

بررسی تجربی یک سیستم ترکیبی آب شیرین کن خورشیدی تبخیری ۱،۵ لیتری با استفاده از لوله حرارتی و پنل خورشیدی

پیام هوشمند^۱

دانشجوی دکترا

محمد بهشاد شفیعی^۲

استاد

رامین روشندل^۳

دانشیار

در این مقاله به بررسی یک نوع آب شیرین کن خورشیدی تبخیری به منظور شیرین سازی آب شور پرداخته شده است. از اهداف اصلی این مقاله ساخت تجربی دستگاه آب شیرین کن با بهره گیری از فناوری های پنل خورشیدی و لوله حرارتی همزمان در یک سیستم می باشد، ظرفیت تولید آب شیرین ۱،۵ لیتر در روز و توان پنل خورشیدی ۸۰ وات می باشد. با توجه به بازده پایین تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی توسط سیستم فتوولتائیک، انرژی تلف شده در این سیستم توسط لوله حرارتی بازیابی می گردد تا علاوه بر کاهش دمای صفحه فتوولتائیک سبب افزایش راندمان آن شود. بررسی تاثیر عمق آب در سینی و همچنین تاثیر حضور فن در داخل مخزن نیز انجام شد و در نهایت میزان تولید آب شیرین در حالت اکتیو و پسیو بررسی گردید. نرخ تولید در حالت اکتیو با فن و حالت پسیو به ترتیب $0,355$ و $0,406$ (kg/m^2h) بدست آمد.

واژه های راهنما: آب شیرین کن خورشیدی تبخیری، لوله حرارتی، پنل خورشیدی، عمق بهینه آب، شدت تابش، راندمان تولید آب شیرین.

۱- مقدمه

کل آب موجود در کره زمین ۱۳۸۶ میلیون کیلومتر مکعب (۱,۳۸۶ میلیارد متر مکعب) است که در سه لایه اتمسفر (بالای زمین)، بیوسفر یا زیست کره (روی زمین)، لیتوسفر یا سنگ کره (زیرزمین) دیده می شود. این حجم حدود ۷۰٪ (نزدیک به ۳۶۰ میلیون از ۵۱۰ میلیون کیلومتر مکعب) از کره زمین را پوشانده است، ولی سهم کمی از آب های موجود برای مصارف بهداشتی و کشاورزی قابل استفاده می باشد. از نظر مقدار و حجم، حدود ۹۷ درصد از آب های موجود در سیاره ی زمین در اقیانوس ها و دریاها شور بوده که به علت محلول بودن نمک ها خصوصا نمک طعام غیر قابل استفاده است و قریب به ۲,۸ درصد از آب های کره زمین شیرین هستند و در رودها، یخچال ها، دریاچه ها، اتمسفر و زیرزمین موجودند که درصد توزیع آنها در شکل (۱) قابل مشاهده است.

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی و علوم، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران payam.hooshmand@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران behshad@sharif.edu

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران roshandel@sharif.edu

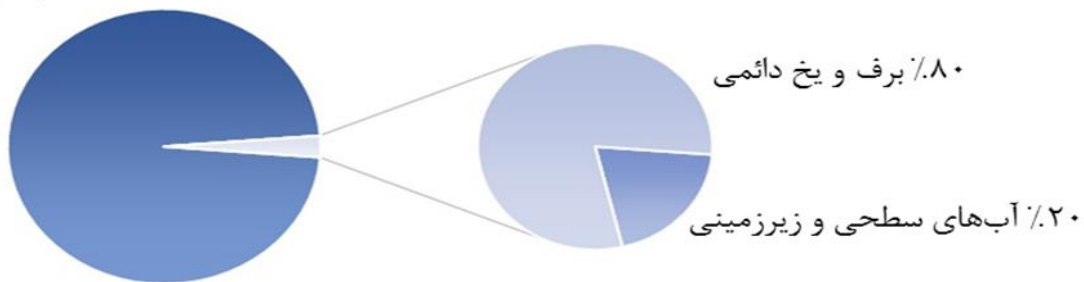
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۰۵، تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۴

آب شیرین یعنی آبی که کمتر از ۰,۰۵ در هر ۱۰۰ واحد، املاح نمکی غیر حل شدنی داشته باشد. آب اقیانوس ها و دریاها شور بوده و استفاده از آنها مستلزم تصفیه کردن است که این امر به سرمایه گذاری برای احداث تأسیسات آب شیرین کن نیاز دارد [۱]. بخش‌هایی از جنوب کشور به خصوص استان‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان از این آب شیرین کن ها استفاده می کنند. دو طبقه بندی کلی برای فناوری های شیرین سازی وجود دارد، شیرین سازی حرارتی (استفاده از حرارت) و شیرین سازی غشایی یا اسمز معکوس (استفاده از فشار بالا با استفاده از غشاء).

جدول (۱) فناوری های عمده در این حوزه را نشان می‌دهد [۳]. فن آوری آب شیرین کن ها در حال حاضر با سه چالش تخریب محیط زیست، بالا بودن هزینه تمام شده و وابستگی تجهیزات به خارج از کشور مواجه است. تولید هر متر مکعب آب شیرین ۵۰ تا ۸۰ سنت هزینه دارد، که این مقدار به طور مستمر در حال کاهش است. در شکل (۲) سمت چپ منابع جدید تامین آب تا سال (۲۰۵۰) که در این بین آب شیرین کن‌ها درصد بالایی را به خود اختصاص داده است و همچنین سمت راست وضعیت جهانی کاربرد فناوری شیرین سازی آب بر پایه انرژی های تجدیدپذیر بر اساس نوع فناوری را نشان می‌دهد [۴].

از اهداف اصلی این مقاله ساخت تجربی دستگاه آب شیرین کن با بهره گیری از فناوری های پنل خورشیدی و لوله حرارتی همزمان در یک سیستم می‌باشد. در بخش تجربی، هدف بررسی کامل با توجه به پیکره سیستم براساس شرایط جغرافیایی نظیر تاثیر شدت تابش، عمق آب شور، استفاده از فن بر تولید آب شیرین و همچنین بررسی عملکرد سیستم در حالت پسیو (سیستم بدون لوله حرارتی و پنل خورشیدی به حالت پسیو تبدیل شود) می‌باشد. در این سیستم از یک فن در داخل مخزن جهت افزایش نرخ انتقال حرارت و میعان استفاده شده است که تاثیر چشم گیری بر عملکرد و بازده کلی سیستم دارد. بعد از تشریح مراحل ساخت سیستم آب شیرین کن خورشیدی، تست سیستم و استخراج نتایج تجربی انجام گرفت و به تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته شد.

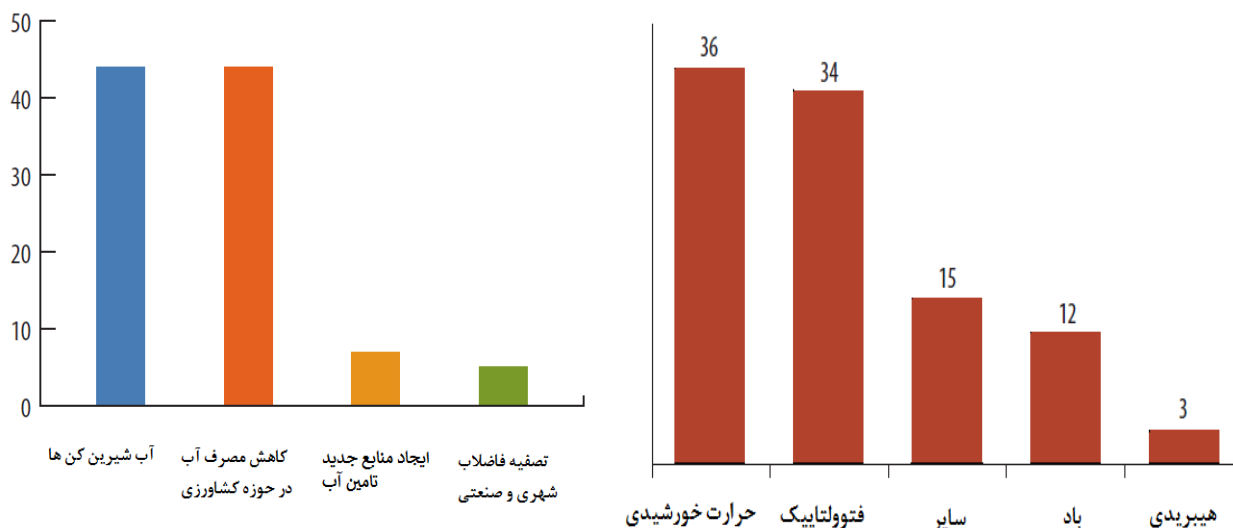
آب اقیانوس‌ها ۹۷/۵٪



شکل ۱- نمودار حجم آب های جهان به اشکال مختلف [۲]

جدول ۱- فناوری‌های اصلی در زمینه آب شیرین کن ها

تکنولوژی های غشایی	تکنولوژی های حرارتی
Reverse Osmosis, RO	Multi Stage Flash, MSF
Electrodialysis, ED	Multi Effect Distillation, MED
	Vapor Compression, VC

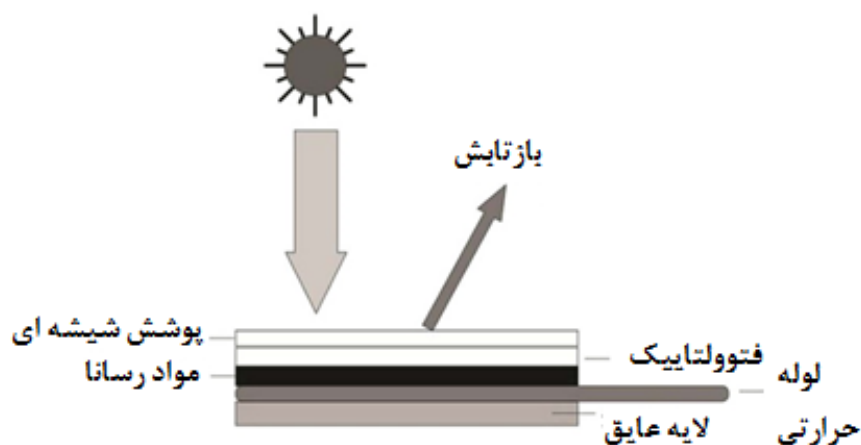


شکل ۲- منابع جدید تامین آب تا سال ۲۰۱۵ (سمت چپ) و وضعیت جهانی کاربرد فناوری شیرین سازی آب بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس نوع فناوری (سمت راست) [۴]

۱-۱- تشریح تئوری سیستم

در این سیستم آب شیرین کن، که از ترکیب فناوری‌های الکتریکی، حرارتی و یک فناوری انتقال حرارت تشکیل شده است، به جای استفاده از کلکتور صرف حرارتی از یک پنل خورشیدی که هم نقش کلکتور حرارتی و هم تولید انرژی الکتریکی را دارد، استفاده شده است، تا علاوه بر تولید الکتریسیته، انرژی حرارتی خورشید را جذب کند و از طریق لوله‌های حرارتی که در پشت پنل اتصال داده شده‌اند به مخزن آب شیرین کن که در اثر فرآیند تبخیر و میعان (تقطیر) تولید آب شیرین می‌کند، منتقل شود. شماتیک نحوه قرارگیری پنل خورشیدی و لوله حرارتی در شکل (۳) نشان داده شده است.

شماتیک کلی سیستم در شکل (۴) نشان داده شده است به طوری که ابتدا آب شور وارد مخزن آب شیرین کن می‌شود، با تابش خورشید به سطح فتوولتائیک، قسمتی از انرژی ورودی تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود و بقیه آن در قالب حرارت تلف می‌شود.



شکل ۳- شماتیک نحوه قرارگیری پنل خورشیدی و لوله حرارتی و صفحه عایق

از توان تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی جهت تامین انرژی الکتریکی مصرفی در فن و تجهیزات خارج از سیستم استفاده می‌گردد. انرژی حرارتی بازیابی شده توسط لوله‌های حرارتی، به مخزن آب منتقل می‌گردد و عملیات شیرین سازی انجام می‌گیرد. در این سیستم از یک فن در داخل مخزن جهت افزایش نرخ انتقال حرارت و میعان سریعتر استفاده می‌شود که تاثیر چشم گیری بر عملکرد و بازده سیستم دارد. انرژی فن نیز توسط پنل تامین می‌گردد. آب شور در اثر انتقال حرارت توسط لوله حرارتی تبخیر شده و بخار حاصله در داخل مخزن صعود می‌کند و با برخورد به پوشش مخزن و تبادل حرارتی با فضای خارج که دمای پایین تری دارد، عمل میعان انجام می‌گیرد و با توجه به شیب پوشش شیشه ای هدایت می‌شوند و از طرفی دیگر بخار تجمع شده روی دیواره های مخزن نیز در اثر فرآیند بیان شده تبدیل به آب شیرین می‌شوند. در نهایت با تجمع قطرات، آب شیرین حاصل از فرآیند شیرین سازی تولید می‌گردد. یکی از پارامترهای مهم، محاسبه بازده یا عملکرد سیستم شیرین سازی مطابق رابطه زیر است:

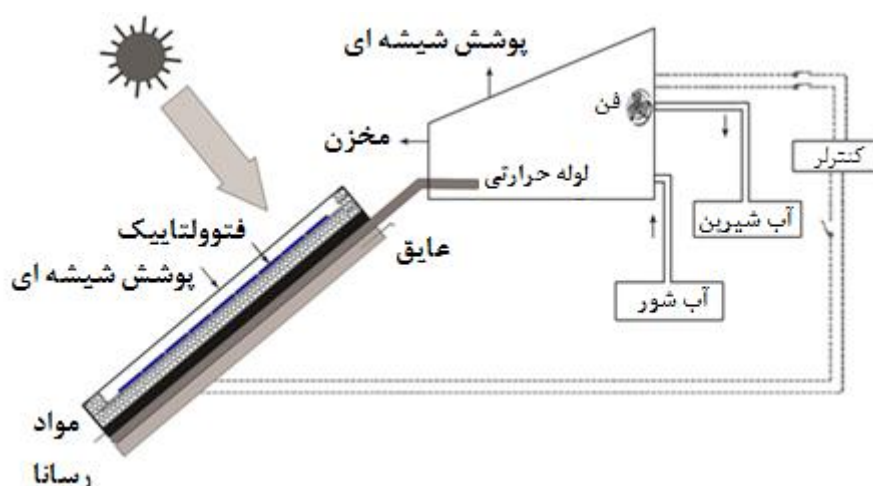
$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot h_{fg} + (W_{pv} - W_{fan})}{IA_{pv} + I' A_{basin}} \quad (1)$$

که در این رابطه η بازده سیستم، \dot{m} دبی آب شیرین تولید شده بر حسب کیلوگرم بر ثانیه، h_{fg} حرارت نهان آب، I و I' شدت تابش بر حسب وات بر متر مربع، A مساحت موثر بر حسب متر مربع برای قسمت های مربوطه و W هم کار مصرفی و تولیدی توسط فن و پنل هستند.

۱-۲- مروری بر ادبیات

زاخارچینکو و همکارانش [۵] به بررسی سیستم گرمایشی آب در ترکیب فتوولتائیک و کلکتور پرداختند. دریافتند که برای رسیدن به بازده بالاتر نیازی به یکسان بودن مساحت پنل و کلکتور نیست و برای فعالیت پنل در دماهای پایین، مدول باید قسمت دما پایین کلکتور را بپوشاند. همچنین به این نتیجه رسیدند با ایجاد تماس حرارتی مناسب بین مدول و کلکتور می توان به میزان ۱۰٪ افزایش تولید در میزان توان را از پنل داشت. جی و همکارانش [۶] یک سیستم حرارتی جهت گرمایش آب بر اساس فتوولتائیک از جنس آلایژ آلومینیوم ساختند. سیستم آنها بازده حرارتی روزانه تقریبا ۴۰٪ و صرفه جویی بالای ۶۵٪ را بر اساس چرخش طبیعی آب نشان داد. چو و همکارانش [۷] به بررسی و آنالیز انرژی و انرژی عملکرد سیستم کلکتور فتوولتائیک حرارتی با و بدون پوشش شیشه ای روی فتوولتائیک پرداختند.

گمکال و داتا [۸] یک تقطیر کن خورشیدی دو شیب را با استفاده از اجزا آلومینیومی ساختند. در این تقطیر کن از یک فیلم پلی اتیلن سیاه در کف مخزن و عایق بندی آن استفاده کردند. آنها میزان تولید ۲،۵۱ لیتر بر متر مربع در روز و بازده ۲۸٪ را در یکی از شهرهای هند بدست آوردند. من و گارگ [۹] خروجی میزان تقطیر را تابعی از شرایط آب و هوایی، خصوصیات ترموفیزیکی مواد سازنده، جهت دستگاه، زاویه پوشش شیشه ای، عمق آب، نشستی بخار و سایر پارامترهای عملکردی بیان نمود. آنها اتلاف حرارتی ۲۶٪ را از کف تقطیر کن گزارش کردند و عایق نمودن آن را پیشنهاد کردند.



شکل ۴- شماتیک سیستم

ال هینای و همکارانش [۱۰] به مطالعه تاثیرات آب و هوایی، طراحی و پارامترهای عملیاتی بر بازده تقطیرکن پرداختند و ضخامت بهینه ۰،۱ متری برای عایق را پیشنهاد کردند. آنها عمق بهینه آب را در بازه ۲ تا ۶ سانتی متری پیشنهاد نمودند. همچنین افزایش بازده ۸،۲٪ در صورت افزایش دمای آب ورودی از ۲۳ به ۳۳ درجه سانتی گراد را گزارش کردند.

ال سیبای [۱۱] تقطیرکن های پسیو و اکتیو با طرح های مختلفی را بررسی نمود. هدف وی بررسی تاثیر سرعت باد، دمای سطح پوشش شیشه ای و آب و همچنین عمق آب بر میزان بازدهی بود. او عمق بهینه آب را ۵ سانتی متر معرفی نمود و افزایش سرعت باد را باعث افزایش میزان بازده بیان کرد. وروپولوس و همکارانش [۱۲] کوپل کردن یک تقطیرکن خورشیدی با یک تانک ذخیره متصل به کلکتور صفحه تخت را بررسی کردند و دو برابر شدن میزان آب تولیدی در یک شبانه روز را در مقایسه با تقطیرکن پسیو گزارش کردند. تیواری و همکارانش [۱۳] یک مدل حرارتی برای ترکیب تقطیرکن خورشیدی اکتیو با چند مدل مختلف کلکتورهای خورشیدی توسعه دادند. تحقیقات با عمق آب ۵ سانتی متر انجام شد.

در این تحقیق سیستم های مختلف شیرین سازی اکتیو بررسی شد. در کاری دیگر آقای کومار و تیواری [۱۴] یک تقطیرکن خورشیدی پسیو و یک تقطیرکن خورشیدی اکتیو شامل کلکتور و پنل خورشیدی را بررسی و ساختند، آزمایشات در عمق های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متر آب شور انجام گرفت که بیشترین میزان آب دهی مربوط به عمق ۵ سانتی متر، به میزان ۲،۶۶ کیلوگرم و ۷،۲۲ کیلوگرم آب شیرین روزانه به ترتیب برای پسیو و اکتیو بود. آنها همچنین دریافتند که سیستم اکتیو دارای میزان آب دهی ۳،۲ تا ۵،۵ برابر بیشتر به نسبت سیستم پسیو به ترتیب برای ماه های تابستان و زمستان می باشد. کابیل و ال آگوز [۱۵] یک تقطیرکن خورشیدی تک اثره و همچنین تقطیرکن خورشیدی کوپل شده با تجهیزات مختلف از جمله پایه گردان، مواد تغییر فاز دهنده و ... را بررسی کردند. آنها استفاده کردن از پایه گردان را نسبت به پایه ثابت که منجر به افزایش نرخ تولید می شد، تشریح کردند. لوله های حرارتی تجهیزاتی هستند که دارای هدایت حرارتی بسیار بالایی بوده و توانایی انتقال حرارت بدون افت را دارا می باشند.

از این رو یک لوله حرارتی و یک کلکتور خورشیدی می‌توانند در ترکیب با هم یک طراحی مناسبی برای سیستم های کلکتور حرارتی- فتوولتاییک داشته باشند. براساس مفهوم ترکیب شدن لوله های حرارتی و پنل های صفحه مسطح خورشیدی در قالب یک واحد، یک کلکتور لوله حرارتی - فتوولتاییک توسط پی گانگ [۱۶] طراحی و ساخته شد. کلکتور فتوولتاییک حرارتی می‌تواند در مناطق سرد بدون یخ زدگی استفاده شود و پدیده خوردگی در آن کاهش یابد. عملکرد این سیستم در دانگوان چین هم به صورت تجربی و هم عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش افزایش بازده حرارتی برای کلکتور و افزایش بازدهی فتوولتاییک مشاهده شد. پی گانگ [۱۷] در پژوهشی دیگر، یک مدل برای پیش بینی عملکرد سالیانه این سیستم در شرایط جغرافیایی ارائه کرد، همچنین انرژی مورد نیاز برای داغ کردن آب را محاسبه نمود.

در این پژوهش رفتار الکتریکی و حرارتی سیستم در دو حالت بررسی گردید (با استفاده از تجهیزات گرمایشی کمکی - بدون استفاده از تجهیزات گرمایشی کمکی). عملکرد سیستم در سه ناحیه با شرایط آب و هوایی و دمای متفاوت انجام شد. شفییعی و همکارانش [۱۸] به بررسی تجربی استفاده از لوله حرارتی ترموسیفون و لوله خلا بر عملکرد تقطیرکن های خورشیدی پرداختند. در پژوهش آنها سیستم آب شیرین کن اصلاح شده با لوله حرارتی ترموسیفون به عنوان یک وسیله با قابلیت هدایت حرارتی سریع و بالا شناخته شد. نتایج نشان دادند که یک افزایش قابل توجه در نرخ تولید آب شیرین در حدود $1,02 \text{ Kg/m}^2\text{h}$ و حداکثر بازده ۲۲,۹٪ بدست آمد. به علاوه عمق بهینه آب در مخزن در حدود ۲ سانتی متر اندازه گیری شد. ابول اینین و همکارانش [۱۹] عملکرد تقطیرکن های خورشیدی در زوایای مختلف از ۱۰ تا ۵۰ درجه را بررسی کردند. همچنین به بررسی تاثیر شیب پوشش بر انتقال حرارت و جرم داخلی پرداختند. تامله عملکرد سیستم تقطیر خورشیدی را با قرار دادن یک فن ۱۰ وات بر روی شیشه به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج، اقتصادی بودن استفاده از فن و همچنین افزایش ۲۵٪ را نسبت به سیستم تقطیر با انتقال حرارت جابجائی طبیعی نشان می‌دهد.

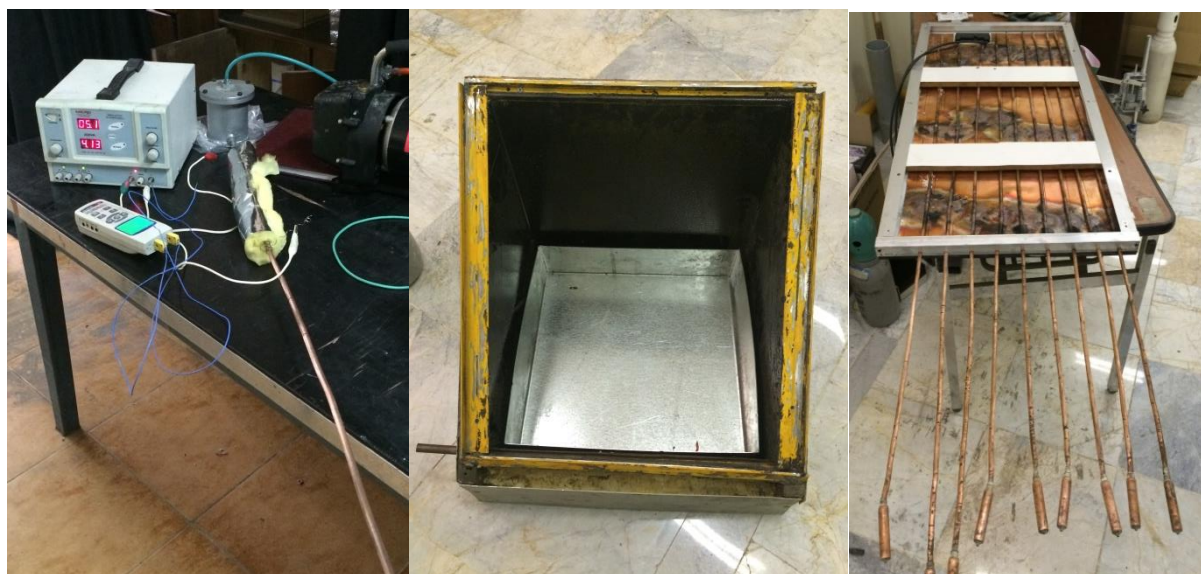
میزان بازده در این روش های اکتیو شیرین سازی به سرعت در حال افزایش است در این بین اگر از سلول های خورشیدی بهره گرفته شود، انرژی حرارتی سلول های خورشیدی از پشت جریان می‌یابد که به درستی از آن بهره گرفته نمی‌شود. در پنل های خورشیدی استاندارد، برای دماهای بالای ۲۵ درجه سانتی گراد، به ازای هر ۱ درجه سانتی گراد افزایش دما ۰,۵٪ کاهش راندمان پنل خواهیم داشت [۲۶]. مفهوم سیستم هیبریدی در این تحقیق ترکیب سلول خورشیدی و لوله حرارتی است به طوری که تابش خورشید به سطح سیستم فتوولتاییک باعث تولید انرژی الکتریکی با بازده ۹٪ الی ۱۲٪ می‌شود و حرارت تلف شده جهت گرم کردن آب یا هوا استفاده می‌شود.

بیش از ۸۰٪ از میزان تابش خورشیدی تابیده شده به سطح فتوولتاییک یا منعکس خواهد شد یا به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. از آنجا که بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی توسط سیستم فتوولتاییک قریب به ۱۲٪ می‌باشد از این رو انرژی تلف شده در این سیستم توسط لوله حرارتی بازیابی می‌گردد تا علاوه بر کاهش دمای صفحه فتوولتاییک و افزایش راندمان آن، مابقی انرژی حرارتی بازیابی گردد. پس این سیستم را می‌توان به عنوان یک سیستم CHP در نظر گرفت که دارای دو هدف اصلی می‌باشد: ۱- تولید آب شیرین ۲- بازیابی حرارت تلف شده از سیستم فتوولتاییک و ارتقای راندمان آن.

۲- تشریح سیستم

۲-۱- تشریح تجربی سیستم

تمام عملیات ساخت و انجام آزمایش در تهران (دانشگاه صنعتی شریف)، ایران انجام شد (عرض جغرافیایی ۳۵،۴۲ درجه، طول جغرافیایی ۵۱،۳۵ درجه و ارتفاع ۱۱۷۲ متر از سطح دریا). سیستم مورد مطالعه از سه بخش متصل به هم ساخته شده است، بخش اول شامل مخزن آب شیرین کن می باشد که فرآیند تقطیر (شامل تبخیر و میعان) در آن صورت می گیرد و از یک پوشش شیشه ای شفاف با ابعاد (۵۲cm×۴۶cm) استفاده شده است، همچنین ابعاد خارجی کف مخزن هم برابر (۵۰cm×۵۰cm) می باشد. در داخل مخزن از یک سینی مجزا استفاده شده است تا در صورت تبخیر آب شور و میعان آن روی دیواره ها، آب شیرین تولید شده مجددا وارد مخزن نگردد و با ایجاد فاصله ای بین دیواره اصلی و سینی باعث هدایت آب تولید شده با تعبیه یک خروجی به منبع ذخیره آب شیرین می شود. با اسپری مات فضای داخل مخزن، سیاه رنگ شده است تا میزان جذب نور خورشید حداکثر گردد. بخش دوم شامل یک پنل خورشیدی ۸۰ وات مدل شارپ NE-080T1J می باشد که ابعاد آن (۱۱۶cm×۵۲cm) می باشد که هم پوشش شیشه ای و هم پنل خورشیدی با زاویه ۳۵ درجه نسبت به راستای افقی قرار داده شده اند که زاویه بهینه برای عملکرد مناسب در آب شیرین کن های تهران می باشد [۲۰، ۲۱]. بخش سوم شامل هیت پایپ از نوع ترموسیفون می باشد که تعداد ۹ لوله حرارتی از جنس مس با طول تقریبی ۱۸۰cm ساخته شدند و سیال عامل جابجایی حرارت در این لوله ها که با استفاده از پمپ خلا ساخته شدند، استون در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۵) تمامی این لوله ها بر روی یک صفحه مسی به ضخامت ۰،۷mm جوش داده شدند تا تمامی حرارت جا به جا شده از طریق صفحه به این لوله ها انتقال یابد. تست عملکرد لوله حرارتی پس از ساخت نیز انجام شد که از طریق تغییر دمای طولی لوله بررسی گردید که در شکل (۵) نشان داده است.



شکل ۵- تثبیت لوله های حرارتی بر روی صفحه مسی با استفاده از جوش (سمت راست) - قرار دادن سینی حاوی آب شور در داخل مخزن آب (عکس وسط) - تست عملکرد لوله حرارتی پس از ساخت (سمت چپ)

وجه های مخزن به دلیل تبادل حرارتی با بیرون و انجام عمل میعان بر روی دیواره نباید عایق گردد چون در صورتی که عایق گردد آبی شیرین بر روی دیواره های داخل تولید نمی شود. برای اتصال بخش های فوق، فضای خالی بین لوله های مسی و صفحه مسی که در اثر جوشکاری تاب برداشته است را با استفاده از چسب سیلیکونی مدل Shin Etsu که به دلیل وجود ذرات ریز فلزی که قابلیت هدایت حرارتی بالایی دارند پر خواهد شد، همچنین صفحه مسی با استفاده از خمیر سیلیکونی که قابلیت هدایت حرارتی بالایی دارد به پشت پنل خورشیدی متصل خواهد شد و همچنین جهت عایق کردن و جلوگیری از انتقال حرارت موجود در لوله های حرارتی به فضای پشت پنل با استفاده از اسپری فوم عایق می شود و با استفاده از یک طلق اکریلیک پوشانده خواهد شد.

شکل (۶) نحوه این اتصالات را نشان می دهد. نهایتاً بخش اول (مخزن آب) به بخش دوم و سوم (پنل خورشیدی و لوله های حرارتی) از طریق چسب آکواریوم حرارتی قرمز رنگ متصل می شود و با عایق بندی بخشی از لوله های حرارتی که با فضای بیرون در ارتباط هستند، سیستم نهایی ساخته خواهد شد. در داخل مخزن آب از یک فن ۶ وات که توان خود را از پنل می گیرد استفاده شده است تا باعث ایجاد جریان گردد. شکل (۷) نحوه اتصال و شکل نهایی سیستم را نشان می دهد.

شکل (۸) فلوجارت کلی تحقیق را نشان می دهد. این فلوجارت شامل مراحل فاز مطالعات اولیه، انجام طراحی، ساخت و تامین قطعات، انجام تست و ارائه گزارش نهایی می باشد. دستورالعمل ها و مراحل مختلف هر مرحله در شکل نشان داده شده است.



شکل ۶- پر کردن فضای خالی بین لوله های حرارتی و صفحه مسی (سمت راست) - عایق کردن لوله های حرارتی با استفاده از اسپری فوم (عکس وسط) - پوشاندن پشت پنل با استفاده از طلق اکریلیک (سمت چپ)



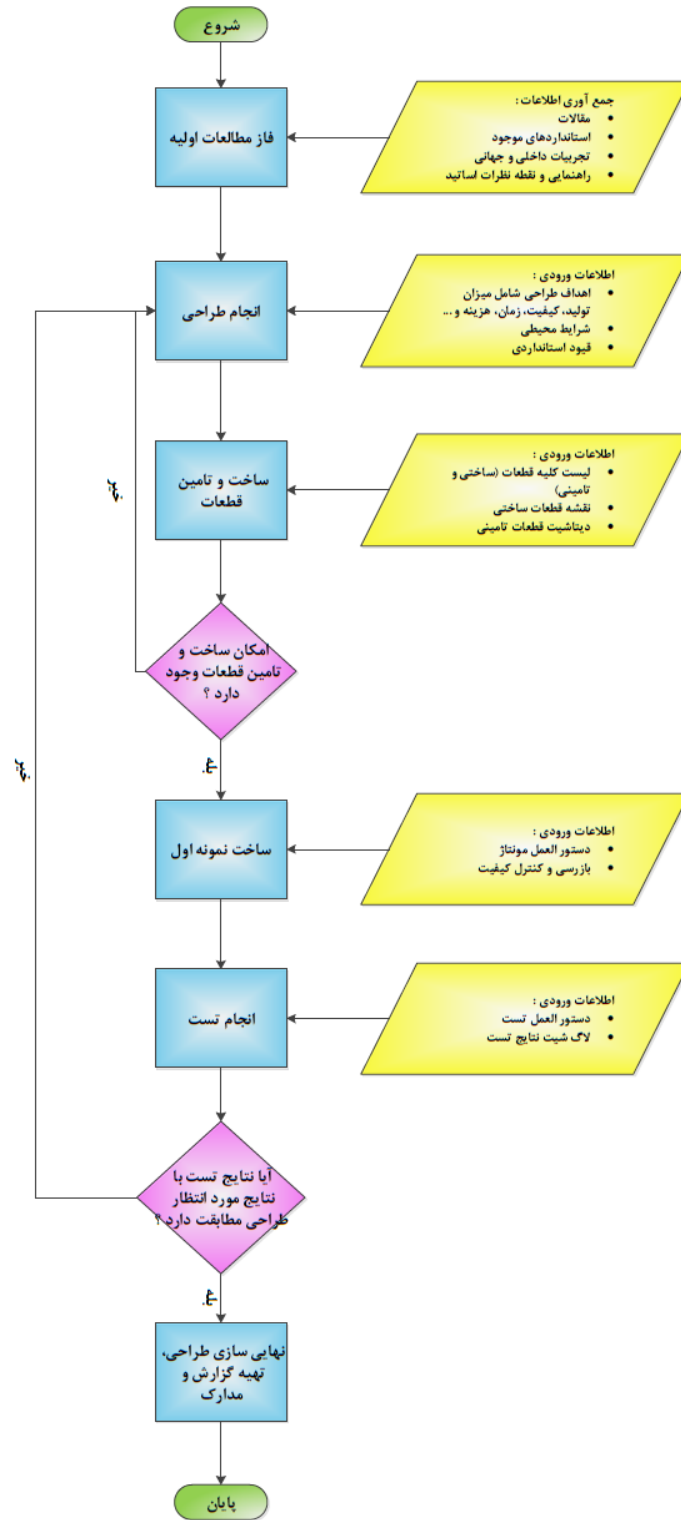
شکل ۷- اتصال مخزن آب به پنل خورشیدی و لوله های حرارتی از طریق چسب آکوارיום (سمت راست)-
عایق کردن لوله های حرارتی با استفاده از فوم (عکس وسط) - شکل نهایی سیستم (سمت چپ)

۳- پارامترهای اندازه گیری شده

در شهر تهران با توجه به اینکه میزان تابش خورشید از ساعت ۸ صبح الی ۱۸ در اوج خود می باشد بنابراین تمامی داده ها در این فاصله زمانی به ثبت رسید. آزمایش تجربی به مدت ۸۰ روز از خرداد سال ۱۳۹۵ تا شهریور همان سال انجام شد. پارامترهای اندازه گیری شده عبارتند از: میزان شدت تابش خورشید، دمای سطح شیشه، دمای سطح پنل خورشیدی، دمای هیت پایپ، دمای آب داخل مخزن و تمامی این پارامترها همزمان با استفاده از چندین ترموکوپل نوع K با دقت ± 0.1 اندازه گیری و ثبت شد. همچنین شدت تابش خورشید با استفاده از پیرانومتر مدل SP-110 و میزان دبی آب شیرین تولید شده با استفاده از یک بشر مدرج اندازه گیری شد.

۴- نتایج و بحث

از آنجا که بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی توسط سیستم فتوولتاییک قریب به ۱۲٪ می باشد از این رو انرژی تلف شده به صورت حرارت در پشت پنل خورشیدی توسط لوله حرارتی بازیابی می گردد تا علاوه بر کاهش دمای صفحه فتوولتاییک و افزایش راندمان آن، مابقی انرژی حرارتی بازیابی گردد. نرخ تولید و بازده یک سیستم شیرین سازی به موقعیت مکانی، دمای ورودی یا تابشی، شدت تابش خورشید، عمق آب در مخزن، شیب، ضخامت و جنس پوشش شیشه ای، ظرفیت حرارتی تقطیر کن بستگی دارد. یک رابطه مستقیم بین عرض جغرافیایی مکان و شیب پوشش شیشه ای مخزن وجود دارد. در این بخش ابتدا نتایج پژوهش حاضر با نتایج کارهای قبلی مقایسه گردید. در ادامه نرخ تولید آب شیرین و تاثیر عمق آب در مخزن بررسی گردید. همچنین استفاده از فن در داخل مخزن و در نهایت بررسی سیستم در حالت پسینو بررسی شد.



شکل ۸- فلوجارت کلی تحقیق

۴-۱- مقایسه نتایج پژوهش‌های پیشین و حاضر

جدول (۲) مقایسه‌ای بین نتایج کارهای پیشین محققین و پژوهش حاضر را انجام می‌دهد، البته با توجه به اینکه سیستم پسیو باشد یا اکتیو نتایج متفاوت می‌باشد. تکنولوژی‌های مورد بررسی نیز متفاوت است.

ذکر این نکته لازم است که در این پژوهش پنل خورشیدی که نقش کلکتور را دارد به جز جذب حرارت و انتقال آن توسط لوله های حرارتی، انرژی الکتریکی هم تولید می کند اما در سایر کارهای محققین حرارت جذب شده توسط کلکتور تنها منتج به تولید آب شیرین می شود.

۴-۲- نرخ تولید آب شیرین

میزان تولید آب شیرین با توجه به زاویه تابش خورشید به سطح پنل و جنس پوشش شیشه ای و همچنین شدت تابش خورشید در ساعات روز تغییر می کند. عمق آب ۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است که در ادامه به بررسی تاثیر عمق آب در مخزن پرداخته می شود. در اوایل صبح با توجه به پایین بودن دمای هوا و شدت تابش، میزان تبخیر آب پایین است تا اینکه پس از جذب حرارت خورشید، حبابهایی در اطراف کندانسور لوله حرارتی ظاهر می شوند و نشان از ایجاد جریان حرارتی دارد.

در جدول (۳) میزان آب شیرین تولیدی با توجه به ساعت و شدت تابش خورشید بیان شده است، خروجی ۱ میزان آب تقطیر شده بر روی پوشش شیشه ای و خروجی ۲ میزان آب تقطیر شده بر روی دیواره های اطراف مخزن می باشد. در جدول دمای سایر قسمت های سیستم از جمله دمای سطح پنل T_{pv} ، دمای سطح پوشش شیشه ای بیرون T_g و دمای سطح لوله حرارتی T_{hp} بیان شده است. داده های استخراج شده میانگین اعداد ثبت شده در طول یک ماه (مرداد ۱۳۹۵) می باشد. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، تعبیه خروجی ۲ و قرار دادن سینی در داخل مخزن و جلوگیری از ترکیب شدن دوباره بخار میعان شده بر روی دیواره ها، سبب افزایش تولید آب شیرین به میزان ۲۰٪ می شود.

جدول ۲- مقایسه ای بین نتایج کارهای پیشین محققین و پژوهش حاضر

کار تجربی متعلق به	نوع عملکرد سیستم	میزان تولید آب شیرین (kg/m^2h)
Dwivedi and Tiwari[22]	پسیو	۰،۳۶
Dwivedi and Tiwari[22]	پسیو (دو شیب)	۰،۱۷۵
Rahbar and Esfahani[23]	اکتیو	۰،۲۸
Shafii and et al.[25]	اکتیو	۰،۲۷
Tiwari et al.[24]	پسیو	۰،۲۶
Present study	اکتیو	۰،۲۹۲
Present study	اکتیو (با فن)	۰،۳۵۵
Present study	پسیو	۰،۴۰۶

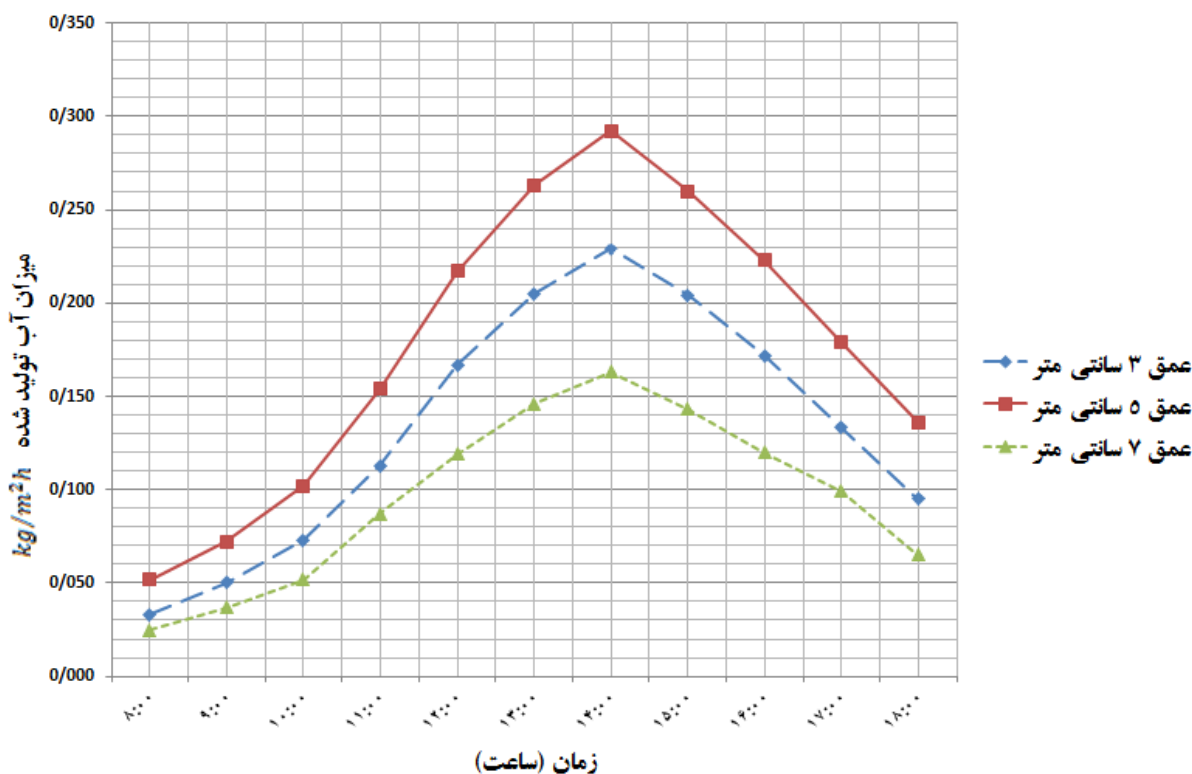
جدول ۳- میزان آب شیرین تولیدی و دمای قسمت های مختلف سیستم (عمق آب ۵ سانتی متر)

زمان	شدت تابش (w/m^2)	میزان آب شیرین تولید شده از خروجی ۱ (kg/m^2h)	میزان آب شیرین تولید شده از خروجی ۲ (kg/m^2h)	میزان آب شیرین تولید شده (kg/m^2h)	دمای سطح پنل ($^{\circ}C$)	دمای سطح پوشش شیشه ای ($^{\circ}C$)	دمای سطح لوله حرارتی ($^{\circ}C$)
۸:۰۰	۳۳۵	۰،۰۴۰	۰،۰۱۲	۰،۰۵۲	۳۸،۲	۳۰	۳۲
۹:۰۰	۵۲۰	۰،۰۵۴	۰،۰۱۸	۰،۰۷۲	۴۵،۷	۳۶	۳۶،۵
۱۰:۰۰	۷۷۰	۰،۰۷۸	۰،۰۲۴	۰،۱۰۲	۵۵،۲	۴۳،۸	۴۸
۱۱:۰۰	۸۴۰	۰،۱۲۲	۰،۰۳۲	۰،۱۵۴	۶۲،۵	۵۰،۵	۵۷،۵
۱۲:۰۰	۸۷۰	۰،۱۷۶	۰،۰۴۱	۰،۲۱۷	۶۷،۷	۵۷	۶۲
۱۳:۰۰	۹۰۰	۰،۲۱۲	۰،۰۵۱	۰،۲۶۳	۶۸،۲	۵۸،۱	۶۳،۱
۱۴:۰۰	۸۶۰	۰،۲۳۴	۰،۰۵۸	۰،۲۹۲	۶۴،۱	۵۵،۲	۵۸
۱۵:۰۰	۷۹۵	۰،۲۰۷	۰،۰۵۳	۰،۲۶۰	۵۵،۶	۵۱	۵۲
۱۶:۰۰	۷۰۵	۰،۱۷۸	۰،۰۴۵	۰،۲۲۳	۵۰،۳	۴۸	۴۷،۲
۱۷:۰۰	۵۷۶	۰،۱۳۸	۰،۰۴۱	۰،۱۷۹	۴۱،۸	۴۲	۳۶،۵
۱۸:۰۰	۳۰۰	۰،۰۸۱	۰،۰۲۵	۰،۱۰۶	۳۲،۳	۳۸	۳۱،۲

۳-۴- بررسی تاثیر عمق آب در مخزن

یکی از پارامترهایی که تاثیر قابل توجهی بر میزان تولید آب شیرین سیستم دارد عمق آب در داخل سینی مخزن می باشد. این آزمایش در عمق های مختلف ۳، ۵ و ۷ سانتی متر آب از کف سینی مخزن انجام شد، میزان آب شیرین تولید شده نشان داد که در عمق ۵ سانتی متر، بیشترین میزان تولید آب وجود دارد و این عمق به عنوان عمق بهینه در نظر گرفته شد. دلیل کاهش میزان تولیدی آب در اثر افزایش عمق آب را می توان ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر آب بیان کرد که برای تبخیر بیشتر نیاز به جذب حرارت بیشتر دارد، از طرفی دیگر این نتیجه حاصل شد که در صورت برابر شدن سطح آب و سطح کندانسور لوله حرارتی، بیشترین میزان تولید وجود دارد که همان ۵ سانتی متر بود. شکل (۹) میزان تولید آب شیرین را در عمق های مختلف ۳، ۵ و ۷ سانتی متر آب از کف سینی مخزن نشان می دهد.

در پژوهش های سایر محققین نیز به همراه کاهش در عمق آب، کاهش در میزان ظرفیت حرارتی تقطیرکن در مخزن گزارش شد که در نتیجه سبب افزایش تولید آب به طور چشمگیری می گردد. همچنین با افزایش عمق آب، حباب های بخار تولید شده بر روی سطح کندانسور لوله حرارتی باید مسافت بیشتری را برای رسیدن به سطح تبخیر آب در مخزن طی کنند زمانی که دما کاهش می یابد. از این رو ممکن است تا هنگام صعود به سطح آب مخزن از بین بروند بنابراین عمق کمتر همواره سبب تولید بیشتر می گردد به شرطی که آب مخزن سطح کندانسور را بپوشاند.



شکل ۹- میزان تولید آب شیرین در عمق های مختلف ۳، ۵ و ۷ سانتی متر آب از کف سینی مخزن

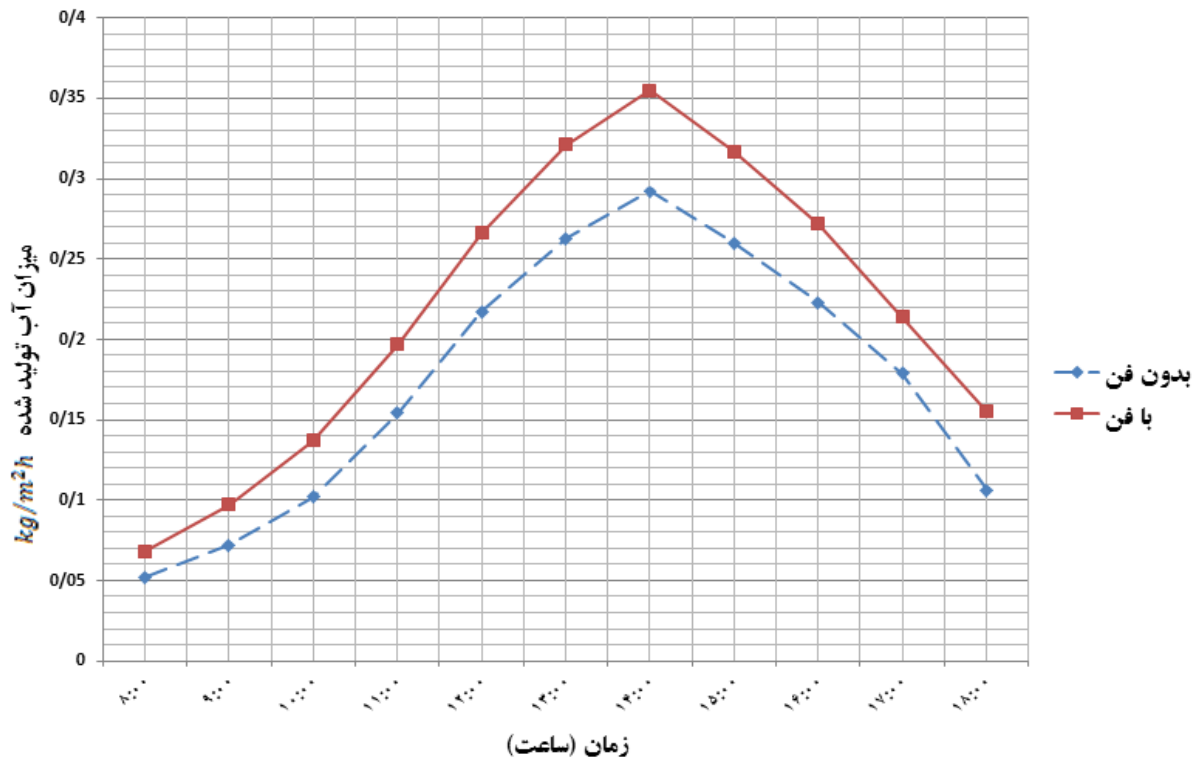
۴-۴- تاثیر استفاده از فن در داخل مخزن

فن سبب ایجاد یک جریان گردشی و افزایش نرخ تبخیر و همچنین افزایش نرخ تقطیر می شود و راندمان سیستم بالا می رود. همچنین فن در داخل مخزن جهت افزایش نرخ انتقال حرارت و میعان استفاده می شود. در این سیستم از یک فن ساده ۵ وات که توان خود را از پنل می گیرد استفاده شده است تا باعث ایجاد جریان گردد. جهت جلوگیری از نوسان و یا سوخته شدن فن از ۳ مقاومت ۱۰ اهم که به صورت موازی بسته شده اند استفاده می شود. شکل (۱۰) تاثیر روشن بودن فن بر عملکرد سیستم و میزان آب دهی آن را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که تقریباً ۲۳٪ میزان تولید آب شیرین در اثر روشن کردن فن افزایش می یابد.

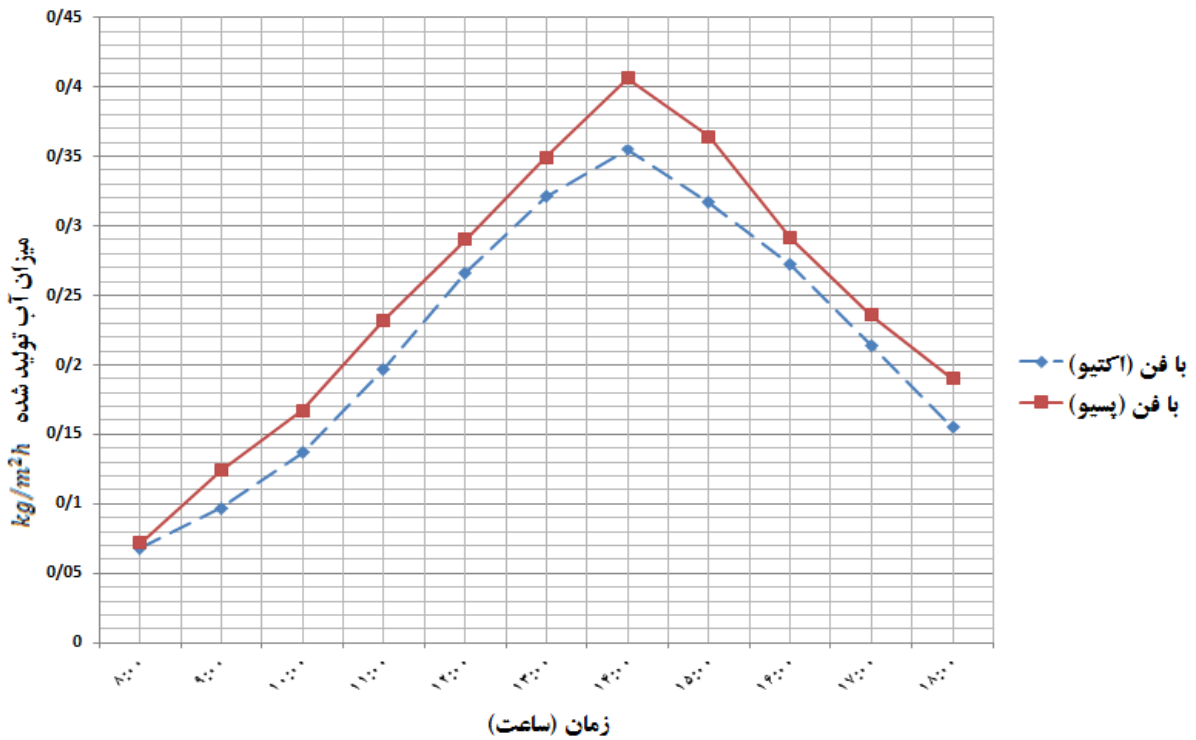
۴-۵- حذف پنل خورشیدی (حالت پسیو)

تمامی بررسی های فوق مربوط به حالتی بود که از پنل خورشیدی جهت جذب حرارت و انتقال آن از طریق لوله های حرارتی استفاده می شد، اما در این آزمایش پنل خورشیدی حذف و سیستم از حالت اکتیو (استفاده از پنل خورشیدی و لوله حرارتی) به حالت پسیو (تنها تابش خورشید به مخزن) تبدیل شد. آزمایش های تجربی نشان می دهد که در حالت اکتیو آب شیرین بیشتری تولید می شود اما حالت پسیو راندمان تولیدی بیشتری دارد. شکل (۱۱) نشان دهنده میزان تولید آب شیرین در حالت اکتیو و پسیو می باشد. در حالت پسیو با توجه به اینکه میزان مساحت زیر تابش کمتر می باشد و این قسمت زیر تابش مستقیم خورشید می باشد، بازده تولیدی بیشتری دارد.

در حالت اکتیو با توجه به وجود اتلاف حرارتی و واسط جهت انتقال حرارت و عدم تابش مستقیم خورشید در تمامی سطوح، بازده تولید کمتر اما مقدار تولید بدون در نظر گرفتن واحد سطح بیشتر است.



شکل ۱۰- تاثیر روشن بودن فن بر عملکرد سیستم و میزان آب دهی



شکل ۱۱- نشان دهنده میزان تولید آب شیرین در حالت اکتیو و پسیو

۵- نتیجه گیری

یک سیستم آب شیرین کن جدید با بهره گیری از تکنولوژی پنل خورشیدی و لوله های حرارتی ساخته شد. این آب شیرین کن از یک پنل خورشیدی ۸۰ وات، ۹ عدد لوله حرارتی ترموسیفون، یک مخزن آب شور حاوی یک عدد سینی، یک ورودی آب شور و دو عدد خروجی آب شیرین، یک پوشش شیشه ای و یک فن ساخته شد. از دستگاه در شرایط مختلفی بهره برداری شد و پارامترهای متفاوتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بیشترین میزان آب تولید شده مربوط به ساعت ۱۴:۰۰ و به میزان (kg/m^2h) ۰،۲۹۲ بود. در ادامه به بررسی عمق بهینه آب از کف مخزن در عمق های ۳، ۵ و ۷ سانتی متر پرداخته شد که بیشترین میزان تولید مطابق با داده های ارائه شده مذکور، مربوط به عمق ۵ سانتی متر بود. از طرفی دیگر این نتیجه حاصل شد که در صورت برابر شدن سطح آب و سطح کندانسور لوله حرارتی، بیشترین میزان تولید وجود دارد که همان ۵ سانتی متر بود. همچنین با افزایش عمق آب، حباب های بخار تولید شده بر روی سطح کندانسور لوله حرارتی باید مسافت بیشتری را برای رسیدن به سطح تبخیر آب در مخزن طی کنند زمانی که دما کاهش می یابد. از این رو عمق کمتر همواره سبب تولید بیشتر می گردد به شرطی که سطح آب و سطح کندانسور لوله حرارتی یکسان باشند. استفاده از فن که سبب ایجاد جریان چرخشی می شود و همچنین نرخ تقطیر را افزایش داده و راندمان سیستم بالا می رود. عملکرد فن سبب افزایشی در حدود ۲۳٪ در میزان تولید شد، در نهایت سیستم در دو حالت اکتیو (استفاده از پنل خورشیدی و لوله حرارتی و فن) و حالت پسیو (تنها تابش خورشید به مخزن) مورد آزمایش قرار گرفت و مطابق با مشاهدات انجام شده راندمان تولید در حالت اکتیو و حالت پسیو به ترتیب (kg/m^2h) ۰،۳۵۵ و ۰،۴۰۶ بدست آمد.

مراجع

- [۱] مجید بازگان، مریم احمدی، "تولید آب شیرین با استفاده از سرمایش زیرزمینی هوای مرطوب و انرژی خورشیدی"، دو فصلنامه علمی تخصصی انرژی های تجدیدپذیر، شماره اول، بهار (۱۳۹۳).
- [2] Rosegrant, X., Cai, M.W., and Cline, S.A., "World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity", International Food Policy Research Institute, (2002).
- [3] International Energy Agency-the Energy Technology Systems Analysis Programmed, The International Renewable Energy Agency, "Water Desalination using Renewable Energy, Technology Brief", March (2012).
- [4] "Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close the Middle East and North Africa's Water Gap", The World Bank, MENA Development Report, (2012).
- [5] Zakharchenko, R., Licea-Jime nez, L., Perez-Garci, S.A., Vorobiev, P., Dehesa-Carrasco, U., Perez-Robels, J.F., González-Hernández, J., and Vorobiev, Yu., "Photovoltaic Solar Panel for a Hybrid PV/Thermal System", Sol Energy Mater Sol Cell, Vol. 82, pp. 253–261, (2004).
- [6] Ji, J., Lu, J.P., Chow, T.T., He, W., and Pei, G., "Hybrid Photovoltaic and Thermal Solar Collector Designed for Natural Circulation of Water", Appl Energy, Vol. 83, pp. 199–210, (2006).

- [7] Chow, T.T., Pei, G., Fong, K.F., Lin, Z., Chan, A.L.S., and Ji, J., "Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic–thermal Collector with and without Glass Cover", *Appl Energy*, Vol. 86, pp. 310–316, (2009).
- [8] Gomkale, S.D., and Datta, R.L., "Some Aspects of Solar Distillation for Water Purification", *Sol Energy*, Vol. 14, pp. 387–392, (1973).
- [9] Garg, H.P., and Mann, H., "Effect of Climatic, Operations and Design Parameters on the Year Round Performance of Single Sloped and Double Sloped Solar Stills under India Arid Zone Conditions", *Sol Energy*, Vol. 18, pp. 159–164, (1976).
- [10] Al-Hinai, H., Al-Nassari, M.S., and Jubran, B.A., "Effect of Climatic, Design and Operational Parameters on the Yield of a Simple Solar Still", *Energy Convers Manage*, Vol. 43, pp. 1639–1650, (2002).
- [11] El-Sebaili, A.A., "Effect of Wind Speed on Active and Passive Solar Stills", *Energy Convers Manage*, Vol. 45, pp. 1187–1204, (2004).
- [12] Voropoulos, K., Mathioulakis, E., and Belessiotis, V., "Experimental Investigation of A Solar Still Coupled with Solar Collectors", *Desalination*, Vol. 138, pp. 103–110, (2001).
- [13] Tiwari, G.N., Dimri, V., Singh, U., Chel, A., and Sarkar, B., "Comparative Thermal Performance Evaluation of an Active Solar Distillation System", *Int. J. Energy Res*, Vol. 31, pp. 1465–1482, (2007).
- [14] Kumar, Sh., and Tiwari, A., "Design, Fabrication and Performance of a Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Active Solar Still", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 1219–1229, (2010).
- [15] Kabeel, A., and El-Agouz, S., "Review of Researches and Developments on Solar Stills", *Desalination*, Vol. 276, pp. 1–12, (2011).
- [16] Gang, P., Huide, F., Tao, Zh., and Jie, J., "A Numerical and Experimental Study on a Heat Pipe PV/T System", *Sol Energy*, Vol. 85, pp. 911–921, (2011).
- [17] Gang, P., Huide, F., Jie, J., Tin-tai, Ch., and Tao, Zh., "Annual Analysis of Heat Pipe PV/T Systems for Domestic Hot Water and Electricity Production", *Energy Convers Manage*, Vol. 56, pp. 8–21, (2012).
- [18] Jahangiri Mamouri, S., Gholami Derami, H., Ghiasi, M., Shafii, M.B., and Shiee, Z., "Experimental Investigation of the Effect of using Thermosyphon Heat Pipes and Vacuum Glass on the Performance of Solar Still", *Energy*, Vol. 75, pp. 501-507, (2014).
- [19] Aboul-Enein, S., El-Sebaili, A.A., and El-Bialy, E., "Investigation of a Single-basin Solar Still with Deep Basins", *Renew. Energy*, Vol. 14, pp. 299–305, (1998).
- [20] Singh, A., Tiwari, G., Sharma, P., and Khan, E., "Optimization of Orientation for Higher Yield of Solar Still for a Given Location", *Energy Convers Manag*, Vol. 36, pp. 175-181, (1995).

- [21] Kargar Sharif Abad, H., Ghiasi, M., Jahangiri Mamouri, S., and Shafii, M., "A Novel Integrated Solar Desalination System with a Pulsating Heat Pipe", *Desalination*, Vol. 311, pp. 206-210, (2013).
- [22] Dwivedi, V., and Tiwari, G., "Comparison of Internal Heat Transfer Coefficients in Passive Solar Stills by Different Thermal Models: An Experimental Validation", *Desalination*, Vol. 246, pp. 304-318, (2009).
- [23] Rahbar, N., and Esfahani, J., "Experimental Study of a Novel Portable Solar Still by Utilizing the Heat Pipe and Thermoelectric Module", *Desalination*, Vol. 284, pp. 55-61, (2012).
- [24] Tiwari, G., Shukla, S., and Singh, I., "Computer Modeling of Passive/Active Solar Stills by using Inner Glass Temperature", *Desalination*, Vol. 154, pp. 171-185, (2003).
- [25] Jafari Mosleh, H., Jahangiri Mamouri, S., Shafii, M.B., and Hakim Sima, A., "A New Desalination System using a Combination of Heat Pipe, Evacuated Tube and Parabolic through Collector", *Energy Conversion and Management*, Vol. 99, pp. 141–150, (2015).
- [26] Giwa, A., Fath, H., and Hasan, Sh., "Humidification–dehumidification Desalination Process Driven by Photovoltaic Thermal Energy Recovery (PV-HDH) for Small-scale Sustainable Water and Power Production", *Desalination*, Vol. 377, pp. 163–171, (2016).

فهرست نمادهای انگلیسی

A_{basin} : مساحت موثر تابش مخزن آب شیرین کن (m^2)

A_{pv} : مساحت موثر تابش پنل خورشیدی (m^2)

h_{fg} : حرارت نهان آب (kJ/kg)

I : شدت تابش (W/m^2)

I' : شدت تابش (W/m^2)

\dot{m} : جرم آب شیرین تولید شده (Kg)

T_g : دمای سطح پوشش شیشه ای ($^{\circ}C$)

T_{hp} : دمای سطح لوله حرارتی ($^{\circ}C$)

T_{pv} : دمای سطح پنل ($^{\circ}C$)

W_{fan} : کار مصرفی توسط فن (W)

W_{pv} : کار تولیدی توسط پنل (W)

نمادهای یونانی

η : بازده سیستم

Abstract

With regard to the ever growing world population and the constant capacity of water resources, novel and trusted methods need to be implemented to preserve freshwater resources and also produce drinking water. In this study, an investigation was performed on a type of evaporation-based solar desalination system which was used to desalinate saline water. Among the aims of this study was the fabrication of a desalination system with the help of both solar panel and heat pipe technologies in a single system.

After the fabrication of the desalination system, various parameters such as the amount of produced freshwater by distilled vapor on the glass covering and the surface temperature of the photovoltaic, heat pipe and glass cover were studied. Analysis of the effect of water depth in the basin and also the effect of the presence of a fan inside the reservoir were also performed and finally the amount of freshwater production was studied in passive and active situations. The results indicated that the optimum water depth was 5 cm.