

Technical and Economic Aspects of Water Desalination Worldwide

Hamid Reza Rashidi¹, Mohammad Hossein Sarrafzadeh^{2*} and Hashem Asgharnejad¹

1-Unesco Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

2- Associate Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: sarrafzdh@ut.ac.ir

Received: 18/6/2017

Revised: 10/10/2017

Accepted: 11/10/2017

Abstract

As a consequence to global warming and climate change all around the world and irregular consumption of underground water resources, the societies are being faced to a serious danger named water scarcity. Population growth, need to food security, climate changes and agricultural needs have forced the societies to search for appropriate alternatives for fresh water resources. Unconventional water resources are known as one of the most important alternatives for fresh water on the earth. One of the most sources of unconventional waters is saline or brackish water. Considering the great amount of saline water on the earth, water desalination can be a fruitful method to overcome the crisis of water scarcity. Water desalination technologies will be categorized into two main groups of thermal and membrane technologies. In this paper, at first the most important and most applicable desalination technologies around the world are studied, then the influences of desalination technologies regarding energy and economy have been evaluated. At the end, the examples of desalination units in different parts of the world have been studied.

Keywords: Desalination, Membrane processes, Water sweetening, Unconventional water resources

ارزیابی فنی و اقتصادی روش‌های نمک‌زدایی از آب دریا با در نظر گرفتن ویژگی‌های بومی در نقاط مختلف دنیا

حمیدرضا رشیدی^۱، محمدحسین صراف‌زاده^{۲*}، هاشم اصغرزاده^۱

۱- کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

* نویسنده مسئول، ایمیل: sarrafzdh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۸

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۹

چکیده

با افزایش میانگین دمای کره زمین و به‌وجود آمدن تغییر اقلیم و همچنین مصرف بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، جوامع امروزی با خطری بسیار اساسی و مهم به‌نام کمبود آب مواجه شده‌اند. رشد جمعیت، نیاز به امنیت غذایی، تغییرات اقلیمی و نیازهای کشاورزی جوامع بین‌المللی را مجبور به جستجو برای منابع جایگزین آب کرده است. منابع آب نامتعارف، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جایگزین‌ها برای منابع آب شیرین موجود در کره زمین، معرفی شده‌اند. یکی از مهم‌ترین منابع آب نامتعارف، آب‌های شور و لب‌شور به‌شمار می‌آیند. با توجه به وجود منابع عظیم آب شور در کره زمین، نمک‌زدایی آب روشی کارآمد برای غلبه بر بحران کم‌آبی به‌حساب می‌آید. فرایندهای نمک‌زدایی به‌طور کلی به دو دسته فرایندهای گرمایی و فرایندهای غشایی تقسیم می‌شوند. در این مقاله ابتدا به بررسی روش‌های مهم و پرکاربرد در سطح جهان پرداخته و سپس اثرات فرایند نمک‌زدایی از منظر اقتصاد و انرژی در روش‌های مختلف و متداول این فرایند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نمونه واحدهای نمک‌زدایی در نقاط جغرافیایی مختلف جهان از این حیث بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: منابع آب نامتعارف، نمک‌زدایی، فرایند شیرین‌سازی، فرایندهای غشایی

در اوایل قرن بیستم میلادی فرایند تبخیر و میعان به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های نمک‌زدایی شناخته می‌شد. در خلال جنگ جهانی دوم به دلیل کمبود آب آشامیدنی، سرمایه‌گذاری بسیار زیادی برای پیشرفت تکنولوژی‌های نمک‌زدایی و صنعتی‌سازی آن صورت گرفت. به طوری که سرانجام اولین نوع صنعتی شده و پیشرفته آن در سال ۱۹۶۰ بر مبنای روش حرارتی ابداع شد (Nair and Kumar, 2013). فرایند نمک‌زدایی، آب دریا را به دو جریان اصلی آب آشامیدنی و شورابه (حاوی غلظت بالای نمک) تقسیم می‌کند. اگرچه دفع این جریان شورابه تشکیل شده که حاوی مقادیر بسیار زیادی از نمک است، خود یک معضل بزرگ زیست‌محیطی به‌شمار می‌آید، اما پیشرفت‌های اخیر صورت گرفته در حوزه فناوری‌های شیرین‌سازی آب، استفاده از این روش را به‌منظور تامین آب شیرین، توجیه‌پذیر نموده است. همچنین طراحی فرایندهای جدید نمک‌زدایی به کاهش این معضل کمک شایانی کرده است (Al-Mutaz, 1991). با این وجود در ادامه این مقاله به معرفی و بررسی روش‌های مختلف نمک‌زدایی از آب از منظر فنی و اقتصادی پرداخته خواهد شد.

۲- روش‌های نمک‌زدایی از آب

انتخاب روش مناسب برای نمک‌زدایی به عوامل گوناگونی مانند کیفیت آب، مساحت واحد عملیاتی، ظرفیت و هزینه‌های اکتشاف بستگی دارد. به‌طور عام، روش‌های نمک‌زدایی از آب به دو دسته کلی روش‌های حرارتی و روش‌های غشایی تقسیم می‌شوند (Gorjian and Ghobadian, 2015).

۲-۱- روش‌های حرارتی

نحوه کار روش‌های حرارتی به این صورت است که ابتدا آب دریا را حرارت داده و سپس اقدام به جمع‌آوری میعان حاصل می‌کنند. این روش به سه صورت تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF)، تقطیر چندمرحله‌ای (MED) و تراکم بخار (VC) انجام می‌شود (Kucera, 2014). در تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF) که یک فرایند چندمرحله‌ای تبخیر آب از طریق جوشش است. روش کار بدین‌صورت است که آب گرم شده را به مخازنی با فشار کم هدایت می‌کنند. وقتی آب به فضای حاوی فشار بسیار کم رسیده، به‌این‌علت که قبلاً از منبع حرارتی

آب در تمام جنبه‌های زندگی، مهم و اساسی بوده و نقش بسیار پررنگی در بقای انسان‌ها و همچنین پیشبرد فعالیت‌های اقتصادی ایفا می‌کند (Dawoud, 2011). امروزه نیاز به آب شیرین به‌دلیل افزایش جمعیت جامعه بشری و ارتقای سطح زندگی مردم، توسعه صنایع و پیشرفت کشاورزی روزبه‌روز در حال افزایش است. متأسفانه منابع آب شیرین طبیعی در دسترس، خیلی کم‌تر از درخواست جامعه است و طبق پیش‌بینی سازمان ملل متحد تا پایان سال ۲۰۲۵ نزدیک به ۱/۸ میلیارد نفر از مشکل کم‌آبی رنج خواهند برد (Sharon and Reddy, 2015). آمارها حاکی از آن است که حدود ۹۷ درصد آب موجود در کره زمین را آب‌های شور دربر می‌گیرند و در این میان تنها ۰/۵ درصد آب شیرین و قابل شرب در دسترس است (Khawaji et al., 2008). با در نظر گرفتن رشد ۳۰ درصدی جمعیت در ۳۵ سال آینده، وضعیت کمبود آب بیش از پیش نگران‌کننده و چالش‌برانگیز خواهد شد (Lutz et al., 1997). بنابراین رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی و به‌تبع آن تأثیرات بر کشاورزی و استفاده بیش از حد منابع آبی، جوامع بین‌الملل را مجاب به جستجو برای منابع جایگزین و مدیریت منابع آبی کرده است. از این‌رو حتی آن دسته کشورهای که در حال حاضر با کمبود آب مواجه نیستند نیز در خطر رویارویی با این بحران در آینده قرار دارند.

برای حل مشکل کم‌آبی راه‌های بی‌شماری از جمله سدسازی، باروری ابرها، شیرین‌سازی آب دریا (نمک‌زدایی) و بازیابی آب مصرفی (آب خاکستری) تاکنون اتخاذ شده است. ولی با توجه به این‌که تنها منبع بی‌پایان آب، اقیانوس‌ها و دریاها هستند بهترین راه توسعه و پیشرفت در زمینه تهیه منابع آب، نمک‌زدایی از آب دریاها است (Gorjian and Ghobadian, 2015). نمک‌زدایی فرایندی است که در آن نمک و دیگر املاح معدنی و آلودگی‌ها از آب حذف می‌شود و قابلیت تنظیم کمیت و کیفیت آب را به‌تناسب نیاز فراهم می‌کند تا بدین‌ترتیب آب شور تصفیه شده برای مصارف شهری و کشاورزی یا صنعتی قابل استفاده باشد. تا چندی پیش، این فرایند محدود به کشورهای کم‌آب اما نفت‌خیز مانند کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا بود، اما امروزه این روش به ابزاری مؤثر برای رفع نیاز رو به رشد جوامع تبدیل شده است (Shatat et al., 2013).

مقداری گرما کسب کرده است به صورت ناگهانی تبخیر می شود (Likhachev and Li, 2013). سپس بخار آب شیرین، میعان شده و وارد خطوط آب آشامیدنی می شود. یکی از معایب این روش مصرف بسیار بالای انرژی هم از نوع الکتریکی و هم حرارتی در مقابل سایر روش ها است، همچنین قیمت تمام شده آب شیرین با این روش نیز تقریباً بالا است (Mezhar et al., 2011). در تقطیر چندمرحله ای (MED) با پاشیدن آب شور روی لوله هایی که بخار در آن جریان دارد، مقداری از آب شور تبدیل به بخار می شود. چون این عمل در خلأ انجام می شود، آب در دمای پایین تری به بخار تبدیل می شود و کارایی دستگاه بالا می رود. از بخار تولید شده به عنوان تأمین کننده انرژی حرارتی مرحله بعد استفاده می شود. از طرفی این بخار سرد شده و به محصول تبدیل می شود. با افزایش مراحل می توان از مقدار بخار اولیه ثابت، محصول بیش تری به دست آورد (Sharon and Reddy, 2015). این روش همانند روش MSF به انرژی های حرارتی و الکتریکی نیاز دارد که البته میزان مصرف آن کم تر است. هزینه آب تولیدی نیز تقریباً بالا و در حد روش MSF است (Mezhar et al., 2011). همچنین از این روش می توان در ظرفیت های بالای تولید آب شیرین نیز استفاده کرد (Ghalavand et al., 2015). تراکم بخار (VC) یک فرایند شامل دستگاه های ساده تبخیر است که به عنوان متراکم کننده بخار مورد استفاده قرار می گیرند. در فرایند تراکم بخار، از انرژی مکانیکی و انرژی گرمایی به منظور متراکم ساختن بخار استفاده می شود. در این فرایند آب شور بر روی دسته لوله تبخیر کننده قرار می گیرد که در نتیجه بخاری با همان درجه حرارت و فشار تشکیل می شود. بخار تولیدی در یک اجکتور بخار به صورت حرارتی متراکم شده و یا در یک کمپرسور به صورت مکانیکی فشرده می شود. بخار فشرده شده وارد دسته لوله های تبخیر کننده می شود، در آنجا میعان شده و به آب شیرین تبدیل می شود (Chandrashekera and Yadav, 2017). میزان مصرف انرژی در این روش بسیار بالا است ولی به میزان فضای کم تری نسبت به روش های MSF و MED نیاز دارد (Ghalavand et al., 2015).

۲-۲- روش های غشایی

روش غشایی در ابتدا تنها به مصارف شهری و ظرفیت کم به عنوان تصفیه آب استفاده می شد ولی با پیشرفت تکنولوژی از

این روش به طور گسترده در صنعت آب و شیرین سازی استفاده می شود. این روش از یک غشای انتخاب پذیر استفاده می کند که باعث جدایی آب از نمک و تولید آب آشامیدنی می شود. این روش به سه دسته کلی اسمز معکوس (RO)، الکترودیالیز (ED) و تقطیر غشایی (MD) تقسیم می شود (Gorjian and Ghobadian, 2015). اسمز معکوس (RO) یک فرایند فیزیکی است و طی آن می توان از محلول به کمک یک غشا نیمه تراوا، حلال تقریباً خالص تهیه کرد. همچنین می توان از آب شور، آب آشامیدنی مطلوب تهیه نمود. اگر یک غشای نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت های متفاوت قرار گیرد، مقداری از حلال از یک طرف غشاء به طرف دیگر منتقل می شود. جهت حرکت حلال به گونه ای است که محلول غلیظ تر را رقیق می نماید (Nair and Kumar, 2013). این روش در مقابل سایر روش ها تنها نیاز به انرژی الکتریکی دارد که میزان مصرف انرژی آن بسیار کم تر است و باعث می شود قیمت آب آشامیدنی در مقابل سایر روش ها بسیار کم تر شود. یکی از معایب روش RO، رسوب گیری غشاها است که باعث عمر کوتاه آن ها می شود. الکترودیالیز (ED) یک فرایند بر اساس توانایی غشاهای نیمه تراوا در عبور دادن بعضی از یون های منتخب موجود در محلول نمک های یونی و عبور ندادن سایر یون ها، است. وقتی یک جریان مستقیم به محلول اعمال می شود، یون های مثبت نمک های موجود در محلول به سمت الکترود منفی یا کاتد و یون های منفی به سمت الکترود مثبت یا آند حرکت می کنند. یک غشای نیمه تراوا کاتیونی، به یون های مثبت اجازه عبور می دهد. فرایند الکترودیالیز، مواد کلوئیدی و غیر یونی و نیز باکتری ها را از آب حذف نمی کند (Li et al., 2013). این روش نیاز به انرژی الکتریکی بسیار زیادی دارد و همچنین به دلیل باقی ماندن باکتری ها و مواد غیر یونی در آب، نیازمند یک مرحله تصفیه دیگر پیش از مصرف آشامیدنی است. تقطیر غشایی (MD) یک فرایند ترکیبی از روش اسمز معکوس و تقطیر است که از غشای سنتزی آب گریز استفاده می کند و اجازه می دهد بخار آب از روزه های غشا عبور کند ولی خود محلول اجازه عبور نمی یابد. نیروی محرکه در این روش اختلاف فشار بخار مایع در سراسر غشاء است (Ghaffour et al., 2015). رسوب گیری غشاء یک مشکل بسیار مهم برای این روش است که در درازمدت باعث افزایش هزینه می شود، همچنین به دلیل هزینه بالا و ظرفیت تولیدی کم آن، در مقیاس بالا مورد استفاده قرار نمی گیرد (Wang et al., 2016).

۳- بررسی میزان مصرف انرژی در روش‌های مختلف

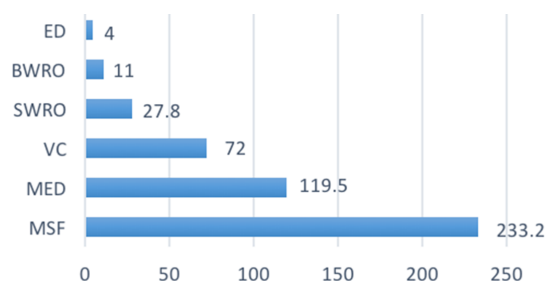
فرایندهای نمک‌زدایی نیازمند انرژی عملیاتی هستند. در فرایندهای حرارتی این انرژی به صورت انرژی حرارتی و در فرایندهای غشایی به طور مثال اسمز معکوس، این انرژی به شکل انرژی الکتریکی مورد نیاز است (Miller, 2003). حداقل انرژی تئوری مورد نیاز برای نمک‌زدایی از آب دریا حدود ۳ کیلوژول به ازای تولید هر کیلوگرم آب شیرین است. اما همانند بقیه فرایندهای شیمیایی و فیزیکی، این فرایند نمی‌تواند در شرایط ایده‌آل کار کند. علاوه بر این در طراحی این فرایند با نزدیک‌تر شدن به بازده ایده‌آل، اندازه تجهیزات بزرگ‌تر شده و هزینه سرمایه‌گذاری ثابت اولیه افزایش می‌یابد و از طرفی هزینه انرژی مصرفی کم‌تر می‌شود. بنابراین باید طراحی در یک نقطه بهینه هزینه مورد نیاز برای تولید آب صورت گیرد. پس انرژی مصرفی واقعی در روش‌های مختلف نمک‌زدایی، از میزان حداقل انرژی تئوری بیش‌تر خواهد بود.

میانگین مصرف انرژی مورد نیاز در فرایندهای متداول نمک‌زدایی در شکل ۱ آمده است. به طور کلی، روش MSF بیش‌ترین مصرف انرژی را دارا است. پس از آن به ترتیب روش‌های MED و VC هستند. واضح است که مقدار انرژی مصرفی اسمز

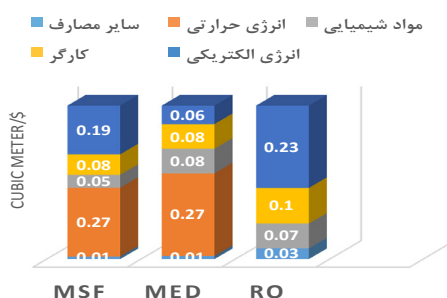
معکوس کم‌تر است اما این روش به انرژی الکتریکی نیاز دارد که از انرژی حرارتی به دست می‌آید، در حالی که روش MSF مستقیماً با انرژی حرارتی کار می‌کند. با توجه به این شکل انرژی مصرفی برای فرایندهای حرارتی تقریباً مستقل از غلظت نمک در آب خوراک است، اما در روش‌های غشایی این مقدار وابسته به غلظت نمک در خوراک ورودی است.

۴- تحلیل اقتصادی روش‌ها

در سال ۱۸۵۰ میلادی تحقیقات اولیه در زمینه نمک‌زدایی شکل گرفت. مهم‌ترین چالش پیش رو در آن زمان، فقط یافتن روشی برای تولید آب شیرین بدون توجه به مباحث انرژی و اقتصادی بود. با بالغ شدن فرایندهای نمک‌زدایی و تجاری شدن آن‌ها، تلاش‌ها برای کاهش هزینه‌های زیاد تولید آب بدین روش‌ها شکل گرفت (Ghaffour et al., 2013). برای این که بتوان نمک‌زدایی را با هزینه کم‌تری انجام داد، در ابتدا باید عوامل تأثیرگذار بر هزینه فرایند نمک‌زدایی شناخته شوند. به طور کلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل هزینه سرمایه‌گذاری ثابت اولیه و عملیاتی می‌شود. شکل ۲ میزان تأثیر عوامل مختلف مؤثر در هزینه عملیاتی نمک‌زدایی برای روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه روش MSF،



شکل ۱- انرژی مصرفی برای نمک‌زدایی (Miller, 2003) (kJ/kg fresh water)



شکل ۲- عوامل تأثیرگذار بر هزینه عملیاتی فرایند نمک‌زدایی (Al Hashemi et al., 2014)

۵- نمک‌زدایی از آب دریا در سطح جهان

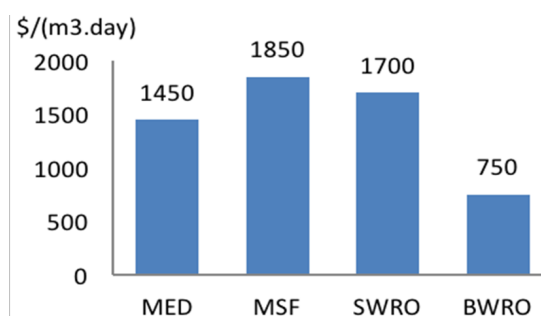
با توجه به بحران آب و منابع محدود آب آشامیدنی، صنعت شیرین‌سازی در جهان به سرعت گسترش یافته تا با استفاده از آب دریاها و اقیانوس‌ها مشکل کم‌آبی برطرف شود. ظرفیت تولیدی آب در سال ۲۰۱۰، حدود ۶۰ میلیون مترمکعب در روز بود که این مقدار تا سال ۲۰۱۵ تقریباً دو برابر شده است (Shatat et al., 2013). در جدول ۱ ظرفیت روش‌های شیرین‌سازی آب دریا در جهان و در جدول ۲ کشورهایی که از صنعت شیرین‌سازی بیش‌ترین استفاده را برای تأمین آب آشامیدنی می‌کنند، بیان شده است.

شیرین‌سازی آب دریا دهه‌ها است که پیشرفت بسیار زیادی در مناطق خشک جهان مانند دریای مدیترانه، خاورمیانه و دریای کارائیب به‌وجود آورده است. قسمت عمده واحدهای تولید کننده آب آشامیدنی در منطقه خاورمیانه واقع شده است، به طوری که نزدیک به ۶۵٪ تولید آب جهان در حاشیه کشورهای خلیج فارس اتفاق می‌افتد. عربستان، امارات، کویت، قطر و ایران از بزرگ‌ترین کشورهای تولید کننده آب آشامیدنی

MED و RO بیش‌ترین هزینه عملیاتی مربوط به تأمین انرژی مورد نیاز فرایند است. دیگر هزینه‌ها شامل تأمین مواد شیمیایی، دستمزد کارگران و غیره می‌شود. از آنجایی که در روش MSF مقدار انرژی مصرفی بیش‌تر از روش‌های دیگر است، منطقی است که بیش‌ترین مجموع هزینه‌های عملیاتی مربوط به این روش باشد. مجموع هزینه‌های عملیاتی در روش‌های MSF، MED و RO به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۴۶ و ۰/۴۶ دلار به‌ازای هر مترمکعب است (Al Hashemi et al., 2014). با فرض ظرفیت تولید یک واحد نمک‌زدایی برابر با ۱ Mm³/day، تفاوت هزینه عملیاتی روش RO و MSF برابر ۱۴۰ K\$/day خواهد شد که باعث صرفه‌جویی ۵۰ میلیون دلاری در سال می‌شود. مقایسه هزینه سرمایه‌گذاری ثابت روش‌های فوق در شکل ۳ نمایش داده شده است که در آن BWRO و SWRO به ترتیب اسمز معکوس برای آب لب‌شور و آب شور دریا می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه سرمایه‌گذاری ثابت اولیه روش MSF بیش‌تر از دو روش دیگر است. همچنین با توجه به غلظت آب لب‌شور در مقایسه با آب دریا تفاوت هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ثابت روش اسمز معکوس توجیه می‌شود.

جدول ۱- ظرفیت روش‌های مختلف نمک‌زدایی در جهان (Attia et al., 2016)

ظرفیت (%)	روش
۵۹/۸۵	اسمز معکوس (RO)
۲۵/۹۹	تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)
۸/۲	تقطیر چند مرحله‌ای (MED)
۳/۵۳	الکترودیالیز (ED)
۰/۷۱	هیبرید
۱/۰۲	سایر



شکل ۳- هزینه سرمایه‌گذاری ثابت (Ghaffour et al., 2015)

جدول ۲- بزرگ‌ترین کشورهای استفاده‌کننده از صنعت شیرین‌سازی آب (Nair and Kumar, 2013)

ردیف	کشور	ظرفیت تولیدی (Mm ³ /day)	سهم جهانی (%)
۱	عربستان	۹/۹	۱۶/۵
۲	آمریکا	۸/۴	۱۴
۳	امارات	۷/۵	۱۲/۵
۴	اسپانیا	۵/۳	۸/۹
۵	کویت	۲/۵	۴/۲
۶	چین	۲/۴	۴
۷	ژاپن	۱/۶	۲/۶
۸	قطر	۱/۴	۲/۴
۹	الجزایر	۱/۴	۲/۳
۱۰	استرالیا	۱/۲	۲

در حاشیه خلیج فارس هستند. در جدول ۳ به اختصار برخی از بزرگ‌ترین واحدهای اجرا شده در منطقه خاورمیانه نمایش داده شده است.

جدول ۳- برخی از بزرگ‌ترین واحدهای نمک‌زدایی اجرا شده در منطقه خاورمیانه (Al Hashemi et al., 2014)

محل	تعداد واحدهای اجرا شده	ظرفیت (m ³ /d)	جمعیت (نفر)
امارات	۴۹۲	۹,۳۵۸,۴۹۲	۹,۲۰۵,۶۵۱
عربستان	۲,۶۶۴	۱۳,۰۸۰,۴۹۷	۲۸,۲۹۰,۰۰۰
قطر	۱۳۹	۱,۸۳۲,۷۶۲	۲,۰۳۵,۱۰۶
عمان	۱۸۴	۱,۰۹۴,۷۴۰	۳,۸۶۹,۸۷۳
کویت	۸۸	۳,۰۲۳,۳۶۹	۳,۲۵۰,۵۰۰
بحرین	۱۶۵	۱,۱۱۳,۰۰۱	۱,۳۱۸,۰۰۰

توریستی، تراکم جمعیت و نیاز روزافزون به آب آشامیدنی، عمده واحدهای شیرین‌سازی در شهرهای ابوظبی، دوی و شارجه احداث شده‌اند، به طوری که نزدیک به ۹۹ درصد آب آشامیدنی شهرهای ابوظبی و دوی از طریق شیرین‌سازی تولید می‌شود (Mohsen et al., 2016). به دلیل انرژی ارزان در دسترس، ظرفیت تولید بالا و غلظت بالای آب خلیج فارس، روش MSF یکی از مورد قبول‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب در امارات متحده عربی است به طوری که سهم آن ۶۳٪ از تولیدات آب شیرین است. مصرف زیاد انرژی در روش MSF استفاده از این فناوری را در واحدهای جدیدالتأسیس این منطقه با تردید مواجه نموده و اقبال بیشتری به فناوری‌های غشایی شده است. با پیشرفت فناوری، امروزه به روش RO توجه بیشتری می‌شود و پیش‌بینی شده است که در سال‌های آینده نقش بسیار بیشتری را در این کشور داشته باشد.

در ایران نیز در سال ۱۹۶۰ اولین واحد شیرین‌سازی بر مبنای روش MSF با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب در روز در جزیره خارک احداث شد. روش MSF در ایران به مانند سایر کشورهای حوزه خلیج فارس یکی از روش‌های مورد علاقه بوده است به طوری که با پیشرفت تکنولوژی و پیدایش روش‌های جدید، روش RO به عنوان جایگزینی بسیار مناسب معرفی شده است. ایران در حال حاضر از ۱۴ واحد شیرین‌سازی در مناطق جنوبی خود بهره می‌برد که برنامه‌ریزی کرده است این مقدار را به ۳۰ واحد در سال‌های آینده افزایش دهد که عمده این واحدها مبتنی بر روش RO می‌باشند. در جدول ۴ به این واحدها اشاره شده است.

چین، اردن و کویت از دیگر کشورهای آسیایی هستند که بخش قابل توجهی از آب شیرین مورد نیاز خود را از طریق نمک‌زدایی از آب دریا تأمین می‌نمایند.

۵-۲- نمک‌زدایی در اروپا

کشورهای قاره اروپا در دو دهه گذشته با کاهش کیفیت و کمیت آب روبه‌رو شده‌اند. این وضعیت در جنوب اروپا و حاشیه دریای مدیترانه به دلیل اقلیم آب و هوایی نیمه‌خشک و همچنین رواج صنعت کشاورزی بر پایه روش‌های سنتی آبی و گردشگری، وخیم‌تر است. برای مثال در جزایر مایورکا واقع در اسپانیا، مصرف آب به دلیل رواج کشاورزی و گردشگری قابل توجه است، اما منابع آبی موجود در این جزیره محدود است (Del Castillo, 2004).

ظرفیت آب شیرین تولیدی از این ناحیه حدود Mm^3/day ۱۲/۱ بوده که معادل ۴۵٪ از آب شیرین تولیدی در کل جهان است. عربستان به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده آب شیرین در جهان به‌شمار می‌رود که ۱۷٪ تولید آب شیرین جهان به آن تعلق دارد. نزدیک به ۵۰٪ آب مورد نیاز این کشور از طریق واحدهای شیرین‌سازی تأمین می‌شود. «الجوبیل» به عنوان بزرگ‌ترین واحد شیرین‌سازی آب در جهان با ظرفیت یک میلیون مترمکعب در روز در عربستان قرار دارد که با روش MSF کار می‌کند. عربستان برنامه‌ریزی کرده است با توجه به رشد جمعیت و نیاز روزافزون به آب شیرین تا ۲۰ سال آینده ۶ میلیون مترمکعب در روز به تولیدات آب شیرین خود اضافه کند. عمده روش‌های مورد استفاده در عربستان MSF و RO هستند که روش MSF با در اختیار داشتن ۶۴/۲٪ در تولیدات آب شیرین، نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. با توجه به آلاینده‌های زیست‌محیطی که واحدهای شیرین‌سازی با مصرف نفت و گاز تولید می‌کنند، کشور عربستان درصدد جایگزینی انرژی مصرفی از طریق انرژی خورشیدی و انرژی هسته‌ای در ۱۰ سال آینده است (Mezhar et al., 2011).

امارات نیز از جمله کشورهای پیشرو در امر استفاده از فرایندهای نمک‌زدایی برای تهیه آب شیرین به‌شمار می‌آید. اولین واحد شیرین‌سازی در سال ۱۹۷۶ در «ابوظبی» با ظرفیت ۲۵۰ مترمکعب در روز تأسیس شد. به دلیل بحث‌های

جدول ۴- واحدهای شیرین‌سازی آب در ایران (Gorjian and Ghobadian, 2015)

سال تأسیس	ظرفیت (مترمکعب در روز)	روش	محل
۲۰۰۰	۳۰,۰۰۰	MSF	چابهار
۲۰۰۰	۲,۴۰۰	MSF	بندرعباس
۲۰۰۴	۱۰,۰۰۰	RO	عسلویه
۲۰۰۶	۱۵,۰۰۰	MSF	کنارک (فاز ۱)
۲۰۱۰	۲۰,۰۰۰	RO	کنارک (فاز ۲)
۲۰۰۶	۲,۵۰۰	RO	بندرعباس
۲۰۰۷	۱,۲۰۰	MED	سیری
۲۰۰۵	۴,۰۰۰	MED	بندرعباس
۲۰۰۸	۵,۰۰۰	RO	خوزستان
۲۰۰۹	۲,۴۰۰	MED	جزیره لاوان
۲۰۰۸	۳۶۰	MED	خارک
۲۰۰۸	۱۲۰,۰۰۰	MED	عسلویه
۲۰۱۱	۲,۰۰۰	MED	جزیره قشم
۲۰۱۰	۲۰,۰۰۰	RO	زاهدان
	۲۳۴,۸۶۰		مجموع

استفاده از روش‌های نمک‌زدایی آب دریا برای تأمین آب در کشور اسپانیا تغییر سیاست‌های اقتصادی دولت اسپانیا در سال ۲۰۰۵ بود. قبل از این سال دولت اسپانیا به دنبال انتقال آب از اروپای مرکزی به جنوب این کشور بود، اما پس از آن سیاست تأمین آب به استفاده از نمک‌زدایی آب دریا تغییر کرد، به‌نحوی که تا سال ۲۰۰۹ شاهد رشد ۷۰ درصدی ظرفیت نمک‌زدایی در این کشور بود. در جدول ۵ برخی از واحدهای نمک‌زدایی اروپا نمایش داده شده است (Fritzman et al., 2007).

جدول ۵- مشخصات واحدهای مهم شیرین‌سازی آب در اروپا (Mickley, 2012)

نام	سال ساخت	ظرفیت (m ³ /day)
لاس پالماس	۲۰۰۴	۷۸,۰۰۰
کاربونراس	۲۰۰۲	۱۲۳,۰۰۰
ماربلا	۱۹۹۶	۵۵,۰۰۰
لنزاروته	۲۰۰۰	۲۰,۰۰۰
کارتاجنا	۲۰۰۶	۱۴۰,۰۰۰

۵-۳- نمک‌زدایی در آمریکا

نزدیک به ۱۴ درصد از واحدهای شیرین‌سازی آب در سطح جهان در آمریکا قرار دارند که این مقدار برابر ۲۰۰۰ واحد شیرین‌سازی می‌باشد. به گزارش موسسه بین‌المللی شیرین‌سازی آب، ۵۰ تا ۷۵ درصد واحدهای شیرین‌سازی در آمریکا با میانگین ظرفیت یک میلیون گالن در روز تأسیس می‌شوند. در قسمت عمده‌ای از این واحدها از فرایند اسمز معکوس یا نانوفیلتراسیون و در موارد معدودی مانند واحدهای صنعتی کوچک یا هتل‌ها از تراکم بخار استفاده می‌شود. تاریخچه شیرین‌سازی آب در آمریکا بسیار قدیمی است، به‌عنوان مثال در دهه ۱۹۶۰ در Key West واحد شیرین‌سازی با تکنولوژی MSF احداث شده است که بعداً در سال ۱۹۸۰ به روش اسمز معکوس تغییر یافته است. همچنین اولین واحد شیرین‌سازی در آمریکا در سال ۱۸۶۱ تأسیس شده و تا سال ۱۹۰۰ در حال بهره‌برداری بوده است که آب قسمت‌های جنوبی ایالت فلوریدا را تأمین می‌کرده است. همچنین جزایر ویرجین ۵۰ سال است که از روش شیرین‌سازی آب استفاده می‌کنند (Tonner, 2002). مشکل عمده شیرین‌سازی آب به‌روش گرمایی در ایالت‌هایی مانند تگزاس یا ایالت‌های جنوبی آمریکا این است که با وجود

کمبود آب بر جنبه‌های مختلف رشد اقتصادی اثرگذار خواهد بود، اما این معضل تأثیر به‌سزایی بر روی صنعت گردشگری خواهد داشت. برای نمونه در لنزاروته بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۲ تعداد گردشگران از ۱۰,۰۰۰ نفر به ۱/۹ میلیون نفر رسیده است. این رشد در تعداد گردشگر قطعاً بدون افزایش تأمین آب شیرین از ۴۵۰,۰۰۰ مترمکعب در سال به ۱۷,۲۱۰,۰۰۰ مترمکعب در سال، در طول همین سال‌ها امکان‌پذیر نبود (Del Castillo, 2004). تضمین ادامه این صنعت در آینده نیز وابسته به تأمین بیشتر منابع آبی است. بنابراین بیش‌ترین واحدهای نمک‌زدایی در سواحل مدیترانه احداث شده و از فناوری اسمز معکوس برای نمک‌زدایی آب دریا استفاده می‌کنند. دلیل این امر قیمت بالای انرژی فسیلی در اروپا است که باعث مقرون به‌صرفه شدن روش‌های غشایی نسبت به روش‌های حرارتی می‌شود.

در قاره اروپا بیش‌ترین و بزرگ‌ترین واحدهای نمک‌زدایی در اسپانیا واقع شده است. ۸۰ درصد از واحدهای نمک‌زدایی در اسپانیا در ۴ ناحیه جزایر قناری (۲۳٪)، آندولس (۲۳٪)، موریسیا (۱۳٪) و والنسیا (۱۳٪) قرار دارد. یکی از دلایل افزایش

داشتن منابع فراوان سوخت‌های فسیلی، فرایند همچنان گران است و برای آن که اقتصادی شود فرایند شیرین‌سازی آب با فرایندهای شیمیایی یا نفتی که گرمای زیادی تولید می‌کنند و یا واحدهای تولید قدرت یا انرژی کوپل می‌شوند و انرژی لازم برای شیرین‌سازی آب از این طریق تأمین می‌شود. فرایند اسمز معکوس می‌تواند در کنار فرایندهای تولید هم‌زمان قدرت و انرژی به کار رود تا فرایندها هرچه بیش‌تر اقتصادی شوند. سیستم غشایی دوتایی با ترکیب کردن سیستم فشار پایین - شار بالا می‌تواند سیستمی ایجاد کند که آب را بسیار خالص و کاملاً قابل شرب کند. این روش هم‌اکنون در آمریکا بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین نوعی از فرایند هیبرید وجود دارد که در آن از نانوفیلترها برای تصفیه اولیه آب در فرایندهای گرمایی شیرین‌سازی استفاده می‌شود که این امر باعث کاهش چشمگیری در دمای مورد نیاز در فرایندهای گرمایی شیرین‌سازی می‌شود که خود باعث کاهش مصرف انرژی خواهد شد (Tonner, 2002).

بیشتر واحدهای شیرین‌سازی در آمریکا برای شیرین‌سازی آب‌های بسیار شور زیرزمینی، آب‌ها و فاضلاب‌های شهری برای استفاده در مصارف صنعتی است. تقریباً تمام واحدهای شیرین‌سازی در آمریکا براساس فرایندهای غشایی کار می‌کنند و سرآمد آن‌ها فرایند اسمز معکوس (RO) است که تعدادی از آن‌ها در جدول ۶ آورده شده‌اند (Barker, 2003). تعداد بسیار زیادی از واحدهای شیرین‌سازی در کشور آمریکا در مناطق ساحلی هم در شرق و هم در غرب آمریکا متمرکز هستند. دلیل این موضوع می‌تواند برای هر ایالتی به‌صورت جداگانه توجیه شود. برای ایالتی مانند ایالت کالیفرنیا به‌علت خشکسالی پیش‌رونده‌ای که در سال‌های اخیر در این ایالت رخ داده است و همچنین به‌علت کشاورزی گسترده‌ای که در این ایالت وجود دارد، نیاز به آب شیرین بسیار حیاتی و ملموس است. برای ایالتی مثل فلوریدا در ابتدا به‌نظر می‌رسد به‌علت دارا بودن آب‌وهوای استوایی نیازی به واحدهای شیرین‌سازی ندارد، اما باید در نظر گرفت که جمعیت بسیار زیادی در این ایالت و ایالت‌های همسایه آن ساکن هستند و همچنین این ایالت از افزایش روزافزون جمعیت که یک روند افزایشی در جهان است، مستثنی نیست. همچنین به‌دلیل این‌که ایالت‌های شمال ایالت فلوریدا دسترسی به اقیانوس ندارند، آب در ایالت فلوریدا شیرین‌سازی شده و به ایالت‌های شمالی منتقل می‌شود.

همچنین جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یک منبع طبیعی آب شیرین، نیاز به سرمایه‌گذاری و ساخت زیرساخت‌های فراوان برای جمع‌آوری آب‌های سطحی دارد که به‌سهولت امکان‌پذیر نیست (Rijsberman, 2006).

شیرین‌سازی آب نه‌تنها در کشور آمریکا ادامه پیدا می‌کند بلکه به‌عنوان یک صنعت مهم هم تلقی خواهد شد و مردم هم به‌زودی از این تکنولوژی از طریق رسانه‌های جمعی آگاهی بیشتری کسب می‌کنند. یکی از بزرگ‌ترین واحدهای شیرین‌سازی آب در ترینیداد در قاره آمریکا تأسیس شده است. در حالی که برخی فکر می‌کنند استفاده از آب شیرین موجود به‌صورت طبیعی بهتر است، اما باید به این نکته توجه داشت که هزینه بالای تأسیسات انتقال آب و خشکسالی روزافزون، اهمیت وجود واحدهای شیرین‌سازی آب را آشکار می‌کند. در کشور آمریکا ایالت‌های پرآب مرکزی آب را برای ایالت‌های خشک تا نیمه‌خشک در جنوب غربی تأمین می‌کنند که به‌علت هزینه بالای تأسیسات انتقال آب، این راه اقتصادی به‌نظر نمی‌رسد و این موضوع خود نیز لزوم استفاده از تکنولوژی‌هایی برای شیرین‌سازی آب را آشکار می‌کند. همچنین مشکلات سیاسی می‌تواند لزوم استفاده از فناوری‌هایی برای شیرین‌سازی آب و تأمین آب هر کشوری از طریق منابع همان کشور را نشان دهد. به‌طور مثال کشور آمریکا واحد شیرین‌سازی آبی را در خلیج گوانتانامو تأسیس نمود، اما کشور کوبا از جاری شدن آب برای این فرایند ممانعت کرد. یا در مثالی دیگر تأسیس واحدی در خلیج تمپا با تولید ۲۵ میلیون گالن در روز با انتقادهای فراوانی روبه‌رو شد مبنی بر این‌که این واحد نباید در یک خلیج بلکه باید در آب‌های آزاد تأسیس شود. در سال‌های پیش شیرین‌سازی آب به‌عنوان یک صنعت پرهزینه و غیراقتصادی در نظر گرفته می‌شد که با گرفتن وام‌هایی با اقساط ۵ ساله مثل تمام صنایع

جدول ۶- تعدادی از واحدهای شیرین‌سازی آمریکا (Tonner, 2002)

واحد	ظرفیت (مترمکعب در روز)	سال تأسیس
تگزاس	۳۴۰,۶۵۰	۲۰۰۶
کالیفرنیا	۲۶۵,۰۰۰	۲۰۰۷
کالیفرنیا	۲۶۴,۹۵۰	۲۰۰۶
تگزاس	۹۴,۶۲۵	۲۰۰۷
فلوریدا	۹۴,۶۲۵	۲۰۰۷
مجموع	۱,۰۵۹,۸۵۰	

همچنین تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی را کاهش داد و این تکنولوژی را دوست‌دار محیط زیست قرار داد.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Multi Stage Flash (MSF)
- 2- Multi Effect Distillation (MED)
- 3- Vapor Compression (VC)
- 4- Reverse Osmosis (RO)
- 5- Electrodialysis (ED)
- 6- Membrane Distillation (MD)
- 7- Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO)
- 8- Seawater Water Reverse Osmosis (SWRO)

۸- مراجع

- Al Hashemi, R., Zarreen, S., Al Raisi, A., Al Marzooqi, F.A., and Hasan, S.W., (2014), "A review of desalination trends in Gulf Cooperation Council Countries", *International Interdisciplinary Journal of Scientific Research*, 1(2), 72-96.
- Al-Mutaz, I.S., (1991), "Environmental impact of seawater desalination plants", *Environmental Monitoring and Assessment*, 16(1), 75-84.
- Attia, N.F., Jawad, M.A., and Al-Saffar, A., (2016), "The integration of desalination plants and mineral production", *Desalination and Water Treatment*, 57(45), 21201-21210.
- Barker, M., (2003), *Desalination in the United States*, Frost & Sullivan, Industry Analyst, Environment Group.
- Chandrashekara, M., and Yadav, A., (2017), "Water desalination system using solar heat: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1308-1330.
- Dawoud, M.A., (2011), "Water import and transfer versus desalination in arid regions: GCC countries case study", *Desalination and Water treatment*, 28(1-3), 153-163.
- Del Castillo, J., (2004), "Desalination costs at the Spanish Mediterranean Coast, The Bahia de Palma, Mallorca Case", *International Conference on Desalination Costing*, Limassol.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin, T., (2007), "State-of-the-art of reverse osmosis desalination", *Desalination*, 216(1-3), 1-76.
- Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., and Goosen, M.F., (2015), "Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems", *Desalination*, 356, 94-114.
- Ghaffour, N., Missimer, T.M., and Amy, G.L., (2013),

دیگر قابل تأسیس بود. اما در حال حاضر و با پیشرفت فناوری، این صنعت به‌عنوان یک صنعت با توجیه اقتصادی بالا در نظر گرفته می‌شود و سرمایه‌گذاران بر روی سهام آن در بازارهای جهانی سرمایه‌گذاری می‌کنند. همچنان که جمعیت در آمریکا در حال رشد و در حال مهاجرت به مناطق ساحلی است، صنعت شیرین‌سازی آب هم در حال پیشرفت خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در بین راه‌حل‌های موجود برای غلبه بر بحران آب شیرین در جهان، نمک‌زدایی روشی پایدار و توسعه‌یافته به حساب می‌آید که استفاده از آن در بسیاری از نقاط جهان رشد چشمگیری داشته است. این روند افزایشی ناشی از وجود منبع خوراک عظیم، کیفیت مناسب آب خروجی، قابلیت تنظیم کیفیت آب تصفیه شده و امکان ترکیب با دیگر واحدهای صنعتی مثل نیروگاه برق برای استفاده بهینه از انرژی هدررفته است. البته این رشد چشم‌گیر با چالش‌های مصرف انرژی و هزینه بالا مواجه است که نیازمند چاره‌اندیشی برای ادامه این روند روبه‌رشد است. مقایسه روش‌های به‌کار گرفته شده برای شیرین‌سازی آب، در کشورهای مختلف آسیایی و آمریکا حاکی از آن است که به دلیل برخورداری بودن کشورهای حوزه خلیج‌فارس از منابع غنی نفت و گاز، دغدغه تصفیه با خلوص بالا و تهیه آب با کیفیت، از اهمیت بسیار بالاتری نسبت به انرژی برخوردار است. چرا که در بسیاری از موارد، روش MSF به دلیل قابل‌اعتماد بودن، نیاز کم‌تر به مراحل پیش‌تصفیه و تولید آب با خلوص بالا، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی واحدهای شیرین‌سازی در حاشیه خلیج‌فارس، به دلیل دارا بودن مقادیر زیادی نمک، نیازمند تکنولوژی قوی برای تصفیه همانند MSF می‌باشند، هرچند که مصرف زیاد انرژی در روش MSF استفاده از این فناوری را در واحدهای جدیدالتأسیس با تردید مواجه نموده است. این مسئله در دریای چین واقع در اقیانوس آرام و همچنین همسایگی آمریکا با اقیانوس‌های آرام و اطلس کاملاً برعکس است. در این مناطق به دلیل غلظت کم‌تر نمک نسبت به خلیج فارس، عدم نیاز به تصفیه کامل و همچنین کاهش هزینه‌های آب تولیدی از روش RO استفاده می‌شود. با این حال تحقیقات و پیشرفت‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در شیرین‌سازی را به‌عنوان روشی مؤثر و کارآمد معرفی کرده است، به‌طوری که می‌توان هم‌زمان بحران آب و

- worldwide”, *Sustainable Cities and Society*, 9, 67-80.
- Tonner, J.B., (2002), “Desalination in America”, *Water Quality Products*, 7(11), 12-13.
- Wang, O., (2016), “Desalination by evaporation: A review”, *Desalination*, 387, 46-60.
- “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability”, *Desalination*, 309, 197-207.
- Ghalavand, Y., Hatamipour, M.S., and Rahimi, A., (2015), “A review on energy consumption of desalination processes”, *Desalination and Water Treatment*, 54(6), 1526-1541.
- Gorjian, S., and Ghobadian, B., (2015), “Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 571-584.
- Khawaji, A.D., Kutubkhanah, I.K., and Wie, J.M., (2008), “Advances in seawater desalination technologies”, *Desalination*, 221(1-3), 47-69.
- Kucera, J., (2014), “Introduction to desalination”, *Desalination: Water from Water*, 1-37.
- Li, C., Goswami, Y., and Stefanakos, E., (2013), “Solar assisted sea water desalination: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 136-163.
- Likhachev, D.S., and Li, F.C., (2013), “Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives”, *Desalination and Water Treatment*, 51(13-15), 2836-2849.
- Lutz, W., Sanderson, W.C., and Scherbov, S., (1997), “Doubling of world population unlikely”, *Nature*, 387(6635), 803-805.
- Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., and Khaled, A., (2011), “Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies”, *Desalination*, 266(1), 263-273.
- Mickley, M., (2012), “US municipal desalination plants: number, types, locations, sizes, and concentrate management practices”, *IDA Journal of Desalination and Water Reuse*, 4(1), 44-51.
- Miller, J.E., (2003), *Review of water resources and desalination technology*, Sandia national labs unlimited release report SAND.
- Mohsen, M.S., Akash, B., Abdo, A.A., and Akash, O., (2016), “Energy options for water desalination in UAE”, *Procedia Computer Science*, 83, 894-901.
- Nair, M., and Kumar, D., (2013), “Water desalination and challenges: The Middle East perspective: a review”, *Desalination and Water Treatment*, 51(10-12), 2030-2040.
- Rijsberman, F.R., (2006), “Water scarcity: fact or fiction?”, *Agricultural Water Management*, 80(1), 5-22.
- Sharon, H., and Reddy, K.S., (2015), “A review of solar energy driven desalination technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080-1118.
- Shatat, M., Worall, M., and Riffat, S., (2013), “Opportunities for solar water desalination