مروری بر سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی متصل به نیروگاه‌های متمرکز کننده خورشیدی

علی بابایی بزاز [۱]، شیوا گرجیان [۲*]، مجید عمیدپور [۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس (Ali.babaeebazaz@modares.ac.ir)
۲. استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس (Gorjian@modares.ac.ir)
۳. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (Amidpour@kntu.ac.ir)

چکیده

آب نقش مهمی در زندگی روزمره ما دارد. امروزه به دلیل تغییرات اقلیمی، برخی از مناطق جهان دچار کمبود آب شده‌اند. استفاده از انرژی خورشیدی به‌منظور نمک‌زدایی آب، یک راه‌حل پایدار برای مشکل کمبود آب جهان است. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری در زمینه استفاده از انرژی خورشیدی در صنعت نمک‌زدایی صورت گرفته است. استفاده از انرژی خورشید می‌تواند به صورت مستقیم (حوضچه خورشیدی) و یا غیر مستقیم (تقطیر اثر چندگانه، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، اسمز معکوس و..) باشد. در حال حاضر سامانه‌های تقطیر اثر چندگانه و تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای به ترتیب ۱۳ درصد و ۹ درصد سهم بازار جهانی را دارند. بنابراین این مقاله به مقایسه و بررسی پژوهش‌های صورت گرفته بر سامانه‌های نمک‌زدایی تقطیر اثر چندگانه و تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، سامانه‌هایی که مناسب مناطق دور افتاده بوده و قابلیت اتصال به سامانه‌های حرارتی خورشیدی را دارند، می‌پردازد.

کلمات کلیدی: *تغییرات اقلیمی، انرژی حرارتی خورشیدی، نمک‌زدایی حرارتی، تقطیر اثر چندگانه، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای.*

*نویسنده مسئول: Amidpour@kntu.ac.ir

مروری بر سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی متصل به نیروگاه‌های متمرکز کننده خورشیدی

مقدمه

امروزه آب و انرژی دو عامل مهم برای پیشرفت جوامع در حال توسعه می‌باشند. با رشد روز افزون جوامع در حال توسعه، نیاز به این دو عامل در حال افزایش است. در حال حاضر بسیاری از کشورهای سرتاسر دنیا از مشکل کمبود آب رنج می‌برند. آب برای حیات انسان‌ها، حیوانات و گیاهان ضروری بوده و کمبود آب آشامیدنی باعث به‌وجود آمدن مشکلات بسیار زیادی، به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک شده است. همچنین منابع طبیعی آب آشامیدنی به دلیل مقدار کمی که دارند، قادر به پاسخگویی به تقاضای آب نیستند [۱]. با توجه به برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد(UNEP)[1]، یک سوم جمعیت جهان در کشورهایی زندگی می‌کنند که دچار بحران آب هستند در حالی‌که تا سال ۲۰۵۰، دو سوم جمعیت جهان دچار کمبود آب خواهند شد[2]. بیشتر سطح زمین را آب فراگرفته که تنها مقدار کمی از آن توسط انسان قابل استفاده است. نمک‌زدایی[2] آب شور می‌تواند راه‌حلی برای حل مشکل بحران آب باشد. در حال حاضر واحدهای نمک‌زدایی آب شور در بسیاری از مناطق سرتاسر جهان مستقر هستند که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند. سالانه در حدود ۱۰۰۰۰ تن نفت نیاز است تا مقدار ۱۰۰۰ m^3/d آب تولید شود [3]. خطرات زیست محیطی و افزایش روز افزون قیمت سوخت‌های فسیلی از جمله مشکلات استفاده از این نوع سوخت‌ها می‌باشند [4]. با توجه به موارد گفته شده، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر منطقی به نظر می‌رسد. از میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی خورشیدی کاربرد بیشتری دارد. انرژی خورشیدی تا به امروز فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر هست و بالاترین عملکرد فنی ممکن (در حدود ۶۰TW[3]) را در بین منابع انرژی تجدیدپذیر دارد [5]. سامانه‌های نمک‌زدایی برپایه انرژی خورشیدی برای مناطق خشک و نیمه خشک و مناطق دور افتاده‌ای که به دیگر منابع انرژی دسترسی ندارند مناسب هستند [6]. خوشبختانه بسیاری از کشورهایی که دچار مشکل کم آبی و یا بحران آب هستند، از منبع انرژی خورشیدی فراوانی بهره می‌برند که با استفاده از آن می‌توانند به حل مشکل آب و انرژی بپردازند.

انرژی‌های تجدیدپذیر

انرژی‌های تجدیدپذیر منابع انرژی هستند که پس از مصرف به صورت مداوم جایگزین می‌شوند. این منابع یا به صورت مستقیم از خورشید نشأت گرفته می‌شوند (انرژی حرارتی خورشیدی، فتوشیمیایی و فتوالکتریک) و یا به صورت غیر مستقیم (باد، نیروی جریان آب[4] و انرژی فتوسنتزی ذخیره شده در زیست‌توده[5]) هستند و یا اینکه از دیگر پدیده‌های طبیعی نشأت گرفته می‌شوند (انرژی زمین گرمایی و موج دریا). انرژی‌های تجدیدپذیر شامل موارد زیر نمی‌باشد: منابع انرژی بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی، محصولات دورریزی که منبع فسیلی دارند و دور ریز مواد غیرآلی[7].

انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی به معنی استفاده از خورشید به‌منظور گرم کردن آب توسط سامانه‌های حرارتی خورشیدی (مثلاً آب‌گرم‌کن خورشیدی) یا تولید الکتریسیته توسط پنل‌های فوتوولتاییک و یا متمرکز کننده‌های خورشیدی است. انرژی خورشیدی یکی از در دسترس ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است که استفاده از آن روز به روز در حال افزایش است (شکل ۱). پیشرفت مداوم سامانه‌های خورشیدی در

[1] United Nations Environment Programme
[2] Desalination
[3] Terawatt (10^{12} Watts)
[4] Hydropower energy
[5] Biomass

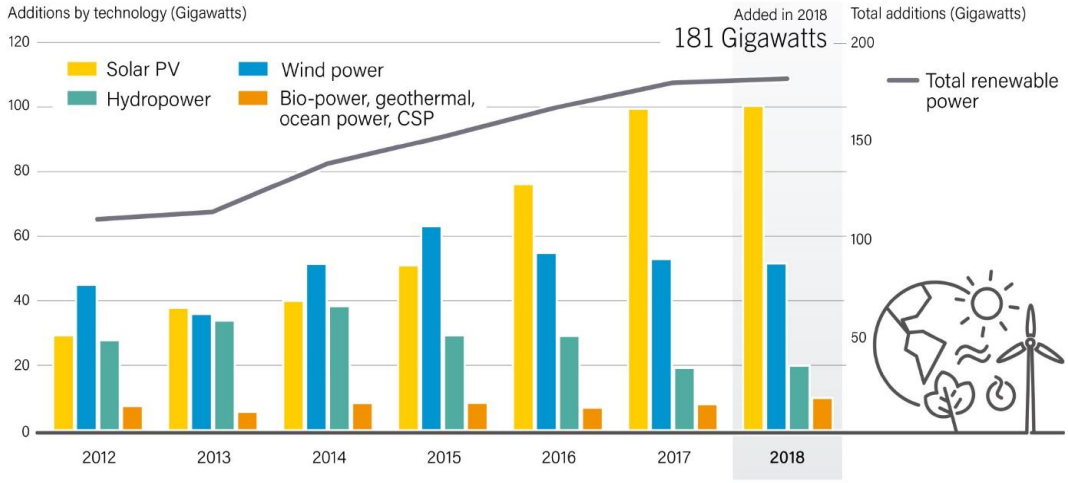
دهه‌های گذشته باعث کاهش قیمت این سامانه‌ها و افزایش کارایی آن‌ها شده است. با توجه به گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی، تا سال ۲۰۵۰ میلادی انرژی خورشیدی می‌تواند بزرگ‌ترین منبع تولید الکتریسیته باشد [8]. عمده استفاده از انرژی خورشیدی به صورت زیر هست:

فتوولتاییک

سامانه‌های فتوولتاییک انرژی خورشید را به صورت مستقیم به جریان الکتریکی تبدیل می‌کنند. ساده‌ترین جز یک سامانه PV یک سلول PV است که از مواد نیمه‌هادی ساخته‌شده است. با به هم پیوستن این سلول‌ها، ماژول‌های PV ساخته می‌شوند که معمولاً بین ۵۰ تا ۲۰۰ وات انرژی تولید می‌کنند. از ترکیب ماژول‌های PV با دیگر لوازم برقی (اینورتر، باتری و...) یک سامانه کامل PV ساخته می‌شود. این سامانه‌ها ماژولار هستند به‌طوری‌که می‌توان آن‌ها را با ترکیب‌های متفاوتی با توجه به کاربرد مورد نظر کنار هم قرار داد و به تولید توان از چند وات تا ده‌ها مگاوات، پرداخت.

انرژی حرارتی خورشیدی

متمرکز کننده‌های خورشیدی با متمرکز کردن پرتوهای خورشید در یک نقطه و گرم کردن یک مایع، گاز و یا یک جسم جامد، به تولید توان می‌پردازند. متمرکز کردن پرتوهای خورشید یا به صورت خطی است و یا اینکه به صورت نقطه‌ای است. کاربردهای متمرکز کننده‌های خورشیدی از مقادیر بسیار کم در حد چند ده کیلووات تا مقادیر بسیار بالای چند ده مگاوات گسترده است. انرژی حرارتی تامین شده از این نوع متمرکز کننده‌ها می‌تواند مستقیماً مورداستفاده واحدهای نمک‌زدایی قرار بگیرد و یا اینکه می‌تواند در یک چرخه ثانویه، به‌عنوان محرک یک توربین برای تولید الکتریسیته استفاده شود. به‌منظور کارکرد پیوسته، متمرکز کننده‌های خورشیدی می‌توانند به همراه ذخیره کننده‌های انرژی حرارتی[1] و سامانه‌های پشتیبانی[2]، مورداستفاده قرار گیرند.



شکل ۱ میزان افزایش ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر برحسب تکنولوژی به صورت سالیانه

این روش بیشتر مناسب مکان‌هایی است که از میزان تابش مستقیم[3] بالایی برخوردار هستند. طبق نقشه راه این فناوری، سامانه‌های متمرکز کننده خورشیدی تا سال ۲۰۳۰ میلادی به‌عنوان منابع اصلی توان شناخته خواهند شد [9]. در حال حاضر ۴ نوع عمده از متمرکز

1 Thermal Energy Storage
2 Backup systems
3 Direct Normal Irradiation (DNI)

کننده‌ها وجود دارد که عبارت‌اند از: متمرکز کننده‌های سهموی خطی[1]، متمرکز کننده‌های سهموی بشقابی[2]، برج‌های خورشیدی[3] و لنزهای خطی فرسنل[4]. کاربرد این سامانه‌ها از مقادیر متوسط تا مقیاس‌های بزرگ گسترده است و بیشترین استفاده از آن‌ها در حال حاضر در کشورهای آمریکا و اسپانیا هست.

جدول ۱ مقایسه انواع متمرکز کننده‌های خورشیدی [10] ,[9]

جاذب	نسبت تمرکز	دمای کارکرد (°C)	عملکرد ترمودینامیکی	مقدار آب برای خنک کردن (L/MWh)	میزان هزینه نسبی	نوع کلکتور
تخت	۱	۸۰-۳۰				صفحه تخت
تخت	۱	۲۰۰-۵۰				لوله خلاء
لوله‌ای	۵-۱	۲۴۰-۶۰				سهموی مرکب
لوله‌ای	۱۵-۵	۳۰۰-۶۰				سهموی مرکب
لوله‌ای	۴۰-۱۰	۲۵۰-۶۰	کم	۳۰۰۰	بسیار کم	فرسنل خطی
لوله‌ای	۴۵-۱۵	۳۰۰-۶۰	کم	۳۰۰۰	کم	سهموی خطی
لوله‌ای	۵۰-۱۰	۳۰۰-۶۰				استوانه‌ای خطی
نقطه‌ای	۱۰۰۰-۱۰۰	۵۰۰-۱۰۰	زیاد	-	بسیار زیاد	سهموی بشقابی
نقطه‌ای	۱۵۰۰-۱۰۰	۲۰۰۰-۱۵۰	زیاد	۱۵۰۰	زیاد	برج خورشیدی

مقایسه سامانه‌های متمرکز کننده

از میان تمامی سامانه‌های متمرکز کننده، سامانه‌های سهموی خطی بیشترین کاربرد را دارند. در حال حاضر پرهزینه‌ترین نوع متمرکز کننده‌ها از نوع سهموی بشقابی و برج‌های خورشیدی هستند که طبق پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط آزمایشگاه‌های ملی ساندیا (SNL)[5]، با توجه به پیشرفت‌های آینده، این دو نوع تکنولوژی تا پایان سال ۲۰۲۰ میلادی جز ارزان‌ترین متمرکز کننده‌ها خواهند بود [9]. یکی از راه‌کارهای کاهش قیمت در سامانه‌های سهموی بشقابی تولید انبوه آن‌هاست و با توجه به این‌که این نوع از متمرکز کننده، در مقایسه با دیگر متمرکز کننده‌ها کمترین میزان فضا بر روی سطح زمین را اشغال می‌کنند، ممکن است در آینده بیشتر مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، سامانه‌های سهموی بشقابی نیازی به آب برای خنک کردن ندارند و می‌توانند با هوای اطراف خود خنک شوند. بنابراین استفاده از این نوع متمرکز کننده‌ها به‌منظور نمک‌زدایی آب‌های شور در نقاطی که دچار کمبود شدید آب هستند بهترین گزینه ممکن برای صرفه‌جویی در مصرف آب است. در متمرکزکننده‌های دیگر نیز می‌توان با استفاده از سامانه‌ی خنک‌سازی ترکیبی هوا و آب، در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. بدین صورت که در فصل زمستان فقط از هوا و در فصل تابستان از ترکیب هوا و آب برای خنک کردن سامانه استفاده شود. هرچند که خنک کردن سامانه‌ها با استفاده از هوا باعث کاهش بازده و افزایش هزینه‌ها می‌شود. سامانه‌های سهموی خطی نصب شده در نواحی بیابانی، در تولید الکتریسیته به صورت سالانه، به میزان ۷ درصد کاهش، و در زمینه قیمت الکتریسیته تولید شده به میزات ۱۰ درصد افزایش قیمت را دارند [9].

1 Parabolic trough collector
2 Parabolic dish systems
3 Solar power tower
4 Linear Fresnel reflector
5 Sandia National Laboratories

جدول ۲ مزایا و معایب متمرکز کننده‌های خورشیدی [11].

مزایا	معایب	فناوری ساخت
هزینه نصب کم	اشغال فضای زیاد بازده ترمودینامیکی کم	PTC
هزینه نصب کم	بازده ترمودینامیکی کم	LFR
بازده ترمودینامیکی زیاد	اشغال فضای زیاد هزینه نصب زیاد تلفات حرارتی زیاد	SPT
اشغال فضای کم بازده ترمودینامیکی زیاد	هزینه نصب زیاد	PDC

سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی

نمک‌زدایی آب‌های شور یکی از روش‌های تولید آب آشامیدنی در مناطقی که دچار بحران آب هستند، به شمار می‌رود. برای سالیان متمادی، سامانه‌های نمک‌زدایی که از نفت، گاز و دیگر سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کردند به‌عنوان راه‌حلی برای مشکل بحران آب تلقی می‌شدند. اما این سامانه‌ها انرژی زیادی مصرف می‌کنند که این مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی، دلیل بروز مشکلاتی مانند افزایش میزان کربن موجود در جو زمین، تخریب لایه ازون، افزایش گرمایش جهانی و آسیب رسیدن به انسان‌ها شده است. در حال حاضر استفاده از انرژی خورشیدی یکی از مؤثر ترین روش‌هایی است که می‌تواند تا حد زیادی به حل مشکلات گفته شده منجر شود. استفاده از انرژی خورشید در زمینه نمک‌زدایی آب‌های شور به دو بخش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شود. در استفاده مستقیم، انرژی خورشید مستقیماً به‌منظور نمک‌زدایی مورداستفاده قرار می‌گیرد. مانند حوضچه‌های تبخیر. اما در روش‌های غیر مستقیم، انرژی خورشید توسط متمرکز کننده‌های خورشیدی و یا پنل‌های فتوولتاییک به انرژی حرارتی و الکتریکی تبدیل شده تا مورداستفاده سامانه‌های نمک‌زدایی که از این انرژی‌ها استفاده می‌کنند، قرار گیرد.

تقطیر خورشیدی[1]

این سامانه‌ها از یک مخزن که قسمت داخلی آن برای جذب بیشتر انرژی خورشید سیاه رنگ است تشکیل شده‌اند که یک پوشش شیشه‌ای شیب دار بر روی آن قرار گرفته است. با جذب انرژی خورشید آب درون مخزن بخار شده و به دلیل اختلاف دما و فشار جزئی با محیط بیرون، بخار آب با برخورد به سطح داخلی شیشه به مایع تبدیل شده و سپس جمع آوری می‌شود. به دلیل میزان تولید بسیار پایین آب و همچنین فضای زیادی که این مخزن‌ها نیاز دارند، استفاده از آنها به صورت گسترده کاربرد چندانی ندارد [12].

رطوبت‌زا-رطوبت‌زدایی[2] (HDH)

این روش از اصلی استفاده می‌کند که طبق آن با افزایش دمای هوا، ظرفیت انتقال رطوبت افزایش می‌یابد. در این نوع از سامانه‌های نمک‌زدایی، هوای گرم شده توسط کلکتور خورشیدی ضمن حرکت از قسمت اواپراتور، درحالی‌که آب شور در آن قسمت اسپری

[1] Solar still
[2] Humidification dehumidification

می‌شود، مقداری از بخار آب را همراه خود حمل می‌کند که این بخار آب در قسمت کندانسور، ضمن پیش گرمایش آب ورودی، دوباره به مایع تبدیل شده و تحت عنوان آب نمک‌زدایی شده جمع‌آوری می‌شود. در این روش، قسمت‌های رطوبت‌زا و رطوبت‌زدا از یکدیگر جدا بوده که در این صورت امکان طراحی و بهینه سازی هر بخش به صورت جداگانه وجود دارد که باعث افزایش بازده گرمایی نسبت به روش تقطیر خورشیدی می‌شود [13].

اسمز معکوس[1] (RO)

در این روش آب با فشار زیاد به سمت یک غشا نفوذپذیر هدایت می‌شود. اگر فشار واردشده به آب بیشتر از فشار اسمزی باشد، آب تصفیه‌شده و بدون نمک از سمت دیگر غشا خارج شده و در سمت دیگر آن شورآبه باقی می‌ماند. این روش به دلیل مصرف پایین انرژی که دارد (۵–۲ kWh/m^3) یکی از به‌صرفه‌ترین روش‌های نمک‌زدایی به شمار می‌رود و به همین دلیل در حدود ۶۵ درصد سهم جهانی از سامانه‌های نمک‌زدایی را به خود اختصاص داده است [14]. این سامانه‌ها از الکتریسیته به‌عنوان منبع انرژی خود استفاده می‌کنند. بنابراین می‌توان این سامانه‌ها را در کنار پنل‌های فتوولتاییک (استفاده مستقیم از برق) و یا سامانه‌های حرارتی خورشیدی (ذخیره انرژی حرارتی خورشید و سپس تولید الکتریسیته از آن) به کار برد.

الکترودیالیز[2] (ED)

الکترودیالیز روشی است که در آن نمک‌زدایی آب شور از طریق تعداد زیادی کاتد و آند که توسط غشاهایی که اجازه عبور را فقط به کاتیون‌ها و یا فقط به آنیون‌ها می‌دهند، صورت می‌گیرد. با اعمال جریان برق مستقیم به کاتدها و آندها، یون‌های با بار منفی از غشای عبور دهنده آنیون و یون‌های با بار مثبت از غشای عبور دهنده کاتیون گذشته و باعث نمک‌زدایی آب می‌شوند. این روش بیشتر مناسب آب‌های با میزان شوری پایین بوده و نمک‌زدایی آب دریا با آن صرفه اقتصادی ندارد. زیرا استفاده از غشاهای تبادل یونی و الکترودها زیاد بوده و همچنین در صورت کارکرد طولانی‌مدت در میدان الکتریکی قوی، طول عمر بسیار کمی خواهند داشت [15]. به دلیل اینکه این سامانه‌ها می‌توانند در محدوده‌های مختلف ولتاژ (جریان مستقیم) کار کنند، می‌توانند مستقیماً از پنل‌های فتوولتاییک به‌منظور تامین توان خود استفاده کنند [12].

تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای[3] (MSF)

در این روش آب شور درون گرم‌کننده شورآبه تا دمایی فراتر از دمای اشباع خود گرم شده و سپس وارد چندین مرحله پشت سر هم می‌شود. به‌منظور کمک به تبخیر آب، در هر مرحله فشار هوا توسط پمپ خلاء مقداری کمتر می‌شود. با وارد شدن آب به هر مرحله، مقداری از آن به صورت ناگهانی تبخیر شده و شورآبه باقی‌مانده وارد مرحله بعد شده تا دوباره تبخیر شود. بخار آب ایجادشده با برخورد به لوله‌های چگالنده ضمن پیش‌گرمایش آب ورودی، تبدیل به مایع‌شده و سپس به‌عنوان آب نمک‌زدایی شده جمع‌آوری می‌شود. در مدل خورشیدی این سامانه، منبع انرژی، می‌تواند کلکتور خورشیدی و یا بخار خروجی از سیکل یک نیروگاه تولید الکتریسیته خورشیدی باشد که آب ورودی را به دمای مطلوب می‌رساند.

1 Reverse osmosis
2 Electrodialysis
3 Multi-stage flash distillation (MSF)

تقطیر اثر چندگانه[1] (MED)

این روش همانند روش تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای به صورت مرحله‌ای است و فشار هوای درون مراحل نیز از مرحله اول تا آخر به ترتیب کمتر می‌شود تا آب در مرحله آخر در دمای کمتری تبخیر شود. روش کار بدین صورت است که بخار آبی که توسط کلکتور خورشیدی به وجود آمده وارد لوله‌های کندانسور مرحله اول شده و همزمان آب شور وروی بر روی این لوله‌ها اسپری می‌شود. مقداری از آب که بخار شده، به‌عنوان منبع انرژی وارد لوله‌های کندانسور قسمت بعد شده تا همین فرآیند دوباره صورت گیرد و در نهایت بخار آب در آخرین مرحله سرد شده و تحت عنوان آب نمک‌زدایی شده از آن خارج می‌شود. قسمتی از آب که تبخیر نشده، تحت عنوان شورآبه وارد قسمت‌های بعدی می‌شود تا از آخرین مرحله خارج شود. در حال حاضر سامانه‌های تقطیر اثر چندگانه به دلیل سازگاری بالایی که با سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی دارند، در حال افزایش سهم خود در بازار جهانی هستند [16].

جدول ۳ مقایسه میزان مصرف انرژی دو سامانه تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر اثر چندگانه [17].

مشخصات	تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای	تقطیر اثر چندگانه
اندازه واحد (m^3/day)	۷۰۰۰۰-۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰-۵۰۰۰
مصرف انرژی الکتریکی (kWh/m^3)	۲/۵-۵	۲-۲/۵
مصرف انرژی حرارتی (MJ/m^3)	۲۸۲-۱۹۰	۲۳۰-۱۴۵
انرژی الکتریکی معادل انرژی حرارتی (kWh/m^3)	۱۵/۸۳-۲۳/۵	۱۲/۲-۱۹/۱
مصرف انرژی الکتریکی کل (kWh/m^3)	۱۹/۵۸-۲۷/۲۵	۱۴/۴۵- ۲۱/۳۵
کیفیت آب تولید شده (ppm)	≈۱۰	≈۱۰

سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی متصل به نیروگاه‌های متمرکز کننده خورشیدی

سامانه‌های MSF در حال حاضر بیشترین استفاده را در بین سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی (در حدود ۲۱ درصد) دارند و به صورت کلی بعد از سامانه‌های RO در مقام دوم بیشترین استفاده قرار دارند [14]. بیشتر انرژی مورداستفاده در این سامانه‌ها انرژی حرارتی است. سامانه‌های MSF به صورت عمده از انرژی حرارتی استفاده می‌کنند و در صورتیکه میزان شوری آب ورودی به آن‌ها بالا باشد (در خاورمیانه و کشورهای حوضه خلیج فارس که شوری آب تا ۴۵g/L نیز می‌رسد)، این مصرف انرژی افزایش می‌یابد [18]. به دلیل وجود پمپ‌های آب و دیگر تجهیزات مربوطه، این سامانه‌ها مقداری هم از انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند (جدول ۳). سامانه‌های MSF می‌توانند به صورت همزمان به منبع انرژی حرارتی خورشیدی و برق شبکه متصل شوند و یا اینکه با استفاده از یک پمپ حرارتی، به منبع گرمایی خورشیدی متصل شوند تا به صورت همزمان به تولید گرما و الکتریسیته بپردازند [15]. انتخاب متمرکز کننده مناسب، طراحی مناسب سیکل گرمایی خورشیدی، طراحی و بهینه سازی از موارد مهم و ضروری در جهت کارکرد مناسب سامانه‌های MSF خورشیدی

1 Multiple-effect distillation (MED)

می‌باشند. همچنین می‌توان با افزایش دمای آب شور ورودی به اولین مرحله، افزایش تعداد مراحل و افزایش سطح انتقال حرارت، کارایی سامانه MSF را بهبود داد. نوع متمرکز کننده‌های خورشیدی بر اساس میزان دمای مورد نیاز انتخاب می‌شود و یکی از مزیت‌های سامانه‌های متمرکز کننده خورشیدی، این است که در مقیاس‌های بالا می‌توانند با تجهیزات مربوط به ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به خوبی کار کنند. به‌طورکلی سامانه‌های MSF نیازمند کنترل دقیق فشار و دما می‌باشند و به دلیل اینکه انرژی گرمایی خورشید به صورت تناوبی است و در طول روز ثابت نیست، وجود یک سامانه ذخیره انرژی در بهبود کارایی سامانه نمک‌زدایی بسیار مؤثر است.

در سال ۱۹۸۳ میلادی یک نمونه آزمایشی سامانه MSF خود تنظیم شونده با ظرفیت ۱۰ m^3/d در صفات کویت طراحی و تست شد. یک مخزن ذخیره حرارتی با ظرفیت ۷ m^3 به‌عنوان تعدیل‌کننده بین کلکتور خورشیدی و MSF در نظر گرفته شد. مصرف انرژی حرارتی ویژه در بازه ۸۳–۱۰۵ kWh/m^3 و مقدار GOR[1] مقداری برابر با ۸–۶/۵ گزارش شد [19]. هو[2] و همکاران با استفاده از آنالیز پینچ، یک سامانه MSF خورشیدی را به‌منظور بهینه سازی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که به‌منظور افزایش کارایی، بازه دمایی کاری وسیعی نیاز است. و به‌منظور بدست آوردن مقدار GOR بیشتر، بهتر است تا شورآبه در آخرین مرحله تخلیه شود [20]. جدول ۴ برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با سامانه‌های MSF خورشیدی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ برخی از پژوهش‌های صورت گرفته بر روی سامانه‌های MSF خورشیدی[21], [15], [12],

مکان	نوع کلکتور	ظرفیت (m^3/d)	هزینه ($/$m^3$)	مساحت کلکتور (m^2)	بیشینه دمای شورآبه[3] (°C)
لاپاز، مکزیک	PTC-FPC	۱۰	نامشخص	PTC ۱۹۴ FPC۱۶۰	نامشخص
تیانجین، چین	Flat	۰/۳	۴/۶۷	نامشخص	۷۸
سوئز، مصر	Flat	۰/۰۱۶۵ – ۰/۰۰۲۵	نامشخص	۲/۳۹	۵۶–۴۹
مصر	PTC	۵۰۰۰	۱/۳۶	۶۱۶۸۰	۱۳۰–۹۰
صفات، کویت	PTC	۱۰	نامشخص	۲۲۰	۹۰–۴۰
ال پاسو، آمریکا	Solar pond	۷/۲ – ۲/۳۵	نامشخص	۳۰۰۰ با عمق ۳/۷۵ متر	نامشخص
آلمریا، اسپانیا	PTC	۱۲۰۰–۳۰۰۰	۴ – ۲/۵	۴۱۸۸۰	کمتر از ۱۰۵
بنغازی، لیبی	CPC	۱۳/۲	نامشخص	۱ (مساحت دهانه)	۱۲۲

انتخاب متمرکز کننده مناسب، طراحی مناسب سیکل گرمایی خورشیدی، طراحی و بهینه سازی از موارد مهم و ضروری در جهت کارکرد مناسب سامانه‌های MSF خورشیدی می‌باشند. همچنین می‌توان با افزایش دمای آب شور ورودی به اولین مرحله، افزایش تعداد مراحل و افزایش سطح انتقال حرارت، کارایی سامانه MSF را بهبود داد.

سامانه‌های MED همانند MSF به صورت عمده از انرژی حرارتی استفاده می‌کنند. با این تفاوت که این نوع از سامانه‌ها نسبت به MSF از نظر ترمودینامکی عملکرد بهتری دارند که باعث می‌شود با میزان TBT کمتری کار کنند و از احتمال ایجاد رسوب در سامانه جلوگیری شود. کارایی سامانه‌های MED تحت تاثیر عوامل طراحی و شرایط کاری همچون: تعداد مراحل، بیشینه دمای بخار مرحله اول، نرخ جریان

[1] Gain Output Ratio
[2] Hou
3 Top Brine Temperature (TBT)

بخار، اختلاف دما در مرحله آخر و... می‌باشند. همچنین به‌منظور افزایش عملکرد، برخی از سامانه‌های MED با پمپ‌های حرارتی ترکیب شده‌اند [21]، که شامل: کمپرسور بخار مکانیکی[1]، کمپرسور بخار حرارتی[2]، پمپ‌های حرارتی جذبی[3] و پمپ‌های حرارتی جذب سطحی[4] می‌باشند. وظیفه تمامی این پمپ‌ها بازیابی انرژی آخرین مرحله هست که از میان آن‌ها کمپرسور بخار حرارتی بیشترین میزان کاربرد را دارد.

بر اساس تست‌های بلند مدت، امکانسنجی فنی و قابلیت اطمینان سامانه‌های MED متصل به کلکتورهای خورشیدی اثبات شده است. در سال ۱۹۸۴ میلادی در ابوظبی یک نیروگاه MED که انرژی خود را از کلکتورهای صفحه تخت تامین می‌کرد، راه‌اندازی شد. این نیروگاه از یک سامانه MED که دارای ۱۴ مرحله بود، تشکیل شده بود و به‌منظور افزایش کارایی، آب قبل از ورود به هر مرحله پیش گرمایش می‌شد. این سامانه توانست مصرف انرژی ویژه برابر با $50\ kWh/m^3$ را داشته باشد که قابل مقایسه با سامانه‌های مرسوم MED بود. میزان هزینه آب تولید شده با توجه به هزینه‌های کلکتور خورشید، برابر $7–10\ \$/m^3$ برآورد شد.

در سال ۱۹۸۸ میلادی یک نیروگاه MED با ظرفیت $3\ m^3/h$ در آلمریا، اسپانیا راه‌اندازی شد. این نیروگاه انرژی مورد نیاز خود را از یک مزرعه PTC تامین می‌کرد که به‌منظور تولید الکتریسیته ساخته‌شده بود. مقدار GOR این سامانه باتوجه به فشار بخار بین ۱۴–۹/۳ اندازه‌گیری شد. در سال ۱۹۹۱ میلادی یک پمپ حرارتی دو مرحله‌ای جذبی به این نیروگاه اضافه شد که نتیجه آن کاهش ۴۴ درصدی در تولید الکتریسیته و افزایش ۱۲ درصدی در مصرف انرژی حرارتی بود. در سال ۲۰۰۴ یک سامانه PTC با مساحت $500 m^2$ به همراه بویلر گازی پشتیبان به آن اضافه شد تا از نظر اقتصادی بررسی شود [22]. آلارکن-پادیلا[5] و همکاران به مزایای اتصال پمپ حرارتی جذبی به سامانه‌های MED اشاره کردند که شامل موارد زیر بود: کم شدن مصرف انرژی حرارتی که باعث کاهش قابل توجه اندازه مزرعه خورشیدی شد و کم شدن مصرف انرژی الکتریکی و کاهش میزان آب ورودی به دلیل نیاز کم‌تر به جریان آب خنک کننده [23].

کاسمیرو[6] و همکاران یک سامانه MED-TVC متصل به CSP را شبیه‌سازی کردند. با توجه به متناوب بودن نیروگاه PTC، سامانه MED کوچک‌تر در نظر گرفته شد تا بتواند بیشتر مواقع در شرایط کاری کمتر از شرایط طراحی‌شده کار کند. بنابراین نیاز به چرخه خنک کننده آب دریا به دلیل اینکه سامانه MED فقط از بخشی از بار گرمایی PTC استفاده می‌کرد، ضروری بود. یک سامانه MED با ظرفیت $36112\ m^3/d$ تحت شرایط آب و هوایی سیسیل ایتالیا صورت گرفت. نتایج نشان داد که به صورت در حدود ۳۴/۲ درصد ظرفیت CSP و ۴۱/۴ درصد ظرفیت MED می‌تواند حاصل شود [24]. خلاصه‌ای از پژوهش‌های مرتبط با سامانه‌های MED خورشیدی در جدول ۵ آورده شده‌اند.

جدول ۵ برخی از پژوهش‌های صورت گرفته بر سامانه‌های MED خورشیدی [21], [15], [12]

مکان	نوع کلکتور	ظرفیت (m^3/d)	هزینه ($\$/m^3$)	مصرف انرژی حرارتی ویژه (kWh/m^3)
ریچموند، کالیفرنیا	PTC	۰/۱۵۱	۲/۰۵ -۴/۷	نامشخص
آلمریا، اسپانیا	PTC	۷۲	نامشخص	۷۲
فایرباو، کالیفرنیا	PTC	۶/۷۴	نامشخص	۱۳۳
عقبه، اردن	PTC-Natural Gas	۲۴۰۰۰	۰/۹۴۳	۷۷/۸

1 Mechanical vapor compression (MVC)
2 Thermal vapor compression (TVC)
3 Absorption heat pump
4 Adsorption heat pump
5 Alarcon-Padilla
6 Casimiro

سیسیل، ایتالیا	PTC	۳۶۱۱۲	نامشخص	۶۴
مصر	PTC	۴۵۴۵	۱/۳۲	۸۱/۵
سوئز، مصر	PTC	۱۰۰	۵/۴۷	۴۲/۴
ملبورن، استرالیا	Solar Pond	۲/۳	۲۲-۱۸	۲۴۴
ابوظبی، امارات متحده عربی	Flat	۸۰	۱۰-۷	۵۰

با مقایسه دو سامانه MSF و MED در میان پژوهش‌های صورت گرفته، مشاهده می‌شود که سامانه‌های MSF به میزان کمتری استفاده شده اند و یا کمتر در گزارش‌های علمی مطرح شده‌اند. سامانه‌های MSF ممکن است به یکی از دلایل زیر از نظر تکنولوژیکی یا اقتصادی، توان رقابت با سامانه‌های MED را نداشته باشند: ۱-میزان بیشینه دمای شورآبه بالایی که نیاز دارند ممکن است باعث شود که این سامانه‌ها به خوبی با انرژی خورشیدی ترکیب نشوند. ۲-مقدار TBT بالا باعث افزایش احتمال ایجاد رسوب می‌شود. ۳-کارایی ترمودینامیکی آن‌ها نسبت به MED کمتر است.

هزینه آب برای سامانه‌های نمک‌زدایی مرسوم با مقیاس کوچک برای آب‌های لب‌شور برابر با $\$/m^3$ ۱/۳ - ۰/۲ و برای آب شور دریا برابر با $\$/m^3$ ۳/۴ - ۰/۴ هست. که در مقایسه با این، هزینه آب تولید شده در سامانه‌های خورشیدی کوچک تا متوسط نسبتاً زیاد است. از طرف دیگر، میزان هزینه تخمین زده شده برای نیروگاه‌های با مقیاس بزرگ، قابل مقایسه با نیروگاه‌های مقیاس بزرگ مرسوم هست که هزینه نمک‌زدایی آب دریا در آن‌ها برابر $\$/m^3$ ۱/۵ – ۰/۵ هست [25].

به صورت کلی چهار بازه از نظر ظرفیتی (جدول۶)، برای برای سامانه‌های نمک‌زدایی که از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کنند وجود دارد که عبارت‌اند از: نیروگاه‌های با مقیاس بسیار کوچک با ظرفیت کمتر از m^3/d ۱ که کاربرد آن‌ها برای مصارف خانگی و استفاده در مناطق دوردست است. نیروگاه‌های با مقیاس کوچک با ظرفیت کمتر از m^3/d ۱۰ که توانایی تامین آب روزانه تعداد بیش از ۱۰۰ نفر را دارند و مناسب روستاها و جزایر کوچک هستند. نیروگاه‌های با مقیاس متوسط که ظرفیتی برابر m^3/d ۱۰-۱۰۰۰ دارند و می‌توانند آب مورد نیاز شهرها و روستاهای دچار کم آبی زیاد را تامین کنند و در نهایت، نیروگاه‌های با ظرفیت بسیار بالای بیشتر از m^3/d ۱۰۰۰ که برای مصارف شهری کاربرد دارند [26].

جدول ۶ هزینه‌های گزارش شده برای سامانه‌های مختلف نمک‌زدایی [12].

	مقیاس خیلی کوچک ($\$/m^3$)	مقیاس کوچک ($\$/m^3$)	مقیاس متوسط ($\$/m^3$)	مقیاس بزرگ ($\$/m^3$)
تقطیر خورشیدی	۶۵ - ۶	نامشخص		
HDH خورشیدی	۴/۴	۲۲/۱ – ۲/۹	نامشخص	
MSF خورشیدی			نامشخص	۱/۶ – ۱/۴
MED خورشیدی		۲۲- ۱۸	۸ – ۴/۱	۱/۳ – ۰/۹
CSP+RO/MED/MSF				۱/۲ – ۰/۹

ترکیب سامانه‌های متمرکز کننده خورشیدی با سامانه‌های نمک‌زدایی (CSP+D) در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. همگام‌سازی مناسب این دو سامانه در تولید آب و الکتریسیته در مقایسه با سامانه‌های مستقل، می‌تواند به‌عنوان راه‌حل پایداری برای حل مشکل آب و انرژی باشد. ترکیب (CSP+D) برای سامانه‌های خورشیدی با مقیاس متوسط و بزرگ بسیار مناسب است.

جمع‌بندی

در زمینه کمبود آب جهانی و بحران انرژی آینده، سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی پایدارترین روش برای حل این مشکلات هستند. اما در حال حاضر این سامانه‌ها در مقایسه با سامانه‌های مرسوم، هزینه‌های نسبتاً بالایی دارند که این به دلیل قیمت بالای تجهیزات خورشیدی است. اما با پیشرفت فناوری و توسعه سامانه‌های خورشیدی این انتظار می‌رود که قیمت‌های این سامانه‌ها به مقدار زیادی کاهش پیدا کنند. علاوه بر این، سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی در مقیاس‌های بزرگ، از نظر اقتصادی توان رقابت با نیروگاه‌های بزرگ مرسوم را دارند. از میان تمامی سامانه‌های نمک‌زدایی غیرمستقیم، سامانه‌های اسمز معکوس و الکترودیالیز می‌توانند به صورت مستقیم از الکتریسیته تولید شده توسط پنل‌های فتوولتائیک و یا نیروگاه‌های متمرکز کننده خورشیدی استفاده کنند. انرژی حرارتی بدست آمده از نیروگاه‌های متمرکز کننده برای راه‌اندازی سامانه‌های نمک‌زدایی رطوبت‌زا–رطوبت‌زدایی، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر اثر چندگانه به کار می‌رود ولی بااین‌حال از این انرژی می‌توان برای راه‌اندازی پمپ فشار قوی سامانه‌های اسمز معکوس نیز استفاده کرد. همچنین پمپ‌های جانبی این سامانه‌های نمک‌زدایی (پمپ گردش آب) می‌توانند انرژی مورد نیاز خود را از پنل‌های فتوولتائیک و یا نیروگاه‌های متمرکز کننده خورشیدی دریافت کنند. تا انرژی تمامی قسمت‌های این سامانه‌ها از منابع تجدیدپذیر تامین شود.

اما استفاده از انرژی خورشید بدون مشکل نیست، علاوه بر قیمت بالای تجهیزات، انرژی خورشید ماهیتی تناوبی دارد و همیشه در دسترس نیست (بعضی از فصول سال و هنگام شب). بنابراین به‌منظور کارکرد متناوب سامانه‌های نمک‌زدایی انرژی خورشید باید ذخیره شود و یا اینکه از سامانه‌های پشتیبان استفاده شود. تحقیقات حال حاضر نشان دهنده این هستند که سامانه‌های هیبرید که از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان پشتیبان استفاده می‌کنند، اقتصادی هستند و می‌توانند به خوبی مشکل تناوبی بودن انرژی خورشید را برطرف کنند.

مراجع

1. H. Sharon and K. S. Reddy, “A review of solar energy driven desalination technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1080–1118, 2015.
2. M. Shatat, M. Worall, and S. Riffat, “Opportunities for solar water desalination worldwide: Review,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 9, pp. 67–80, 2013.
3. S. A. Kalogirou, “Seawater desalination using renewable energy sources,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 242–281, Jan. 2005.
4. S. Lattemann and T. Höpner, “Environmental impact and impact assessment of seawater desalination,” *Desalination*, vol. 220, no. 1, pp. 1–15, 2008.
5. J. Blanco, S. Malato, P. Fernández-Ibañez, D. Alarcón, W. Gernjak, and M. I. Maldonado, “Review of feasible solar energy applications to water processes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6, pp. 1437–1445, 2009.
6. M. T. Chaibi, “An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas,” *Desalination*, vol. 127, no. 2, pp. 119–133, 2000.
7. O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 748–764, 2014.
8. S. P. Energy, “Technology Roadmap,” 2014.
9. H. L. Zhang, J. Baeyens, J. Degrève, and G. Cacères, “Concentrated solar power plants: Review and design methodology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 466–481, 2013.
10. D. Barlev, R. Vidu, and P. Stroeve, “Review,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 10, pp. 2703–2725, 2011.
11. U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, and M. Rood, “Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. March 2016, pp.

82–100, 2017.
12. Y. Zhang, M. Sivakumar, S. Yang, and K. Enever, “Application of solar energy in water treatment processes : A review,” *Desalination*, vol. 428, no. November 2017, pp. 116–145, 2018.
13. F. A. Al-Sulaiman, M. I. Zubair, M. Atif, P. Gandhidasan, S. A. Al-Dini, and M. A. Antar, “Humidification dehumidification desalination system using parabolic trough solar air collector,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 809–816, 2015.
14. S. Burn *et al.*, “Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture,” *Desalination*, vol. 364, pp. 2–16, 2015.
15. C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos, “Solar assisted sea water desalination: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 136–163, 2013.
16. T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, and A. Khaled, “Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies,” *Desalination*, vol. 266, no. 1–3, pp. 263–273, 2011.
17. A. Al-Karaghouli and L. L. Kazmerski, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 343–356, 2013.
18. M. Al-Nory and M. El-Beltagy, “An energy management approach for renewable energy integration with power generation and water desalination,” *Renew. Energy*, vol. 72, pp. 377–385, 2014.
19. S. M. A. Moustafa, D. I. Jarrar, and H. I. El-Mansy, “Performance of a self-regulating solar multistage flash desalination system,” *Sol. Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 333–340, 1985.
20. H. Shaobo, Z. Zhang, Z. Huang, and A. Xie, “Performance optimization of solar multi-stage flash desalination process using Pinch technology,” *Desalination*, vol. 220, no. 1, pp. 524–530, 2008.
21. M. T. Ali, H. E. S. Fath, and P. R. Armstrong, “A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4187–4199, 2011.
22. M. Papapetrou, E. S. Mohamed, D. Manolakos, G. Papadakis, V. J. Subiela, and B. Peñate, “Operating RE/desalination units,” in *Seawater Desalination*, Springer, 2009, pp. 247–272.
23. D.-C. Alarcón-Padilla and L. García-Rodríguez, “Application of absorption heat pumps to multi-effect distillation: a case study of solar desalination,” *Desalination*, vol. 212, no. 1, pp. 294–302, 2007.
24. S. Casimiro, J. Cardoso, C. Ioakimidis, J. Farinha Mendes, C. Mineo, and A. Cipollina, “MED parallel system powered by concentrating solar power (CSP). Model and case study: Trapani, Sicily,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 55, no. 12, pp. 3253–3266, 2015.
25. N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability,” *Desalination*, vol. 309, pp. 197–207, 2013.
26. I. C. Karagiannis and P. G. Soldatos, “Water desalination cost literature: review and assessment,” *Desalination*, vol. 223, no. 1, pp. 448–456, 2008.

A review on thermal desalination systems integrated into concentrating solar plants

Ali Babaeebazaz[1], Shiva Gorjian[2*], Majid Amidpour[3]

1. M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University
2. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University
3. Professor, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

Water plays an important role in our everyday life. Nowadays duo to the climate change some parts of the globe are under water stress. The utilization of solar energy to desalinate water is a sustainable solution for world 's water scarcity issue. In recent years, efforts have been made to develop the use of solar energy in desalination industry. Solar desalination can either be direct including: solar stills or indirect including: Reverse Osmosis, Multiple Effect Distillation (MED), Multi-Stage Flash (MSF). Currently, MED and MSF desalination systems having 13% and 9% of market share respectively. Thus, this study compares and investigates previous researches on solar MED and MSF desalination systems, which can be used in remote areas and integrated into solar thermal energy systems.

Key words: Water scarcity, Climate change, Solar thermal energy, Multiple Effect Distillation, Multi-Stage Flash

*Corresponding author
E-mail: Gorjian@modares.ac.ir