راهبرد مدیریت یکپارچه آب و انرژی در تأمین امنیت آبی در شرایط خشکسالی

مجید احتشامی[1]* حامد قدیمی[2]* آرش قدیمی[3]

چکیده

تأمین آب پاک با صرف انرژی حداقل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به محدودیت منابع آب شیرین بهداشتی و هزینه‌های بالای تأمین و بهره‌برداری از منابع موجود، استفاده از انرژی رایگان خورشیدی در استحصال آب پاک از آب شور در مناطق مستعد، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. با توجه به بحران کم‌آبی، مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی و پتانسیل موجود در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از سیاست‌های یکپارچه مدیریتی در مدیریت منابع جهت بهینه‌سازی و افزایش همزمان کارایی این دو منبع حیاتی، بیش از پیش ضروری می‌نماید. این مقاله در راستای امکان‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن و بهینه‌سازی مصرف انرژی در تولید پایدار آب جهت کاربردهای شرب، صنعتی یا کشاورزی از دیدگاه ارتباط آب و انرژی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: آب‌شیرین‌کن، انرژی تجدیدپذیر، بهینه‌سازی، ارتباط آب و انرژی و توسعه پایدار.

فصلنامه راهبرد اجتماعی فرهنگی • سال چهارم • شماره پانزدهم • تابستان ۹۴ • صص ۶۴- ۳۹

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱۲/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۳/۲

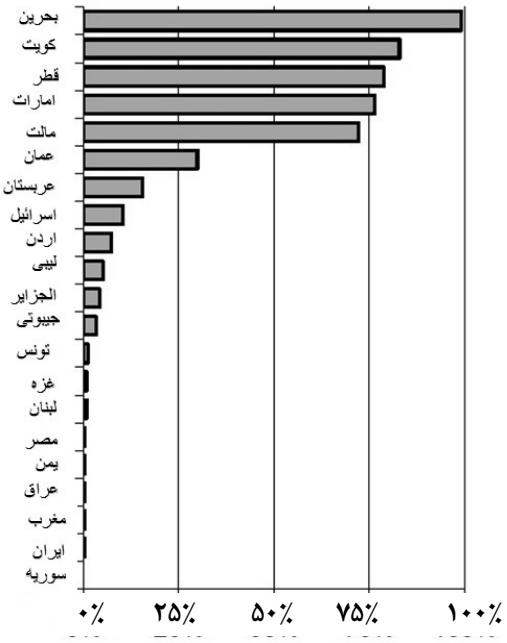
---

۱. استادیار دانشکده عمران، دانشگاه خواجه‌نصیر، نویسنده مسئول (Maehtesh@gmail.com).
۲. کارشناس ارشد مهندسی عمران/ محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف، (h_ghadimi@mehr.sharif.ir).
۳. کارشناس آبیاری و زهکشی، شرکت مهاب‌قدس (a.ghadimi20@yahoo.com).

مقدمه

امروزه پیامدهای تغییر اقلیم، افزایش روزافزون تقاضا و محدودیت منابع موجب شده موضوعات امنیت آب، امنیت انرژی و حفظ منابع زیست‌محیطی در تصمیم‌گیری‌های کلان اقتصادی و سیاسی، دارای اولویت استراتژیک و تعیین‌کننده‌ای باشند. آب در اکثر نقاط کره زمین در دسترس است اما در بیشتر نقاط، کمبود آب آشامیدنی مشاهده می‌شود. نیاز به آب با توجه به رشد روزافزون جمعیت، به‌سرعت در حال افزایش است و منابع آب شیرین موجود، نمی‌توانند همه نیازهای انسانی را برآورده سازند. شرایط خشکسالی به‌خصوص در سال‌های اخیر در مناطق مختلف ایران به‌ویژه جنوب کشور منجر به کاهش دسترسی به آب آشامیدنی شده است. در این مناطق اغلب آب شیرین به‌صورت جاری وجود نداشته و تأمین آب از طریق حفر چاه‌های بسیار عمیق امکان‌پذیر است. این موضوع علاوه بر هزینه‌های گزاف، مشکل غیربهداشتی و شور بودن آب‌های زیرزمینی را نیز در بردارد. از طرفی تأمین آب آشامیدنی از طریق انتقال آب از شهرهای بزرگ به مناطق محروم مشکلات دیگری شامل هزینه بالای انتقال و احداث شبکه آب‌رسانی دارد که این امر را غیراقتصادی می‌نماید.

ازجمله تمهیدات کاهش و سازگاری با تغییر اقلیم تصفیه آب دریا یا آب زیرزمینی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری‌های فراوانی در این زمینه صورت گرفته است. با وجود اینکه بیش از سه‌چهارم حجم آب شیرین‌سازی شده جهان در خاورمیانه تولید می‌شود، سهم کشور ما از این مقدار ناچیز است (Gorjian, 2015). با توجه به بحران کم‌آبی، مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی و پتانسیل موجود در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از سیاست‌های یکپارچه مدیریتی در مدیریت منابع جهت بهینه‌سازی و افزایش همزمان کارایی این دو منبع حیاتی، بیش از پیش ضروری می‌نماید. واقع‌شدن در ناحیه خاورمیانه، رقابت برای دستیابی به انرژی پاک جهت تأمین آب سالم و کاهش وابستگی به سوخت‌های زوال‌پذیر را دوچندان کرده است.



Source: Fichtner, 2011

نمودار ۱. سهم نیاز آبی ملی تأمین‌شده با نمک‌زدایی برای کشورهای خاورمیانه

با توجه به شرایط اقلیمی ایران، وضعیت فعلی تأمین و مصرف آب و افزایش تقاضای آب شیرین به‌خصوص در مناطق جنوبی و مرکزی ایران، استفاده از فناوری‌های نوین برای تأمین آب از منابع آب شور و لب‌شور از ضروریات کشور است. تحقیق حاضر با هدف ارائه راهبرد مناسب تأمین امنیت آب و انرژی در فضای رقابتی کنونی بین کشورها، به ارزیابی فنی ـ اقتصادی روش‌های شیرین‌سازی آب‌های شور و لب‌شور و بررسی محاسن و معایب این سیستم‌ها در سازگاری و تقلیل آثار گرمایش جهانی و راهکارهای بهینه‌سازی آنها در راستای توسعه پایدار چرخه تولید آب و انرژی می‌پردازد. این پژوهش در راستای امکان‌سنجی راهبردهای استفاده از انرژی خورشیدی در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن و بهینه‌سازی مصرف انرژی در تولید پایدار آب جهت کاربردهای شرب، صنعتی یا کشاورزی از دیدگاه ارتباط آب و انرژی ارائه شده است. بدین منظور، بهینه‌سازی راندمان انرژی سیستم‌های نمک‌زدایی آب اسمز معکوس، از راه امکان‌سنجی تلفیق انرژی‌های

تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی و حرارت اتلافی نیروگاه‌ها) در راستای ارائه روشی پایدار و دوستدار محیط‌زیست، که علاوه بر سازگاری با شرایط کشور ما نیاز آبی روزافزون را با افزایش تولید مرتفع ساخته و هزینه دوره عمر واحد آب تولیدی را به حداقل کاهش دهد.

نمک‌زدایی از آب‌های شور در مقایسه با استفاده مجدد از فاضلاب جهت تأمین آب نوشیدنی دارای مزیت نسبی است. هرچند عمده واحدهای رایج آب‌شیرین‌کن صنعتی که به‌طور وسیعی در نقاط مختلف استفاده می‌شوند، مصرف انرژی بالایی داشته و به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از سوخت‌های فسیلی بهره می‌برند. در حال حاضر در همه‌جا استفاده از این روش تأمین آب، اقتصادی نبوده و در کاربرد روش مذکور، بررسی و امکان‌سنجی گزینه‌های مختلف تأمین آب و انتخاب گزینه بهتر جهت تأمین آب شیرین ضروری است. با توجه به رشد سریع جمعیت، پراکنش نامناسب آب شیرین، بالا رفتن نیاز خانوارها، رابطه مستقیم آب سالم و سلامت فردی، ارتقای مقررات و استانداردهای زیست‌محیطی در مورد پساب میادین نفت و گاز، معادن و نیروگاه‌ها، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و امکان ساخت نیروگاه‌های هیبرید تولید آب و انرژی و و از همه مهم‌تر، کاهش ذخایر آب‌های شیرین زیرزمینی و شور شدن این منابع، توسعه این روش نه‌تنها اقتصادی، بلکه سودآور نیز هست.

در این پژوهش هم‌راستا با رویکرد کنونی پروژه‌ها و تحقیقات در زمینه نمک‌زدایی، تمرکز بر روی بیشتر کردن راندمان انرژی و کاهش هزینه‌ها است. رویکرد کلی این مطالعه کاستن معایب و مشکلات سیستم‌ها (روش خورشیدی) و ارائه راهکارهای بهبود کارایی این روش‌ها از طریق تلفیق با فناوری‌های نوین (غشایی، فوتوولتائیک و تمهیدات بازیافت انرژی) جهت دستیابی به پیکربندی‌های جدیدی است که سازگار با شرایط سیاسی، اقتصادی و محیطی کشور ما باشد.

۱. پیشینه تحقیق

بحران کم‌آبی اخیر منجر به تحقیقات گسترده درزمینه توسعه منابع آبی پایدار شده است. این منبع پایدار جایگزین می‌تواند با به‌کارگیری یک استراتژی یکپارچه مدیریت آب که از انرژی‌های تجدیدپذیر در فناوری تصفیه آب بهره می‌برد، حاصل شود. نمک‌زدایی به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان راه‌حل بحران آبی جهانی در قرن ۲۱ مطرح می‌شود. نظر به اینکه تقریباً یک‌چهارم جمعیت دنیا در فاصله کمتر از ۲۵ کیلومتری ساحل زندگی می‌کنند، در آینده نزدیک، آب دریا به یکی از اصلی‌ترین منابع آب شیرین تبدیل خواهد شد (Drioli

Macedonio, 2010 &). نیاز به آب شرب نه‌تنها برای مصرف انسان‌ها، بلکه برای مقاصد آبیاری، صنعتی و گردشگری به این رشد دامن می‌زند. طبق گزارشی (Pike, 2010)، در سال‌های پیش رو فاکتورهایی نظیر کمبود آب، رشد جمعیت و رشد اقتصادی، آلودگی و شهرنشینی موجب رشد شدید بازار فناوری‌های نمک‌زدایی خواهد شد و پیش‌بینی می‌شود سرمایه‌گذاری جهانی سالانه در این بخش از ۸/۳ بیلیون دلار در سال ۲۰۱۰ به دو برابر (۱۶/۶ بیلیون دلار) معادل با مقدار تجمعی ۸۷/۳ بیلیون دلار در این بازه زمانی افزایش یابد (Clean edge, 2011).

هم‌اکنون در ایران در استان‌های سیستان و بلوچستان، بوشهر، هرمزگان و به تازگی در قمرود استان قم، از انواع آب‌شیرین‌کن‌ها به روش اسمز معکوس استفاده می‌شود. این در حالی است که انرژی فراوان موجود شده در کشورهای خاورمیانه به همراه کمبود آب در آنجا احداث مجتمع‌های عظیم و وسیع نمک‌زدایی را ممکن کرده است. در سال ۲۰۰۷ نمک‌زدایی در خاورمیانه به سه چهارم ظرفیت کل جهان رسید (Ghaffour, 2011). انجام مطالعات جامع ارزیابی سیستم‌های نمک‌زدایی از آب‌های شور و لب‌شور در نوار ساحلی جنوب کشور از اواخر سال ۱۳۸۹ به کارفرمایی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و توسط مهندسین مشاور ذی‌ربط این شرکت آغاز و در حال حاضر نیز ادامه دارد. این طرح با هدف بررسی امکان تبدیل آب شور و لب‌شور به آب قابل شرب در سواحل جنوب کشور شکل گرفته است.

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد: مطالعاتی درزمینه طراحی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در سطح کشور، به‌ویژه در سال‌های اخیر صورت گرفته که در مقایسه با تحقیقات فراوان انجام‌شده در سطح جهان و با عنایت به شرایط اقلیمی مناسب در برخی مناطق کشور، بسیار محدود است. در سال ۱۳۹۰ برای نخستین بار در کشور آب‌شیرین‌کن خورشیدی در بخش مرکزی قم نصب شده است. این آب‌شیرین‌کن‌ها توانایی تأمین آب روستاهای با جمعیت ۱۰۰۰ خانوار را دارند. در پالایشگاه گاز سرخون در نزدیکی بندرعباس، روزانه ۱۵۰ مترمکعب پساب شور نفتی در محیط تخلیه می‌شود. با توجه به حجم زیاد پساب خروجی پالایشگاه سرخون بازیافت آن مقرون به‌صرفه است (Asadi et al., 2012). با ساخت پایلوت آب‌شیرین‌کن خورشیدی با سیستم غشایی، تصفیه پساب بسیار شور میدان نفتی سرخون بندرعباس را آزمایش کردند. کیفیت آب خروجی مطابق با

استانداردهای آبیاری سازمان محیط زیست ایران است.

نخستین تحقیقی که بهینه‌سازی مصرف انرژی در آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی ـ رطوبت‌زدایی هوا[1] را مورد بررسی قرارداد، توسط هو[2] و همکارانش (۲۰۰۵) در چین گزارش شد. آنها با استفاده از نمودارهای ترکیبی Pinch برای فرایند رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی، حداقل مصرف انرژی را با استفاده از حداکثر بازیافت حرارت در چگالنده، برای شرایط مشخص محاسبه کردند. در سال ۱۳۸۵ در پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران با هدف بهینه‌سازی سیستم و به‌کارگیری انرژی خورشید در فرایند HD تحقیقات جامعی با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی صورت گرفت. در مرحله اول بهینه‌سازی فرایند با استفاده از تابع حداقل‌سازی شدت مصرف انرژی انجام شد. در مرحله بعد با اضافه کردن کالکتورهای خورشیدی و همچنین پارامترهای مربوط به هزینه واحد آب‌شیرین‌کن، بهینه‌سازی کل سیستم با تابع هدف حداقل نمودن هزینه صورت گرفت. بر مبنای نتایج تئوری به‌دست‌آمده، دستگاهی به ظرفیت تولید ۱۰ لیتر آب شیرین در ساعت طراحی و نتایج تجربی بهینه‌سازی سیستم ارائه شد. تحقیقات تجربی و تئوری متعددی درباره عملکرد و تحلیل اکسرژی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام‌شده است. مهدی‌زاده در سال ۲۰۰۶ محاسبات انرژی و اکسرژی را به‌منظور تعیین شرایط عملیاتی بهینه برای یک دستگاه شیرین‌سازی آب ادغام‌شده از دستگاه اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون انجام داد و در تحلیل شبیه‌سازی، نتایج قابل‌قبولی برای دو فرایند ادغام‌شده ارائه شد. هو و همکاران در سال ۲۰۰۷ از یک فناوری پینچ در فرایند رطوبت‌زنی برای تعیین بیشینه دمای هوای اشباع‌شده و دمای آب برگشت‌یافته از واحد استفاده کردند و سپس فرایند رطوبت‌زدایی را برای تعیین دمای آب خارج‌شده از مبدل حرارتی به کار گرفتند. تورچیا[3] و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک تحلیل تئوری اکسرژی در حالت پایا و ناپایا از یک آب‌شیرین‌کن انجام دادند.

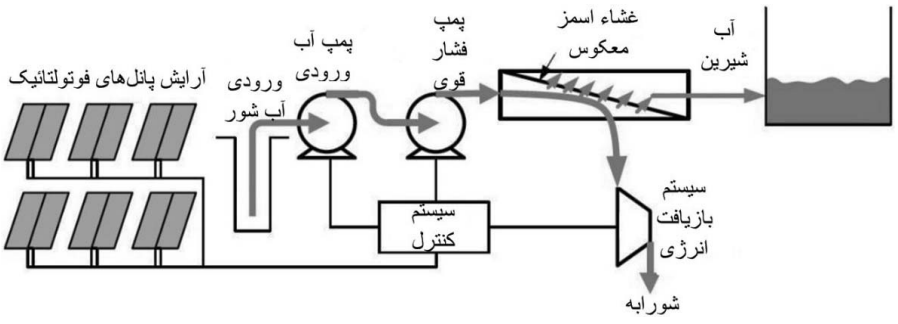
۲. سیستم اسمز معکوس فوتوولتائیک (PVRO)

فرایند اسمزمعکوس شامل اعمال فشار هیدرولیکی جهت غلبه بر فشار اسمزی در غشا برای وادار کردن آب به عبور از سمت غلیظ محلول به‌طرف سمت رقیق است. منابع انرژی

1. Humidification-Dehumidification (HD)
2. Hou
3.Torchia

تجدیدپذیر (RE) برای فرایند نمک‌زدایی، به‌ویژه در نواحی خشک و دورافتاده که استفاده از انرژی مرسوم هزینه‌بر و دور از دسترس است، گزینه‌ای مناسب هستند. آب‌شیرین‌کن اسمزمعکوس (RO) یکی از سازگارترین فرایندهای نمک‌زدایی برای تلفیق با انواع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی است (Bourouni, 2011). سیستم اسمز معکوس فوتوولتائیک (PVRO) کمترین اثر محیطی را داشته و می‌تواند طبق پروفیل‌های مختلف تقاضا پیکربندی شود (شکل ۱). همچنین تعمیر و نگهداری آن به‌سادگی توسط افراد عادی قابل انجام است. اما چنین سیستم‌هایی برای رسیدن به کارایی حداکثر، باید با مشخصات نیاز آبی، تابش خورشید و شرایط کیفی خاص هر منطقه منطبق شوند.

سیستم RO تغذیه‌کننده از PV یکی از مناسب‌ترین اشکال نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر، به‌خصوص در نواحی دورافتاده است. در بازار دو نوع سیستم PV/RO موجود است: سیستمPV/BWRO برای آب لب‌شور و سیستم PV/SWRO برای آب دریا. تعداد زیادی سیستم PV/RO در دنیا نصب شده که برخی از آنها از باتری یا پشتیبان انرژی برای عملکرد ۲۴ ساعته بهره می‌برند (Al-Karaghouli, 2013). نمای شماتیک یک سیستم PV/RO در شکل ۱ مشاهده می‌شود:



Source: Bilton, 2014

شکل ۱. شماتیک مدار جریان سیستم اسمز معکوس فوتوولتائیک

برای حفظ محیط زیست و تبدیل آب دریا به یک منبع آب شرب پایدار، باید از سیستم‌های نمک‌زدا با انرژی تجدیدپذیر و با بازدهی انرژی بیشتر بهره جست. سیستم اسمز معکوس فوتوولتائیک (PV-RO) یکی از بهترین اشکال آب‌شیرین‌کن‌های تجدیدپذیر به‌ویژه برای مناطق دوردست است. بنابراین سیستم‌های کوچک‌مقیاس PVRO در سال‌های

اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفتند و پایلوت‌های زیادی ساخته شد (Khanafer, 2013).

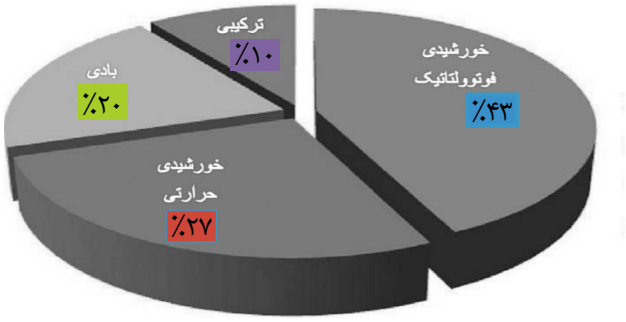
ازآنجاکه آب لب‌شور (آب با شوری بیشتر از آب شیرین و کمتر از آب دریا) فشار اسمزی بسیار کمتری از آب دریا دارد، نمک‌زدایی آن با سیستم PVRO نیازمند آرایه‌های کوچک‌تری از پانل‌های PV است. سیستم‌های PVRO بسیاری برای تصفیه آب لب‌شور در مناطق مختلف دنیا نصب شده است (Fahmy, 2012). لامعی و همکاران (۲۰۰۸) قیمت برقی که در آن انرژی خورشیدی برای آب‌شیرین‌کن اقتصادی است را بررسی کرد. آنها یک فرمول برای تخمین قیمت واحد تولیدی واحدهای آب‌شیرین‌کن PVRO بر اساس قیمت‌های کنونی و آینده پانل‌های PV ارائه کردند. کرشمن[1] و همکاران (۲۰۰۵) یک واحد آزمایشی برای تصفیه اسمزمعکوس آب دریا (SWRO) تغذیه‌شده با انرژی تجدیدپذیر را مطالعه کردند. این واحد نمک‌زدای اسمزمعکوس درحالی که برای بازیافت انرژی با یک منبع شبکه برق‌رسانی ترکیب شده، همزمان از انرژی باد و فوتوولتائیک استفاده می‌کند. درویش و همکاران (۲۰۱۲) امکان‌سنجی کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد برای واحدهای نمک‌زدای SWRO و انتخاب انرژی تجدیدپذیر مناسب برای پمپاژ آب دریا را ارزیابی کردند.

سیستم‌های PVRO (اسمزمعکوس فوتوولتائیک) موضوع بسیاری از تحقیقات بوده‌اند. مدل‌سازی دقیق سیستم اسمز معکوس از موضوعات مورد علاقه بوده است (Hrayshat, 2008). یکی از موارد توجه این مدل‌ها ارزیابی انطباق این سیستم‌ها برای مکانی خاص مانند کشور اردن (Mousa, 2001)، یونان (Essam, 2008) یا اریتره (Thomson, 2003) بوده است. مطالعاتی درباره اجزای مختلف سیستم، مانند تجهیزات بازیافت انرژی و پیکربندی‌های متفاوت سیستم صورت گرفته (Went, 2010) و سرانجام، مدل‌های سیستمی برای توسعه کنترل سیستم‌های خاص به کار برده شده‌اند (Schies, 2010). این مدل‌ها مختص یک پیکره‌بندی خاص از سیستم بوده و برای کاربرد در روش طراحی مدولار که انواع پیکربندی‌ها باید ارزیابی شوند مناسب نیستند. سیستم‌های PVRO بسیاری ساخته و در عمل آزمایش‌شده‌اند (Al-Karaghouli, 2010). تمامی این سیستم‌ها کوچک‌مقیاس و با ظرفیت تولیدی روزانه بین ۱۰۰ لیتر تا ۱۰ مترمکعب آب هستند.

1. Kershman

می‌توان این سیستم‌ها را به دو دسته سیستم‌های تصفیه آب لب‌شور[1] و آب دریا تقسیم کرد.

سیستم‌های PVRO آب لب‌شور در مناطق گسترده‌ای طراحی و امتحان شده‌اند. بسیاری از این سیستم‌ها ساده بوده و به‌دلیل مقیاس کوچک و فشار پایین فاقد تجهیزات بازیافت انرژی هستند. سیستم‌های ساخته و آزمایش‌شده در برزیل، جنوب غربی آمریکا، اردن و پرتغال از این موارد هستند. البته سیستم‌های کوچک PVRO برای آب لب‌شور شامل تجهیزات بازیافت انرژی نیز موجودند که سیستم SolarFlow تست‌شده در استرالیا از آن جمله‌اند (Dallas, 2010). سیستم‌های PVRO برای نمک‌زدایی آب دریا نیز توسعه‌یافته‌اند. اغلب سیستم‌های اولیه شامل یک آرایه از پانل‌های فوتوولتائیک و باتری برای تأمین نیروی یک سیستم اسمز معکوس موجود بود. ازآنجاکه چنین سیستم‌هایی ناکارآمد بودند، تحقیقات اخیر بر روی افزایش کارایی سیستم متمرکز شدند (Calise,2014). انیستیتو تکنولوژیکی جزایر قناری (ITC) یک سیستم کوچک بر اساس باتری ایجاد کرد. سیستم‌های باتری پایه توسط Spectra Watermakers تجاری‌سازی شدند. همچنین تحقیقات منجر به توسعه سیستم‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر فاقد باتری شد. سیستم‌های اسمز معکوس هیبریدی خورشیدی/بادی توسعه یافتند (Mokheimer, 2013). شکل ۲ درصد نسبی کاربرد انرژی‌های غیرفسیلی در فناوری‌های امروزی نمک‌زدایی را نشان می‌دهد.



Source:Qutеishat & Abu-Arabi, 2012

شکل ۲. توزیع کاربرد انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در نمک‌زدایی

1. Brackish water

۳. روش‌شناسی و رویکرد تحقیق

۱-۳. رویکرد مدیریت یکپارچه آب و انرژی در شرایط بحران آبی

آب و انرژی دو مسئله مهم و عمده در زندگی روزمره و توسعه شهری بوده، به‌طوری که سلامت اجتماعی و اقتصادی کشورها وابسته به امنیت انرژی و تأمین آب شرب سالم و بهداشتی است. همبستگی آب و انرژی ارتباط متقابل بین مقدار منابع آب مصرفی جهت تولید و انتقال انرژی و میزان انرژی لازم برای جمع‌آوری، تصفیه، انتقال، ذخیره‌سازی و توزیع آب است (شکل۳).

سرانجام توسعه روش‌های ارزیابی‌های چرخه عمر در سال‌های اخیر به این نتیجه رسید که بسیاری از صنایع و فناوری‌های امروزی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در چرخه ارتباطی بین آب و انرژی تأثیرگذارند. بنابراین بهینه‌سازی مصرف و تأمین امنیت آب و انرژی و نیز کاهش ردپای زیست‌محیطی جوامع تنها با لحاظ این پیوستگی امکان‌پذیر بوده و هیچ‌یک از این شاخص‌ها به‌تنهایی متضمن توسعه پایدار نیست. لذا تخصیص بهینه منابع و آمایش سرزمین بر اساس استعدادهای منطقه‌ای نیازمند مدیریت یکپارچه آب و انرژی است.

افزایش بهره‌وری منابع از ضروریات توسعه پایدار در جهان امروز است. با گسترش بحران آبی جهانی، مفاهیمی چون تجارت آب و آب مجازی، در کنار شاخص‌های اقتصادی وارد تصمیم‌گیری‌های کلان تجاری شد. سپس علاوه بر روش‌های مرسوم محاسبه آب، روشی با عنوان ردپای آب توسعه یافت که شاخصی از میزان آب مصرفی در فرایند تولید یک کالا (کشاورزی یا صنعتی) از دیدگاه چرخه عمر است. از دیگر سو ارزیابی ردپای کربن محصولات صنعتی در جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و تقلیل اثرات تغییر اقلیم در اغلب کشورها الزامی است. مفهوم تجارت کربن در تبادلات بین‌المللی به‌منظور کاهش ردپای زیست‌محیطی فرایندهای صنعتی اعمال شده و موجب تشویق کشورها در توسعه استفاده از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر شده است. آب و انرژی هریک منابع مستقلی دارند که در تلفیق با هم ارتباط آب و انرژی[1] را شکل می‌دهند.

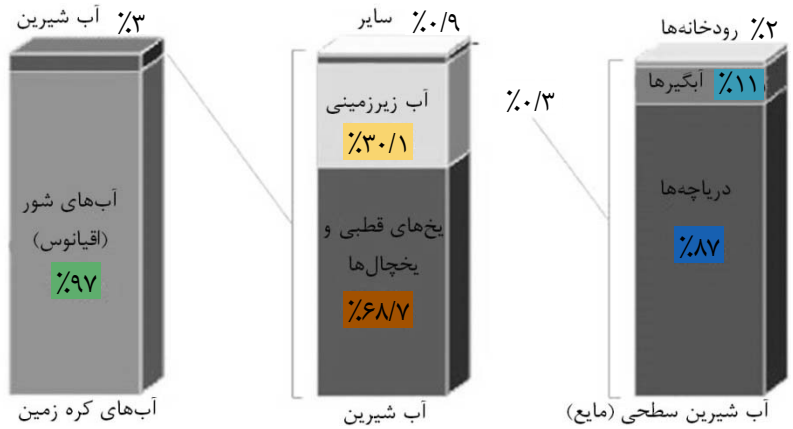
1. Water Energy Nexus = WEN

Source:WEC, 2010

شکل ۳. ارتباط آب و انرژی

کمبود آب شیرین در دنیا به نحوی است که تنها ۲۰ درصد از جمعیت جهان به آب بهداشتی دسترسی دارند و بقیه از این نعمت بی‌بهره‌اند. عمده آب‌های موجود در زمین به‌صورت آب شور بوده یا دور از دسترس هستند (شکل ۴). آب سطحی بیشترین سهم تأمین نیاز آب شیرین در کشور را داراست. در نواحی که نوسانات بارش زیاد است، سدهای بزرگ برای تأمین امنیت آبی بیشتر ساخته شده و در محوریت برنامه‌ریزی منابع آب قرار دارند. این درحالی است که خشکسالی‌های اخیر باعث شده ذخایر سدها بدون جایگزینی کاهش یافته و این امنیت منابع به خطر افتد. بنابراین، با روند رو به رشد فشار وارد بر سیستم ارتباط آب و انرژی محلی،[1] کشورهای مختلف علاوه بر یافتن جایگزین برای منابع سوخت زوال‌پذیر، ناگزیر به اجرای راهکارهای استفاده از منابع آب جایگزین مانند آب تولیدشده در معادن، میادین نفت و گاز، پساب شهری، آب دریا، آبخوان‌های شور برای کاربری‌های مختلف هستند. استفاده از گزینه‌های مستقل از بارش، مانند تصفیه آب دریا، امنیت منابع و تضمین بیشتری ایجاد می‌سازد.

1. Regional Water Energy Nexus



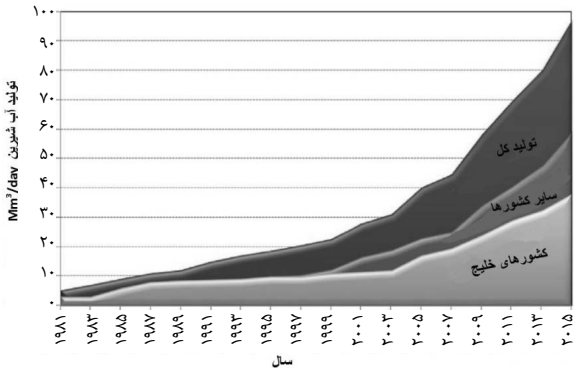
Source: USGS, 2014

شکل ۴. توزیع آب‌های موجود در زمین

تأمین آب پاک با صرف حداقل انرژی به‌خصوص در شرایط فعلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به محدودیت منابع آب شیرین بهداشتی و هزینه‌های بالای تأمین و بهره‌برداری از منابع موجود، استفاده از انرژی رایگان خورشیدی در استحصال آب پاک از آب شور در مناطق مستعد، توجه دانشمندان و محققان بسیاری را به خود جلب کرده است. تحقیقات فراوانی در این رابطه در سطح جهان به انجام رسیده اما در حال حاضر، تحقیقات و اقدامات چندانی در کشور به‌منظور استفاده از این نعمت خدادادی با توجه به ظرفیت‌های محدود آب پاک و به‌ویژه در شرایط سخت آتی به عمل نیامده و این در حالی است که در برخی از نقاط پهناور کشور به‌خصوص حاشیه خلیج‌فارس پتانسیل مناسبی به‌منظور تبدیل آب‌های شور و لب‌شور به آب شیرین با استفاده از انرژی رایگان خورشیدی در این مناطق به‌ویژه جهت مناطق روستایی کم‌جمعیت و استفاده در برخی از صنایع و مصارف دیگر وجود دارد. شکل ۵ روند رو به رشد تولید آب بهداشتی به روش نمک‌زدایی را نشان می‌دهد.

با توجه به وضعیت اقلیمی کشور و گستردگی مناطق کویری و خشک، تأمین آب شیرین یکی از مهم‌ترین مشکلات این مناطق به شمار می‌رود. وجود منابع آب شور در این مناطق عملیات شیرین‌سازی آب را ضروری می‌نماید. در بسیاری از نواحی خشک مرکز و جنوب ایران، آب زیرزمینی لب‌شور و آب حاصل از میادین نفت و گاز به‌طور گسترده در دسترس هستند و پتانسیل تأمین نیاز آب آتی ناحیه را دارند. پساب شور و روغنی

پرحجم‌ترین محصول جانبی اکتشاف و استخراج نفت و گاز بوده که نیازمند تصفیه در تأسیسات تصفیه پالایشگاه است. مدیریت چنین حجم بزرگی از پساب، برای تولیدکنندگان نفت و گاز امری کلیدی است.



Source:Lattemann et al., 2010

شکل ۵. رشد فعلی و پیش‌بینی‌شده صنعت تولید آب شیرین به روش نمک‌زدایی

روش متداولی که برای تأمین آب شرب در مناطق خشک به کار گرفته می‌شود استفاده از سیستم‌های معمول آب‌شیرین‌کن است که مشکلات تأمین انرژی و سوخت مورد نیاز، فناوری بالا در این‌گونه سیستم‌ها، هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری، ظرفیت بالا و درنتیجه عدم کاربری آن برای مناطق با جمعیت محدود باعث می‌شود که استفاده از این‌گونه سیستم‌ها در روستاها امری غیرممکن باشد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تأمین آب شیرین برای چنین مناطقی باید به اقتصادی بودن سیستم آب‌شیرین‌کن، به‌کارگیری آب‌شیرین‌کن‌هایی به قدرت تصفیه آب شور و جداسازی انواع نمک‌ها، میکروارگانیزم‌ها، باکتری‌ها، انگل‌ها و فلزات سنگین از آب، استفاده از منابع انرژی پاک و ارزان، سادگی سیستم و قابلیت استفاده آسان برای روستاهای محروم و هزینه پایین ساخت، تعمیر و نگهداری توجه کرد. بنابراین با استفاده از فرصت ایجاد شده ناشی از رشد روزافزون صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان بخشی تهدیدات ناشی از گرمایش جهانی، در قالب استرس وارد شده بر سیستم‌های محلی چرخه ارتباطی آب ـ انرژی را با جایگزینی منابع جدید آب و انرژی برطرف کرد.

۲-۳. امکان‌سنجی کاربرد انرژی تجدیدپذیر در آب‌شیرین‌کن‌ها

برای اجتماعات کوچک و دورافتاده که به‌دوراز شبکه برق‌رسانی هستند و به انتقال آب از نقاط دیگر وابسته‌اند، واحدهای آب‌شیرین‌کن با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند راهکار پایدار مقابله با خشکسالی باشد. بنابراین استفاده از انرژی پاک خورشیدی برای تأمین آب سالم روشی ایده‌آل برای این اجتماعات است (Bilton, 2011). انواع انرژی تجدیدپذیر قابل تلفیق با هر فناوری، بر اساس نوع فرایند نمک‌زدایی قابل تعیین است (جدول ۲).

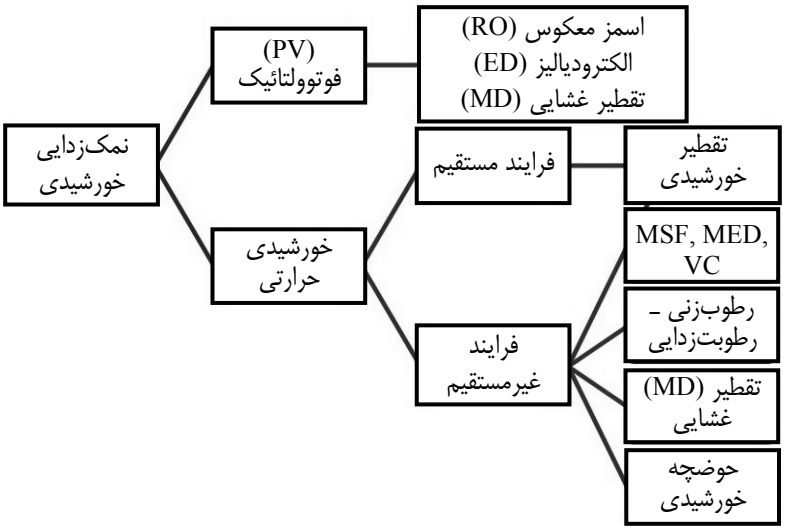
جدول ۲. ترکیبات امکان‌پذیر فناوری‌های آب‌شیرین‌کن با انرژی‌های تجدیدپذیر*

	خورشید				باد		زمین‌گرمایی		اقیانوس		
	کالکتور حرارتی	متمرکز (CSP) حرارتی	متمرکز (CSP) الکتریکی	PV	مکانیکی	الکتریکی	حرارتی	الکتریکی	الکتریکی	مکانیکی	حرارتی
SD	✓										
MEH	✓	✓					✓				✓
MD	✓	✓					✓				✓
TVC		✓					✓				✓
MSF		✓					✓				
MED	✓	✓					✓				✓
ED			✓	✓	✓			✓	✓		
MVC			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
RO			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	

*SD: Solar Distillation, MEH: Multi Effect Humidification, MD: Membrane Distillation, TVC: Thermal Vapour Compression, MSF: Multi-Stage Flash, MED: Multi-Effect Distillation, ED: Electro Dialysis MVC: Mechanical Vapor Compression, RO: Reverse Osmosis

استفاده از انرژی تجدیدپذیر یک راه‌حل برد ـ برد است (Negewo, 2012)، چراکه تلفیق انرژی تجدیدپذیر با نمک‌زدایی منبع پایدار آب شرب فراهم می‌سازد و با پیشرفت روزافزون فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و نمک‌زدایی، افزایش مقیاس تولید و سیاست‌های کاهش تغییر اقلیم، انرژی تجدیدپذیر جایگزین مقرون‌به‌صرفه‌ای برای انرژی‌های متداول می‌گردد (رفع مشکلات سوخت‌های فسیلی از قبیل گازهای گلخانه‌ای، منابع محدود روبه‌زوال، فراریت و گران شدن رقابتی). کاهش انتشار دی‌اکسید کربن شامل موارد زیر است: ۱. نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر (RE-Desal) می‌تواند مانع انتشار معادل ۴۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن تا سال ۲۰۵۰ شود، ۲. تجاری‌سازی انرژی تجدیدپذیر در مقیاس جهانی می‌تواند میزان انتشار تا سال ۲۰۵۰ را از ۱/۵ بیلیون تن (در صورت ادامه روند کنونی) به ۲۶۵ میلیون تن کاهش دهد، ۳. می‌تواند باعث کاهش حجم

شورابه تولیدی گردد، چراکه به‌دلیل انطباق و انعطاف بیشتر موجب رشد استفاده از اسمزمعکوس شود، RO به‌جای روش‌های حرارتی می‌شود که این سیستم کمترین اثرات محیط‌زیستی را دارد، ۴. ایجاد امنیت انرژی (ترکیب پایدار)، ۵. ایجاد درآمد حاصل از صادرات الکتریسیته سبز و ۶. تنوع‌بخشی و پیشرفت صنایع آب و انرژی (ایجاد پتانسیل‌ها و مهارت‌های جدید).



Source: Shatat, 2013

شکل ۷. ترکیبات ممکن انرژی خورشیدی با فناوری‌های آب‌شیرین کن

در کشور پهناور ما، میزان انرژی خورشیدی دریافتی به‌طور متوسط در حدود ۱۸ مگاژول بر مترمربع در روز و یا حدود ۱۰۱۶ مگاژول در سال در سطح کشور تخمین زده می‌شود. این مقدار بیش از ۴۰۰۰ برابر انرژی مصرفی سالانه در کل کشور است (Safaripour, 2011). در شکل ۷ یک دسته‌بندی کلی از انواع فرایندهای نمک‌زدایی با قابلیت کاربرد انرژی خورشیدی ارائه شده است. ویژگی‌های مختص هر فرایند باعث می‌شود انتخاب سیستم مناسب در هر منطقه و شرایط جغرافیایی از اهمیت راهبردی برخوردار باشد.

یک رویکرد راهبردی تمرکز مطالعات و پژوهش‌ها بر کاستن معایب و مشکلات سیستم‌ها (روش خورشیدی) و ارائه راهکارهای بهبود کارایی این روش‌ها از طریق تلفیق با فناوری‌های نوین (غشایی، فوتوولتائیک و تمهیدات بازیافت انرژی) جهت دستیابی به

پیکربندی‌های جدیدی است که سازگار با شرایط سیاسی، اقتصادی و محیطی کشور ماست. ازجمله نیازهای مطالعات راهبردی در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. امکان‌سنجی طرح و اجرای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی جهت مناطقی از کشور که از پتانسیل لازم برای استفاده از این‌گونه آب‌شیرین‌کن‌ها برخوردار هستند، به‌خصوص جهت مناطق روستایی، شهرک‌های صنعتی، میادین نفت و گاز، ۲. توسعه چارچوب نظام‌مند جهت ارزیابی معیارهای فنی اقتصادی و زیست‌محیطی جهت توسعه تأمین آب شیرین به روش نمک‌زدایی، ۳. تبیین اهمیت مسئله در مدیریت یکپارچه منابع آب و انرژی و نیازسنجی در جهت بسط و توسعه دانش ساخت و استفاده از این‌گونه تأسیسات در کشور با نظر به روند رو به رشد این پروژه‌ها به‌ویژه در منطقه خاورمیانه و ۴. بومی‌سازی دانش آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی متناسب با اقلیم کشور.

مزایای زیست‌محیطی استفاده از انرژی پاک می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را جبران کند. به‌ویژه در نقاط دورافتاده با دسترسی محدود شبکه برق، شدید بودن کمبود آب و وجود تابش و سرعت باد مناسب مقرون‌به‌صرفه است. با وجود پیشرفت‌های تکنولوژیکی آتی، همراه با تشدید بحران آب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری کاهش‌یافته و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر قابل‌اتکا با قیمت مناسب در دسترس قرار خواهد گرفت که این امر منجر به کاهش چشمگیر هزینه آب تولیدی می‌شود (Al-Karaghouli, 2013).

۳-۳. امکان‌سنجی فنی و مکان‌یابی

نمک‌زدایی با سیستم اسمزمعکوس (RO) رایج‌ترین فناوری و با پوشش ۶۰ درصد کل ظرفیت جهان است. در سال‌های اخیر کوشش‌های مهمی به‌منظور بهبود عملکرد غشای RO از راه افزایش شار جریان نفوذی و کاهش پدیده رسوب‌گذاری و گرفتگی و همچنین جهت کاهش مصرف انرژی مخصوص با استفاده از ابزار کارآمد بازیافت انرژی (ERD) صورت گرفته است (Liu, 2014). ثمره این تلاش‌ها در طول سال‌های اخیر کاهش چشمگیر هزینه تولید آب بوده است (Iaquaniello, 2014; Medeazza, 2004). با بررسی آثار اجتماعی و اقتصادی گرمایش جهانی و افزایش نیاز آبی در اسپانیا و مغرب در سناریوهای مختلف، نمک‌زدایی آب لب‌شور زیرزمینی و آب دریا، به‌ویژه به روش اسمزمعکوس را راه‌حل پایدار و بلندمدت کمبود آب جهانی دانست. مدزا و همکاران

(۲۰۰۷) با استفاده از مدل‌سازی با نرم‌افزار ونسیم[1] مدلی جهت بررسی روند آتی، پیش‌بینی و ارزیابی سناریوهای مختلف شیرین‌سازی آب در یکی از جزایر قناری اسپانیا که منبع آب آن کاملاً از این طریق تأمین می‌شود، توسعه داد. هدف اولیه این مطالعه ارزیابی پایداری بلندمدت فناوری نمک‌زدایی در کاهش بحران جهانی آب با استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های آب ـ انرژی است. همچنین آثار زیست‌محیطی عمده و عوامل اجتماعی منجر به مدیریت ناپایدار آب بحث می‌شود. غفور و همکاران ۲۰۱۳ یک ارزیابی فنی اقتصادی بر اساس عوامل مختلف مؤثر بر هزینه نمک‌زدایی ارائه کردند و روش‌های مختلف تصفیه آب را به لحاظ هزینه اقتصادی و زیست‌محیطی مقایسه نمودند. مشاهده می‌شود: هزینه آب دریای نمک‌زدایی شده برای یک آب‌شیرین‌کن SWRO بزرگ‌مقیاس در یک مکان و شرایط خاص US$0. 50/m3 است، درحالی که همین تأسیسات در یک مکان دیگر ۵۰ درصد افزایش هزینه دارند (US$1. 00/m3).

در حال حاضر، سیاست‌گذاران برای مکان‌یابی نقاطی که شرایط طبیعی و اجتماعی مساعد برای نمک‌زدایی وجود دارد، نیازمند استفاده از یک چارچوب تحلیلی یکپارچه مختص مکانی هستند (Grubert et al. 2014). روشی با یک آنالیز کمی جهانی ارائه کردند که مکان‌های مناسب برای احداث آب‌شیرین‌کن خورشیدی اسمزمعکوس (SWRO) را بر اساس معیارهای هدف شناسایی کند. این تحقیق با ارائه یک متدولوژی چندمعیاره با تفکیک مکانی (GIS-MCDA) به شناسایی محل مناسب برای زیرساخت آب‌شیرین‌کن بر اساس سه معیار زیر می‌پردازد: ۱. وجود منابع تجدیدپذیر بخشی از بار انرژی فسیلی را جبران کند، ۲. مشخصات آب ورودی باعث کاهش انرژی موردنیاز نمک‌زدایی شود و ۳. جامعه انسانی دارای ظرفیت و تمایل به پرداخت هزینه آب تصفیه‌شده باشد. نتیجه این بود که شهرهای حاره‌ای دارای بحران آبی، بیشترین پتانسیل کاربرد SWRO خورشیدی پایدار به لحاظ اقتصادی را دارند.

۴-۳. امکان‌سنجی اقتصادی

هزینه انرژی، هزینه بهره‌برداری و نگهداری و سرمایه‌گذاری اولیه موارد اصلی تعیین‌کننده هزینه تولید آب هستند. حدود ۵۰ درصد قیمت آب تولیدی را هزینه انرژی تشکیل

1. Vensim

می‌دهد. در این رویکرد هزینه‌های دوره عمر شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری سیستم اسمزمعکوس فوتوولتائیک و دیزلی برای یافتن سیستم مقرون‌به‌صرفه ارزیابی و مقایسه می‌شوند. این هزینه‌ها به میزان تقاضای آب، شدت تابش محلی و مشخصات آب وابسته‌اند. سیاست‌گذاری‌هایی نظیر مالیات کربن و مشوق‌های انرژی تجدیدپذیر لحاظ می‌شوند. هزینه‌های سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه مواد مصرفی مانند سوخت دیزلی تابع مکان هستند. معمولاً از میزان متوسط هزینه‌ها استفاده می‌شود، اما مقادیر برای یک مکان و تقاضای خاص قابل اصلاح است. فاکتورهایی شامل ظرفیت سیستم، طراحی واحد، مواد مصرفی و کیفیت آب ورودی تعیین‌کننده میزان مصرف انرژی سیستم هستند.

داده‌های تغییرات مکانی پتانسیل انرژی خورشیدی و کیفیت آب در نرم‌افزار GIS پیاده‌سازی می‌شوند. مشخصات کمی و کیفی آب لب‌شور زیرزمینی منطقه وارد می‌شود. انرژی موردنیاز در هر سایت بر اساس شوری و عمق آب برآورد می‌شود. سپس با تعیین پیکربندی سیستم‌های خورشیدی و دیزلی لازم، یک آنالیز هزینه دوره عمر کامل برای هر دو سیستم انجام‌شده و روش بهینه تعیین می‌گردد. در صورت برتری سیستم خورشیدی، نواحی که هزینه تأمین آب به روش PVRO از هزینه انتقال آب (10 $/m3) کمتر باشد، قابل‌قبول شمرده می‌شوند.

۱-۴-۳. پارامترهای اصلی مؤثر بر هزینه

پارامترهای مؤثر بر سرمایه‌گذاری کل و هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای آب‌شیرین‌کن عوامل اصلی مورد نظر در انتخاب فناوری نمک‌زدایی مناسب است. هزینه تخمینی نمک‌زدایی برای فرایندهای مختلف در هر سایت منحصربه‌فرد بوده و عموماً وابسته به عوامل زیر است: ۱. در دسترس بودن نیروی الکتریکی، ۲. پیکربندی فرایند نمک‌زدایی، اندازه تأسیسات و طراحی اجزا و ۳. مکان جغرافیایی و مشخصات ویژه سایت. آب‌شیرین‌کن‌های دارای ظرفیت موردنیاز باید در مکان‌های مناسبی احداث شوند تا از هزینه‌های اضافی، نظیر انتقال آب و عدم عملکرد در شرایط بهینه اجتناب شود، ۴. کیفیت آب خام ورودی، دما، چیدمان آبگیر و کیفیت لازم آب تولیدی (تصفیه نهایی و مخلوط‌سازی)، ۵. نوع شورابه تخلیه‌شونده در محیط و مخزن ذخیره آب تولیدی، ۶. تصفیه

نهایی آب حاصل (تنظیم مجدد PH و سختی آب نمک‌زدایی شده)، ۷. ذخیره درجای آب تولیدی، ۸. نرخ بازگشت آب تولیدی و هزینه انرژی، ۹. مصالح، تجهیزات، مواد شیمیایی و سایر مواد مصرفی. ۱۰. جزئیات تأمین بودجه و دوره بازگشت سرمایه و همچنین تورم، ۱۱. قرارداد (زمین و کارهای ساختمانی، تورم هزینه‌ای و هزینه استهلاک سرمایه)، تغییرات نرخ سود و هزینه‌های بالاسری و ۱۲. هزینه بهره‌برداری و نگهداری، تعویض غشا و جایگزینی تجهیزات (به‌خصوص پمپ‌ها و لوله‌های زهکش).

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. ارزیابی فنی اقتصادی سیستم PVRO

در مطالعات امکان‌سنجی احداث واحدهای جدید آب‌شیرین‌کن، به‌دلیل انرژی‌بر بودن و هزینه فرایند تصفیه و نمک‌زدایی، اولویت‌بندی و نیازسنجی نواحی مستعد بر اساس شاخص‌های موردنظر در یک فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره ضروری است. شاخص‌های کلیدی در مکان‌یابی به سه دسته اجتماعی ـ اقتصادی، فنی ـ کیفی و شرایط اقلیمی قابل‌طبقه‌بندی هستند که باید هریک به نحو مناسب وزن‌دهی شوند.

برای ایجاد یک چارچوب تصمیم‌گیری از روش آنالیز تصمیم چندمعیاره[1] سیستم اطلاعات جغرافیایی[2] (GIS-MCDA) برای مکان‌یابی تأسیسات نمک‌زدایی بر اساس شرایط طبیعی محلی و فاکتورهای انسانی استفاده می‌شود. با این روش می‌توان علاوه بر یافتن مکان‌هایی که وفور انرژی تجدیدپذیر و کمبود منابع آبی همزمان روی می‌دهد، با تغییر پارامترهای هدف مکان‌هایی را شناسایی کرد که مشخصات مساعد آب ورودی و شرایط محیطی منجر به کاهش مصرف انرژی می‌گردد. ابزار GIS-MCDA امکان به‌کارگیری بازه‌ای از فاکتورهای مهم، مانند منابع سوختی مختلف، شرایط طبیعی مناسب برای انواع فناوری‌های نمک‌زدایی و اولویت‌های اقتصادی محلی را دارد. هدف شناسایی محل‌هایی است که شرایط طبیعی و اجتماعی منجر به ارتقای پایداری و اقتصادی بودن روش اسمزمعکوس خورشیدی می‌گردد. به‌خصوص، مناطقی که انرژی خورشیدی فراوان، دمای آب بالا و شوری کم همزمان با وجود مراکز شهری، تنش آبی زیاد و ارزش بالای

1. Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)
2. Geographical Information System (GIS)

آب رخ می‌دهند، کاندیدهای مناسبی برای نمک‌زدایی هستند. در این روش، GIS-MCDA برای شناسایی کمی مکان‌های مناسب برای سیستم خورشیدی (PVRO) در گام‌های زیر پیاده خواهد شد: ۱. انتخاب شاخص‌های محوری بر اساس محدودیت‌های کلیدی منابع و نیازهای عملکرد اجتماعی ـ سیاسی، ۲. تعریف مقادیر حدی و مرزی برای انجام ارزیابی‌ها، ۳. شناسایی سری داده‌های مناسب برای پیاده‌سازی بر روی نقشه جغرافیایی، ۴. یکپارچه‌سازی سری‌های داده‌ای به شکلی سازگار و دقیق (یکپارچه‌سازی لایه‌های نرم‌افزار)، ۵. انجام آنالیز فضایی با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار GIS و ۶. استخراج نتایج و استنباط ملازمات و تعیین نواحی دارای پتانسیل بالا.

خروجی نهایی یک سری نقشه کمی‌سازی شده[1] با جزئیات دلخواه، مشخص‌کننده سایت‌های مناسب سیستم اسمزمعکوس خورشیدی و نشان‌دهنده مقادیر پارامترهای منتخب در این نواحی است. این رویکرد بر شناسایی مناطقی که سیستم اسمزمعکوس خورشیدی عملی است متمرکز بوده و متغیرهای شاخص بر اساس سه هدف انتخاب می‌شود: ۱. اطمینان از شدت تابش و تعداد ساعات آفتابی کافی، ۲. مکان‌یابی نزدیک‌ترین منبع آب ورودی با ویژگی‌هایی که باعث کاهش مصرف انرژی آب‌شیرین‌کن می‌شود و ۳. شناسایی بازارهای بالقوه (تقاضای آب) برای آب نمک‌زدایی شده. معیارهای مشخص‌شده برای هریک از این اهداف و نیز مقادیر حدی در جدول ۳ ارائه شده است. نرم‌افزار GIS از یک ساختار پوش بولین برای تعیین نقاط مناسب بر اساس اهداف موردنظر استفاده کرده و برای هر معیار، نواحی را با عنوان «تأمین معیار» و یا «عدم تأمین معیار» دسته‌بندی می‌کند. سرانجام، مکان‌هایی که هر سه فیلتر تعریف شده (شرایط تابش، شرایط مصرف کم انرژی و شرایط اجتماعی) را برآورده سازند با عنوان نقاط با شرایط عالی معرفی می‌شوند.

1. Digitized maps

جدول ۳. معیارهای منتخب و مقادیر حدی برای تشخیص سایت‌های مناسب به لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی

سیستم منتخب	آب‌شیرین‌کن اسمزمعکوس	
ملازمات هدف	منبع آب	آب دریا یا آب لب‌شور
	منبع انرژی	سلول خورشیدی + شبکه برق‌رسانی
شرایط جغرافیایی	پرتوگیری و تابش (GHI)	>5 $kWh/m^2/day$
	دمای آب	$>25^0c$
	شوری آب	<50th Percentile
شرایط اجتماعی	شاخص خشک‌سالی	>85th Percentile
	ارزش آب	≥ 1.5 USS/m^3
	جمعیت شهری	≥ ۱میلیون

۲-۴. طراحی بهینه

برای طراحی بهینه سیستم‌های RE/RO به دنبال یافتن برخی ترکیب‌های مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اطمینان هستیم. پیچیدگی طراحی این سیستم‌ها به‌دلیل عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، بار تقاضا و ویژگی‌های غیرخطی بعضی اجزاست. طرح و پیش‌بینی عملکرد این سیستم‌ها به‌دلیل ماهیت متغیر شرایط عملکرد سیستم، بسته به شرایط آب و هوایی حاکم، مانند تابش خورشید و سرعت باد و دمای پیرامون، پیچیده است. در چنین سیستمی، سناریوهای گوناگونی قابل پیشنهاد است؛ مانند ترکیب‌های مختلف پانل‌های خورشیدی، نوع و تعداد باتری‌ها، نوع و تعداد توربین‌ها و غیره. بنابراین، تعیین پیکربندی بهینه با روش‌های کلاسیک دشوار است. توسعه یک ابزار برای یکپارچه‌سازی همه پارامترها و مقایسه سناریوهای ممکن بسیار مهم است.

پس از امکان‌سنجی و انتخاب سایت موردنظر معلومات مسئله طراحی بدین شرح است: ۱. ظرفیت سیستم، ۲. مشخصات کمی و کیفی آب ورودی، ۳. مشخصات فنی غشاها، ۴. مشخصات فنی پانل‌های خورشیدی و توان تولیدی آنها، ۵. شرایط آب‌وهوایی شامل شدت تابش، تعداد روزهای آفتابی، سرعت باد و دما، ۶. داده‌های محیط‌زیستی و ۷. داده‌های اقتصادی. هدف تعیین پیکربندی بهینه و نیز تعیین شرایط عملکردی بهینه سیستم PVRO با شرط حداقل هزینه و حداقل آثار زیست‌محیطی است.

یک سیستم PVRO باید دارای قابلیت تطابق با نوسانات نیرو جهت رسیدن به حداکثر تولید، ضمن احتساب استهلاک عناصر سیستم باشد. ازآنجا که ارزیابی عملکرد سیستم

به‌دلیل تغییر در منبع انرژی تولیدی و میزان تقاضا پیچیده است، از روش استوکستیک برای احتساب این تغییرات زمانی در طرح سیستم، به‌منظور اطمینان از برآورده شدن نیازها با احتمال تعیین‌شده بهره می‌گیریم. بدین‌صورت که با ارزیابی داده‌های تاریخی تابش، عملکرد سیستم را در بلندمدت بررسی می‌کنیم. عملکرد سیستم در بازه‌های بحرانی سال را نیز می‌توان به شیوه آماری ارزیابی کرد. این روش‌ها در قیاس با نمونه‌ها و الزامات قطعی طراحی منجر به توسعه روشی سیستماتیک در رسیدن به یک توپولوژی مناسب برای احداث واحدهای جدید آب‌شیرین‌کن خواهد شد. سیستم RO بسته به مشخصات آب، نسبت بازگشت و استانداردهای لازم جریان نفوذی ممکن است به‌صورت تک‌گذر یا چندگذر طرح شود. در یک چیدمان دو گذره، گام دوم جداسازی با جریان نفوذی آمده از عبور اول تغذیه شده و نسبت بازگشت بالا تا ۸۵ یا ۹۰ درصد به کار گرفته می‌شود. چیدمان چند گذره جریانی با TDS کمتر تولید کرده و در نتیجه نسبت بازگشت کلی کمتری دارد (Greenlee, 2009).

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش هم‌راستا با رویکرد کنونی پروژه‌ها و تحقیقات در زمینه نمک‌زدایی، تمرکز بر بیشتر کردن راندمان انرژی و کاهش هزینه‌هاست. بدین منظور، بهینه‌سازی راندمان انرژی سیستم‌های نمک‌زدایی آب اسمز معکوس، از راه امکان‌سنجی تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی و حرارت اتلافی نیروگاه‌ها) در راستای ارائه روشی پایدار و دوستدار محیط زیست است که علاوه بر سازگاری با شرایط کشور ما نیاز آبی روزافزون را با افزایش تولید مرتفع ساخته و هزینه دوره عمر واحد آب تولیدی را به حداقل کاهش می‌دهد.

اولین گزینه برای تأمین نیرو در نقاط دورافتاده، ژنراتورهای متحرک با سوخت فسیلی هستند. درحالی که هزینه‌های بالای سوخت و نگهداری و نیز مشکلات زیست‌محیطی، باعث ایجاد گرایش به منابع انرژی تجدیدپذیر شده است، بهره‌مندی بسیاری از مناطق نفت‌خیز از نعمت بادهای قوی و آفتاب تابان، تولید انرژی بادی و خورشیدی با استفاده از فناوری کنونی توربین‌های بادی و فوتوولتائیک را به لحاظ اقتصادی ممکن و توجیه‌پذیر می‌سازد. امید آن است که تأمین توان واحدهای نمک‌زدایی با انرژی باد یا خورشید، آب شیرین پایدار به لحاظ اقتصادی را به شیوه‌ای مناسب برای محیط زیست در دسترس قرار

دهد. بنابراین فراهم بودن استعداد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشید و باد یا توان حرارتی اتلافی نیروگاه‌ها می‌تواند فرصت مناسبی جهت توسعه سیستم‌های پایدار و خودکفای تولید آب شیرین باشد. بنابراین، یکی از مؤثرترین روش‌های مورد استفاده به‌منظور دستیابی به این هدف به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهبردهای توسعه پایدار در بخش آب و انرژی کشور، استفاده از انرژی خورشیدی است.

انواع فناوری‌های نمک‌زدایی به دو دسته عمده حرارتی و غشایی قابل‌تقسیم هستند، البته انتخاب دقیق فرایند تصفیه آب به کیفیت نهایی آب و حجم مورد نیاز آب وابسته است. برخی از مشکلات و مسائل این فناوری به‌عنوان پیشنهادهایی جهت بررسی در مطالعات آتی عبارتند از: ۱. ارائه چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت انتخاب بهترین مکان ممکن جانمایی واحد آب‌شیرین‌کن خورشیدی، ۲. تعیین معیارهای مناسب جهت انتخاب پیکربندی مناسب سیستم نمک‌زدا با توجه به شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی و محلی، ۳. تعیین روش پایدار تأمین انرژی در شرایطی که این واحدها در مناطق دورافتاده و به‌دوراز شبکه برق‌رسانی هستند، ۴. بهینه‌سازی طراحی فرایند جهت افزایش راندمان انرژی، ۵. توسعه سیستم کنترل و راهبری جهت ساده‌سازی و خودکار کردن عملیات واحد، ۶. ارائه سیستمی مقرون‌به‌صرفه با بهره‌برداری و نگهداری آسان، با قابلیت جابه‌جایی و بادوام، ۷. ایجاد تمهیدات سازگاری و تطابق با طبیعت نوسانی انرژی خورشیدی، ۸. ارائه تمهیدات کاهش شورابه خروجی و دفع مناسب آن و ۹. ارائه فرایندهایی بی‌نیاز از کاربرد مواد شیمیایی. توجه به معیارهای فنی و زیست‌محیطی جهت توسعه سیستم پایدار تولید آب به روش نمک‌زدایی اهمیت دارد. توسعه و استفاده از یک چارچوب نظام‌مند جهت ارزیابی معیارهای فنی اقتصادی و زیست‌محیطی جهت توسعه تأمین آب شیرین به روش نمک‌زدایی می‌تواند به تسهیل فرایند تصمیم‌گیری در این بخش منجر شود.

فهرست منابع

1. Al-Karaghouli, Ali & Lawrence L. Kazmerski (2013)."Energy Consumption and Water Production Cost of Conventional and Renewable-energy-powered Desalination Processes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24: 343-356 .
2. Al-Karaghouli, D. Renne, L. Kazmerski (2010). "Technical and Economic Assessment of Photovoltaic-driven Desalination Systems", Renew. Energy 35: 323–328 .
3. Asadi, Rada Zarasvand et al. (2012). "Solar Desalination of Gas Refinery Wastewater Using Membrane Distillation Process," Desalination 291: 56-64 .
4. Bilton, Amy M. et al. (2011). "On the Feasibility of Community-scale Photovoltaic-powered Reverse Osmosis Desalination Systems for Remote Locations," Renewable Energy, 36(12): 3246-3256 .
5. Clean Edge (2011). Desalination Plants to Attract $87. 8 Billion in Investment by 2016. Clean edge news
6. Bilton, Amy M. and Steven Dubowsky(2014). "A Computer Architecture for the Automatic Design of Modular Systems With Application to Photovoltaic Reverse Osmosis," Journal of Mechanical Design, 136(10): 101401 .
7. Bourouni K., T. Ben M'Barek, A. Al Taee (2011). "Design and Optimization of Desalination Reverse Osmosis Plants Driven by Renewable Energies Using Genetic Algorithms", Renew Energy, 36: 936–950 .
8.Calise, Francesco, Massimo Dentice d'Accadia, and Antonio Piacentino (2014). "A Novel Solar Trigeneration System Integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) Desalination: Dynamic Simulation and Economic Assessment,"Energy, 67: 129-148 .
9. Dallas, Stewart et al. (2009). "Efficiency Analysis of the Solarflow–An Innovative Solar-powered Desalination Unit For Treating Brackish Water", Renewable Energy, 34(2): 397-400 .
10. Darwish, Mohamed et al. (2012)."Desalting Seawater in Qatar by Renewable Energy: A Feasibility Study,"Desalination and Water Treatment, 47(1-3): 279-294 .
11. Drioli, E. & Macedonio, F.(2010). New Trends in Membrane Technology for Water Treatment and Desalination.
12.Essam, Mohamed Sh. et al. (2008). "A Direct Coupled Photovoltaic Seawater Reverse Osmosis Desalination System Toward Battery Based Systems—a Technical and Economical Experimental Comparative Study," Desalination 221(1): 17-22 .
13.F. H. Fahmy, N. M. Ahmed, H. M. Farghally (2012). "Optimization of Renewable Energy Power System for Small Scale Brackish Reverse Osmosis Desalination Unit," Smart Grid and Renewable Energy, 3: 43-50.

14. Fichtner (2011). MENA Regional Water Outlook Part II Desalination Using Renewable Energy .
15. Ghaffour, N.T. M. Missimer & Gary L. Amy (2013). "Technical Review and Evaluation of the Economics of Water Desalination:Current and Future Challenges for Better Water Supply Sustainability",Desalination,309 :197–207 .
16.Ghaffour, N. V. K. Reddy, M. Abu-Arabi (2011)."Technology Development and Application of Solar Energy In Desalination: MEDRC Contribution ," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 : 4410– 4415.
17. Greenlee, Lauren F. et al. (2009). "Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges", Water research, 43(9): 2317-2348 .
18. Grubert, E. A., A. S. Stillwell, M. E. Webber (2014). "Where Does Solar-aided Seawater Desalination Make Sense? A Method For Identifying Sustainable Sites", Desalination, 339: 10–17.
19. Gorjian, Shiva & Barat Ghobadian(2015). «Solar Desalination: A Sustainable Solution to Water Crisis in Iran," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48: 571-584 .
20. Hou, Shaobo, Shengquan Ye, & Hefei Zhang(2005). "Performance Optimization of Solar Humidification–dehumidification Desalination Process Using Pinch Technology", Desalination, 183(1): 143-149 .
21. Hou, Shaobo et al. (2007)."Exergy Analysis of the Solar Multi-effect Humidification–dehumidification Desalination Process," Desalination, 203(1): 403-409 .
22. Hrayshat, Eyad S. (2008)."Brackish Water Desalination by A Stand Alone Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by Photovoltaic Solar Energy," Renewable Energy, 33(8): 1784-1790 .
23. Iaquaniello, G., A. Salladini, A. Mari (2014). "Concentrating Solar Power (CSP) System Integrated with MED–RO Hybrid Desalination," Desalination, 336: 121–128.
24.Kershman, Sultan A. et al. (2005)."Hybrid Wind/PV and Conventional Power For Desalination in Libya—Gecol's Facility For Medium and Small Scale Research at Ras Ejder," Desalination, 183(1): 1-12 .
25. Khanafer, Khalil & Kambiz Vafai (2013)."Applications of Nanomaterials in Solar Energy and Desalination Sectors," Advances in Heat Transfer, 45: 303 .
26. Lamei, P. Van der Zaag, E. von Munch(2008). "Impact of Solar Energy Cost on Water Production Cost of Seawater Desalination Plants in Egypt", Energy Policy, 36: 1748–1756 .
27. Lattemann, Sabine et al. (2010). "Global Desalination Situation," Sustainability Science and Engineering, 2: 7-39 .
28. Liu, Z. R. Hu, X. Chen (2014)."A Novel Integrated Solar Desalination System

With Multi-stage Evaporation/Heat Recovery Processes," Renewable Energy, 64 : 26-33.
29. Medeazza, Gregor Meerganz(2004). "Water Desalination As a Long-term Sustainable Solution to Alleviate Global Freshwater Scarcity? A North-South Approach", Desalination, 169(3): 287-301 .
30. Medeazza, Gregor Meerganz & Vincent Moreau (2007)."Modelling of Water–energy Systems, The Case of Desalination", Energy, 32(6): 1024-1031.
31. Mehdizadeh, H. (2006)."Membrane Desalination Plants From An Energy–Exergy Viewpoint," Desalination, 191(1): 200-209 .
32.Mohsen, Mousa S. and Jamal O. Jaber (2001). "A Photovoltaic-powered System For Water Desalination," Desalination, 138(1): 129-136 .
33. Mokheimer, M. A., A. Z. Sahin, A. Al-Sharafi (2013)."Modeling and Optimization of Hybrid Wind–solar-powered Reverse Osmosis Water Desalination System in Saudi Arabia," Energy Conversion and Management, 75: 86–97 .
34. Negewo, Bekele Debele (2012). Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close The Water Gap In The Middle East and North Africa, World Bank Publications .
35. Pike Research(2010). Desalination Technology Markets .
36. Quteishat, K. (2012)."Abu-Arabi,"Promotion of Solar Desalination in the MENA Region," Middle East Desalination Research Centar, Muscat, Oman .
37. Safaripour, M. H. & Mehrabian, M. A. (2011). "Predicting the Direct, Diffuse, and Global Solar Radiation on a Horizontal Surface and Comparing with Real Data", Heat and mass transfer, 47 (12): 1537-1551 .
38.Schies, A. et al. (2010)."Operating Control Strategies and Dimensioning of Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Desalination Plants Without Batteries," Desalination and Water Treatment, 21(1-3): 131-137 .
39. M. Shatat, M. Worall, S. Riffat (2013)."Opportunities for Solar Water Desalination Worldwide: Review," Sustainable Cities and Society, 9: 67–80 .
40.Thomson, Murray(2003). Reverse-osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries .
41.Torchia-Nunez, J. C., M. A. Porta-Gandara & J. G. Cervantes-de Gortari (2008). "Exergy Analysis of A Passive Solar Still," Renewable energy, 33(4): 608-616 .
42.USGS (2014). The USGS Water Science School. The World's water: http: //water. usgs. gov/edu/earthwherewater. html. Last modified 17 March, 2014
43.UN-Water (2007). Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century, prepared for World Water Day 2007: http: //www. unwater. org/wwd07/downloads/documents/ escarcity. Pdf.
44.Went, J. et al. (2010)."The Energy Demand For Desalination With Solar Powered Reverse Osmosis Units", Desalination and Water Treatment, 21(1-3): 138-147 .