصادی آن نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند برای ظرفیت‌های کوچکتر بسیار مناسب‌تر و رقابتی‌تر باشد، اما در ظرفیت‌های بالا، برای کارکرد بهینه نیاز به تعداد بالایی مرحله دارد که هزینه سیستم را بسیار بالا می‌برد. با اینحال، این سیستم در ظرفیت‌های پایینتر نیز به‌طور نسبی نیاز به سطح مقطع بالا برای کندانسور و رطوبت‌زن دارد.

سیستم دودکش خورشیدی به‌هیچ‌عنوان برای مقیاس‌های کوچک مناسب نیست و صرفه اقتصادی ندارد. در واقع، تولید همزمان توان و آب شیرین از یک واحد دودکش خورشیدی اگرچه جذاب بوده، اما تنها در صورتی امکان‌پذیر است که مقدار وسیعی زمین بی‌استفاده یا مناطق ساحلی در دسترس باشد.

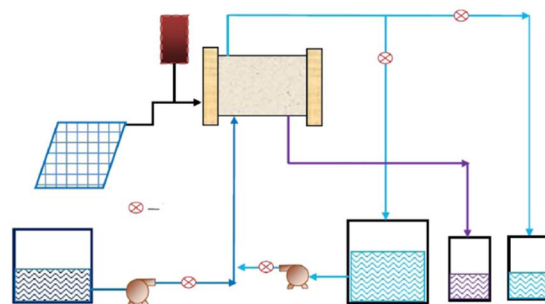
سیستم نمک‌زدایی اسمز معکوس خورشیدی با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک، هم در مقیاس‌های صنعتی و بزرگ و هم در مقیاس‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. واحدهای نمک‌زدایی فرایند اسمزی معکوس خورشیدی با صفحات فتوولتائیک، بسیار برای واحدهای نمک‌زدایی کوچک مناسب‌تر بوده و برای واحدهای متوسط یا بزرگ چندان مناسب نیست. همچنین انرژی مصرفی یک واحد اسمزی معکوس و قیمت آب تولیدی، بستگی زیادی به آرایش غشاهای، بازده سیستم و میزان شوری آب تغذیه دارد. قیمت آب تولیدی و میزان مصرف انرژی سیستم بر پایه صفحات خورشیدی با استفاده از سلول‌های بازده بالا، سیستم‌های ردیابی جدید و غشاهای با عمر طولانی جدید کاهش می‌یابد. اگرچه پیش‌بینی شده که قیمت پنل‌های صفحات خورشیدی کاهش خواهد یافت، اما مشکل اصلی این سیستم، هزینه اولیه بالای آن می‌باشد. واحدهای اسمزی معکوس بسیار

سیستم الکترودیالیز قابلیت نمک‌زدایی از آب شور تخلیه شده از سیستم اسمزی معکوس را نیز دارا می‌باشد [۱۵]. در این سیستم نمک‌زدایی، برای آب زیرزمینی و محلول کلرات سدیم، درصد نمک زدوده شده، به ترتیب برابر با ۹۵ و ۹۹ درصد می‌باشد [۱۶].

یک سیستم نمک‌زدایی الکترودیالیز خورشیدی برای ۳ منطقه بسیار مناسب است:

۱. مناطق بدون داشتن توان الکتریکی یا با توان الکتریکی کم
۲. مناطق بدون دسترسی به منبع سوخت ارزان قیمت
۳. مناطق با تشعشعات خورشیدی فراوان

شماتیک بیان‌کننده این سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است. در زمان تابش تشعشعات قوی خورشیدی، توان زیاد خروجی صفحات فتوولتائیک به‌منظور توان مورد نیاز برای نمک‌زدایی تقریبی آب تغذیه دریا به‌کار می‌رود. پس از آن، این آب که به‌طور تقریبی نمک‌زدایی شده است، در زمان تابش تشعشعات ضعیف خورشیدی که ظرفیت باتری کم شده است، به‌طور کامل نمک‌زدایی می‌شود. یک سیستم نمک‌زدایی الکترودیالیز رانده شده توسط صفحات فتوولتائیک بدون باتری در هند راه‌اندازی شده است و با انجام یک سال تست میدانی درباره آن نشان داده شد که کارایی‌اش قابل اعتماد بوده، برای مناطق روستایی و همچنین مناطق با کنترل از راه دور سیستم مناسب است.



شکل ۸ واحد نمک‌زدایی الکترودیالیز خورشیدی

این سیستم شامل سامانه صفحات فتوولتائیک ( $450 \text{ W}$ ) بوده که به‌صورت دستی، روزانه ۳ بار (جنوب شرقی - جنوب - جنوب غربی) و ماهانه یک بار (شمال - جنوب) مورد ردیابی قرار می‌گیرد. این سیستم روزانه از ساعت ۴:۳۰ صبح تا ۸:۳۰ عصر مورد استفاده قرار می‌گیرد و آب آشامیدنی مورد نیاز ساکنان بومی را تأمین می‌کند. مطالعه تجربی درباره یک واحد نمک‌زدایی الکترودیالیز با استفاده از صفحات فتوولتائیک خورشیدی نشان داده است که



هزینه استحصال آب با سیستم الکترودیالیز خورشیدی برای آبی با غلظت  $2000 \text{ ppm}$  نسبت به سیستم اسمزی معکوس پایین تر است. بنابراین مطابق با بررسی های انجام شده، بهترین سیستم نمک زدایی کوچک مقیاس به منظور ساخت در ایران با توجه به شرایط اقلیمی، سیستم نمک زدایی اسمز معکوس خورشیدی می باشد که به اسمزی معکوس با استفاده از صفحات خورشیدی معروف است. پس از آن سیستم الکترودیالیز خورشیدی در صورتی که هدف شیرین سازی آب با غلظت متوسط باشد، مناسب است.

توسعه داده شده اند و به راحتی قابل کویل شدن با پتل های خورشیدی می باشند. با این وجود برای جذاب تر کردن این سیستم، تحقیقات بیشتری باید انجام بگیرد تا بتوان غشاهای با عمر طولانی تر را توسعه داد و به این ترتیب، هزینه نگهداری و قیمت آب کاهش یابد. سیستم الکترودیالیز خورشیدی با وجود مزایایی که نسبت به سیستم اسمزی معکوس دارد، برای آب های با غلظت نمک بالا همانند آب دریا، چندان مناسب نیست و بیشتر برای آب های لب شور یا آب های شور با غلظت متوسط مناسب است.

## ۵. ماخذ

- [1] USGS – Earth's water distribution, <https://www.usgs.gov/centers/sa-water> (accessed 11 December 2012). Retrieved on 29 December 2012.
- [2] <http://www.unwater.org/statistics> (accessed 31 August 2017).
- [3] <http://hbfreshwater.com> (accessed 31 August 2017).
- [4] <http://sinovoltaics.com/technology/solar-water-desalination-decentralized-desalination-systems-powered-solar-energy> (accessed 31 August 2017).
- [5] S. A. Kalogirou, Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, No. 3, pp. 242-281, 2005.
- [6] M. A. Eltawil, Z. Zhengming, L. Yuan, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 9, pp. 2245-2262, 2009.
- [7] H. M. Qiblawey, F. Banat, Solar thermal desalination technologies, *Desalination*, Vol. 220, No. 1-3, pp. 633-644, 3/1/, 2008 .
- [8] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, A hybrid solar desalination and water heating system, *Desalination*, Vol. 164, No. 2, pp. 189-195, 2004
- [9] M. A. Eltawil, Z. Zhengming, Wind turbine-inclined still collector integration with solar still for brackish water desalination, *Desalination*, Vol. 249, No. 2, pp. 490-497, 12/15/, 2009 .
- [10] A. A. El-Sebaili, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, A. M. Khallaf, Thermal performance of an active single basin solar still (ASBS) coupled to shallow solar pond (SSP), *Desalination*, Vol. 280, No. 1-3, pp. 183-190, 2011.
- [11] T. Arunkum, D. Denkenberger, A. Ahsan, R. Jayaprakash, the augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material, *Desalination*, Vol. 314, pp. 189-192, 2013.
- [12] G. P. Narayan, M. H. Sharqawy, E. K. Summers, J. H. Lienhard, S. M. Zubair, M. A. Antar, The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 4, pp. 1187-1201, 2010.
- [13] S. Farsad, A. Behzadmehr, Analysis of a solar desalination unit with humidification-dehumidification cycle using DoE method, *Desalination*, Vol. 278, No. 1-3, pp. 70-76, 2011.
- [14] F. Cao, H. Li ,Y. Zhang, L. Zhao, Numerical Simulation and Comparison of Conventional and Sloped Solar Chimney Power Plants: The Case for Lanzhou, *The Scientific World Journal*, Vol. 2013, pp. 8, 2013.
- [15] E. Korngold, L. Aronov, N. Daltrophe, Electrodialysis of brine solutions discharged from an RO plant, *Desalination*, Vol. 242, No. 1-3, pp. 215-227, 2009.
- [16] J. E. Lundstrom, Water desalting by solar powered electrodialysis, *Desalination*, Vol. 31, No. 1-3, pp. 469-488, 1979.

- 
1. solar distillation
  2. evacuated tube collector
  3. concentrating dish type collector
  4. solar pond
  5. phase change material
  6. photo catalyst