DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.1.5.2

سال هفتم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۹، ص ص ۳۵- ۴۲

فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۱۶

بررسی اقتصادی فناوری های تولید آب شیرین با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر

سید کیوان ناطقی[۱]، حسین یوسفی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد انرژیهای تجدیدپذیر، گروه انرژیهای نو و محیط زیست دانشگاه تهران

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

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

منطقه های دور افتاده در بسیاری از کشور ها، نیاز به آب شیرین قابل اعتماد و مقرون به صرفه دارند که باید از آب شور یا آب دریا تهیه شود. انرژی های تجدید پذیر نظیر باد، خورشیدی، زمین گرمایی و یا منابع دیگر ممکن است زمانی که دسترسی به برق محدود است، لازم باشد. این مقاله عمدتا بر روی نمک زدایی آب بر اساس استفاده از انرژی های تجدید پذیر متمرکز شده است. برداشت های جهانی آب حدود ۴۰۰۰ میلیارد متر مکعب در سال و در برخی مناطق، به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) – نمک زدایی آب به عنوان مهم‌ترین منبع آب برای مصارف نوشیدنی و کشاورزی تبدیل شده است. تولید آب آشامیدنی در جهان امروزه به حدود ۶۵،۲ میلیون مترمکعب در روز معادل ۰،۶ درصد از آب در جهان رسیده است. عمده تکنولوژی های نمک‌زدایی بر اساس فرآیندهای حرارتی با استفاده از حرارت و برق و تکنولوژی های غشایی فقط با استفاده از برق میباشد. فن آوری غالب، اسمز معکوس (RO) است که ۶۰ درصد ظرفیت جهانی را دارد و به دنبال آن تقطیر ناگهانی چند مرحله ای (MSF) میباشد که ۲۶،۸ درصد سهم دارد. فن آوری های تجدیدپذیر که برای نمک‌زدایی آب مناسب هستند شامل انرژی خورشیدی، فتوولتائیک خورشیدی (PV)، باد و انرژی زمین گرمایی میباشند. چون ذخیره سازی برق همچنان یک چالش به حساب می‌آید، ترکیب تولید برق و آب شیرین همچنین می تواند گزینه ای مناسب برای ذخیره برق در هنگام تولید بیش از تقاضا باشد.

کلید واژگان: انرژی‌های تجدیدپذیر، آب شیرین، فرایند نمک‌زدایی

The Economic Review Of Desalination Technologies Using Renewable Energy

Seyed keyvan nateghi[1], Hossein Yousefi [2]

1-Master Student, Dep. of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Iran

2- Associate Professor, Dep. of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran Hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received 13 February 2019 Accepted 7 July 2019

Abstract

Remote communities in many countries are in need of dependable and affordable fresh water that must be derived from local brackish water or seawater. Renewable energy from wind, solar, geothermal, or other sources may be necessary when access to grid electricity is limited. This brief focuses primarily on water desalination based on the use of renewable energy. Global water withdrawals amount to around 4,000 billion m3 per year and in some regions, especially the Middle East and Northern Africa (MENA) – desalination has become the most important source of water for drinking and agriculture. Today's global desalinated water production amounts to about 65.2 million m3 per day (24 billion m3 per year), equivalent to 0.6% of global water supply. Major desalination technology options are based on thermal processes using both heat and electricity, and membrane technologies using electricity only. The dominant technology is Reverse Osmosis (RO), which accounts for 60% of the global capacity, followed by Multi Stage Flash (MSF), with a 26.8% share. Renewable technologies that are suited to desalination include solar thermal, solar photovoltaics (PV), wind, and geothermal energy. As electricity storage is still a challenge, combining power generation and water desalination can also be a costeffective option for electricity storage when generation exceeds demand.

keywords: Renewable energy, fresh water, desalinating process.

۱- مقدمه

با روند روزافزون صنعتی شدن اکثر کشورها و افزایش جمعیت در جهان، نیاز به انواع مختلف انرژی روز به روز در حال افزایش است. در این میان، موضوع تامین آب در صدر چالشهای محیط زیستی جهان و ایران قرار دارد و تقاضای جهانی برای آب همچنان در حال افزایش است. در حالی که منابع آب شیرین با توجه به افزایش تقاضا و اثرات منفی تغییرات اقلیمی در اغلب مناطق از جمله مناطق خشک و نیمه خشک در حال کم شدن هستند.

به منظور پاسخگویی به تقاضای در حال رشد آب شیرین و کاهش شکاف بین عرضه و تقاضای آب، فرایندهای نمک‌زدایی از آب دریا و آب شور می تواند به عنوان یک منبع آب تازه مورد استفاده قرار گیرد. اما نمک زدایی فرایند بسیار فشرده ای است که نیازمند انرژی است که تامین آن خود جزو بزرگ ترین مشلات جهان میباشد. نمک زدایی اغلب با استفاده از منابع سوخت های فسیلی انجام می‌شود که به قیمت‌های ناچیز در بازار جهانی موجود است و در حال حاضر بیشترین نیاز جامعه به انرژی را فراهم میسازند. ولی در عین حال پایان پذیرند و پایدار نخواهند بود.

با توجه به وابسته بودن دو مشکل تامین آب و انرژی ، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر میتواند گزینه مناسبی باشد. اما در حال حاضر تامین آن نسبت به سوخت های فسیلی نیاز به هزینه بیشتری دارد. با این حال انرژی تجدیدپذیر همچنان در حال گسترش و هزینه تکنولوژی آن رو به کاهش است. انرژی های تجدیدپذیر در صورت ادامه کاهش هزینه میتوانند در بازار با سوخت های فسیلی رقابت کنند.

یکی از راه های کاهش هزینه، امکان‌سنجی و پتانسیل‌سنجی هر منطقه برای تولید انواع انرژی تجدیدپذیر است. با توجه به اینکه در فرایند استفاده از سوخت های فسیلی هزینه زیادی صرف انتقال و جابجایی آن میشود، اگر بتوان در هر منطقه با توجه به پتانسیل های زیست محیطی آن انرژی تجدیدپذیر تولید نمود، هزینه ها کاهش یافته و قابل رقابت خواهد بود.

به عنوان مثال انرژی خورشیدی برای نمک زدایی در مناطق خشک قابل گسترش است یا انرژی باد برای پروژه های سواحل و جزایر مورد توجه است. بنابراین انتظار می‌رود استفاده از تکنولوژی تجدیدپذیر در سال‌های آینده گسترش بیشتری پیدا کند. در این مقاله سعی شده علاوه بر آشنایی با انواع فناوری های نمک زدایی، راه های استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای تولید آب شیرین را مورد بررسی قرار دهیم.

۲- مبانی نظری

برای درک بهتر موضوع تولید آب شیرین از منابع مختلف نیازمند درک بهتر موضوع و مفاهیم این بخش هستیم که در بندهای زیر به آنها اشاره میکنیم.

۲-۱- آب شیرین

در تعریف عددی آب شیرین میتوان گفت آبی است که کمتر از ۰.۰۵ در هر ۱۰۰ واحد، املاح نمکی غیر حل شدنی داشته باشد. گر چه بیش از ۷۰ درصد از سطح کره ی زمین با آب پوشیده شده است اما کمتر از ۳ درصد از آن آب شیرین می باشد. از این مقدار ۷۹ درصد به قله های یخی تعلق دارد، ۲۰ درصد آن آب های زیر زمینی است که به راحتی قابل دسترسی نمی باشد و فقط ۱ درصد آن شامل دریاچه ها و رودخانه ها و چاه ها می باشند که به راحتی به دست می آید.

اما مصارف آب شیرین شامل مصارف خانگی،صنعتی و کشاورزی میباشد که مصارف کشاورزی بزرگترین مصرفکننده منابع آب شیرین دنیا به حساب می آید.

۲-۲- انرژی‌های تجدیدپذیر

از انرژی‌های تجدیدپذیر مختلفی برای تولید آب شیرین میتوان استفاده کرد که تعریف مختصری از انواع آن در زیر آورده شده :

الف-خورشیدی

انرژی خورشیدی منحصر به فردترین منبع انرژی تجدیدپذیر در جهان است و منبع اصلی تمامی انرژی‌های موجود در زمین است. انرژی خورشیدی به صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند به اشکال دیگر انرژی تبدیل گردد. به‌طور کلی میزان انرژی متصاعد شده از خورشید به سطح زمین در حدود ۳۰۰۰۰ کیلوژول در روز است.

انرژی خورشید همانند سایر انرژی‌ها بطور مستقیم یا غیر مستقیم می‌تواند به دیگر اشکال انرژی همانند گرما و الکتریسیته و... تبدیل شود. اما موانعی مانند ضعف علمی و متغیر بودن مقدار انرژی به دلیل تغییرات جوی و جهت تابش موجب شده تا استفاده کمی از این انرژی صورت گیرد.

استفاده ازمنابع عظیم انرژی خورشید برای تولید انرژی الکتریسته، ایجاد گرمایش محوطه‌ها و ساختمان‌ها، خشک کردن تولیدات کشاورزی و تغییرات شیمیایی و... اخیراً شروع گردیده است.

ب- بادی

باد به وسیله‌ی جذب گرمای یکنواخت سطح کره‌ی زمین که حاصل عملکرد خورشید است به وجود می‌آید و از آنجا که باد تا زمانی که خورشید به زمین می‌تابد، به طور پیوسته تولید خواهد شد، آن را منبع انرژی تجدید شونده می‌نامند.

در جهان هزاران توربین بادی در حال بهره‌برداری وجود دارد. تولید برق بادی در میان دیگر روش‌های تولید انرژی الکتریکی دارای بیشترین شتاب رشد در قرن ۲۱ بوده‌است . امروزه از انرژی بادی جهت تولید الکتریسیته، پمپاژ آب از چاهها و رودخانه ها، آرد کردن غلات، کوبیدن گندم، گرمایش خانه و مواردی نظیر اینها می توان استفاده نمود. استفاده رایج از انرژی بادی در توربین های بادی و به منظور تولید الکتریسته بکار گرفته می شوند.

پ- زمین گرمایی

زمینی که زیر پای ما قرار دارد، منبع بسیار عظیم انرژی است. این انرژی که به صورت حرارت از اعماق زمین به سطح آن هدایت می شود در صورت توسعه فناوری استخراج آن، به تنهایی قادر خواهد بود کلیه نیازهای انرژی امروز و آینده بشر را تامین کند. طبق محاسبه ها، مشخص شده است که انرژی حرارتی ذخیره شده در ۱۱ کیلومتر فوقانی پوسته زمین معادل پنجاه هزار برابر کل انرژی به دست آمده از منابع نفت و گاز شناخته شده امروز جهان است.

انرژی زمین گرمایی، بر خلاف سایر انرژیهای تجدید پذیر محدود به فصل، زمان وشرایط خاصی نبوده و بدون وقفه قابل بهره‌برداری می‌باشد. همچنین قیمت تمام شده برق در نیروگاه‌های زمین گرمایی با برق تولیدی از نیروگاه‌های فسیلی قابل رقابت بوده و از انواع دیگر انرژی های نو به مراتب ارزانتر است.

ت-زیست توده

زیست توده عبارت است از اجزا قابل تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی (شامل مواد گیاهی و دامی)، جنگلها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه که یکی از منابع عمده در میان انواع منابع انرژیهای نو، می‌باشد. تعاریف متعدد و گوناگونی از این منابع شده است.

امروزه مشخص شده است که سوخت های زیستی به دست آمده از پسماندهای جنگل ها و محصول های کشاورزی جهان می تواند سالانه به اندازه ۷۰ میلیارد تن نفت خام انرژی در دسترس بشر قرار دهد که این میزان ۱۰ برابر مصرف سالانه انرژی در جهان است.همچنین می توان از این سوخت ها بیشتر در تولید گرما بهره برد زیرا می توانند باعث صرفه جویی اقتصادی چشمگیری شوند.

ث-دریایی

انرژی به دست آمده از امواج دریا، جزر و مد، شوری، جریان اقیانوسی و تفاوت در درجه حرارت آب دریا همگی جزو انرژی های دریایی محسوب میشوند.

۳-۲- فناوری نمک زدایی

دو دسته گسترده از از فناوری های آب شیرین کن وجود دارد. نمک زدایی حرارتی که از حرارت برای تبخیر آب استفاده می کند. و نمک زدایی غشایی(اسمز معکوس) فشار بالا که از پمپ های الکتریکی استفاده می کنند تا آب شیرین را از آب دریا یا آب شور با استفاده از غشا جدا کنند.

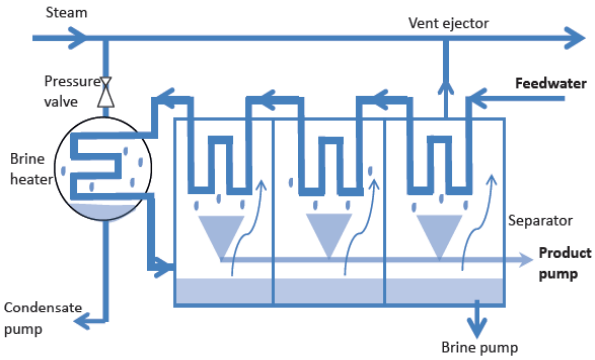
۱-۳-۲- نمک زدایی حرارتی

نمک زدایی حرارتی شامل فرایندهای تقطیر است.آب شور برای تبخیر گرم می شود، باعث می شود که آب تبخیر شده و آب شور یا آب نمک،آب را ترک کند. سپس آب شیرین از سرد شدن بخار و تراکم دوباره آن حاصل می شود. نمک زدایی حرارتی خود انواع مختلف دارد[۱]:

الف: تقطیر ناگهانی چند مرحله ای (MSF)[۱]

فرایند (MSF) به چند بخش یا مرحله تقسیم می شود. ابتدا آب شور در دمای جوش بین ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد گرم می شود و سپس آب از شیر ها به مرحله ای که دما و فشار کمتری دارد، برگشت داده می‌شود. در هر مرحله، همچنان‌که آب شور وارد می‌شود، دمایش کمی بالاتر از نقطه جوش در فشار آن مرحله است. به همین دلیل ، بخشی از آب به سرعت و ناگهانی تبخیر می شود.

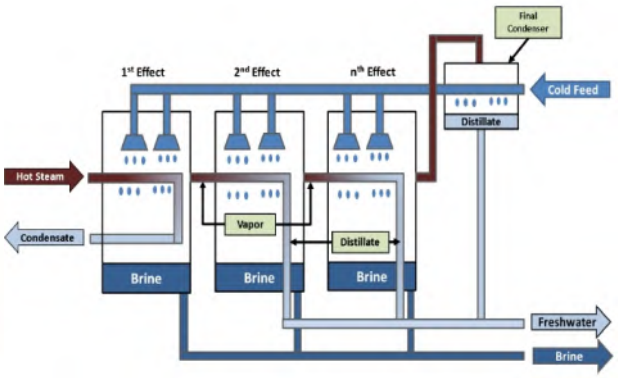
بنابراین دمایش را از دست می‌دهد تا به تعادل برسد. بخار حاصل‌شده کمی از آب تغذیه موجود در مبدل حرارتی گرم‌تر است. پس سرد می‌شود و در مجاورت مبدل‌های حرارتی، به مایع تغییر فاز داده و همان‌طور که پیشتر گفته شد، آب ورودی را گرم می‌کند. مراحل کامل این فرایند در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل۱- فرایند کلی نمک زدایی تقطیر ناگهانی چند مرحله ای

ب: تقطیر اثر چندگانه (MED)[۲]

شبیه به فرایند MSF ، تقطیر اثر چندتایی (MED) یک فرآیند چند مرحله ای است که در آن بخار بعد از هر مرحله، متراکم می شود و دوباره با کاهش فشار محیط تبخیر می شود. برخلاف MSF، MED اجازه می دهد بدون نیاز به تهیه گرمای اضافی برای تبخیر در هر مرحله، آب خوراکی تهیه شود.



شکل۲- فرایند کلی نمک زدایی تقطیر اثر چندگانه

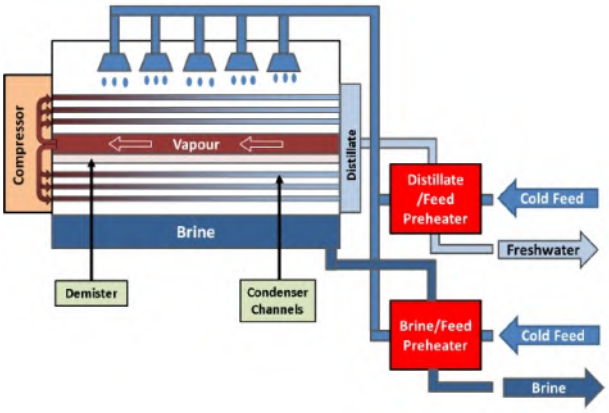
پ: تراکم بخار (VC)[۳]

تکنولوژی دیگر برای نمک زدایی حرارتی، فرآیند تراکم بخار (VC) است که در آن حرارت برای تبخیر آب ، از فشرده سازی به جای گرمای مستقیم حاصل می شود. این فرایند در ترکیب با سایر فرآیندهای (MED) برای بهبود بهره وری کلی استفاده می شود.

۲-۳-۲- نمک زدایی غشایی

نمک زدایی غشایی از غشا ها برای جداسازی آب شیرین از آب شور استفاده می شود. آب خوراکی به سطح غشاء منتهی می شود که به طور انتخابی آب را عبور می دهد و نمک ها را حذف می کند. در زیر انواع مختلف فرایند غشایی را مورد بررسی قرار میدهیم.

۱. Multi Stage Flash
2 Multi Effect Distillation
۳Vapor Compression



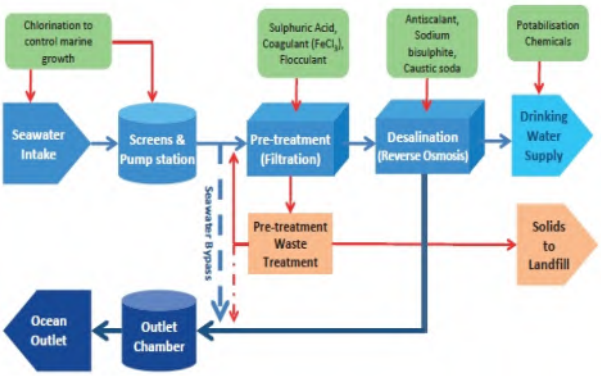
شکل۳– فرایند کلی نمک زدایی تراکم بخار

الف: اسمز معکوس (RO)[1]

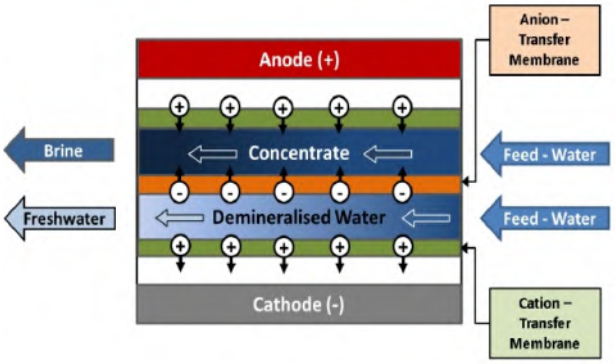
در اسمز معکوس (RO)، فشار آب دریا بیش از فشار اسمزی افزایش می یابد، به همین طریق اجازه می دهد آب نمک دار از طریق غشاهای نیمه نفوذ پذیر عبور کند و ذرات جامد جامد را پشت غشا ترک کند (شکل ۳). سیستم RO بسیار حساس به کیفیت خوراک آب (شوری، گل آلودگی، درجه حرارت) هستند، در حالی که سایر تکنولوژی های تقطیر در این زمینه چندان سخت گیر نیستند.

آب با شوری و درجه حرارت بالا می تواند فرایند اسمز را تحت تاثیر فشار اسمز، با توجه به نیاز به انرژی بیشتر محدود کند. آب خوراکی حاوی گل آلودگی می تواند منجر به آسیب شود اگر آن حفره های غشا با مواد جامد معلق مسدود شوند. شوری دریایی معمولی که برای سیستم های RO مناسب است حدود ۳۵۰۰۰ ppm محتویات جامد حل شده است. با این حال، در بعضی از مناطق (یعنی دریای سرخ، خلیج فارس)، محتوای جامدات حل شده بالاتر است.

در این مناطق، آب دریا دارای پتانسیل رسوب زیاد (با توجه به مقدار زیاد موجودات زنده) و دمای سطح بالا است. بنابراین یک سری عملیات برای تبدیل شدن به آب خوراکی قبل از نمک زدایی RO مورد نیاز است. نمک زدایی RO همچنین برای کارخانه های کوچک در مناطق روستایی یا جزایر مناسب است که در آن هیچ منبع آب دیگری وجود ندارد.



شکل۴– نحوه تولید آب شیرین به وسیله فرایند اسمز معکوس



شکل۵– نحوه تولید آب شیرین به وسیله فرایند الکترودیالیز [۱۰]

جدول۱– انواع فرایند های نمک زدایی

تکنولوژی غشایی	تکنولوژی حرارتی
اسمز معکوس RO	تقطیر اثر چندگانه MED
الکترودیالیزED	تبخیر ناگهانی چند مرحله ای MSF
	تراکم بخار VC

۳ – تولید آب شیرین با انرژی های تجدیدپذیر

نمک زدایی بر اساس استفاده منابع انرژی تجدید پذیر می توانند راه های پایداری برای تولید آب باشد و انتظار می رود از نظر اقتصادی مورد توجه واقع شود. زیرا هزینه های فناوری های تجدید پذیر همچنان کاهش می یابد و افزایش قیمت سوخت های فسیلی همچنان ادامه دارد. استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در دسترس برای دفع نمک زدایی به خصوص در مناطق دور افتاده، با تراکم جمعیت کم و زیرساخت های ضعیف آب و برق ،راه حل مقرون به صرفه خواهد بود.

در حال حاضر بهره برداری از آب شیرین کن بر اساس تجدید پذیر کمتر از ۱ درصد از ظرفیت دفع نمک بر اساس سوخت های فسیلی است.که مزایای استفاده از این گزینه تکنولوژی را منعکس نمی کند. نمک زدایی تجدیدپذیر بیشتر بر مبنای فرایند RO (۶۲٪) و به دنبال آن فرایندهای حرارتی مانند MSF و MED است. انرژی تجدیدپذیر غالب نسبت به بقیه ، منبع خورشیدی فتوولتائیک (PV) است که در حدود ۴۳٪ از تکنولوژی های موجود است. و پس از آن انرژی حرارتی خورشید و بادی قرار دارد. ترکیبی مناسب از یک منبع انرژی تجدیدپذیر با تکنولوژی آب شیرین کن می تواند کلیدی برای تقاضای انرژی و آب از لحاظ اقتصادی،کارآمد و سازگار با محیط زیست باشد.

ارزیابی فنی امکان سنجی و هزینه کارآیی کارخانه آب شیرین سازی نیاز به تجزیه و تحلیل دقیق، از جمله عوامل مختلف، مانند محل، کیفیت(شوری) ورودی آب خوراکی و خروجی آب شیرین،انرژِ های قابل تجدید موجود،منبع انرژی، ظرفیت و اندازه کارخانه، و دسترسی به برق دارد.شیرین کننده های قابل بازیافت به ویژه در مناطق خشک با انرژی های بزرگ انرژی خورشیدی مانند منطقه MENA[2](خاورمیانه و آفریقای شمالی) رو به رشد است.

1 Reverse Osmosis
[2] Middle East and Northern Africa

بسیاری از سیستم های آب شیرین سازی قابل تجدید موجود در ظرفیت های کوچک از چند متر مکعب تا ۱۰۰ متر مکعب در روز اجرا می شوند. بزرگترین کارخانه نمک زدایی خورشیدی در جهان با استفاده از فناوری جدید نانو غشا در شهر الخفیجی در عربستان سعودی است. سایر کارخانه های آب شیرین سازی که توسط انرژی های تجدید پذیر طراحی شده اند در قبرس، مصر، اردن، مراکش، ترکیه، ابوظبی و جزایر قناری دیده میشوند.

سیاست گذاران با توجه به امکان سنجی هر منطقه نیاز دارند که این تکنولوژی های مختلف برای شیرین کردن آب را در نظر بگیرند. به عنوان مثال انرژی خورشیدی مخصوصاً گرما از انرژی متمرکز (CSP)[۱] برای نمک زدایی حرارتی در مناطق خشک قابل گسترش است. انرژی باد برای پروژه های آب شیرین کننده غشایی در ساحل و جزایر مورد توجه بوده ولی هنوز هزینه بر است .اما انتظار می‌رود استفاده از تکنولوژی تجدیدپذیر در سال‌های آینده این هزینه را کاهش دهد. برای شروع میتوان آن را در مناطق کم جمعیت و دور افتاده مورد امتحان قرار داد. فناوری نمک زدایی تجدیدپذیر انواع مختلفی دارد[۲]:

۱-۳- حرارتی خورشیدی

نمک زدایی از طریق MSF و MED با استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان ورودی انرژی از امیدوار کننده ترین فرآیندهای آب شیرین کن بر اساس انرژی های تجدید پذیر است. کارخانه نمک زدایی شامل دو بخش (از قبیل گردآوری گرمای خورشیدی و تقطیر) است. این فرایند به عنوان یک فرایند غیرمستقیم به حساب می آید. گرما از یک مجموعه جداگانه خورشیدی یا بخاری های خورشیدی حاصل می شود، در صورتی که تمام اجزای آن در کارخانه ادغام می شوند. کارخانه های CSP تشعشع خورشیدی را جمع آوری می کنند و گرما را برای تولید برق مهیا می کنند.

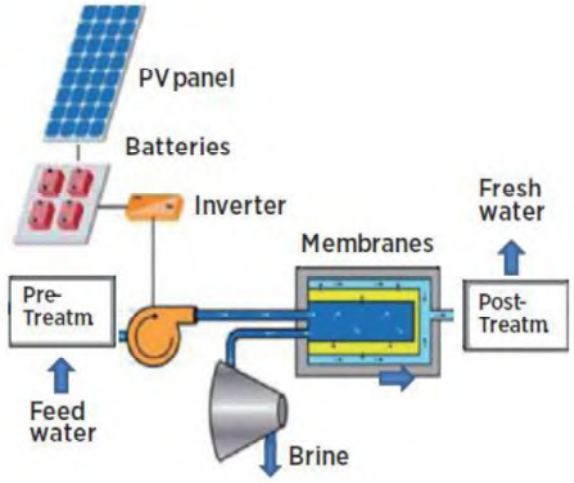
بنابراین، آنها می توانند با هر دو فرایند نمک زدایی غشا یا فرایند نمک زدایی حرارتی همراه باشند. کارخانه های CSP اغلب مجهز به سیستم های ذخیره سازی حرارتی میباشند تا زمانیکه تابش خورشیدی در دسترس نباشد.این راه را به تعدادی از راه حل های طراحی می دهد که ترکیبی از تولید برق و گرما با نمک زدایی آب از طریق فرایندهای جداسازی حرارتی یا غشایی است.

کارخانه های CSP نیز به اندازه کافی بزرگ هستند تا انرژی هسته ای را برای آنها فراهم کنند. کارخانه نمک زدایی متوسط و بزرگ،در مناطق بیابانی با استفاده از تابش مستقیم خورشید مستقیم، CSP به عنوان یک تکنولوژی چند منظوره امیدوار کننده برای تولید برق، گرما و تهویه خنک کننده و شیرین سازی آب در نظر گرفته می شود.

۲-۳- فتوولتائیک (PV)

فن آوری فوتوولتائیک (PV) می تواند به طور مستقیم به فرآیندهای آب شیرین کننده RO یا ED متصل شود که بر اساس انرژی به عنوان انرژی ورودی (شکل ۴) است. بسیاری از سیستم های آب شیرین سازی مبتنی بر سیستم PV در سراسر جهان، به ویژه در مناطق دور افتاده و جزایرمثل ریاض، عربستان سعودی ، جزیره اوشیمای ژاپن راه اندازی شده اند.

مسئله اصلی نمک زدایی PV هزینه باتری سلول های PV و باتری های ذخیره سازی برق است.تعمیر و نگهداری دقیق و بهره برداری از سیستم باتری نیز ضروری است. پیشرفت تکنولوژی در ذخیره سازی برق (ETSAP E18) در ارتباط با PV می تواند منجر به استفاده گسترده تر از آب شیرین کن شود.



شکل۶- سیستم ترکیب شده ی فناوری تجدیدپذیر فوتوولتائیک و نمک زدایی اسمز معکوس

۳-۳- بادی

قدرت الکتریکی و مکانیکی تولید شده توسط توربین بادی می تواند در کارخانه های آب شیرین کن ، به ویژه واحد های آب شیرین کننده VC, RO , ED و به ویژه فرایند تراکم بخار مکانیکی(MVC)[۲] مورد استفاده قرار گیرد. در MVC، انرژی مکانیکی توربین بادی به طور مستقیم برای فرایندVC بدون تبدیل بیشتر به برق مورد استفاده قرار می گیرد. به طور کلی، آب شیرین سازی بر پایه باد می تواند یکی از گزینه های امیدوار کننده برای نمک زدایی آب دریا، به ویژه در مناطق ساحلی با پتانسیل باد بالا باشد.کارخانه‌های آب شیرین کن بر پایه باد در سراسر جهان از جمله گران کاناریا، جزایر قناری، جزیره فوئرتونتورا، اسپانیا و مرکز فناوری های سیستم های انرژی تجدید پذیر در انگلستان نصب شده است. همانطور که برای PV وCSP، یکی از نقاط ضعف ناپذیر باد، متناوب بودن منبع انرژی است.ترکیبات احتمالی با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری‌ها یا سایر سیستم‌های ذخیره انرژی می توانند شرایط عملیاتی‌تر را فراهم کنند.

۴-۳- زمین گرمایی

انرژی زمین گرمایی می تواند برق و گرما تولید کند که می توان آن را با هر دو تکنولوژی نمک زدایی حرارتی و غشایی ترکیب کرد. انرژی زمین گرمایی با درجه حرارت پایین، معمولا در محدوده ۷۰-۹۰ درجه سانتیگراد، برای نمک زدایی MED مناسب است. یک پروژه در جزیره میلوس، یونان، یک سیستم آب شیرین خورشیدی را برای تولید ۱۹۲۰ متر مکعب در روز آب پیشنهاد داده است [۱۲].این کارخانه شامل یک سیستم دوگانه با آب گرم از چاه های زمین گرمایی است که برای اجرای یک چرخه رابینین آلی (ORC)[۳] با توربین ۴۷۰ کیلو وات برای تولید برق و یا واحد آب شیرین کن کار می کند. این سیستم می تواند با تولید آب شیرین در هزینه های بسیار کم به جامعه محلی کمک کند. با این حال، بهره برداری از انرژی های زمین گرمایی بسیار بستگی به

[۱] concentrating solar power
[۲] Mechanical Vapor Compression

[۳] organic Rankine cycle

شرایط خاص محلی دارد و هزینه های سرمایه گذاری پیش روی آنها معمولا بالا است.

جدول ۲- امکان‌سجی ترکیب تکنولوژی‌های تجدیدپذیر و آب شیرین

تکنولوژی تجدید پذیر	تکنولوژی حرارتی			تکنولوژی غشایی	
	MSF	MED	VC	RO	ED
حرارتی خورشیدی	-	-	●	●	●
فتولتائیک	-	-	●	●	●
بادی	●	●	●	●	●
زمین گرمایی	●	●	●	●	●

۴- انرژی مورد نیاز برای شیرین‌سازی آب

نمک زدایی نیاز به انرژی قابل توجهی دارد. نمک‌زدایی غشایی(RO) فقط نیاز به برق دارد، در حالی که نمک زدایی حرارتی (MSF, MED) نیاز به انرژی الکتریکی و حرارتی دارد و در مجموع انرژی بیشتری نسبت به فرآیند غشایی دارد. نمک زدایی دریایی از طریق MSF عمدتا ۲۹۰ کیلوژول در کیلوگرم انرژی حرارتی به اضافه ۲,۵-۳,۵ کیلووات ساعت در متر مکعب برق مصرف می کند، در حالیکه آب شیرین‌کن غشایی در مقیاس بزرگ نیاز به ۰.۵-۳,۵ کیلووات ساعت در متر مکعب برق دارد. جدول ۳ ، داده های انرژی معمولی را برای تکنولوژی های مختلف آب شیرین بیان می کند. با توجه به تقاضای انرژی متوسط برای فرآیندهای آب شیرین کن برایMED ، ظرفیت آب شیرین کن جهانی نیاز به مصرف حدود ۲۰۶ میلیون کیلووات ساعت در روز دارد که برابر با ۷۵,۲ کیلو وات ساعت در سال است. انرژی قابل تجدید، به ویژه CSP با سیستم های ذخیره سازی حرارتی، می تواند به طور قابل توجهی در کاهش سوخت های فسیلی (و انتشار گازهای همراه) مورد استفاده برای نمک زدایی قرار گیرد[۳].

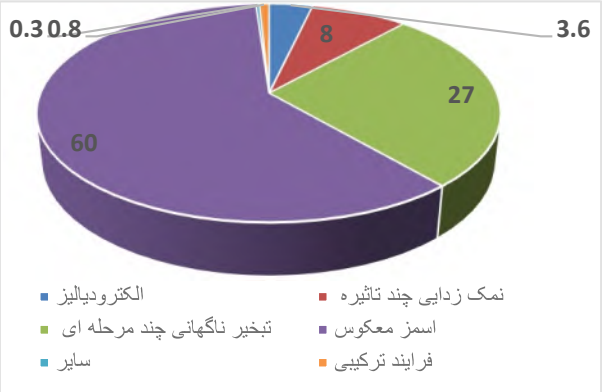
۶- بررسی اقتصادی نمک زدایی در جهان

هزینه آب شیرینکن در سالهای گذشته به این نیم دلار در هر مترمکعب کاهش یافته است. در حالی که قیمت بازار آب آشامیدنی بین یک دلار و ۲ دلار است. براین آب‌شیرین‌کن در حال حاضر برای مناطق با درآمد متوسط مناسب است. طبق آمار برداشت آب جهانی بیش از ۴۰۰۰ میلیارد متر مکعب در سال است و در حدود ۲۵٪ از جمعیت جهان با کمبود آب شیرین مواجه میباشند. در پاسخ به تقاضای روزافزون،نمک زدایی تبدیل به مهمترین منبع آب برای نوشیدن و کشاورزی در برخی مناطق جهان، به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا و برخی از جزایر کارائیب، میباشد[۱۳].

جدول ۳- میزان انرژی لازم برای انواع تکنولوژی های تولید آب شیرین

	MSF	MED	SWRO	ED
دمای کارکرد (سانتی گراد)	110-90	70	دمای محیط	دمای محیط
برق مورد نیاز (کیلو وات ساعت بر متر مکعب)	3.5-2.5	2.5-1.5	5-3.5	4-1.5
انرژی حرارتی مورد نیاز (کیلو وات ساعت بر متر مکعب)	80.6 (290KJ/kg)	80.6 (290KJ/kg)	0	0

انجمن بین المللی نمک‌زدایی (IDA)[1]گزارش می‌دهد که در حدود ۱۵،۰۰۰ کارخانه آب شیرین کن در سراسر جهان با ظرفیت ۷۱,۷ میلیون متر مکعب در روز وجود دارد. اکثر فرآیندهای آب شیرین کن که امروزه استفاده می‌شوند بر اساس اسمز معکوس (RO) و تقطیر ناگهانی چند مرحله ای (MSF) هستند که به ترتیب ۶۰ % و ۲۶ % از ظرفیت جهانی را تشکیل می‌دهند. امکان پذیری هر تکنولوژی بستگی به شرایط خاص مانند قیمت انرژی، کیفیت آب و منابع فنی منطقه دارد[۴].



شکل۷- میزان استفاده از فناوری‌های مختلف نمک‌زدایی در جهان[۱۱]

هزینه آب شیرین‌کن تا حد زیادی تحت تأثیر هزینه انرژی قرار می‌گیرد. بنابراین، امکان‌سنجی اقتصادی آب شیرین‌کن به میزان قابل توجهی به در دسترس بودن محلی و هزینه انرژی بستگی دارد. مقایسه بین فناوری های مختلف آب شیرین‌سازی باید بر اساس شرایط محلی یکسان باشد.جنبه های خاص مکان، که تأثیر قابل توجهی بر هزینه های نهایی نیز دارند، عبارتند از : حمل و نقل آب خوراکی، تحویل آب شیرین به کاربران نهایی، دفع سدیم و اندازه سیستم کارخانه.

[1] International Desalination Association

در مقایسه با سرمایه و هزینه عملیات و نگهداری، مقایسه دو سیستم نمک زدایی معمولی، یعنی RO و MSF که در لیبی نصب شده است، نشان می دهد که کارخانه MSF نیازمند سرمایه بالا است. در حالی که کارخانه RO نیاز به هزینه های عملیاتی و نگهداری بیشتر به دلیل پیچیدگی کارخانه دارد. ارقام معمول برای هزینه سرمایه گذاری ظرفیت آب شیرین سازی جدید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ دلار به ازای هر واحد ظرفیت، و با تغییرات زیادی بستگی به شرایط محلی (هزینه کارگری، نرخ بهره، و غیره) دارد [۱۴].

هزینه های عملیاتی و نگهداری معمول در حدود ۲ الی ۲/۵ ٪ هزینه های سرمایه گذاری در سال تخمین می زنند. با توجه به هزینه کل شیرین کننده، سالهای گذشته این هزینه کاهش قابل توجهی صورت گرفته است، اما هنوز آب شیرین کننده تنها برای کشورهای با درآمد متوسط مقرون به صرفه است و برای کشورهای فقیر کماکان گران محسوب میشود. هزینه تولید معمول از کارخانه های آب شیرین کن که در حال اجرا بر روی سوخت های فسیلی هستند، بین ۱ و ۲ دلار بر متر مکعب است. در شرایط مطلوب، این هزینه تولید می تواند تا ۰،۵ دلار در متر مکعب نیز باشد[۵].

به طور کلی، نمک زدایی بر پایه منابع انرژی تجدید پذیر هنوز در مقایسه با نمک زدایی معمولی گران‌تر است، زیرا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تولید انرژی تجدیدپذیر بیشتر است. با این وجود، در شرایط خاص به عنوان مثال- نصب و راه اندازی در مناطق دور افتاده که تولید انرژی توزیع شده (گرما و قدرت) راحت تر از تولید، انتقال و توزیع انرژی متمرکز است و شیرین سازی تجدیدپذیر می‌تواند با سیستم‌های معمولی رقابت کند. هزینه‌های آب شیرین شده از شایع ترین فناوری‌های شیرین‌سازی بر اساس انرژی تجدیدپذیر در جدول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۷- موانع

ترکیب سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و نمک‌زدایی موانعی را به همراه دارد. بعد از مسائل اقتصادی، مسئله کلیدی دفع نمک است. نمک زیاد، نوعی زباله است که باید از بین برود یا بازیافت شود. در حال حاضر، این نمک‌ها عمدتا به دریا ریخته می شود یا رقیق شده و به یک فضای باز افشانده می شود. با این حال، تاثیر منفی آب نمک بر اکوسیستم ها، به این معنی است که برای حل و فصل دفع و یا بازیافت آب شور برای پیشگیری از اثرات زیست محیطی، یک راه حل پایدار نیاز است[۹].

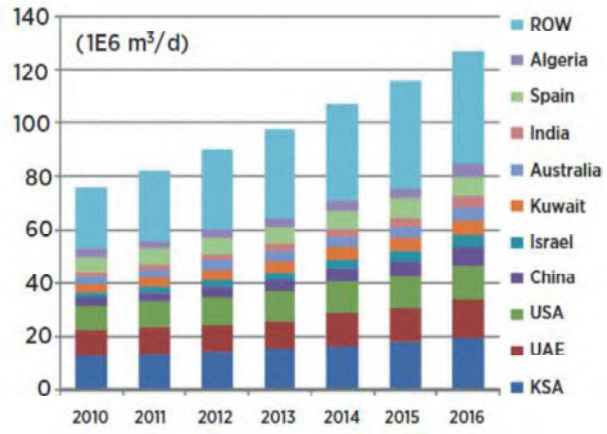
از دیدگاه اقتصادی، شناسایی بازارها و چارچوب سیاست مناسب می تواند سرمایه گذاران خصوصی برای دفن زباله های تجدیدپذیر را جذب کند. در کنار همکاری و ادغام بیشتر بین شرکت های بخش انرژی و شرکت ها از بخش آب ضروری است و توجه بیشتری به موانع برای کشورهای در حال توسعه، از جمله سرمایه گذاری های بالا و هزینه های عملیاتی، و پرسنل آموزش دیده جهت اجرای طرح، باید پرداخت شود.

جدول ۴ – مقایسه تقاضای انرژی و ظرفیت فنی نمک‌زدایی‌های تجدیدپذیر [۶]

	ظرفیت فنی (متر مکعب در روز)	تقاضای انرژی (kWh / m^3)
رطوبت زایی اثرچندگانه	۱-۱۰۰	حرارتی: ۱۰۰ الکتریکی: ۱/۵
حرارتی خورشیدی		
تقطیر غشایی	۰/۱ – ۱۰	حرارتی: ۱۵۰-۲۰۰
حرارتی خورشیدی		
تقطیر اثر چندگانه	۵۰۰۰	حرارتی: ۶۰-۷۰ الکتریکی: ۱/۵ -۲
حرارتی خورشیدی		
اسمز معکوس	۱۰۰	فقط الکتریکی آب شور : ۰/۵-۱/۵ آب دریا:۴/۵
فتوولتائیک		
الکترودیالیز	۱۰۰	فقط الکتریکی آب شور:۳-۴
فتوولتائیک		
اسمز معکوس	۵۰-۲۰۰۰	فقط الکتریکی آب شور : ۰/۵-۱/۵ آب دریا:۴/۵
بادی		
تراکم بخار مکانیکی	۱۰۰	فقط الکتریکی آب دریا:۱۱-۱۴
بادی		

جدول ۵– مقایسه هزینه تولید و توسعه برای نمک‌زدایی‌های تجدیدپذیر [۶]

	هزینه تولید آب (دلار بر مترمکعب)	مرحله توسعه
رطوبت زایی اثر چندگانه	۲/۶-۶/۵	کاربردی
حرارتی خورشیدی		
تقطیر غشایی	۱۰/۴-۱۹/۵	در حال تحقیق و توسعه
حرارتی خورشیدی		
تقطیر اثر چندگانه	۲/۳-۲/۹	در حال تحقیق و توسعه
حرارتی خورشیدی		
اسمز معکوس	آب شور: ۶/۵-۹ آب دریا: ۱۱/۵-۱۵/۵	کاربردی
فتوولتائیک		
الکترودیالیز	آب شور: ۱۰/۵-۱۱/۵	در حال تحقیق و توسعه
فتوولتائیک		
اسمز معکوس	آب شور: ۴-۶/۵ آب دریا: ۶/۵-۹	کاربردی
بادی		
تراکم بخار مکانیکی	۵/۲ – ۷/۸	تحقیقات پایه
بادی		



شکل۸– سهم کشورهای مختلف در میزان نمک‌زدایی در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ [۱۱]

۸- بحث و نتیجه گیری

فن‌آوری تولید آب شیرین در طی دهه‌های گذشته به طور مداوم توسعه یافته است و آب شور به عنوان بخشی از تولید آب شیرین مورد استفاده قرار میگیرد. با این حال، هزینه‌های فعلی تولید آب شیرین شده به دلیل استفاده گسترده از انرژی هنوز هم بالاست. ولی همانطور که گفته‌شد، انرژی تجدیدپذیر، با سیستم های ذخیره سازی حرارتی، می تواند به طور قابل توجهی در کاهش سوخت های فسیلی (و انتشار گازهای همراه) مورد استفاده برای نمک زدایی قرار گیرد. انتخاب یک فرآیند شیرین‌سازی آب باید بر اساس مطالعه دقیق شرایط خاص منطقه و کاربرد آن باشد. شرایط محلی می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در تعیین مناسب‌ترین فرآیند شیرین‌سازی برای یک منطقه ایفا کند. استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای نمک‌زدایی، یک گزینه بسیار مناسب برای مشکلات انرژی و آب حال حاضر است.پیشرفت های تکنولوژی همچنان به بهبود کارایی سیستم و کاهش هزینه‌ها ادامه می‌دهد.

در حال حاضر هزینه تولید آب شیرین از سیستم های نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر کمتر از راه‌های جایگزین دیگر در مناطق دور افتاده است که دسترسی به برق وجود ندارد. مطالعات بسیاری در مورد مقایسه فنی مناسب بین انرژی‌های تجدیدپذیر و فرایند آب شیرین سازی در قالب مقالات مختلف انجام شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که سیستم های انرژی تجدیدپذیر می توانند در شرایط خاص با سیستم های دیگر رقابت کنند. این فناوری‌ها از نظر اقتصادی، ظرفیت تولید و میزان مصرف انرژی مورد مقایسه قرار گرفتند، که با توجه به نتایج به دست‌آمده انتظار می‌رود ترکیب فناوری‌های بسیار گزینه های امیدوار کننده ای باشد.

۱- (حرارتی خورشیدی- رطوبت زایی اثر چندگانه)
۲- (حرارتی خورشیدی - تقطیر اثر چندگانه)
۳- (فتوولتائیک - اسمز معکوس)
۴- (فتوولتائیک - الکترودیالیز)
۵- (بادی - اسمز معکوس)
۶- (زمین‌گرمایی – تقطیر اثر چندگانه)

از بین فناوری های نام برده شده میتوان فناوری (حرارتی خورشیدی - تقطیر اثر چندگانه) را با توجه به ظرفیت تولید بسیار بالا و هزینه تولید کم، بهینه ترین روش برای تولید آب شیرین با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر انتخاب کرد. با این حال، این آزمایشات به طور تجربی تایید نشده است ولی می تواند به عنوان یک راهنما برای تصمیم گیری در مورد انتخاب فناوری برای یک برنامه خاص مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[1] Francisco, F., Leijon, J., Boström, C., Engström, J., & Sundberg, J. (2018). Wave power as solution for off-grid water desalination systems: Resource characterization for Kilifi-Kenya. *Energies*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/en11040004

[2] IRENA, & Fraunhofer ISE. (2015). Renewable Desalination : Technology Options for Islands, (October).

[3] Isaka, M. (2012). Water Desalination Using Renewable Energy - Technology Brief. *IRENA - IEA - Etsap*, (March), 24.

[4] IEA, 2005, World Energy Outlook 2005, Middle East and North Africa Insights. *International Energy Agency (IEA)*.

[5] Caribbean Environmental Health Institute (CEHI), 2006, The Evaluation of the Use of Desalination Plants in the Caribbean, United Nations Educational, *Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*.

[6] Economic and Social Commission for Western Asia. Energy options for water desalination in selected ESCWA member countries. *New York: United Nations*. ۲۰۰۱ ;

[7] UNEP (United Nations Environment Program) (2003) *Key Facts about Water*

[8] World Health Organization. Guidelines for drinking water quality, *Vol. I, Geneva, 1984*.

[9] ARMINES. Technical and economic analysis of the potential for water desalination in the Mediterranean region, RENA-CT94–0063, *France; 1996*.

[10] O.K.Buros. The desalinating ABC, McGrawhill, *New York, 1990*.

[11] O.A Hamed (2005). Overview of hybrid desalination systems – current status and future prospects. *Desalination 186, 207-214*.

[12] A. Maurel. Desalination by reverse osmosis using renewable energies (Solarwind):cadarache central experiment. In: Proceedings of the New Technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination Conference, Session II, *Athens, Greece; 1991. p.* ۱۷–۲۶.

[13]. Jenny Lindblom, Bo Nordell, Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation, *Desalination 203 (2007) 417–434*

[14]. Vahid Khalajzadeh, Moien Farmahini, Ghassem Heidarinejad, A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler , *Energy and Buildings 49 (2012) 604–610*