

بررسی سیستم‌های مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی

حامد باقری اسفه^{۱*}، رضا رستم‌زاده^۲، محمد رستم‌زاده^۲

^۱استادیار گروه مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی شهرضا

^۲کارشناسی مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی شهرضا

*مسئول مکاتبات: h.bagheri@shahreza.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

آب شیرین‌کن
انرژی خورشیدی
روش پلکانی
روش حوضچه‌ای

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

در این مقاله انواع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی، اجزاء تشکیل دهنده و نحوه عملکرد آن‌ها بررسی می‌گردد. همچنین روش‌های مختلف برای افزایش بازدهی این آب شیرین‌کن‌ها مطالعه می‌گردد. در ادامه انواع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با هم مقایسه می‌شود. در انتها اثر عوامل محیطی نظیر شدت تابش، دمای محیط و سرعت باد بر میزان تولید آب شیرین‌کن خورشیدی بررسی خواهد شد. میزان بارندگی در ایران یک سوم متوسط جهانی است، این در حالی است که میزان تبخیر منابع آبی کشور سه برابر میانگین جهانی برآورد می‌شود که این موضوع خود نشان از یک بحران پایدار و همیشگی دارد که نیازمند به کاربرد راه حل‌های مستمر است. ۱۲ استان از ۳۱ استان ایران طی ۵۰ سال آینده با خشک شدن کامل سفره‌های زیرزمینی آب خود مواجه خواهند شد. یکی از روش‌های مؤثر برای جبران کمبود آب آشامیدنی کشور استفاده از منابع آب شور و تبدیل آن به آب شیرین با آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی دارای انرژی رایگان، طراحی ساده و کم هزینه، اشغال فضای کم، بدون آلودگی زیستی و بدون تولید سر و صدا هستند.

۱ مقدمه

آب سر منشاء حیات و باعث پدید آمدن تمدن‌هاست، بطوریکه پیدا کردن و دسترسی به منابع آب دغدغه بشری بوده و حتی کاوشگران خارج از محدوده کره زمین به دنبال کشف سیارات با منابع آب هستند و اولین اولویت برای زندگی انسان خارج از کره خاکی را آب می‌دانند. کره زمین دارای ۷۱ درصد آب و ۲۹ درصد خشکی بوده با این وجود بحران آب به یکی از مهم‌ترین معضلات برای کشورها تبدیل شده است. این موضوع به دلیل شوری آب دریاها و کمبود منابع آب شیرین است، زیرا از مقدار حجم آب موجود فقط ۳ درصد آن آب شیرین بوده که همین سه درصد حجم زیادی از آن در دسترس انسان نیست و در یخ‌های قطبی و آب‌های زیرزمینی وجود دارد [۱]. شیرین‌سازی آب موضوعی بوده که انسان از گذشته‌های دور به روش‌های مختلف انجام می‌داده و آب شیرین مورد نیاز خود را تأمین کرده است.

روش‌های شیرین‌سازی برگرفته از مکانیزم و فرآیندهای بارش باران است. خورشید بر سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها تابیده و تبخیر آب صورت می‌گیرد. بخار آب در ارتفاعات بالاتر به دلیل پایین بودن دما و وزش باد دچار میعان می‌شود، در این حالت به صورت قطرات آب نزول کرده و جریانی از آب شیرین را تأمین می‌نماید [۲]. روش‌های شیرین‌سازی آب در کارخانجات تصفیه‌سازی به کمک گرم کردن و تبخیر آب صورت گرفته که جهت تأمین انرژی از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌گردد.

طبق محاسبات انجام گرفته توسط کالوگیرو [۳] برای تولید ۱۰۰۰ مترمکعب آب در هر روز به طور مداوم نیاز به تولید و استخراج ۱۰۰۰۰ تن نفت در سال است. این هزینه‌ای است که بسیاری از کشورها جهت

دسترسی به آب پاک با استخراج نفت یا خرید نفت از کشورهای نفت خیز باید بپردازند. در عمل به دلیل هزینه‌های سرسام آور و بحران اقتصادی، کم آبی مشکلی فراگیر شده است و درحال حاضر طبق گزارش United Nation، ۴۰ درصد از جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار داده در حالی که نزدیک ۷۸۳ میلیون نفر دسترسی کامل به آب تصفیه شده ندارند. این معضل تا سال ۲۰۲۵ بین ۴۶ تا ۵۲ کشور را با بحران کم آبی روبرو خواهد کرد.

روش‌هایی که در حال حاضر پژوهشگران به دنبال جایگزینی جهت تصفیه آب هستند استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشید، زمین گرمایی، بیومس و باد است. این روش‌ها دارای هزینه‌های بسیار پایین، آلودگی صوتی و زیست محیطی پایین و دارای سیکل‌های نسبتاً ساده هستند. در بین انرژی‌های تجدیدپذیر ذکر شده استفاده از انرژی خورشید جهت شیرین‌سازی آب مناسب‌تر است که به دلیل دسترسی بهتر به نور و انرژی خورشیدی است. این نوع روش با وجود تمام مزایای ذکر شده دارای بازدهی پایین در تولید است و استفاده از آن برای مناطق گرم و خشک و با تراکم جمعیتی پایین مناسب است.

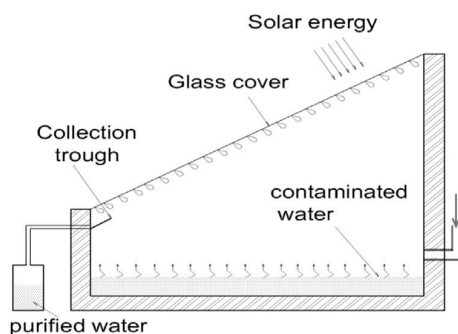
در حال حاضر مناطقی مانند کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا دارای بحران کم آبی بیشتر نسبت به دیگر نقاط جهان بوده ولی به دلیل وجود منابع انرژی تجدیدپذیر فراوان به خصوص انرژی خورشیدی در کنار منابع آب زیرزمینی شور دارای بستر مناسبی جهت بکارگیری انرژی خورشیدی و تصفیه آب است [۲].

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با بکارگیری انرژی خورشید در سیکل خود

۱.۲ آب شیرین کن حوضچه‌ای

روش حوضچه‌ای یکی از روش‌های تقطیر آب در حجم‌های کم و خانگی است. در این روش از یک حوضچه که باید عایق بندی شود استفاده می‌گردد. علت عایق بندی جلوگیری از افت انتقال حرارت است. جنس حوضچه می‌تواند فلز، پلاستیک، چوب، بتون و یا هر ماده‌ای که بتواند دمای بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد را تحمل کند باشد. داخل حوضچه یک صفحه سیاه قرار می‌گیرد که از نشتی آب جلوگیری می‌کند. همچنین تابش نور خورشید را جذب کرده به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند. لازم به ذکر است که دلیل استفاده از رنگ سیاه برای صفحه، ضریب جذب بالای آن در مقایسه با دیگر رنگ‌ها است. در بالای حوضچه یک پوشش شفاف شیدار قرار می‌گیرد که می‌تواند از جنس شیشه یا پلاستیک باشد. این پوشش شفاف باید در برابر اشعه فرابنفش مقاوم بوده و تحمل گرما و دماهای بالا را نیز داشته باشد. پوشش شفاف دارای یک قاب است که لبه‌های آن را می‌پوشاند. این قاب می‌تواند از جنس فلز (غالباً آلومینیوم)، چوب، بتون یا مواد پلاستیکی باشد. همچنین کانال‌هایی برای جمع کردن آب چگالیده شده در امتداد پوشش شفاف در دیواره حوضچه باید قرار بگیرد. می‌توان برای ذخیره آب شیرین در کنار حوضچه از مخازن ذخیره آب استفاده کرد. برای تزریق آب شور در داخل حوضچه از پمپ استفاده می‌شود [۴].

فرآیند آب شیرین کن حوضچه‌ای بدین صورت است که تابش نور خورشید به داخل پوشش شفاف شیدار نفوذ می‌کند و در داخل حوضچه به سمت صفحه سیاه جذب می‌تابد، در نتیجه جذب آب شور قرار گرفته روی صفحه می‌شود که باعث شده آب شور به دمایی پایین‌تر از دمای جوش خود و دمایی بالاتر از دمای پوشش شیدار برسد. سطح روی آب شور تبخیر شده و مخلوطی از بخار آب و هوا سطح آب شور را ترک می‌کند که دارای دمای بیشتر و چگالی کمتر نسبت به مخلوط بخار آب و هوا در نزدیکی پوشش شفاف است. سپس یک جریان جابجایی ایجاد می‌شود و مخلوط بخار آب و هوای اشباع از سطح آب شور به سمت بالا حرکت می‌کند و به خاطر تماس با پوشش شفاف بالایی که دمای پایین‌تری دارد خنک می‌شود. سپس به حالت مایع اشباع رسیده و مقداری از آن چگالیده می‌شود. به صورت یک فیلم نازک روی پوشش شفاف شیدار تشکیل شده و به دلیل وجود جاذبه به سمت پایین شیب می‌لغزد (شکل ۱). قسمت‌های چگالیده نشده از مخلوط بخار آب و هوا به سطح آب باز می‌گردد [۴].



شکل ۱: فرآیند آب شیرین کن حوضچه‌ای (حالت تک شیبی) [۵]

سازوکار نرخ تبخیر به جابجایی سیال بستگی دارد. همچنین داشتن یک

عملیات گرمایش، تبخیر آب و جداسازی آب از ناخالصی‌های موجود را انجام می‌دهند. در این پژوهش سعی شده چند روش تصفیه آب به کمک آب شیرین کن‌های خورشیدی بررسی گردد. همچنین مزایا و معایب این روش‌ها مقایسه شده و روش‌های مختلف افزایش بازده آن‌ها بیان می‌گردد.

۲ انواع آب شیرین کن خورشیدی

چرخه شیرین سازی آب نیاز به انرژی در قالب گرما دارد. این انرژی در آب شیرین کن‌های خورشیدی توسط نور و حرارت ایجاد شده از جانب خورشید تأمین می‌شود. در این حالت شیرین سازی آب به صورت تبخیر و تقطیر انجام می‌گیرد. مکانیزم آب شیرین کن خورشیدی در حالت کلی به این شکل است که انرژی و نور خورشید از طریق پوشش شفاف وارد محفظه آب شده و جذب صفحه جاذب تیره رنگ محفظه می‌گردد (در حالتی می‌تواند صرف گرم کردن آب جاری در لوله‌های حامل آب شود). نور بازتاب شده از کف محفظه‌ای که حجم آب روی آن قرار دارد به دلیل مات عمل کردن شیشه شفاف محفظه درون آن محبوس شده و باعث تجمع انرژی و در نتیجه تبادل حرارت می‌شود. در این حالت انرژی مورد نیاز که در روش‌های معمول توسط سوخت فسیلی تأمین می‌شود توسط خورشید تأمین می‌گردد.

آب شیرین کن‌های خورشیدی دارای انواع مختلف و مکانیزم‌های متفاوت هستند و در یک دسته بندی به دو دسته تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای تقسیم می‌شوند.

آب شیرین کن تک مرحله‌ای دارای یک مرحله تولید و تقطیر آب شیرین است، در حالی که در آب شیرین کن چند مرحله‌ای، تولید آب شیرین از آب شور در دو یا چند مرحله صورت می‌گیرد. آب شیرین کن‌های خورشیدی یک مرحله‌ای دارای دو دسته فعال^۱ و غیر فعال^۲ هستند. در روش فعال جابه‌جایی سیال از نوع اجباری به وسیله پمپ و فن صورت می‌گیرد و زمانی که حجم مخزن بزرگ باشد مناسب است. اما در روش غیر فعال جابه‌جایی سیال به وسیله اختلاف چگالی و از نوع طبیعی است.

انواع آب شیرین کن‌های غیر فعال عبارتند از:

۱. حوضچه‌ای
۲. پلکانی
۳. فیتله‌ای
۴. دودکشی
۵. اضطراری.

آب شیرین کن‌های خورشیدی علی‌رغم هزینه پایین در نصب و راه‌اندازی، رایگان بودن انرژی و عدم نیاز به اپراتور ماهر، دارای ظرفیت تولید پایین بوده و عملاً تا غروب آفتاب می‌توانند فعالیت کنند، مگر اینکه بتوان از روش‌های ذخیره گرمایی، انرژی آن را نگهداری کرد و پس از غروب آفتاب از آن استفاده نمود. با این وجود بکارگیری آن‌ها در ابعاد گسترده می‌تواند تا حدود زیادی هزینه‌های ناشی از روش‌های معمول و سنتی را کم کرده و در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی کند. در ادامه به معرفی روش حوضچه‌ای و پلکانی پرداخته شده و در انتها یک سیکل شیرین سازی خورشیدی موسوم به روش رطوبت زنی-رطوبت گیری^۳ بررسی می‌شود.

¹Active ²Passive ³Solar humidification-dehumidification desalination (SHDD)

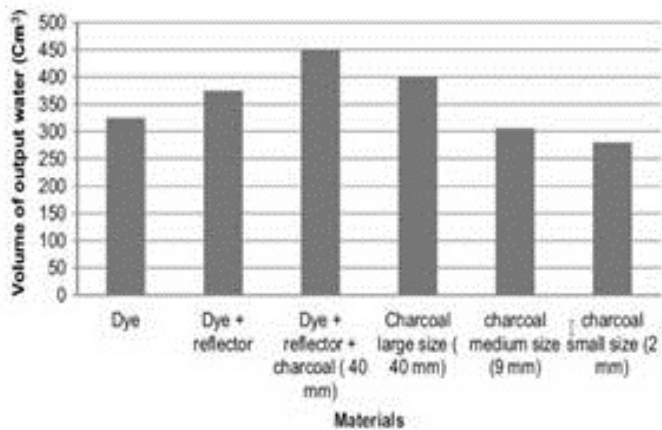
افزایش داد. با استفاده از ریفلکتور میزان تولید آب شیرین ۶۸ درصد افزایش می‌یابد [۷].

۴.۱.۲ تأثیر ذغال چوب

سه ویژگی در ذغال چوب باعث گرم شدن آب شور و افزایش بازدهی تولید آب شیرین می‌شود:

۱. قابلیت ترشوندگی بالا^۱
۲. ضریب جذب بالا برای تابش خورشیدی
۳. تابش خورشیدی را بیش از آن که بازتاب کند در آب شور پراکنده می‌کند و آن را گرم می‌سازد. اندازه ذغال چوب در بازدهی تولید آب شیرین تأثیر گذار است.

آزمایش‌های انجام شده توسط الحجار [۷] برای بررسی میزان بازدهی آب شیرین‌کن نشان داده است که بیشترین بازدهی زمانی است که عمق آب شور ۳ سانتی متر بوده و در آن رنگ سیاه و تکه‌های ۴۰ میلی متر ذغال چوب ریخته شده و در دستگاه ریفلکتور استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۳: تأثیر استفاده از ریفلکتور و ذغال چوب در تولید آب شیرین‌کن حوضچه‌ای [۷]

یکی دیگر از روش‌های افزایش بازدهی این است که صفحه سیاه کف حوضچه به صورت مقعر باشد. آزمایشات انجام شده توسط نصار و همکاران [۸] نشان داده است که در صورت استفاده از صفحه سیاه مقعر می‌توان پرتوهای خورشیدی را در کانون مقعر بازتاب و متمرکز کرد. طبق آزمایش انجام شده توسط فتح [۹] استفاده از کندانسور در آب شیرین‌کن حوضچه‌ای می‌تواند تا ۴۵ درصد بازده تولید آب را افزایش دهد. عوامل مؤثر در افزایش بازده آب شیرین‌کن حوضچه‌ای در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: عوامل مؤثر در افزایش بازده آب شیرین‌کن حوضچه‌ای

میزان افزایش بازده	روش افزایش بازده
۳۹ درصد	اضافه کردن رنگ قرمز به آب شور
۷۰ درصد	اضافه کردن رنگ سیاه به آب شور
۶۸ درصد	استفاده از ریفلکتور
۴۵ درصد	استفاده از کندانسور

در جدول ۲ خلاصه‌ای از عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای مختلف که از کندانسور استفاده می‌کنند آمده است. از آزمایشات

فضای بهینه در آب شیرین‌کن می‌تواند میزان رسانش را بالا ببرد. بنابراین داشتن یک فاصله و زاویه مناسب بین سطح آب و پوشش شیبدار در فرآیند بسیار مؤثر است. میزان اختلاف دما بین سطح آب شور و پوشش شیبدار نیز بسیار مهم است و هر چه بیشتر باشد، نرخ انتقال حرارت بالاتر خواهد بود [۴]. از مزایای این روش می‌توان به ارزان و ساده بودن آن اشاره کرد. روش حوضچه‌ای نیاز به مصرف زیاد انرژی برای تولید آب شیرین نداشته و همچنین تولید گازهای خطرناک نمی‌کند. آب شیرین‌کن حوضچه‌ای از نظر نوع پوشش شفاف به دو نوع تک شیبی و دو شیبی تقسیم می‌شود که آب شیرین‌کن حوضچه‌ای تک شیبی مناسب آب و هوای سرد است، در حالیکه مدل دو شیبی مناسب برای شرایط آب و هوای گرم می‌باشد (شکل ۲) [۶].



شکل ۲: آب شیرین‌کن حوضچه‌ای دوشیبی [۶]

۱.۱.۲ راهکارهای افزایش بازدهی آب شیرین‌کن حوضچه‌ای

یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین روش‌ها برای افزایش بازده تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی، ریختن رنگ سیاه یا رنگ قرمز در آب است. همچنین می‌توان تکه‌های ذغال چوب نیز در داخل آب ریخت یا اینکه می‌توان چگالی و ضخامت سطح سیاه جاذب را تغییر داد [۷].

۲.۱.۲ تأثیر رنگ تیره

تشعشعات خورشیدی پس از عبور از پوشش شیشه‌ای به سطح آب می‌رسند که اگر این آب شفاف باشد مقداری از آن عبور کرده و به سطح جاذب رسیده و مقداری نیز بازتاب می‌شود. درصدی نیز جذب آب خواهد شد. اگر این آب تیره رنگ باشد تلفات کم شده و تابش مستقیماً جذب آب می‌شود. در این حالت، آب تیره سریع‌تر گرم شده و سپس تبخیر می‌شود. رنگ استفاده شده در آب بسیار مهم است. رنگ قرمز در آب باعث افزایش بازدهی تولید آب شیرین به اندازه ۳۹ درصد و رنگ سیاه باعث افزایش تولید ۷۰ درصدی می‌شود [۷]. لازم به ذکر است که استفاده از رنگ در کیفیت آب کندانس شده تأثیری ندارد.

۳.۱.۲ تأثیر ریفلکتور

تابش خورشیدی که به بیرون از حوضچه تابیده می‌شود را می‌توان با استفاده از یک ریفلکتور به داخل آب شیرین‌کن فرستاد و میزان تابش خورشیدی را

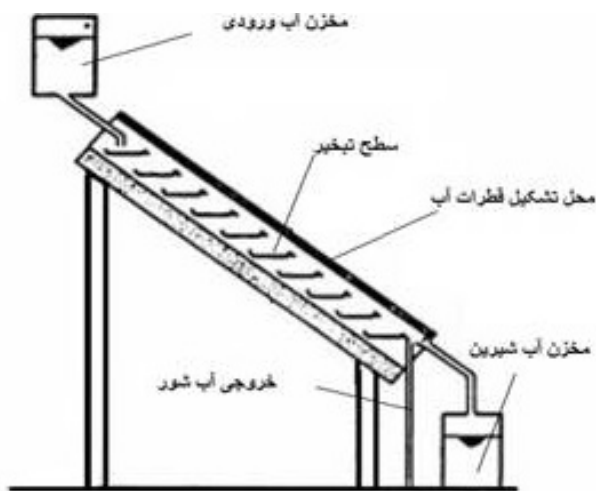
¹Wettability

جدول ۲: مقایسه عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای مختلف با کندانسور

میزان تولید روزانه ($kg/m^2 \cdot day$) (درصد بهبود عملکرد)	نام محققان	نوع آب شیرین‌کن و تجهیزات
۷ -	الباهی و اینان [۱۰]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه ریفلکتور خارجی از جنس فولاد ضدزنگ
۹/۲۳ (٪۵۵)	عماد [۱۱]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای تک شیبی به همراه کندانسور خارجی
۱۰/۷ -	فتح [۱۲]	تقطیر چند مرحله ای
۵/۷۱ (٪۳۳)	الحمّدانی و شکلا [۱۳]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه مواد تغییر فاز دهنده
۴۰ -	ژیونگ و همکاران [۱۴]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای چند مرحله‌ای به همراه کلکتور لوله خلاء
۶/۲ (٪۴۴)	تیواری و همکاران [۱۵]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه دو محفظه کندانسور
- (٪۱۰۰)	نیجرگوردوف و همکاران [۱۶]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای حرارتی-الکتریکی
۴/۸ (٪۱۱۶)	کییل و همکاران [۱۷]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه نانو سیال اکسید آلومینوم
۱۰/۴ (٪۱۳۳)	کییل و همکاران [۱۸]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه نانو سیال اکسید مس و اکسید آلومینوم
- (٪۲۸۵)	عمر و همکاران [۱۹]	آب شیرین‌کن حوضچه‌ای به همراه فیتله‌های موج‌دار، ریفلکتور داخلی، کندانسور خارجی و نانو سیال اکسید مس و اکسید آلومینوم

تخلیه می‌گردد (شکل ۴). آب شور تبخیر نشده نیز در انتهای مسیر خود از دستگاه خارج و تخلیه می‌گردد، هر چند می‌توان از طریق لوله‌کشی و بکارگیری پمپ، آب شور را دوباره به مخزن برگرداند.

انجام گرفته می‌توان دریافت که مدل‌های چند مرحله‌ای میزان تولید بیشتری داشته در حالی که میزان تولید در روش‌های تک مرحله‌ای کمتر از ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع در روز است.



شکل ۴: آب شیرین‌کن پلکانی

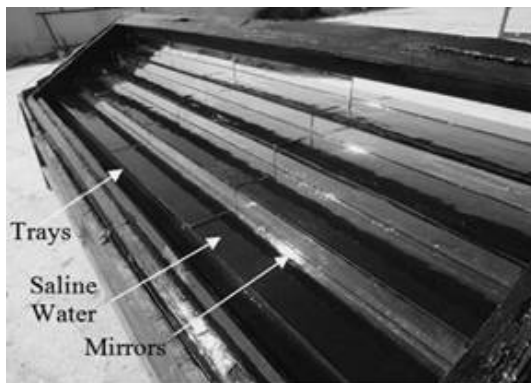
مزیت این دستگاه نسبت به آب شیرین‌کن حوضچه‌ای این است که به دلیل فاصله کم میان صفحه جذب کننده نور خورشید و پوشش شفاف، رطوبت نسبی بالا و نزدیک به ۱۰۰ درصد بوده و هوای محبوس در آن سریع اشباع می‌شود. به همین دلیل نرخ تولید آب شیرین در روش پلکانی بالاتر خواهد بود. دمای آب شور جاری و دمای پوشش شفاف در این روش بیشتر از روش حوضچه‌ای است که دو دلیل دارد. اولاً حجم کمتر هوای محبوس در محفظه باعث تبادل حرارتی سریع‌تری شده است. ثانیاً سطح مقطع بیشتر در تماس

۲.۲ آب شیرین‌کن پلکانی

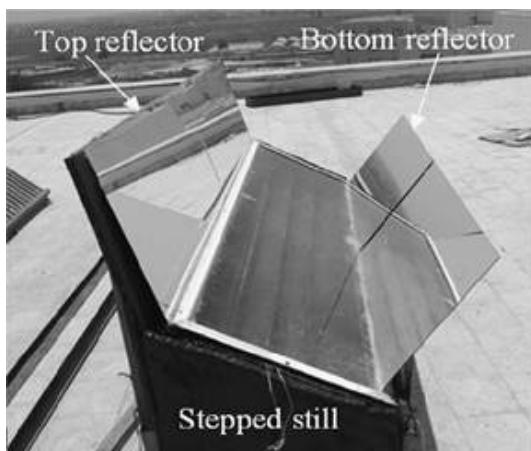
آب شیرین‌کن پلکانی و حوضچه‌ای به عنوان دو آب شیرین‌کن خورشیدی به صورت گلخانه‌ای عمل می‌کنند. به این صورت که با به دام انداختن انرژی و نور خورشید باعث تجمع انرژی و تبادل حرارت شده و با تبخیر آب شور و چگالش آن روی سطوح شیشه‌ای باعث به دست آمدن آب شیرین می‌شوند. در فناوری تقطیر خورشیدی، عمق آب شور اهمیت ویژه‌ای دارد و آزمایشات نشان داده هر چه عمق آب شور در جریان در سیکل کمتر باشد بازدهی و تولید بالاتر است [۵]. از این رو از آب شیرین‌کن پلکانی استفاده می‌شود که با زیاد کردن سطح مقطع جریان و مسیر جریان عمق آن را کاهش می‌دهد.

آب شیرین‌کن پلکانی از مخزنی تشکیل شده که در ارتفاعی بالاتر نسبت به دیگر اجزای سیستم قرار دارد. مخزن حاوی آب شور بوده و از طریق یک لوله وارد یک قاب مورب با پوشش شفاف و قابل تنظیم با تابش خورشید می‌شود. درون قاب، پلکانی طراحی شده که آب به صورت یک لایه نازک روی آن جریان می‌یابد. صفحه کف هر کدام از پله‌ها به عنوان یک صفحه جاذب نور خورشید عمل کرده و عملیات تبخیر آب شور در این مرحله انجام می‌شود. بخار آب درون محفظه بالا رفته و بر روی پوشش شفاف عموماً از جنس شیشه تقطیر می‌گردد. با تشکیل قطرات آب خالص روی پوشش شفاف به دلیل مورب بودن قاب و نیروی جاذبه قطرات آب به سمت پایین حرکت کرده و از طریق ناودان تعبیه شده جمع‌آوری می‌شود و یا در مخزن آب شیرین

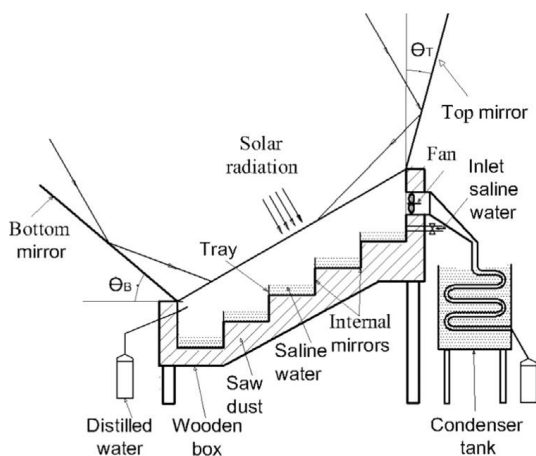
بالا رفتن دمای شیشه، تولید آب شیرین به طور چشمگیری افزایش یافت.



شکل ۵: آب شیرین‌کن پلکانی به همراه آینه در سطوح عمودی پلکان [۵]



شکل ۶: آب شیرین‌کن پلکانی به همراه ریفلکتور در ابتدا و انتهای قاب [۵]



شکل ۷: آب شیرین‌کن پلکانی به همراه ریفلکتور و کندانسور [۲۱]

دیگر وسیله‌ای که جهت بالا بردن میزان تولید آب شیرین کاربرد دارد، پره^۱ است. پره به دلیل افزایش سطح باعث افزایش انتقال گرمای جابجایی در قطعاتی مانند رادیاتورها می‌شود. در آب شیرین‌کن پلکانی با نصب پره در سطوح جاذب می‌توان انتقال گرما و نرخ میزان تبخیر را بالا برد. طبق آزمایش ولموراگان و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۰۸ تولید ۷۶ درصدی آب شیرین مشهود است. در بخش دیگر این آزمایش از اسفنج در کنار پره در

با نور خورشید باعث انتقال حرارت جابجایی بیشتری شده و ترکیب این دو موضوع نرخ تبخیر و چگالش را بالاتر می‌برد [۵].

امروزه پژوهش‌های بسیاری جهت بالا بردن بازده ترمودینامیکی، طراحی مناسب و بهبود عملکرد آب شیرین‌کن‌های پلکانی انجام شده و رعایت عوامل مؤثر باعث بالا رفتن میزان تولید آب در طول روز می‌گردد. چند مورد از این عوامل عبارتند از:

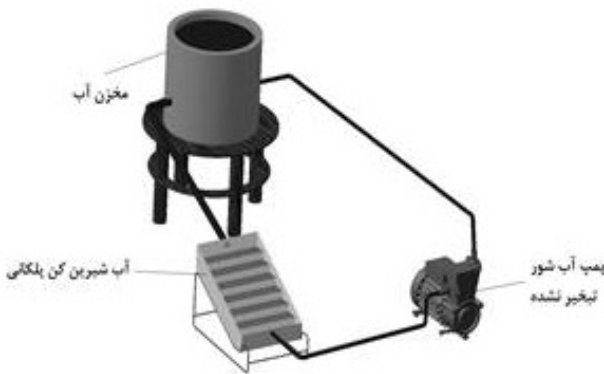
توجه به جنس، هندسه و ابعاد صفحه جاذب: از آنجایی که صفحه جاذب در تماس با آب شور جاری و در معرض نور خورشید است، باید ماده‌ای برای آن انتخاب شود که دارای ضریب جذب حرارتی بالا و مقاوم در برابر خوردگی باشد و ترجیحاً از رسوب کردن جلوگیری نماید. از این جهت آهن گالوانیزه، آلومینیوم و سیمان برای صفحه جاذب مناسب‌تر بوده که آلومینیوم کاربرد و مزایای بیشتری دارد. سطح صفحه جاذب اصولاً سیاه رنگ بوده تا میزان نور بیشتری داشته باشد و جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی زیر آن را عایق‌بندی می‌کنند تا فقط در سطح تماس تبادل حرارتی با آب شور داشته باشد. صفحه جاذب در ابعاد مختلفی ساخته می‌شود، ولی توجه به اینکه در کدام عرض و طول بیشترین میزان تولید را دارد، می‌تواند بازدهی دستگاه را بالا ببرد. بطور مثال، در آزمایش انجام گرفته از جانب کبیل و همکاران در سال ۲۰۱۵ بهترین بازدهی تولید در عرض ۱۲۰ میلی‌متر و عمق صفحه ۱۵ میلی‌متر انجام گرفت [۵]. البته در این آزمایش از فیتیله پارچه‌ای جهت بالا بردن میزان تولید به دلیل ظرفیت گرمایی پایین آن استفاده شد که بین ۳ تا ۵ درصد ظرفیت تولید آب شیرین را افزایش داد. عامل مهم دیگر در طراحی صفحه جاذب، هندسه سطح است. طبق مطالعات انجام شده توسط گاوآنده و بویر در سال ۲۰۱۳، صفحه محدب ۵۷ درصد و صفحه مقعر ۲۹ درصد آب شیرین بیشتری نسبت به صفحه تخت تولید کردند [۲۰].

استفاده از تجهیزات جانبی (ریفلکتور، کندانسور، پره) و انتخاب پوشش مناسب: در آب شیرین‌کن پلکانی، سطوح عمودی پلکان بازدهی کافی را جهت کمک به تبخیر نداشته و عملاً از آن‌ها اتلاف حرارتی صورت می‌گیرد. در آزمایشی که توسط کبیل و همکارانش در سال ۲۰۱۳ انجام گرفت، بر روی سطوح عمودی آینه‌هایی را جهت بازتاب نور خورشید و هدایت به صفحات جاذب تعبیه کردند (شکل ۵) [۵]. این کار هم برای آب شیرین‌کن پلکانی و هم آب شیرین‌کن حوضچه‌ای در شرایط آب و هوایی یکسان انجام گرفت و حاصل آن افزایش بهره‌وری ۳۴ درصدی برای آب شیرین‌کن حوضچه‌ای و ۵۶ درصدی آب شیرین‌کن پلکانی بود. سپس آزمایش با دو ریفلکتور یکی در ابتدا و دیگری در انتهای قاب انجام گرفت (شکل ۶) که نتیجه آن، تولید بیشتر از دو برابر آب شیرین‌کن پلکانی نسبت به حوضچه‌ای بود.

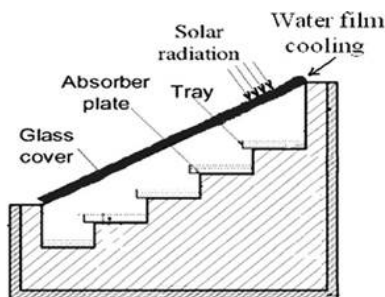
در آب شیرین‌کن پلکانی می‌توان جهت رطوبت‌گیری بیشتر از هوای مرطوب درون قاب، از کندانسور استفاده نمود. به این صورت که در ابتدای قاب یک فن مکنده نصب شده و با مکش هوای مرطوب درون خود، آن را به یک مبدل گرمایی هدایت می‌کند که در آن لوله‌های جریان آب سرد وجود داشته و باعث تقطیر و افزایش تولید آب شیرین می‌گردد. این آزمایش توسط الصمدونی و همکارانش [۲۱] انجام گرفت و در آن کندانسور به همراه دو آینه در ابتدا و انتهای قاب به کار گرفته شد (شکل ۷). در این حالت با وجود

¹Fin

می‌توان عایق جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی استفاده کرد. عایق انتخاب شده می‌تواند از جنس یونولیت باشد. برای کمک به عایق‌بندی می‌توان قاب بیرونی را نیز به رنگ سیاه رنگ آمیزی کرد، در این صورت با بالا رفتن ضریب جذب حرارتی و در نتیجه دمای آن، اختلاف دمای آن با قاب درونی کمتر شده و هدر رفت کمتر خواهد شد. ترجیحاً بهتر است پایه نگه دارنده دارای قابلیت تنظیم شیب را داشته باشد تا با بهترین زاویه، صفحات جاذب در معرض نور خورشید قرار بگیرد.



شکل ۸: آب شیرین‌کن پلکانی با بکارگیری پمپ



شکل ۹: روش خنک کاری شیشه به کمک فیلم آب

عوامل مؤثر در افزایش بازده آب شیرین‌کن پلکانی در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: عوامل مؤثر در افزایش بازده آب شیرین‌کن پلکانی

میزان افزایش بازده	روش افزایش بازده
۵۷ درصد	استفاده از صفحه جاذب محدب
۲۹ درصد	استفاده از صفحه جاذب مقعر
۵۶ درصد	استفاده از آینه در سطوح عمودی پلکان
۷۶ درصد	استفاده از پره در سطوح جاذب

۴.۲ آب شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زن-رطوبت‌گیر (SHDD)

در این روش آب شور گرم شده و رطوبت برخاسته جذب هوای در معرض آن می‌گردد. آب شیرین توسط خنک کاری و چگالش قطرات آب از همین هوا تولید می‌شود. این روش در فشار اتمسفر عمل کرده، به همین دلیل در دمایی کمتر از دمای جوش آب می‌توان به تبخیر رسید. روش SHDD نقص‌های روش‌های حوضچه‌ای و پلکانی را برطرف می‌کند. در سیکل SHDD آب و

پلکان استفاده شد که حاصل آن افزایش حدود دو برابری تولید آب شیرین بود.

مسئله مهم دیگر در تولید آب شیرین تأثیر پوشش شفاف دستگاه در تقطیر بخار آب است. جنس پوشش شفاف عموماً از پلاستیک فشرده یا شیشه است. پلاستیک فشرده علی‌رغم ویژگی‌های مثبتی مانند وزن کم و حمل آسان به دلیل رسانش حرارتی کم که از توزیع دمای یکنواخت جلوگیری و در تقطیر اختلال ایجاد می‌کند، کمتر به کار گرفته می‌شود. شیشه با وجود قابلیت شکنندگی به دلیل مقاومت در برابر باد و باران مناسب‌تر است و جهت دریافت بهتر بخار آب و تقطیر بیشتر در آن می‌توان از متاسیلیکات سدیم و هیدروفلوریک اسید استفاده کرد.

توجه به اختلاف دمای شیشه و سطح آب شور: اختلاف دمای سطح تبخیر شونده یا همان سطح آب شور و سطح کندانس کننده یا همان سطح شیشه عامل انتقال حرارت و در نتیجه انجام فرآیند تبخیر و تقطیر است. بنابراین، این اختلاف دما رابطه‌ای مستقیم با میزان تولید آب شیرین دارد. این اختلاف را می‌توان به صورت افزایش دمای آب شور یا کاهش دمای شیشه و یا به صورت همزمان ایجاد کرد.

افزایش دمای آب شور با افزایش دمای آب ورودی به قاب امکان پذیر است. در این صورت می‌توان برای بالا بردن دمای آب ورودی به دستگاه از آب خروجی گرم شده توسط انرژی خورشید با ایجاد یک چرخه و بکارگیری پمپ استفاده کرد (شکل ۸). روش دیگر جهت بالا بردن دمای ورودی استفاده از هیتر خارجی است.

جهت پایین آوردن دمای سطح شیشه از فیلم آب خنک و جاری کردن آن روی سطح بیرونی شیشه استفاده می‌شود (شکل ۹). عوامل مؤثر بر بازدهی در این روش دبی حجمی فیلم آب، دمای ورودی آن، ضخامت فیلم آب و سرعت باد است و باید هر کدام طوری انتخاب شود که بتواند تأثیر منفی سرعت باد بر بازدهی را خنثی کند [۲۳].

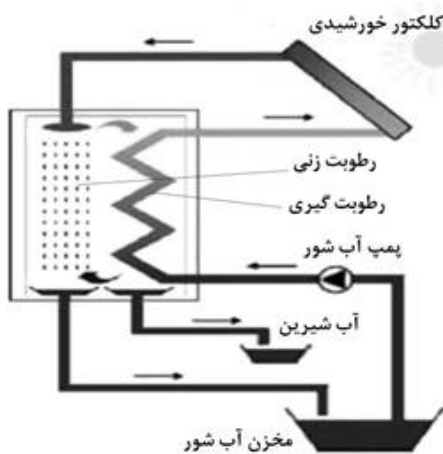
۳.۲ نکاتی در مورد طراحی

جهت طراحی قاب در ابتدا پلکان دستگاه طراحی می‌شود و در این حالت باید طول، عرض و تعداد پلکان تعیین گردد. پس از آن، قاب درونی دستگاه در نظر گرفته شده که پلکان درون آن قرار می‌گیرد. اتصال پلکان به قاب درونی به کمک جوش کاربرد است. سپس آن سمت از پلکان که در مجاورت نور خورشید است رنگ زده می‌شود. اتصال پلکان و قاب درونی باید طوری باشد که از نشت آب جلوگیری کند. در این فرآیند از چسب آکوارיום جهت آب بندی مرز مشترک پلکان و صفحات جانبی قاب درونی استفاده می‌شود. می‌توان در هنگام نصب پلکان درون قاب، فضایی خالی در زیر آن در نظر گرفت و از آن به عنوان منبع ذخیره گرمایی با بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده استفاده کرد، در این حالت دستگاه دارای تولید آب شیرین در شب نیز خواهد بود.

پس از طراحی قاب درونی نوبت طراحی قاب بیرونی دستگاه می‌باشد. ابعاد این قاب باید طوری انتخاب شود که هر وجه آن با وجه متناظر در قاب درونی مقداری فاصله داشته باشد و در این فضای خالی ایجاد شده

گرمایش هوا تا دمای بالایی می‌شود، ولی به دلیل هزینه بالا و استفاده از سوخت فسیلی عملاً برای سیستم کم هزینه مانند SHDD به صرفه نبوده و دمای هوا در این مورد بسیار بالاتر از دمای عملیاتی سیکل مورد نظر است. به همین دلیل گرمای هوا با استفاده از انرژی خورشیدی مناسب‌تر است که به کمک هوا گرم کن خورشیدی انجام می‌گیرد. هوا گرم کن خورشیدی می‌تواند یک کلکتور صفحه تخت حامل سیال هوا باشد و می‌تواند دمای هوا را تا حدود ۸۰ درجه سلسیوس بالا ببرد. مدل‌های مختلفی از سیکل SHDD توسط پژوهشگران طراحی شده و عوامل مؤثر ترمودینامیکی آن بررسی شده است. تفاوت این سیکل‌ها در نحوه چینش دستگاه‌ها و تفاوت در سیکل‌های آب و هوا است. در ادامه سه مدل از آب شیرین‌کن‌های رطوبت‌زن-رطوبت‌گیر معرفی شده است.

۱- رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری به کمک محفظه مشترک: این سیکل به صورت هوا بسته-آب باز بوده و شامل یک محفظه است که از نظر گرمایی جدا شده است. به طوری که در یک طرف آن دوش یا افشانک آب و در طرف دیگر کویل لوله‌های آب خنک قرار دارد. آب شور از جانب دریا به لوله‌های خنک محفظه و بخش کندانسور پمپ شده و پس از تماس با هوای داخل محفظه پیش گرم می‌شود. سپس وارد کلکتور خورشیدی صفحه تخت شده و تا دمایی بین ۸۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس گرم می‌شود. آب شور گرم مجدداً وارد محفظه شده و از طریق دوش آب ریزش می‌کند. قطرات آب گرمای نهان تبخیر خود را از هوای درون محفظه گرفته و تبخیر شده که باعث رطوبت‌زنی هوای محفظه می‌شود. هوای مرطوب در مجاورت کندانسور قرار گرفته و از طریق جابجایی طبیعی تبادل حرارت انجام می‌گیرد. در این حالت قطرات آب شیرین بر روی سطح لوله‌های خنک کننده تشکیل شده و آب شیرین جمع‌آوری می‌شود. آب شور تبخیر نشده نیز از سینک مخصوص خود تخلیه می‌شود (شکل ۱۰). این روش توسط پژوهشگران متعددی بررسی شده که از جمله آن مولر و همکاران [۲۴] در سال ۱۹۹۹ و همچنین چاندراشکارا و یاداو [۶] در سال ۲۰۱۵ می‌باشد.



شکل ۱۰: رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری به کمک محفظه مشترک اواپراتور-کندانسور [۲۴]

۲- رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری به کمک اواپراتور، کندانسور و کلکتور خورشیدی: این روش توسط دلپانیس و بلسیاتیس [۴] در سال ۲۰۱۳

هوا هر کدام گرم شده که گرم شدن هوا ظرفیت حمل رطوبت آن را افزایش می‌دهد، به طوری که یک کیلوگرم هوای خشک می‌تواند نیم کیلوگرم رطوبت و ۲۸۰۵ کیلوژول انرژی را در صورت افزایش دما از ۳۰ به ۸۰ درجه سلسیوس حمل کند [۲]. آب نیز با گرم شدن راحت‌تر به دمای ایده آل جهت تبخیر و رطوبت‌زنی هوا می‌رسد. سیکل‌های آب و هوا هر کدام می‌تواند به صورت باز یا بسته بوده که انتخاب آن‌ها بستگی به طراح آب شیرین‌کن دارد. در این مقاله چند مدل سیکل SHDD با حالت‌های هوا باز-آب بسته و هوا بسته-آب باز توضیح داده می‌شود.

به طور کلی سیکل SHDD چهار فرآیند اصلی را در خود طی می‌کند که شامل رطوبت‌زنی، رطوبت‌گیری، گرمایش آب و گرمایش هوا است.

الف) رطوبت‌زنی: وظیفه این فرآیند، اشباع کردن هوای موجود در محفظه است. در این فرآیند هوا وارد شده و آب شور از طریق اسپری یا دوش‌های آب روی آن پاشیده می‌شود. قطرات آب با گرفتن گرمای نهان خود از هوا تبخیر شده و باعث رطوبت‌زنی هوا می‌شوند. پس از آن هوای مرطوب از بالای محفظه رطوبت‌زن خارج می‌شود.

ب) رطوبت‌گیری: در فرآیند رطوبت‌گیری بخار آب موجود درون هوا به وسیله تبادل حرارتی در بخش رطوبت‌گیر تقطیر یافته و به عنوان آب شیرین ذخیره می‌شود. در رطوبت‌گیری هوای مرطوب به عنوان جسم گرم‌تر در تماس با جسم سردتر قرار دارد. جسم سردتر می‌تواند لوله‌های حامل جریان آب سرد یا آب شور جاری درون خود سیکل باشد. رطوبت‌گیر درون سیکل اصولاً یک مبدل حرارتی یا کندانسور است.

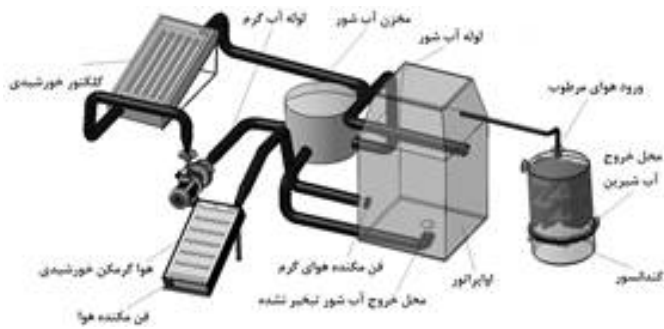
ج) گرمایش آب: گرمایش آب در جهت بالا بردن دمای آب و راحت‌تر تبخیر شدن آن در محفظه اواپراتور یا رطوبت‌زن انجام می‌گیرد. گرمایش آب را می‌توان به کمک سوخت‌های فسیلی و در بویلر، المنت‌های الکتریکی یا در کلکتورهای خورشیدی انجام داد. کلکتورهای خورشیدی به دلیل کم هزینه‌تر بودن و رایگان بودن انرژی گرمایشی آن مناسب‌ترند. چند مورد از کلکتورهای خورشیدی عبارتند از:

۱. کلکتورهای صفحه تخت
۲. کلکتور لوله خلا^۱
۳. کلکتورهای سهموی خطی^۲
۴. کلکتورهای سهموی مرکب^۳

د) گرمایش هوا: هوا دارای میزان مشخصی رطوبت همراه با خود است. زمانی که هوا گرم شده ظرفیت حمل رطوبت افزایش یافته و به همین دلیل رطوبت نسبی آن کاهش می‌یابد. از این رو بعد از رطوبت‌گیری، چگالش بخار بیشتری درون آن انجام گرفته و ظرفیت تولید افزایش می‌یابد. این فرآیند در تمام سیکل‌های SHDD انجام نمی‌گیرد که به دلیل تأثیر پایین آن در افزایش تولید است. گرمایش هوا به وسیله سوخت‌های فسیلی یا انرژی خورشیدی انجام می‌گیرد. جهت گرمایش هوا با سوخت‌های فسیلی از محفظه هوا گرمکن یا کائوپر استفاده شده که درون آن واکنش احتراقی مونوکسید کربن و گاز متان با هوا باعث

¹Evacuated Tube Collector ²Parabolic Trough Collectors ³Compound Parabolic Collectors

آب گرم قرار دارد. آب گرم درون کویل‌ها به کلکتور خورشیدی پمپ شده و در آن گرم می‌شود. آب گرم شده در اثر تبادل حرارتی با آب شور، آن را گرم می‌کند. در نتیجه آب شور با دمای نزدیک به ۴۰ درجه وارد محفظه رطوبت‌زن شده و از طریق مه پاش ریزش می‌کند. از طرفی، هوا نیز از محیط وارد هوا گرم کن خورشیدی شده و پس از گرم شدن توسط انرژی خورشید از زیر وارد اواپراتور می‌شود. هوا پس از رسیدن به حالت اشباع از بالای اواپراتور خارج شده و وارد کندانسور می‌شود. آب شور نیز از سینک مخصوص خود تخلیه شده و به منبع خود باز می‌گردد. جهت تقطیر رطوبت هوا در کندانسور از آب چاه یا آب چیلر در دمای بین ۱۴ تا ۱۷ درجه سلسیوس در کویل‌های خنک کننده کندانسور استفاده می‌شود. هوای مرطوب پس از تبادل حرارتی با لوله‌های خنک کننده به دمای نقطه شبنم رسیده و قطرات آب شیرین از درون آن چگالش می‌یابد. در انتها آب شیرین جمع‌آوری شده و هوا به محیط وارد می‌شود (شکل ۱۲). این سیکل کم هزینه دارای ظرفیت تولید ۲۰ لیتر در روز بوده که برای مصرف خانگی در مناطق گرم و خشک و روستایی مناسب است.



شکل ۱۲: رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری با کندانسور، اواپراتور، هوا گرم کن و کلکتور خورشیدی

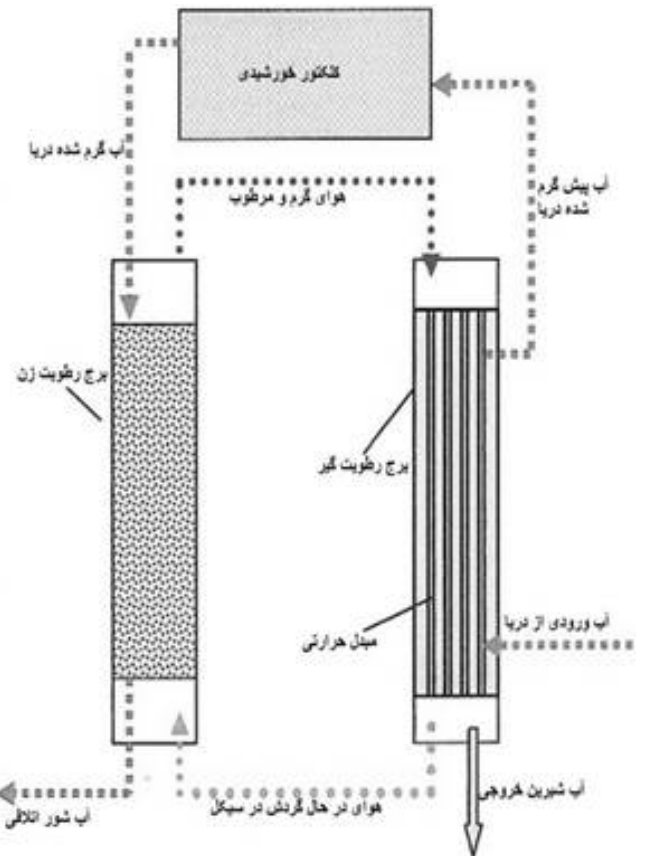
۱.۴.۲ نکاتی جهت بهبود عملکرد آب شیرین‌کن رطوبت‌زن-رطوبت‌گیری

بجز مواردی مانند بالا بردن دمای هوا و استفاده از پکینگ که ذکر شد، موارد متعددی وجود دارد که توجه به آن‌ها در پروسه طراحی و بکارگیری آن‌ها باعث افزایش بازده و ظرفیت تولید می‌شود. معمولاً جهت داشتن ظرفیت بالا در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری از مدل‌های چند تأثیری یا چند مرحله‌ای استفاده می‌گردد که این مورد در خود چند مرحله رطوبت‌گیری و رطوبت‌زنی دارد. از نمونه‌های سیستم‌های چند تأثیری ساخته شده می‌توان به مدل هولست [۲۴] با تولید متوسط ۶ متر مکعب و ماکزیمم ۱۰/۵ متر مکعب در ماه و مدل ساخته شده در مؤسسه بین‌المللی تحقیقات و فناوری تونس (INRST) با تولید ماکزیمم ۵۱۶ لیتر در روز اشاره کرد [۲۵]. با این وجود مسائلی مانند نگهداری کلکتورهای هوا و آب، رطوبت‌زن‌ها و مبدل‌های حرارتی باعث هزینه بر بودن این مدل سیستم‌ها شده است. به طور مثال، مدل طراحی شده در INRST دارای هزینه‌ای بالغ بر ۲۸/۶۵ یورو به ازای هر متر مکعب تولید است [۶].

برای بالا بردن تولید سیستم‌های معمولی تک مرحله‌ای توجه به نکات زیر مهم است:

بالا بردن دمای آب و هوا قبل از ورود به رطوبت‌زن توسط هوا گرم‌کن

بررسی شد. در این مدل آب شور به کار گرفته شده به عنوان مایع خنک کننده در کندانسور استفاده می‌شود. سیکل از نوع هوا بسته-آب باز است. آب شور وارد لوله‌های خنک کننده کندانسور (رطوبت‌گیر) شده و سپس با تبادل حرارتی با هوای مرطوب درون محفظه پیش گرم می‌شود. در مرحله بعد، وارد کلکتور خورشیدی شده و تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس گرم می‌شود. آب گرم خروجی از کلکتور وارد برج رطوبت‌زن شده و از طریق دوش‌های آب ریزش می‌کند. هوا نیز از پایین در خلاف جهت آب از محفظه رطوبت‌گیر وارد اواپراتور شده و رطوبت‌زنی می‌شود. می‌توان جهت بالا بردن سطح انتقال حرارت از پکینگ در برج رطوبت‌زن استفاده کرد [۱]. هوای مرطوب و گرم از بالای محفظه خارج شده و وارد محفظه کندانسور می‌شود که در این بخش با عبور جریان آب شور از درون لوله‌های کندانسور تبادل حرارتی صورت گرفته و باعث تقطیر قطرات آب از هوای مرطوب موجود می‌شود. آب شیرین جمع‌آوری شده و هوای موجود در محفظه دوباره به برج رطوبت‌زن فرستاده می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری به وسیله کندانسور، اواپراتور و کلکتور خورشیدی [۳]

۳- رطوبت‌زنی-رطوبت‌گیری به کمک اواپراتور، کندانسور، کلکتور خورشیدی و هواگرمکن خورشیدی: این روش در سال ۲۰۱۶ توسط جهان‌شاهی و همکارانش [۱] طراحی شد. این سیکل به صورت آب بسته-هوا باز است که از دورریزی آب نیز در آن جلوگیری می‌شود. همچنین به دلیل عدم تماس مستقیم آب شور با کلکتور از خوردگی در کلکتورها جلوگیری می‌شود [۲]. آب شور در یک منبع ذخیره شده و در مجاورت با کویل‌های

ظرفیت تولید نزدیک به ۵۰۰ لیتر آب شیرین در روز هستند که دارای اندازه و هزینه بیشتری خواهند بود و در صنعت، بیمارستان ها، مدارس، پادگان ها و دیگر مکان های عمومی می توانند استفاده شوند.

اما آب شیرین کن های خورشیدی دارای معایبی نیز هستند. آب شیرین کن های خورشیدی عملاً از طلوع تا غروب آفتاب کارایی داشته و حتی روش های ذخیره انرژی جهت تولید آب شیرین مانند مواد تغییر فاز دهنده تأثیر کمی در برابر انرژی خورشیدی دارند. شرایط جوی در هر روز متفاوت است، از این رو عملکرد سیستم ثابت نخواهد بود و ممکن است با خروجی مورد انتظار تفاوت داشته باشد. از طرفی این سیستم ها برای همه مناطق مناسب نبوده و در نواحی سردسیر، آب و هوای ابری و بارانی بازدهی آب شیرین کن به شدت کاهش می یابد. این سیستم ها دارای بازده تبدیل انرژی پایینی هستند، زیرا با دریافت مقدار زیادی از انرژی خورشیدی در طول روز، درصد کمی از آب شور موجود را شیرین می سازند. همچنین در صورت گردش آب شور در سیکل، لوله های حامل (مانند لوله های کلکتور) پس از مدتی دچار رسوب و خوردگی می شوند.

تفاوت آب شیرین کن ها به ساختار داخلی آن ها مربوط می شود. آب شیرین کن های رطوبت زن-رطوبت گیر، ظرفیت تولید بیشتری دارند، در حالیکه آب شیرین کن های حوضچه ای و پلکانی، توانایی ذخیره انرژی به وسیله مواد تغییر فاز دهنده^۱ برای تولید در شب را نیز دارند.

۴ اثر شرایط جوی بر عملکرد آب شیرین کن های خورشیدی

شرایط جوی مانند دمای محیط، سرعت باد، فصل مورد نظر و آفتابی یا ابری بودن (میزان تابش) بر میزان تولید آب شیرین کن های خورشیدی تأثیر گذار است.

آفتابی یا ابری بودن بر تبخیر آب شور و نرخ تولید آب شیرین کن خورشیدی تأثیر گذار است. این مورد در آزمایش شوکلا [۲۶] بر روی آب شیرین کن حوضچه ای با صفحه جاذب سیاه فولادی انجام شد. در آزمایش شوکلا که در روز آفتابی هشت جولای سال ۲۰۱۲ انجام گرفت، میزان تولید آب شیرین کن حوضچه ای ۴۲۹۵ میلی لیتر بر متر مربع در روز بود. در حالی که فردای همان روز در آب و هوای ابری تولید آب شیرین به مقدار ۱۰۹۵ میلی لیتر کاهش یافت.

در شکل ۱۳ میزان تابش و تولید آب در آب شیرین کن خورشیدی در ماه های مختلف سال آمده است.

شکل ۱۳ نشان می دهد که ماه می و ژوئن بیشترین تابش و تولید آب شیرین در روز را دارا هستند و ماه های دسامبر و ژانویه کمترین میزان تولید را به دلیل کم بودن میزان تابش دارا هستند.

در شکل ۱۴ میزان تابش و نرخ تولید آب شیرین در آب شیرین کن های خورشیدی در ساعات مختلف شبانه روز آمده است. با توجه به این شکل بیشترین میزان تابش و تولید آب شیرین مربوط به ساعات بین ۱۲ تا ۱۴ بعد از ظهر است.

و آبگرمکن خورشیدی انجام می گیرد. هرچه دمای آب و هوا بیشتر باشد رطوبت زنی بیشتری انجام خواهد گرفت. از این رو می توان با انتخاب رنگ های تیره برای صفحه جاذب و لوله های حامل سیال هوا و آب میزان جذب انرژی خورشیدی را بیشتر کرد. نصب رفلکتور در ابتدا و انتهای کلکتورها می تواند نور بیشتر و در نتیجه انرژی بیشتری را به درون کلکتور منتقل کند. ضمناً استفاده از صفحه جاذب با سطح زیر نیز دارای انتقال حرارت بیشتری است [۱].

اتلاف حرارت در محفظه های رطوبت زن و رطوبت گیر باعث پایین آمدن دمای عملیاتی و کاهش بازدهی تولید می شود. از این رو این دو محفظه به کمک عایق های الاستومری، یونولیتی، پشم شیشه و ... عایق بندی می شود. عایق بندی دیواره و کف هواگرم کن و آبگرمکن خورشیدی نیز جهت جلوگیری از افت دما مطلوب است [۱]. جهت جلوگیری از نشی آب و هوا در رطوبت زن و رطوبت گیر باید در هنگام طراحی آن ها را آب بندی و هوا بندی کرد. در این صورت می توان از جوشکاری کاربید و چسب آکواریوم استفاده نمود.

کاهش میزان دمای آب ورودی به رطوبت گیر باعث ایجاد اختلاف دمای بیشتر با هوای ورودی و در نتیجه تبادل حرارتی بیشتر شده که حاصل آن کاهش دمای هوای خروجی، کاهش میزان رطوبت هوا و به موازات آن افزایش تولید آب شیرین است [۱]. مطلوب است جهت بالا بردن سطح انتقال حرارت در لوله های کندانسور از پره استفاده شود. در انتها دبی آب ورودی به کندانسور باید کنترل شود.

پایین بودن دبی آب ورودی به کندانسور باعث افزایش اختلاف دمای آب ورودی و خروجی از کندانسور می شود. این عامل سبب شده انتقال حرارت در انتهای مسیر خنک کننده کمتر شده و میزان تقطیر آب کاهش یابد. از این رو با افزایش دبی آب ورودی به رطوبت گیر این اختلاف دما کاهش یافته و انتقال حرارت بر روی سطح خنک کننده به صورت یکنواخت انجام می گیرد. طبق آزمایشات انجام گرفته توسط جهانشاهی و همکارانش [۱]، افزایش دبی آب ورودی از یک میزان به بعد عملاً تأثیر چندانی در اختلاف دما، انتقال حرارت و تولید آب شیرین نخواهد داشت.

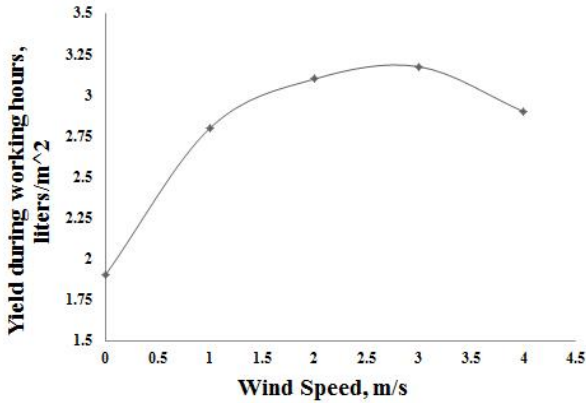
۳ مقایسه انواع مختلف آب شیرین کن خورشیدی

آب شیرین کن های خورشیدی دارای انرژی رایگان، طراحی ساده و کم هزینه، اشغال فضای کم، بدون آلودگی های زیستی و پسماند و بدون تولید سر و صدا هستند. از دیگر مزایای این سیستم ها کم بودن میزان ناخالصی در آن ها در مقایسه با روش های معمولی تصفیه آب است. میزان ناخالصی در آب شیرین تولید شده در آب شیرین کن های خورشیدی در حدود ۱۰ ppm تا ۱۵ ppm و در روش های معمولی ۶۰ ppm تا ۷۰ ppm است.

مدلهایی که دارای ظرفیت تولید بین ۵ تا ۴۰ لیتر آب شیرین در روز هستند قابلیت تأمین بخشی از آب شیرین در مصارف خانگی، آبیاری مزارع، کشاورزی و گلخانه را دارا هستند. این مدل ها شامل حوضچه ای، پلکانی و رطوبت زن-رطوبت گیر هستند. مدل های چند مرحله ای و آب شیرین کن هایی که از کلکتورهای متمرکز کننده نور خورشید در آن ها استفاده شده است دارای

¹Phase Changed Material (PCM)

شفاف کنندانس کننده و هوای اطراف بیشتر خواهد شد. در نتیجه اختلاف دما بین سطح تقطیر کننده و سطح آب شور در حال تبخیر افزایش می‌یابد؛ از این رو انتقال حرارت و نرخ تبخیر و میعان افزایش خواهد یافت. طبق شکل ۱۶ برای آب شیرین‌کن حوضچه‌ای افزایش سرعت باد تا یک میزان مشخص می‌تواند نرخ تولید آب شیرین را افزایش دهد.



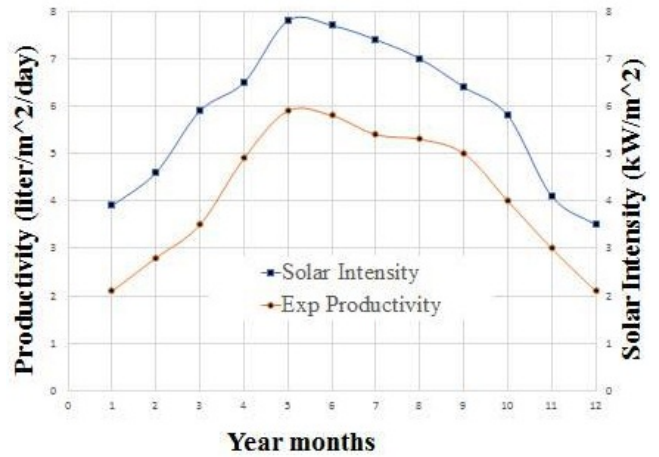
شکل ۱۶: تغییرات تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای با سرعت باد [۳۰]

۵ نتیجه‌گیری

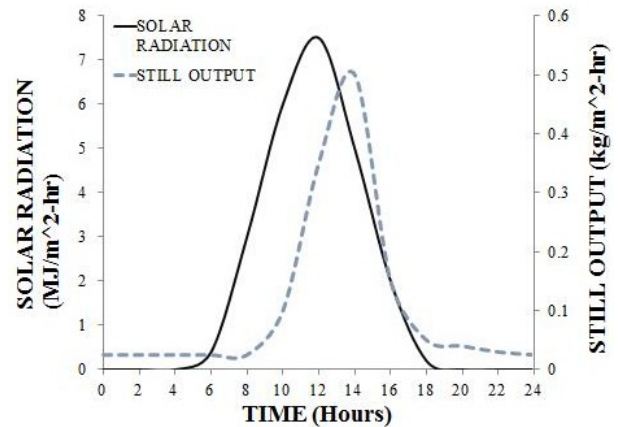
در این مقاله ساختار داخلی و نحوه عملکرد سه نوع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی (حوضچه‌ای، پلکانی، رطوبت‌زن-رطوبت‌گیر) بررسی شد. روش حوضچه‌ای یکی از روش‌های تقطیر آب در حجم‌های کم و خانگی است. از مزایای این روش می‌توان به ارزان و ساده بودن آن اشاره کرد. روش حوضچه‌ای نیاز به مصرف زیاد انرژی برای تولید آب شیرین نداشته و همچنین تولید گازهای خطرناک نمی‌کند. نرخ تولید آب شیرین در روش پلکانی نسبت به حوضچه‌ای بالاتر است. آب شیرین‌کن‌های رطوبت‌زن-رطوبت‌گیر، ظرفیت تولید بیشتری نسبت به دو نوع دیگر دارند، در حالیکه آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای و پلکانی، توانایی ذخیره انرژی برای تولید در شب را نیز دارند. همچنین با بررسی شرایط جوی مشخص می‌شود با افزایش شدت تابش، دمای محیط و سرعت باد نرخ تولید آب در آب شیرین‌کن خورشیدی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Jahanshahi, Ebrahim, Hosseinkhani, Ali, and Moahm-madi, Seyed Mohammad Hojat. Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12):239-248, 2017.
- [2] Qiblawey, Hazim Mohameed and Banat, Fawzi. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220(1-3):633-644, 2008.
- [3] Kalogirou, Soteris A. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in energy and combustion science*, 31(3):242-281, 2005.

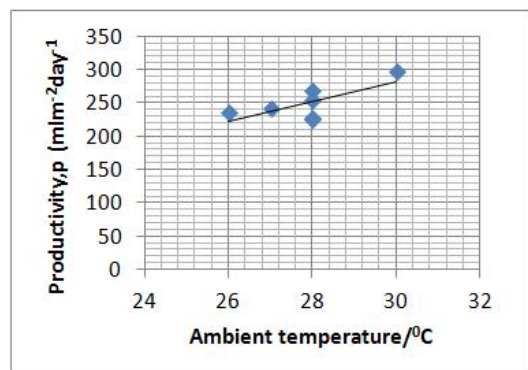


شکل ۱۳: میزان تابش و تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی در ماه‌های مختلف سال میلادی [۲۷]



شکل ۱۴: نمودار تغییرات تابش و میزان تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی در ساعات مختلف شبانه روز [۲۸]

به طور بدیهی می‌توان پیش بینی کرد که هر چه دمای محیط بیشتر باشد، میزان تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی بیشتر خواهد بود. زیرا با بالا رفتن دمای محیط، نرخ تبخیر بیشتر شده و نرخ تقطیر نیز به موازات آن افزایش می‌یابد. به همین دلیل در تابستان بیشترین میزان تولید آب شیرین وجود دارد. شکل ۱۵ نشان دهنده چنین پدیده‌ای است که با افزایش دمای محیط، میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵: نمودار تغییرات تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی با دمای محیط [۲۹]

وقتی سرعت جریان باد افزایش می‌یابد، نرخ انتقال حرارت بین پوشش

- [20] Gawande, Jagannath S and Bhuyar, Lalit B. Effect of shape of the absorber surface on the performance of stepped type solar still. *Energy and Power Engineering*, 5(08):489, 2013.
- [21] El-Samadony, YAF, Abdullah, AS, and Omara, ZM. Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser. *Experimental Heat Transfer*, 28(4):392-404, 2015.
- [22] Velmurugan, V, Kumaran, S Senthil, Prabhu, V Niranjana, and Srithar, K. Productivity enhancement of stepped solar still—performance analysis. *Thermal Science*, 12(3):153-163, 2008.
- [23] El-Samadony, YAF and Kabeel, AE. Theoretical estimation of the optimum glass cover water film cooling parameters combinations of a stepped solar still. *Energy*, 68:744-750, 2014.
- [24] Müller-Holst, H, Engelhardt, M, and Schölkopf, W. Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design. *Desalination*, 122(2-3):255-262, 1999.
- [25] Houcine, Imed, BenAmara, Mahmoud, Guizani, Amanallah, and Maâlej, Mohammed. Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multiple-effect-humidification technique. *Desalination*, 196(1-3):105-124, 2006.
- [26] Shukla, SK. Application of solar distillation systems with phase change material storage. in *Modern Mechanical Engineering*, pp. 15-42. Springer, 2014.
- [27] Ithape, Prachi K, Barve, SB, and Nadgire, AR. Climatic and design parameters effects on the productivity of solar stills: A review. *International Journal of current engineering and scientific research*, 4(7):17-23, 2017.
- [28] Abujazar, Mohammed Shadi S, Fatihah, S, Rakmi, AR, and Shahrom, MZ. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination*, 385:178-193, 2016.
- [29] Babalola, TA, Boyo, AO, and Kesinro, RO. Effect of water depth and temperature on the productivity of a double slope solar still. *Journal of Energy and Natural Resources*, 4(1):1-4, 2015.
- [30] Panchal, Hitesh N and Patel, Sanjay. Effect of various parameters on augmentation of distillate output of solar still: a review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 1(1):4, 2016.
- [4] Delyannis E, Belessiotis V. Solar water desalination, national center for scientific research “demokritos”. *Athens, Greece*, 2013.
- [5] Kabeel, AE, Omara, ZM, and Younes, MM. Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46:178-188, 2015.
- [6] Chandrashekara, M and Yadav, Avadhesh. Water desalination system using solar heat: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:1308-1330, 2017.
- [7] El-Haggar, SM and Awn, AA. Optimum conditions for a solar still and its use for a greenhouse using the nutrient film technique. *Desalination*, 94(1):55-68, 1993.
- [8] Nassar, Yasser Fathi, Yousif, Saib A, and Salem, Abubaker Awidat. The second generation of the solar desalination systems. *Desalination*, 209(1-3):177-181, 2007.
- [9] Fath, Hassan ES. Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment. *Desalination*, 116(1):45-56, 1998.
- [10] El-Bahi, A and Inan, D. A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. *Desalination*, 123(1):79-83, 1999.
- [11] Almuhan, Emad A et al. Evaluation of single slope solar still integrated with evaporative cooling system for brackish water desalination. *Journal of Agricultural Science (Toronto)*, 6(1):48-58, 2014.
- [12] Fath, Hassan ES. High performance of a simple design, two effect solar distillation unit. *Desalination*, 107(3):223-233, 1996.
- [13] Al-Hamadani, Ali AF and Shukla, SK. Performance of single slope solar still with solar protected condenser. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 28(2):6-28, 2013.
- [14] Xiong, Jianyin, Xie, Guo, and Zheng, Hongfei. Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface. *Energy Conversion and Management*, 73:176-185, 2013.
- [15] Tiwari, GN, Kupfermann, A, and Aggarwal, Shruti. A new design for a double-condensing chamber solar still. *Desalination*, 114(2):153-164, 1997.
- [16] Nijegorodov, Nikolai, Jain, Pushpendra K, and Carlsson, Stig. Thermal-electrical, high efficiency solar stills. *Renewable energy*, 4(1):123-127, 1994.
- [17] Kabeel, AE, Omara, ZM, and Essa, FA. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach. *Energy conversion and management*, 78:493-498, 2014.
- [18] Kabeel, AE, Omara, ZM, and Essa, FA. Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum. *Energy conversion and management*, 86:268-274, 2014.
- [19] Omara, ZM, Kabeel, AE, and Essa, FA. Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still. *Energy Conversion and Management*, 103:965-972, 2015.