



مطالعه تجربی تولید آب شیرین با استفاده از بازیابی حرارت تلف شده از فتوولتائیک با استفاده از لوله حرارتی

پیام هوشمند^۱، محمد بهشاد شفیعی^{۲*}، رامین روشندل^۳

^۱ دانشکده مهندسی و علوم، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۳ دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

لوله حرارتی ترموسیفون

فتوولتائیک

آینه

راندمان روزانه آب شیرین کن

تحلیل اقتصادی

چکیده: رشد جمعیت جهان، مصرف بیش از حد آب و ثابت بودن منابع آب شیرین در جهان باعث ایجاد مشکل کمبود آب می‌شود، بنابراین باید تولید آب شیرین بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر در پیش گرفته شود. در این مقاله یک نوع آب شیرین کن با به کارگیری انرژی تجدیدپذیر خورشیدی به منظور شیرین‌سازی آب شور بررسی شده است. پس از ساخت آب شیرین کن خورشیدی در ابتدا عمق بهینه آب شور در مخزن آب به صورت تجربی بررسی گردید. در ادامه به بررسی میزان تولید آب شیرین از طریق میعان بخار روی پوشش شیشه‌ای و دیواره‌های مخزن پرداخته شد که بیشینه آب تولید شده در شرایط تقطیر معمولی مربوط به ساعت ۱۴:۰۰ و به میزان $0.292 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$ در عمق ۵ سانتی متر بود. در ادامه تأثیر نصب سینی در داخل مخزن جهت جلوگیری از ترکیب مجدد بخار میعان شده بر روی جداره‌های داخلی مخزن با آب داخل مخزن بررسی گردید. همچنین به بررسی تولید آب شیرین با به کارگیری یک آینه بر روی سطح پل خورشیدی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهند که نصب آینه باعث افزایش به ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصد آب شیرین تولیدی و توان الکتریکی خروجی به طور متوسط خواهد شد. در نهایت راندمان ساعتی و روزانه هر کدام از حالت‌های بررسی شده محاسبه گردید. پارامترهای مربوط به فتوولتائیک و بازده الکتریکی نیز محاسبه شد. یک تحلیل اقتصادی برای آب شیرین کن مورد نظر انجام گرفت و هزینه تولید هر لیتر آب شیرین 0.0039 دلار به ازای هر لیتر محاسبه گردید و با نتایج سایر پژوهشگران مقایسه شد.

۱- مقدمه

منابع آب شیرین در رودخانه‌ها و آب‌های زیر زمینی بسیار محدود هستند و با توجه به رشد جمعیت و نیاز روز افزون بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعتی، مسکونی و ... به این مایه حیات، زنگ خطر برای به اتمام رسیدن آن به صدا در آمده است. از این رو با توجه به وجود منابع عظیم آب شور در اقیانوس‌ها و آب‌های آزاد راهی به جز شیرین‌سازی آن‌ها وجود ندارد. فرآیندهای شیرین‌سازی فرآیندهایی برای خالص سازی آب شور دریاها به آب شیرین هستند. حدود ۹۷ درصد از آب‌های موجود در کره زمین در اقیانوس‌ها، دریاها و آب‌های آزاد شور بوده که به علت محلول بودن نمک‌ها غیر قابل استفاده می‌باشند و نزدیک به ۳ درصد از آب‌های کره زمین قابل شرب و شیرین هستند و در رودها، یخ‌های قطبی، دریاچه‌ها، اتمسفر و زیرزمین موجودند که درصد توزیع آن‌ها در شکل ۱ قابل مشاهده است. در حال حاضر بیش از ۲۵ کشور در سطح دنیا با بحران کمبود آب مواجه هستند و تا سال ۲۰۲۵ میلادی حدس زده می‌شود که دو سوم (قریب به ۶۶٪) از جمعیت کل جهان با بحران کمبود آب مواجه شوند [۱].

در میان تعاریف و شاخص‌های مختلف، به منطقه‌ای که میزان آب تجدیدپذیر آن زیر ۱۷۰۰ متر مکعب به ازای هر نفر در سال باشد به آن منطقه تحت تنش آبی گفته می‌شود. با معطوف شدن به شکل ۲ این نتیجه

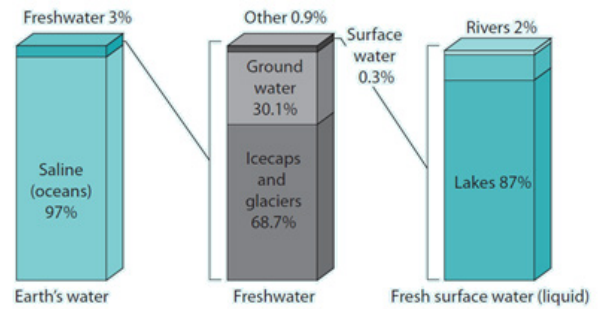
حاصل می‌شود که کشور ایران نیز در آستانه ورود به این تنش آبی قرار دارد و از این رو باید تحقیقات گسترده‌ای جهت رویارویی با بحران آب انجام گیرد. یکی از مؤلفه‌های این تحقیقات، بررسی و مطالعه انواع فن‌آوری‌ها از جمله آب شیرین کن حرارتی (استفاده از حرارت) و آب شیرین کن‌های غشایی یا اسمز معکوس (استفاده از فشار و عبور از غشاء) می‌باشد. سیستم‌های آب شیرین کن به دو دسته اصلی غیر فعال^۱ و فعال^۲ تقسیم بندی می‌شوند. در سیستم‌های غیر فعال، انرژی خورشیدی تنها منبع تأمین انرژی برای سیستم می‌باشد و این در حالی است که در سیستم‌های فعال، انرژی حرارتی مازاد قابل دستیابی است و از سایر تجهیزات برای جذب حرارت خورشیدی می‌توان استفاده کرد. این انرژی مازاد ممکن است از یک کلکتور خورشیدی یا پل خورشیدی و یا هر منبع دیگر تأمین انرژی فراهم گردد. سیستم‌های فعال آب شیرین کن معمولاً جزو آب شیرین کن‌های دما بالا، استفاده از آب پیش گرمایش شده و تولید شبانه‌روزی آب شیرین دسته بندی می‌شوند.

طراحی، ساخت و نگهداری از آب شیرین کن‌های خورشیدی ساده، با توجه به عدم وجود قطعه متحرک و یا پیچیده، آسان است. فن‌آوری آب شیرین کن‌ها در حال حاضر با سه مشکل اصلی الف) تخریب محیط زیست، ب) بالا بودن هزینه تمام شده و ج) وابستگی تجهیزات به خارج از کشور

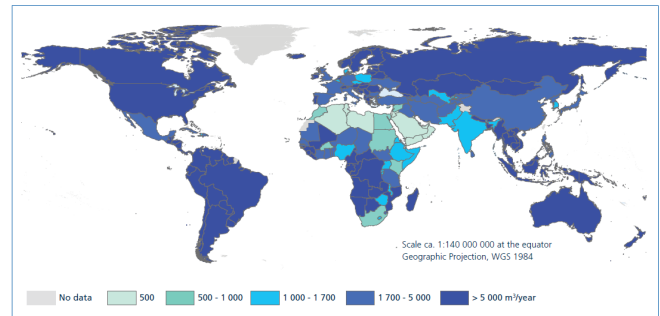
1 Passive

2 Active

پارامترهای هندسی و عملکردی می‌باشد تا بتوان نرخ تولید و بازده عملکردی سیستم را بهبود بخشید. شکل ۳ وضعیت جهانی کاربرد فن‌آوری شیرین سازی آب بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به اهمیت حرارت حاصله از خورشید و فتوولتائیک را نشان می‌دهد [۴].

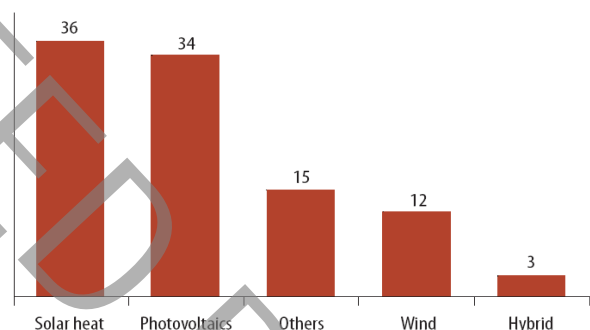


شکل ۱: حجم آب‌های جهان به اشکال مختلف [۲]



شکل ۲: منابع کلی آب تجدیدپذیر در سطح جهان بر حسب مترمکعب به ازای هر نفر در سال ۲۰۱۴ [۳]

Global Renewable Energy Desalination by Energy Source, 2009 (percent)



شکل ۳: وضعیت جهانی کاربرد فن‌آوری شیرین سازی آب بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس نوع فن‌آوری [۴]

روبه‌رو است. نرخ تولید و بازده پایین این سیستم‌ها از دیگر محدودیت‌ها برای تجاری سازی در مقیاس بزرگ می‌باشند. عامل‌های بسیاری بر عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی موثرند که می‌توان به الف) پارامترهای هواشناسی از جمله: شدت تابش خورشید، دمای محیط، سرعت باد، فشار محیط، رطوبت هوا، ابری بودن هوا و ... ب) پارامترهای هندسی از جمله: ابعاد مخزن، نوع، جنس و ضخامت مخزن و پوشش شیشه‌ای و ... ج) پارامترهای عملکردی از جمله: دمای آب داخل مخزن، عمق آب شور داخل مخزن، موقعیت دستگاه، نوع سیال عامل و ... اشاره کرد. هر چند که مهمترین عامل‌ها، پارامترهای هواشناسی هستند اما با توجه به عدم توانایی در کنترل آن، تلاش بر ارزیابی

۱-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته
 محققان بسیاری بر روی سیستم‌های آب شیرین‌کن غیر فعال مطالعات تئوری و تجربی فراوانی انجام دادند. مانوکار و همکاران [۵] به بررسی یک آب شیرین‌کن غیر فعال پرداختند. پژوهش آن‌ها نشان داد که فرایند میعان تابعی از سرعت وزش باد و شکل پوشش شیشه‌ای و نرخ تبخیر تابعی از عمق آب در مخزن، ظرفیت حرارتی سیستم و ... می‌باشد. جونس و همکاران [۶] به بررسی انواع جنس پوشش مخزن (شیشه ساده، پلکسی گلاس و ورق پلی اتیلن نازک) و تأثیر آن بر روی تولید آب شیرین پرداختند. آن‌ها بهترین عملکرد و بالاترین بازده را مربوط به شیشه ساده گزارش کردند. تحقیقات زیادی پیرامون تأثیر عمق بهینه آب انجام گرفت که نتایج بیشتر آن‌ها تولید بیشتر با عمق بهینه کمتر بود. در سیستم‌های غیر فعال با افزایش عمق آب میزان تولید آب شیرین کاهش پیدا می‌کند [۷ و ۸]. همچنین پژوهشگرانی بر روی سیستم‌های آب شیرین‌کن غیر فعال مطالعات تئوری و تجربی انجام دادند. عملکرد سالیانه یک تقطیرکن خورشیدی فعال توسط سانجیو و همکاران [۹] انجام شد. نتیجه پژوهش آن‌ها این بود که زمانی تولید سالیانه بهینه خواهد بود که شیب کلکتور ۲۰ درجه و شیب پوشش شیشه‌ای ۱۵ درجه باشد. همچنین در پژوهشی دیگر سانجیو و تیواری [۱۰] تأثیر مساحت کلکتورها، نرخ جریان، مساحت مخزن و عمق آب را در سیستم‌های فعال دو اثره بر میزان نرخ تولید بررسی کردند.

جهت افزایش راندمان و تولید آب شیرین، محققان طرح‌های جدیدی ارائه کرده‌اند و می‌توان به ترکیب این سیستم‌های غیر فعال با کلکتورها، رفلکتورها، فتوولتائیک‌ها و ... اشاره کرد. برخی از محققین به بررسی و ساخت همزمان سیستم‌های غیر فعال و فعال و مقایسه آن‌ها پرداختند. ال سیبای [۱۱] آب شیرین‌کن‌های غیر فعال و فعال مختلفی را بررسی کرد. هدف ایشان بررسی تأثیر سرعت باد، دمای پوشش شیشه‌ای و آب شور و همچنین تأثیر عمق آب بر میزان تولید بود. عمق بهینه آب ۵ سانتی متر مشاهده شد و افزایش سرعت باد را سبب بهبود بازده سیستم معرفی کرد. تیواری و همکاران [۱۲] به صورت تجربی به محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت و چگونگی ایجاد جریان حرارتی در آب شیرین‌کن‌های غیر فعال و فعال پرداختند. در پژوهش آن‌ها که بر مبنای بالانس انرژی برای هر دو نوع سیستم انجام گرفت، یک برنامه کامپیوتری توسعه داده شد تا عملکرد آب شیرین‌کن‌ها را بر اساس دمای داخلی و خارجی آن‌ها پیش‌بینی نماید. در کاری دیگر کومار و تیواری [۱۳] یک آب شیرین‌کن خورشیدی غیر فعال و یک آب شیرین‌کن خورشیدی فعال دارای کلکتور و فتوولتائیک را به صورت تجربی بررسی نمودند، آزمایشات در عمق‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵

[۲۴]، آب شیرین کن‌های دارای چند مخزن [۲۵ و ۲۶]، آب شیرین کن‌های قطره‌ای معکوس [۲۷]، چند اثره [۲۸ و ۲۹]، دارای منعکس کننده یا آینه [۳۰]، دارای شکل کره‌ای یا نیم کره‌ای [۳۱ و ۳۲]، مثلثی [۳۳] اشاره کرد. مفهوم سیستم هیبرید در این تحقیق عملکرد همزمان پنل خورشیدی و لوله حرارتی ترموسیفون می‌باشد به طوری که تابش خورشید به سطح پنل خورشیدی باعث تولید انرژی الکتریکی با بازده بسیار پایینی می‌شود و مابقی انرژی تابیده شده به شکل گرما اتلاف می‌شود که در این تحقیق به آب شور موجود در مخزن منتقل می‌گردد تا طی فرآیند تبخیر به آب شیرین تبدیل گردد. زمانی که از پنل خورشیدی جهت تولید توان استفاده می‌شود در حین اتلاف حرارت از پنل، تولید انرژی الکتریسیته می‌کند [۳۴]. این حرارت منجر به ایجاد مقاومت به وسیله سطوح انتقال حرارت در فتوولتاییک خواهد شد که باعث کاهش راندمان سیستم می‌گردد [۳۵]. به هر حال حرارت می‌تواند به وسیله سرمایش فتوولتاییک با استفاده از سیستم واسطی مانند آب یا استون بازیابی شود [۳۶ و ۳۷]. بازیافت حرارت منجر به کاهش دمای سطح انتقال حرارت در فتوولتاییک و افزایش راندمان سیستم می‌شود [۳۸]. برای مثال برای یک فتوولتاییک استاندارد در دمای بالای ۲۵ درجه سانتی گراد، افت توان الکتریکی تقریباً ۰/۵٪ به ازای هر یک درجه سانتی گراد افزایش دما می‌باشد.

در این مقاله به بررسی و ساخت یک نوع آب شیرین کن خورشیدی تبخیری با هدف بازیابی حرارت تلف شده در فتوولتاییک با استفاده از لوله حرارتی پرداخته شده است. در بخش تجربی، هدف بررسی میزان تولید آب شیرین در حالت غیر فعال و فعال می‌باشد. این سیستم آب شیرین کن را می‌توان به عنوان یک تولید کننده همزمان حرارت و برق ۱ در نظر گرفت که همزمان دارای تولید انرژی الکتریسیته و آب شیرین می‌باشد. استفاده از لوله حرارتی ترموسیفون علاوه بر این که سبب انتقال حرارت به مخزن آب شیرین کن جهت تبخیر بیشتر آب می‌گردد سبب خنک کاری پشت پنل خورشیدی و ارتقاء عملکرد و راندمان آن نیز می‌گردد. همچنین تأثیر نصب یک سینی در داخل مخزن بررسی شده است. در ادامه به محاسبه بازده روزانه سیستم در حالت غیر فعال و فعال و همچنین عملکرد پنل خورشیدی و بازده الکتریکی آن پرداخته شد. در ادامه با قرار دادن یک آینه بر سطح پنل خورشیدی، جهت بازتابش نور خورشید بر سطح پنل و ایجاد جریان حرارتی بیشتر در سطح پنل و لوله‌های حرارتی با ملاحظات دمایی فتوولتاییک به بررسی میزان تأثیر بازتابش نور خورشید پرداخته شده است. در نهایت یک تحلیل اقتصادی برای محاسبه هزینه تمام شده به ازای هر لیتر آب شیرین تولید شده انجام گرفت.

۲- تشریح سیستم

عملیات ساخت دستگاه و انجام آزمایش در شهر تهران، ایران (پژوهشگاه

سانتی‌متری انجام شد که بیشترین میزان تولید آب شیرین مربوط به عمق ۵ سانتی متر، به میزان ۲/۶۶ کیلوگرم و ۷/۲۲ کیلوگرم آب شیرین روزانه به ترتیب برای حالت‌های غیر فعال و فعال بود. این مطالعه نشان داد که طراحی این سیستم فعال هیبریدی دارای بازده الکتریکی و حرارتی بیشتری است که به میزان ۲۰٪ بیشتر از حالت غیر فعال می‌باشد. همچنین بازه دمایی آب در حالت فعال بسیار بیشتر از حالت غیر فعال بود.

مفهوم استفاده از لوله‌های حرارتی و لوله‌های خلأ در ترکیب با سایر سیستم‌های خورشیدی روز به روز وسیع‌تر خواهد شد. تحقیقات تجربی و همچنین تحلیل‌های تئوری و مدل‌سازی بسیاری توسط محققان و همچنین شیتزر و همکاران [۱۴] انجام شده است. لوله‌های حرارتی تجهیزاتی با نرخ بالای انتقال حرارت هستند که مطالعات بسیاری در این زمینه وجود دارد [۱۹-۱۵]. جهانگیری و همکاران [۲۰] به مطالعه تجربی استفاده از لوله حرارتی ترموسیفون و لوله خلأ بر عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها از پوشش‌های مختلف شیشه‌ای، آلومینیومی و فولادی استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش شیشه‌ای دارای بهترین عملکرد و بالاترین بازده می‌باشد. همچنین استفاده از پوشش شیشه‌ای سبب افزایش چشمگیری در نرخ تولید آب شیرین در حدود $(1/02 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{h})$ و بازده ۲۲/۹٪ شد. عمق بهینه آب در مخزن در حدود ۲ سانتی‌متر که همان طول بخش کندانسور لوله حرارتی بود، اندازه‌گیری شد. در نهایت هزینه تولید آب شیرین ۰/۰۹۲ دلار به ازای هر لیتر محاسبه شد. در کاری دیگر کارگر و همکاران [۲۱] به بررسی یک ترکیب جدید برای سیستم شیرین‌سازی و لوله حرارتی ضربانی پرداختند. آن‌ها دو نوع سیستم غیر فعال و فعال (کلکتور با لوله حرارتی ضربانی) را به صورت تجربی مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان داد که سیستم فعال دارای افزایشی قابل توجه در میزان تولید آب شیرین نسبت به سیستم غیر فعال در حدود $(875 \text{ ml} / \text{m}^2 \text{h})$ و حداکثر بازده ۴۰٪ می‌باشد. به علاوه عمق بهینه آب در مخزن در حدود ۱ سانتی متر اندازه‌گیری شد. گیوا و همکاران [۲۲] نیز به بررسی سیستم شیرین‌سازی آب به صورت رطوبت‌زنی و رطوبت‌گیری با استفاده از بازیافت انرژی حرارتی از پنل‌های خورشیدی پرداختند که تولید آب شیرین و توان الکتریکی را داشتند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که این سیستم سالیانه ۸۳۳ لیتر آب شیرین به ازای هر متر مربع پنل خورشیدی و همچنین ۲۷۸ کیلووات ساعت به ازای هر متر مربع پنل تولید می‌کند. امرا و همکاران [۲۳] دو نوع تقطیرکن (تقطیرکن معمولی و تقطیرکن با فن) ساختند و در شرایط محیطی آن‌ها را آزمایش کردند. آزمایش‌ها در عمق‌های مختلف آب در مخزن انجام گرفت. این نتیجه حاصل شد که به کارگیری فن سبب افزایش تولید آب شیرین به میزان ۱۷٪ با عمق آب ۳ سانتی‌متر شد. همچنین بازده روزانه سیستم با فن ۳۹/۸٪ محاسبه شد که در مقایسه با ۳۶/۷٪ برای سیستم بدون فن در شرایط یکسان قابل توجه است.

محققان بسیاری برای بهبود عملکرد آب شیرین کن‌ها، طرح‌های متفاوتی ارائه کرده‌اند که می‌توان به آب شیرین کن‌های دو اثره (دو شیب)

جدول ۱: مشخصات ابعادی و فنی سیستم

مقدار	واحد	پارامتر
۴۶ × ۵۲	(سانتی متر × سانتی متر)	ابعاد پوشش شیشه‌ای
۴۹ × ۴۹	(سانتی متر × سانتی متر)	ابعاد کف مخزن
۴۷ × ۴۷	(سانتی متر × سانتی متر)	ابعاد کف سینی
۲۰ × ۴۸	(سانتی متر × سانتی متر)	ابعاد آینه
۱۱۶ × ۵۲	(سانتی متر × سانتی متر)	ابعاد پنل خورشیدی
۸۰	(وات)	توان بیشینه فتوولتاییک
۲۱/۶	(ولت)	ولتاژ مدار باز فتوولتاییک
۵/۱۵	(آمپر)	جریان مدار کوتاه فتوولتاییک
۹	-	تعداد لوله حرارتی
۱۸۰	(سانتی متر)	طول لوله حرارتی
۰/۸	(سانتی متر)	قطر خارجی لوله حرارتی
استون	-	نوع سیال عامل
شیشه شفاف	-	جنس پوشش شیشه‌ای
مس	-	جنس لوله حرارتی

تمامی لوله‌های حرارتی بر روی یک صفحه مسی به ضخامت ۰/۷ mm جوشکاری شدند تا تمامی حرارت بازبایی شده از فتوولتاییک از صفحه مسی به این لوله‌ها انتقال یابد و ایجاد گرادیان حرارتی نکند، که در شکل ۵ نشان داده است. جدول ۱ مشخصات کلی سیستم را بیان می‌کند.

در ادامه مخزن آب به قسمت کندانسور لوله حرارتی با استفاده از چسب اکواریوم حرارتی قرمز رنگ و پنل خورشیدی به قسمت اوپراتور لوله‌های حرارتی از طریق صفحه مسی و خمیر سیلیکون متصل می‌شوند و با عایق بندی بخشی از لوله‌های حرارتی که در فضای بیرون هستند، سیستم نهایی ساخته خواهد شد. شکل ۵ نحوه اتصال و شکل نهایی سیستم را نشان می‌دهد. در سیستم نهایی از یک آینه جهت ارزیابی تاثیرات بازتابیده شدن امواج خورشید بهره گرفته شده است.

۲-۱- نمودار جریان انرژی سیستم

شکل ۶ نمودار جریان انرژی در سیستم تشریح شده را نشان می‌دهد. سیستم فتوولتاییک انرژی خورشیدی را جذب می‌کند که بخشی از آن تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود و بخشی از حرارت تلف شده توسط لوله حرارتی بازبایی می‌شود و طبیعتاً بخشی از آن هم به محیط تلف می‌شود. لوله حرارتی انرژی حرارتی بازبایی شده را به مخزن آب منتقل می‌کند و قسمتی اندک از انرژی هم آنجا تلف می‌شود. بعد از انتقال حرارت به آب مخزن، بخار تولید و به صورت قطرات بر روی پوشش شیشه‌ای و جداره‌های مخزن قابل جمع آوری است.

۳- تشریح آزمایش تجربی

هدف از پژوهش حاضر بررسی عملکرد سیستم آب شیرین کن با بازبایی

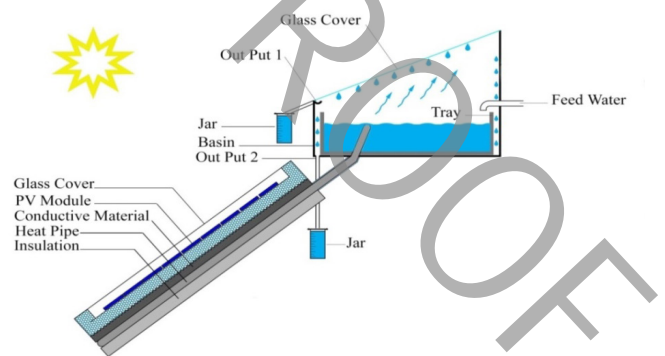
علوم و فن آوری انرژی شریف، دانشگاه صنعتی شریف) انجام شد که دارای عرض جغرافیایی ۳۵/۴۲ درجه، طول جغرافیایی ۵۱/۳۵ درجه و ارتفاع ۱۱۷۲ متر از سطح دریا می‌باشد. شماتیک کلی سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است به طوری که لوله‌های حرارتی به پشت فتوولتاییک متصل شده‌اند و برای جلوگیری از هدر رفت حرارت در لوله‌های حرارتی، پشت آن‌ها عایق شده است. ایده اصلی این تحقیق از آنجا نشأت گرفت که با توجه به این که بازده تبدیل انرژی امواج خورشیدی به الکتریکی توسط سیستم فتوولتاییک بسیار پایین می‌باشد و انرژی تلف شده در این سیستم توسط لوله حرارتی بازبایی می‌گردد تا علاوه بر کاهش دمای صفحه فتوولتاییک و افزایش راندمان آن، مابقی انرژی حرارتی بازبایی گردد. پس این سیستم را می‌توان به عنوان یک سیستم تولید همزمان حرارت و برق در نظر گرفت که دارای دو هدف اصلی می‌باشد: ۱- تولید آب شیرین با بازبایی حرارت تلف شده از سیستم فتوولتاییک ۲- تولید انرژی الکتریسیته از فتوولتاییک با راندمان بالاتر.

دستگاه مورد مطالعه از سه بخش متصل به هم ساخته شده است:

الف) مخزن آب شیرین کن، که فرآیند تبخیر و میعان در آن صورت می‌گیرد و از یک پوشش شیشه‌ای شفاف استفاده شده است. در داخل مخزن یک سینی نصب شده است که ابعاد آن از ابعاد کف مخزن کوچک‌تر است. در این حالت در صورت انجام عمل میعان بر روی دیواره‌ها، آب شیرین تولیدی به جای ترکیب شدن مجدد با آب مخزن می‌توان آن را جمع آوری کرد. فضای داخل مخزن با اسپری مات، سیاه شده است تا قابلیت جذب نور خورشید حداکثر شود.

ب) یک فتوولتاییک شارپ مدل NE-۰۸۰T۱J که هم پوشش شیشه‌ای و فتوولتاییک با زاویه ۳۵ درجه نسبت به راستای افقی قرار داده شده‌اند که زاویه بهینه عملکرد مناسب در آب شیرین کن‌های تهران می‌باشد [۳۹].

ج) لوله حرارتی از نوع ترموسیفون، که سیال عامل جابجایی حرارت در این لوله‌ها که با استفاده از پمپ خلأ ساخته شد، استون در نظر گرفته شد.

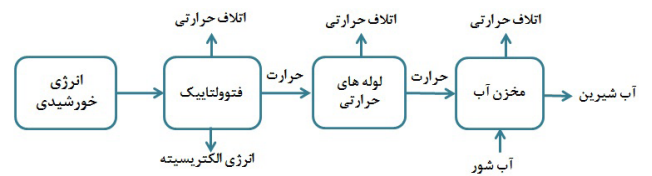


شکل ۴: شماتیک کلی سیستم



شکل ۵: قرار دادن سینی حاوی آب شور در داخل مخزن آب (سمت راست) - اتصال لوله حرارتی به صفحه مسی با جوشکاری و چسب سیلیکونی و عایق کردن لوله‌های حرارتی با استفاده از اسپری فوم (عکس وسط) - شکل نهایی سیستم و نصب آینه بر روی فتوولتائیک (سمت چپ)

با بازیابی حرارت اتلافی از پنل خورشیدی توسط لوله حرارتی می‌باشد. آزمایش شماره ۳ که شامل مخزن، سینی، لوله حرارتی، پنل خورشیدی و آینه می‌باشد. هدف بررسی تأثیر حضور آینه بر عملکرد سیستم در آزمایش شماره ۱ می‌باشد.



شکل ۶: نمودار جریان انرژی سیستم آب شیرین کن

۳-۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده
پارامترهای اندازه‌گیری شده عبارتند از: میزان شدت تابش خورشید، دمای سطح پوشش شیشه‌ای، پنل خورشیدی و لوله حرارتی، آب تولید شده از خروجی ۱ و ۲، توان بیشینه فتوولتائیک، ولتاژ مدار باز، جریان مدار کوتاه، فیل فاکتور و پارامترهای دما همزمان با استفاده از چندین ترموکوپل نوع K با دقت ± 0.1 اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین شدت تابش خورشید، توان بیشینه فتوولتائیک و سایر پارامترهای فتوولتائیک با استفاده از Solar I-V اندازه‌گیری شد، این دستگاه یک ابزار حرفه‌ای برای اندازه‌گیری پارامترهای تجربی مربوط به فتوولتائیک است. میزان دبی آب شیرین تولید شده با استفاده از یک بشر مدرج اندازه‌گیری شد. جدول ۲ خطا و میزان عدم قطعیت

حرارت تلف شده از پنل خورشیدی با استفاده از لوله حرارتی می‌باشد. برای ایجاد مقایسه بین حالت فعال و غیر فعال، همچنین تأثیر منعکس کردن امواج خورشید توسط آینه، ۳ آزمایش در نظر گرفته شده است.
آزمایش ۱: سیستم آب شیرین کن غیر فعال،
آزمایش ۲: سیستم آب شیرین کن فعال،
آزمایش ۳: سیستم آب شیرین کن فعال با آینه.
آزمایش شماره ۱ که شامل مخزن و سینی می‌باشد. هدف بررسی عملکرد سیستم بدون استفاده از هر گونه تجهیزات جانبی و ارزیابی سیستم در حالت غیر فعال می‌باشد. آزمایش شماره ۲ که شامل مخزن، سینی، لوله حرارتی ترموسیفون و پنل خورشیدی می‌باشد. هدف بررسی عملکرد سیستم

جدول ۲: خطای تجربی شامل دقت و عدم قطعیت

ابزار اندازه‌گیری	پارامتر	دقت	محدوده اندازه‌گیری	عدم قطعیت
Solar I-V	شدت تابش خورشید	$\pm 1 \text{ W/m}^2$	$0 - 500 \text{ W/m}^2$	10.6 W/m^2
Solar I-V	توان تولید شده بیشینه توسط فتوولتائیک	$\pm 1 \text{ W}$	$50 - 3200 \text{ W}$	1.75 W
Solar I-V	ولتاژ مدار باز	$\pm 0.01 \text{ V}$	$15 - 99.99 \text{ V}$	0.48 V
Solar I-V	جریان مدار کوتاه	$\pm 0.01 \text{ A}$	$0.5 - 9.99 \text{ A}$	0.48 A
ترموکوپل نوع K	دمای بخش‌های مختلف	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$1.01 \text{ }^\circ\text{C}$
بشر مدرج	نرخ جریان آب تولید شده	$\pm 5 \text{ mL}$	$0 - 1000 \text{ mL}$	5.8 mL

قطعیّت در اندازه‌گیری پارامترهای بیان شده را نشان می‌دهد.

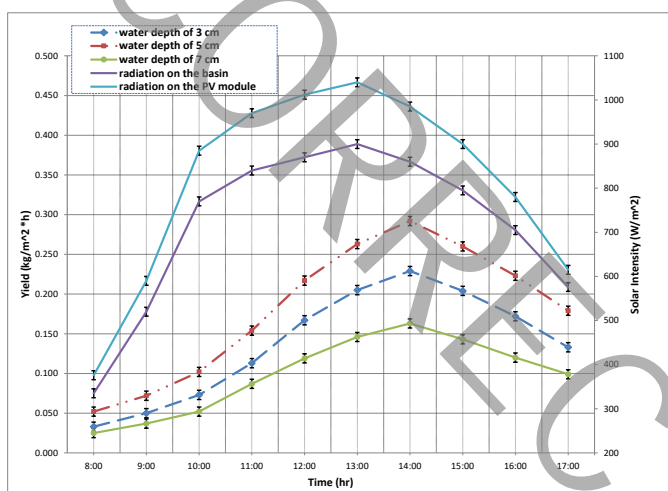
۴- نتایج و بحث

در فتوولتاییک، بیشتر انرژی تابیده شده یا به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود یا منعکس می‌گردد، بنابراین از دسترس ما خارج می‌شود تا هم سبب افزایش دمای سلول و هم سبب کاهش راندمان سیستم می‌گردد. از این رو با قراردادن لوله‌های حرارتی در پشت فتوولتاییک و انتقال حرارت از پشت دیواره پنل به داخل مخزن علاوه بر خنک کاری پشت پنل و افزایش راندمان آن، سبب تأمین حرارت لازم برای تقطیر آب شور و در نتیجه تولید آب شیرین می‌شود. در بخش نتایج ابتدا عمق آب بهینه در داخل مخزن محاسبه شده است، سپس به بررسی میزان تولید سیستم در حالت فعال و غیر فعال و همچنین تأثیر نصب سینی در داخل مخزن پرداخته شده است. در ادامه به بررسی تأثیر نصب آینه بر روی فتوولتاییک پرداخته شده است. همچنین راندمان ساعتی و روزانه آب شیرین کن در حالت‌های مختلف بررسی شده است. در نهایت یک تحلیل اقتصادی برای آب شیرین تولید شده انجام گرفته است.

۴-۱- عمق بهینه آب شور داخل مخزن

میزان تولید آب شیرین به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که از جمله می‌توان به عمق آب شور در مخزن اشاره نمود. از این رو با شرایط یکسان، آزمایشی در عمق‌های مختلف ۳، ۵ و ۷ سانتی متر آب از کف سینی مخزن (آزمایش ۲) انجام شد. ارتفاع کندانسور لوله حرارتی در داخل مخزن نیز ۵ سانتی متر بود. نتایج تجربی نشان داد که میزان آب شیرین تولید شده در عمق ۵ سانتی متر، بیشترین مقدار را دارد و این عمق به عنوان عمق بهینه در نظر گرفته شد. دلیل افزایش میزان آب تولید شده در اثر کاهش عمق آب

را می‌توان جرم و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر آب بیان کرد که برای تبخیر بیشتر نیاز به جذب حرارت بیشتر دارد به این معنا که هر چقدر ارتفاع بیشتر باشد آب باید حرارت بیشتری برای تبخیر، جذب کند و این امر موجب کاهش در مقدار تبخیر می‌گردد، از طرفی دیگر این نتیجه حاصل شد که اگر سطح آب و سطح کندانسور لوله حرارتی با هم برابر باشند، بیشترین میزان تولید وجود دارد که همان ۵ سانتی متر بود. در صورتی که کندانسور لوله حرارتی به صورت کامل در آب غرق نشود طول مؤثر کندانسور لوله حرارتی کاهش پیدا می‌کند و این امر سبب افزایش مقاومت لوله حرارتی و در نتیجه کاهش تولید می‌گردد. از دیگر یافته‌های پژوهشی در این آزمایش این بود که روند تولید آب در عمق‌های بالاتر بعد از ساعت ۲ بعد از ظهر ملایم‌تر بود. جدول ۳ میزان تولید آب شیرین در عمق‌های مختلف ۳، ۵ و ۷ سانتی متر آب از



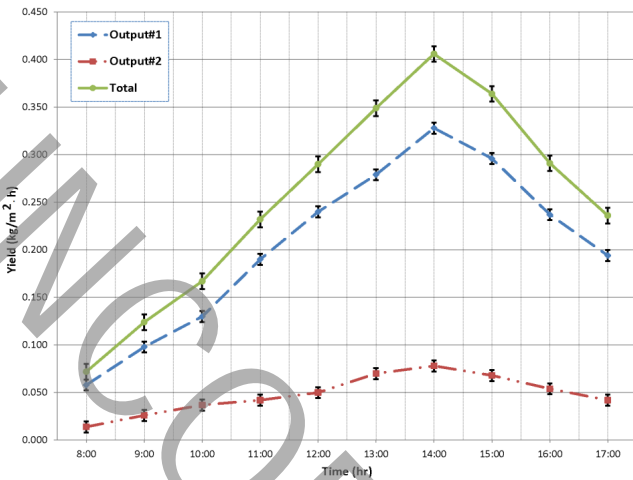
شکل ۷: شدت تابش در راستای افق و عمود بر سطح پنل خورشیدی و میزان آب تولید شده در عمق‌های مختلف در مخزن

جدول ۳: میزان تولید آب شیرین در عمق‌های مختلف و شدت تابش خورشید (آزمایش ۲)

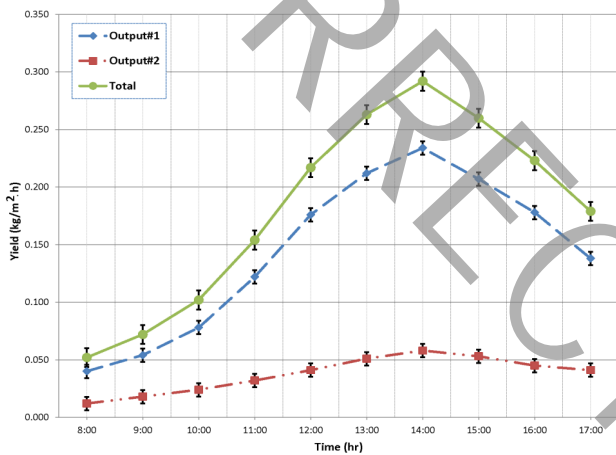
میزان آب شیرین تولید شده (عمق ۷ سانتی متر) (kg / m ² h)	میزان آب شیرین تولید شده (عمق ۵ سانتی متر) (kg / m ² h)	میزان آب شیرین تولید شده (عمق ۳ سانتی متر) (kg / m ² h)	شدت تابش (W / m ²)	زمان (ساعت)
۰/۰۲۵	۰/۰۵۲	۰/۰۳۳	۳۳۵	۸:۰۰
۰/۰۳۷	۰/۰۷۲	۰/۰۵۰	۵۲۰	۹:۰۰
۰/۰۵۲	۰/۱۰۲	۰/۰۷۳	۷۷۰	۱۰:۰۰
۰/۰۸۷	۰/۱۵۴	۰/۱۱۳	۸۴۰	۱۱:۰۰
۰/۱۱۹	۰/۲۱۷	۰/۱۶۷	۸۷۰	۱۲:۰۰
۰/۱۴۶	۰/۲۶۳	۰/۲۰۵	۹۰۰	۱۳:۰۰
۰/۱۶۳	۰/۲۹۲	۰/۲۲۹	۸۶۰	۱۴:۰۰
۰/۱۴۳	۰/۲۶۰	۰/۲۰۴	۷۹۵	۱۵:۰۰
۰/۱۲۰	۰/۲۲۳	۰/۱۷۲	۷۰۵	۱۶:۰۰
۰/۰۹۹	۰/۱۷۹	۰/۱۳۳	۵۷۶	۱۷:۰۰

در حالت فعال کمتر از حالت غیر فعال است که دلیل آن وجود مقاومت حرارتی بیشتر در حالت فعال است.

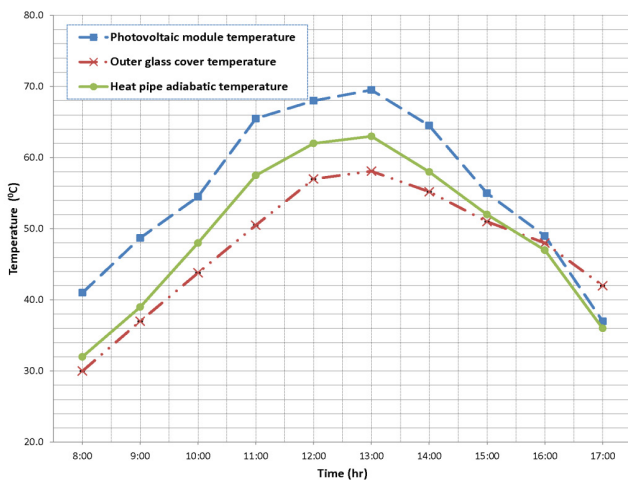
Passive Solar Still - Without Fan (Scenario 1)



Active Solar Still - Without Fan (Scenario 2)



شکل ۸: میزان نرخ تولید آب شیرین در حالت فعال (آزمایش ۲) و غیر فعال (آزمایش ۱) از خروجی ۱ و ۲



شکل ۹: تغییر دمای بخش‌های مختلف سیستم

کف سینی مخزن و میزان شدت تابش خورشید را نشان می‌دهد. بیشینه شدت تابش خورشید در ساعت ۱ بعد از ظهر اتفاق می‌افتد در حالی که بیشینه تولید آب شیرین در ساعت ۲ مشاهده می‌شود که دلیل این اختلاف را می‌توان اینرسی حرارتی بیان کرد به طوری که مخزن آب نیاز به زمان دارد تا حرارت جذب شده از خورشید را از طریق آب در سیستم پخش نماید تا دمای آن افزایش یابد.

در طی انجام آزمایش، پنل خورشیدی به صورتی قرار گرفته است که در ساعت ۱۲ ظهر عمود بر امواج خورشید می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مقدار شدت تابش بر روی سطح پنل همواره بیشتر از سطح مخزن آب می‌باشد. مقدار شدت تابش عمود بر مخزن آب و عمود بر سطح پنل خورشیدی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که می‌توان مشاهده کرد در ساعت ۱ بعد از ظهر، مقدار شدت تابش بر روی مخزن آب ۸۸۰ وات بر متر مربع است و این در حالی است که مقدار شدت تابش بر روی پنل خورشیدی ۱۰۳۱ وات بر متر مربع می‌باشد. در شکل ۷ میزان آب تولید شده در اعماق مختلف آب در مخزن آب شیرین کن نشان داده شده است تا نحوه تغییر مقادیر تولید آب شیرین قابل ارزیابی و مقایسه باشد.

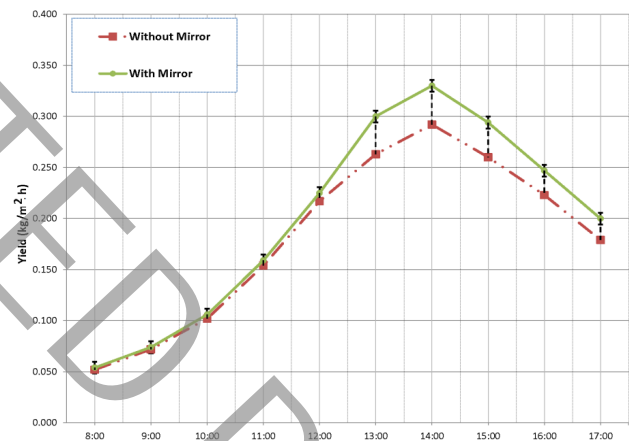
۴-۲- میزان تولید آب شیرین در حالت فعال و غیر فعال

همان‌طور که بیان شد تولید آب شیرین تابعی از پارامترهای بسیاری است، تأثیر عمق آب بررسی گردید حال به بررسی تولید آب در حالات غیر فعال (آزمایش ۱) و فعال (آزمایش ۲) پرداخته می‌شود. در شکل ۸ میزان آب شیرین تولیدی با توجه به ساعت و همچنین تولید آب از خروجی ۱ و ۲ بیان شده است، خروجی ۱ میزان آب تقطیر شده بر روی پوشش شیشه‌ای و خروجی ۲ میزان آب تقطیر شده بر روی دیواره‌های اطراف مخزن می‌باشد. مقدار تولید آب شیرین در حالت فعال ۱/۵۲۷ لیتر در روز است که تقریباً ۲/۵ برابر مقدار تولید در حالت غیر فعال (۰/۶۰۴ لیتر در روز) می‌باشد. بیشینه نرخ تولید در حالت غیر فعال در ساعت ۱۴:۰۰ بعد از ظهر (۰/۴۰۶ $\text{kg/m}^2\text{h}$) می‌باشد. نصب سینی در داخل مخزن و یا نصب خروجی ۲ در آزمایش ۱ سبب افزایش تولید به میزان ۱۹٪ می‌گردد. بیشینه نرخ تولید در حالت فعال در ساعت ۱۴:۰۰ بعد از ظهر (۰/۴۹۲ $\text{kg/m}^2\text{h}$) می‌باشد. نصب سینی در داخل مخزن و یا نصب خروجی ۲ در آزمایش ۲ سبب افزایش تولید به میزان ۲۰/۶٪ می‌گردد. در شکل ۹ دمای سایر قسمت‌های سیستم از جمله دمای سطح فتوولتائیک T_{pv} ، دمای سطح بیرونی پوشش شیشه‌ای T_g و دمای سطح آدیاباتیک لوله حرارتی T_{hp} نشان داده شده است. دمای آب داخل سینی در حالت فعال و غیر فعال اندازه‌گیری شد، در حالت فعال با توجه به انتقال حرارت بیشتر از طریق کندانسور لوله‌های حرارتی متوسط دمای آب داخل سینی به نسبت حالت غیر فعال، ۲۸٪ افزایش نشان داد. نتایج حاصل شده بین حالت فعال و غیر فعال نشان می‌دهد مقدار آب شیرین تولیدی در حالت فعال بیشتر از حالت غیر فعال است که دلیل آن می‌تواند مساحت زیر تابش بیشتر باشد. این در حالی است که نرخ تولید در بیشینه تابش خورشید

۴-۳- تأثیر استفاده از آینه بر روی فتوولتائیک

میزان توان تولید شده از پنل خورشیدی وابسته به شدت تابش و زاویه تابش خورشید به صفحه پنل است از این رو هرچه میزان تابش بیشتر و زاویه تابش عمودتر باشد از طرفی توان الکتریکی بیشتری تولید می‌شود، همچنین حرارت بیشتری جذب و از طرفی دیگر تلف خواهد شد و انتقال حرارت بیشتری به مخزن صورت می‌گیرد. بر این اساس میزان آب شیرین تولیدی با توجه به ساعت و شدت تابش فرق می‌کند. شکل نهایی سیستم که شامل یک آینه نصب شده بر روی سطح پنل می‌باشد در شکل ۵ نشان داده شده است. با تابش نور خورشید به سطح آینه و بازتابیده شدن آن به سطح پنل خورشیدی سبب انعکاس مجدد امواج خورشید و بالا بردن دمای سطح پنل خواهد شد که این امر سبب افزایش انتقال حرارت منتقل شده و در نتیجه افزایش میزان آب شیرین تولیدی و توان تولیدی از فتوولتائیک می‌شود. از این سطوح منعکس کننده (آینه) جهت افزایش پرتوهای خورشیدی استفاده می‌شود. ولتاژ سیستم به شدت به دما بستگی دارد که با افزایش دما، ولتاژ کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با نصب آینه تقریباً ۱۰٪ میزان آب شیرین تولیدی افزایش می‌یابد و همچنین سبب افزایش ۱۲٪ توان الکتریکی تولیدی می‌شود. شکل ۱۰ نرخ آب تولید شده با قرار گیری آینه بر روی فتوولتائیک را نشان می‌دهد.

Active solar still (with mirror, without fan) (Scenario3)



شکل ۱۰: میزان تولید آب شیرین در حالت با آینه و بدون آینه

۴-۴- بازده آب شیرین کن در حالت فعال و غیر فعال و فتوولتائیک

تحلیل و بررسی عملکرد سیستم مطابق با داده‌های تجربی بدست آمده محاسبه شد. پارامترهای مختلف سیستم نظیر توان بیشینه فتوولتائیک، ولتاژ مدار باز، جریان مدار کوتاه، فیل فاکتور و ... توسط Solar I-V مورد مطالعه تجربی قرار گرفتند. دو نوع بازده برای آب شیرین کن‌ها مورد بررسی قرار گرفت: بازده ساعتی و بازده روزانه. بازده‌ها به شیوه زیر تعریف شدند:

(الف) بازده حرارتی ساعتی و روزانه سیستم غیر فعال (آزمایش ۱):

$$\eta_{H-passive} = \frac{(m \times h_{fg}) / 3600}{I_b \times A_{basin}} \quad (۱)$$

$$\eta_{D-passive} = \frac{1}{n} \sum \eta_{H-passive} \quad (۲)$$

(ب) بازده حرارتی ساعتی و روزانه سیستم فعال (آزمایش‌های ۲ و ۳):

$$\eta_{H-active} = \frac{(m \times h_{fg}) / 3600}{I_{pv} \times A_{pv} + I_b \times A_{basin} + I_m \times A_{mirror}} \quad (۳)$$

$$\eta_{D-active} = \frac{1}{n} \sum \eta_{H-active} \quad (۴)$$

معادله (۳) یک معادله جامع برای محاسبه بازده برای آزمایش‌های ۲ و ۳ می‌باشد. در آزمایش ۲ با توجه به عدم وجود آینه $A_{mirror} = 0$ می‌باشند. A_{mirror} مساحت تصویر آینه بر روی فتوولتائیک است. در سناریوهای فوق $A_{basin} \neq 0$ و $W_{pv} \neq 0$ هستند.

(ج) بازده الکتریکی ساعتی و روزانه سیستم فتوولتائیک:

$$\eta_e = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{I_{pv} \times A_{pv}} \quad (۵)$$

$$\eta_{DE-electrical} = \frac{1}{n} \sum \eta_e \quad (۶)$$

(د) بازده حرارتی معادل پنل خورشیدی [۴۰ و ۴۱]:

$$\eta_E = \frac{\eta_{DE}}{\eta_{power}} = \frac{\eta_{DE}}{0.38} \quad (۷)$$

(ه) بازده کلی سیستم (بازده حرارتی + بازده الکتریکی) برای آزمایش‌های ۲ و ۳ شامل مجموع معادلات (۴) و (۷) خواهد شد:

$$\eta_O = \eta_{D-active} + \eta_E \quad (۸)$$

که در آن $I_b, I_{pv}, h_{fg}, \dot{m}, \eta_O, \eta_D, \eta_H, \eta_{DE}, \eta_E, \eta_e$ ، W_{pv}, A, I_m ، بازده حرارتی معادل بازده الکتریکی پنل خورشیدی، بازده الکتریکی روزانه فتوولتائیک، بازده حرارتی ساعتی آب شیرین کن، بازده حرارتی روزانه آب شیرین کن، بازده کلی سیستم (بازده حرارتی+بازده الکتریکی)، نرخ تولید آب شیرین بر حسب kg/s ، حرارت نهان بخار آب بر حسب J/kg ، شدت تابش خورشید بر سطح فتوولتائیک، مخزن آب شور و سطح آینه بر حسب W/m^2 ، مساحت سطح مؤثر برای قسمت‌های مربوطه بر حسب m^2 و توان تولید شده از فتوولتائیک بر حسب W . همچنین V_{oc} و FF به ترتیب جریان مدار کوتاه بر حسب A ، ولتاژ مدار باز بر حسب V و فیل فاکتور هستند. حرارت نهان بخار آب از طریق روابط زیر محاسبه می‌گردد: [۴۲]

برای دماهای بالای ۷۰ درجه سانتی گراد:

$$h_{fg} = 3.2615 \times 10^6 \times [1 - 7.616 \times 10^{-4} T] \quad (۹)$$

جدول ۴: بازده روزانه آب شیرین کن در حالت فعال، غیر فعال و با آینه و میزان آب شیرین و توان الکتریکی تولید شده

شماره آزمایش	نوع آزمایش (مطالعه حاضر)	نوع سیستم	آب شیرین تولید شده در حالت بیشینه (kg / m ² .h)	توان الکتریکی تولید شده در یک روز (kWh / m ² .day)	بازده حرارتی روزانه (%)	بازده الکتریکی پنل خورشیدی (%)	بازده حرارتی معادل الکتریکی (%)	بازده کلی سیستم (%)
آزمایش ۱	غیر فعال	مخزن و سینی	۰/۴۰۶	۰	۲۲/۴	۰	۰	۲۲/۴
آزمایش ۲	فعال	فتوولتاییک، لوله حرارتی، مخزن و سینی	۰/۲۹۲	۰/۸۹۴	۱۴/۶۴	۱۱/۰۰	۲۸/۹۴	۴۳/۵۸
آزمایش ۳	فعال (با آینه)	فتوولتاییک، لوله حرارتی، مخزن، سینی و آینه	۰/۳۳۰	۱/۰۰۴	۱۴/۵۵	۱۱/۲۱	۲۹/۵	۴۴/۰۵

فتوولتاییک روزانه ۰/۸۹۴ کیلووات ساعت بر متر مربع انرژی الکتریسیته تولید می‌کند. همانطور که در بخش ۳-۱ اشاره گردید عدم قطعیت هر کدام از پارامترهای اندازه گیری شده در بخش تجربی محاسبه شد، از این رو راندمان کلی (ساعتی) و عدم قطعیت آن برای هر کدام از آزمایش‌های انجام گرفته، محاسبه و در شکل ۱۱ ارائه گردید [۴۴ و ۵۲].

جدول ۵: مقایسه بازدهی روزانه چند نوع آب شیرین کن فعال و غیر فعال از سایر محققان

بازده روزانه (%)	نوع سیستم	مطالعه تجربی مربوط به:
۴۱	فعال، آب شیرین کن توسعه یافته	التاویل و اومارا [۴۵]
۳۸	فعال، آب شیرین کن توسعه یافته با اسپری آب داغ	التاویل و اومارا [۴۵]
۲۱	فعال، آب شیرین کن توسعه یافته با هوای داغ	التاویل و اومارا [۴۵]
۲۹	فعال، آب شیرین کن توسعه یافته با هوا و آب داغ	التاویل و اومارا [۴۵]
۵۹	فعال، استفاده از جاذب، فتیله و رفلکتورها	اومارا و همکاران [۴۶]
۳۰	غیر فعال، آب شیرین کن غیر فعال (سنتی)	اومارا و همکاران [۴۶]
۳۷/۸	فعال، استفاده از شن	ال سیبای و همکاران [۴۷]
۲۷	غیر فعال، آب شیرین کن غیر فعال (سنتی)	ال سیبای و همکاران [۴۷]

یکی از پارامترهایی که می‌توان بر اساس دمای آب شور، دمای داخلی پوشش شیشه‌ای، فشار بخار نسبی در دمای آب و پوشش داخلی شیشه محاسبه نمود ضرایب انتقال حرارت جابجایی، تابشی، تبخیری و کلی سیستم آب شیرین کن می‌باشد که به ترتیب در معادلات (۱۱) الی (۱۴) بیان شده است. ضرایب انتقال حرارت جابجایی، تابشی، تبخیری و کلی سیستم آب شیرین کن (آزمایش ۲) محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

برای دماهای زیر ۷۰ درجه سانتی گراد:

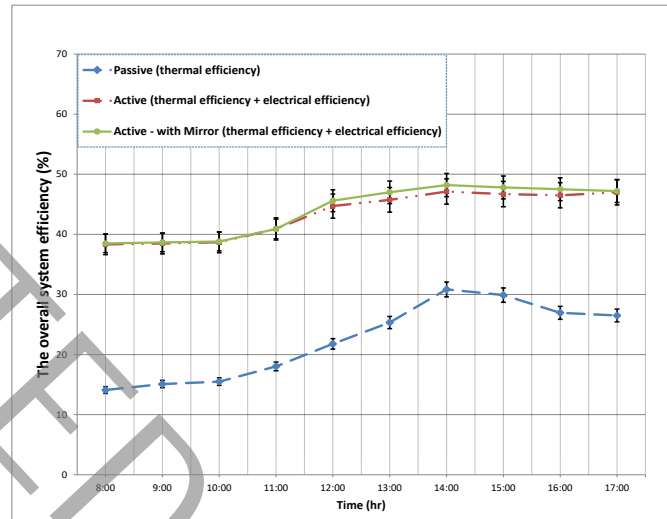
$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 \times \left[1 - 9.4749 \times 10^{-4} T + 1.3132 \times 10^{-7} \times T^2 - 4.7947 \times 10^{-9} T^3 \right] \quad (10)$$

بعد از انجام محاسبات، بازده حرارتی روزانه برای آب شیرین کن سنتی (آزمایش ۱) ۲۲/۴٪ محاسبه گردید و با توجه به عدم تولید الکتریسیته در این حالت، بازده کلی سیستم ۲۲/۴٪ خواهد شد. در ادامه به بررسی سیستم فعال (آزمایش ۲) پرداخته شد که بازده حرارتی روزانه آن ۱۴/۶۴٪ محاسبه گردید. در ادامه به بررسی سیستم فعال با آینه (آزمایش ۳) پرداخته شد که بازده حرارتی روزانه این نوع آب شیرین کن ۱۴/۵۵٪ محاسبه گردید. بازده الکتریکی روزانه برای آزمایش ۱، آزمایش ۲ و آزمایش ۳ به ترتیب ۰، ۱۱/۰۰ و ۱۱/۲۱ درصد و در نهایت بازده کلی سیستم (بازده الکتریکی + بازده حرارتی) به ترتیب ۲۲/۴، ۴۳/۵۸ و ۴۴/۰۵ درصد حاصل شد. نصب آینه سبب افزایش در میزان آب شیرین و میزان توان تولید شده می‌شود. همچنان که در جدول ۴ مشاهده می‌شود بازده کلی حالت فعال (آزمایش ۲) ۴۳/۵۸٪ می‌باشد اما با محاسبه کردن بازده کلی در آزمایش ۳ می‌توان مشاهده کرد که بازده نسبت به آزمایش ۲ با وجود افزایش تولید میزان آب شیرین و توان الکتریکی تولید شده، تغییر چندانی پیدا نکرده است و دلیل آن را می‌توان افزایش سطح کلی تابش (تصویر آینه) بیان کرد. قرار دادن آینه جنبه اقتصادی دارد به طوری که سبب افزایش تولید میزان آب شیرین و توان الکتریکی می‌شود [۴۳]. جدول ۴ بیشینه آب شیرین تولید شده در ساعت ۱۴:۰۰ و همچنین توان الکتریکی تولید شده در یک روز را نشان می‌دهد. جدول ۵ مقدار بازدهی روزانه چند سیستم آب شیرین کن سایر محققان را نشان می‌دهد. پایین بودن بازده حرارتی در آزمایش ۲ و ۳ مربوط به مقاومت حرارتی موجود می‌باشد.

حال به بررسی عملکرد فتوولتاییک و محاسبه راندمان الکتریکی آن پرداخته می‌شود. بازده الکتریکی ساعتی مطابق با معادله (۵) محاسبه شد. همچنان که در جدول ۶ قابل مشاهده است ولتاژ سیستم تابع دما و شدت تابش خورشید است که با افزایش شدت تابش، کاهش می‌یابد. بازده الکتریکی فتوولتاییک در ترکیب با آب شیرین کن همان طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است بالاتر از بازده الکتریکی یک فتوولتاییک تنها می‌باشد. بر اساس اندازه‌گیری‌های به عمل آمده این سیستم آب شیرین کن بر پایه

جدول ۶: بررسی پارامترهای فتولتاییک و بازده الکتریکی (آزمایش ۲)

بازده معادل حرارتی (%)	بازده الکتریکی (%)	توان تولید شده از فتولتاییک (W)	جریان مدار کوتاه (A)	ولتاژ مدار باز (V)	شدت تابش عمود بر پنل خورشیدی (W/m ²)	شدت تابش در راستای افق (W/m ²)	زمان (ساعت)
۲۹/۰	۱۱/۰۲	۲۵	۱/۵۶	۲۰/۱	۳۷۶	۳۳۵	۸:۰۰
۲۹/۵۸	۱۱/۲۴	۴۰	۲/۶۵	۲۰	۵۹۰	۵۲۰	۹:۰۰
۲۹/۵۸	۱۱/۲۴	۶۰	۳/۹۵	۲۰	۸۸۵	۷۷۰	۱۰:۰۰
۳۰/۱۳	۱۱/۴۵	۶۷	۴/۴۸	۱۹/۹	۹۷۰	۸۴۰	۱۱:۰۰
۳۰/۱۸	۱۱/۴۷	۷۰	۵/۰۵	۱۹/۳	۱۰۱۲	۸۷۰	۱۲:۰۰
۲۸/۵۲	۱۰/۸۴	۶۸	۴/۹۵	۱۹/۱	۱۰۴۰	۹۰۰	۱۳:۰۰
۲۷/۰۲	۱۰/۲۷	۶۱	۴/۴۵	۱۹/۲	۹۸۵	۸۶۰	۱۴:۰۰
۲۷/۱۳	۱۰/۳۱	۵۶	۴/۱۲	۱۹/۴	۹۰۰	۷۹۵	۱۵:۰۰
۲۷/۳۹	۱۰/۴۱	۴۹	۳/۵۵	۱۹/۶	۷۸۰	۷۰۵	۱۶:۰۰
۳۰/۵۰	۱۱/۵۹	۴۳	۳/۰۶	۱۹/۷	۶۱۵	۵۷۶	۱۷:۰۰



شکل ۱۲: ضرایب انتقال حرارت جابجایی، تابشی، تبخیری و کلی سیستم آب شیرین کن (آزمایش ۲)

$$h_{ew} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cw} \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} \quad (13)$$

$$h_{rw} = h_{cw} + h_{rw} + h_{ew} \quad (14)$$

۵- تحلیل اقتصادی

پارامترهای بسیاری وجود دارد که بر هزینه تولید آب شیرین در سیستم‌های آب شیرین کن موثرند. تحلیل اقتصادی انجام شده مطابق با تحلیل اقتصادی فت و همکاران [۴۹] انجام شده است. هزینه تمام شده

شکل ۱۱: بازدهی کلی سیستم برای آزمایش ۱، ۲ و ۳ (بازدهی حرارتی + الکتریکی) و محاسبه عدم قطعیت آن‌ها

همانطور که در شکل قابل مشاهده است مقادیر مربوط به ضرایب انتقال حرارت جابجایی h_{cw} و تابشی h_{rw} تقریباً ثابت هستند. ضریب انتقال حرارت تبخیری h_{ew} از ضرایب قبلی مقادیر بیشتری را دارا می‌باشد. ضریب انتقال حرارت کلی می‌باشد که مجموع ضرایب انتقال حرارت جابجایی، تابشی و تبخیری سیستم آب شیرین کن می‌باشد [۴۸].

$$h_{cw} = 0.884 \left[T_w - T_{gi} + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right] \quad (11)$$

$$h_{rw} = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_w + 273)^2 + (T_{gi} + 273)^2 \right] \times \left[(T_w + 273) + (T_{gi} + 273) \right] \quad (12)$$

جدول ۷: تحلیل اقتصادی مطالعه حاضر و مقایسه با سایر سیستم‌های آب شیرین کن

پارامترهای اقتصادی	واحد	دو و همکاران [۵۰]	فائق و همکاران [۵۱]	مصلح و همکاران [۵۲]	مطالعه حاضر (آزمایش ۲)
هزینه سرمایه گذاری (P)	(\$ / m ²)	۱۳۵/۵	۲۰۶	۵۶۸	۲۶۸
ارزش اسقاطی (۱۰ درصد سرمایه اولیه) (S)	(\$ / m ²)	۱۳/۵	۲۰/۶	۵۶/۸	۲۶/۸
طول عمر دستگاه (n)	(Years)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
نرخ تنزیل (i)	(%)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ضریب بازگشت سرمایه (CRF)	-	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷
ضریب نزول سرمایه (SFF)	-	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵
هزینه ثابت سالیانه (CRF×P)	(\$ / m ² .year)	۱۵/۹	۲۴/۱۰۲	۶۶/۷۲	۳۱/۳۵
هزینه اسقاطی سالیانه (SFF×S)	(\$ / m ² .year)	۰/۲۴	۰/۳۵۰۲	۰/۹۹۲	۰/۴۶۹
هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه (۱۵ درصد هزینه ثابت سالیانه)	(\$ / m ² .year)	۲/۳۸	۳/۶۱۵	۱۰/۰۱	۴/۷۰
هزینه سالیانه به ازای متر مربع (هزینه ثابت سالیانه + هزینه تعمیر و نگهداری - هزینه اسقاطی سالیانه)	(\$ / m ² .year)	۱۸/۰۴	۲۷/۳۶۷	۷۵/۷۳	۳۵/۵۸
تولید روزانه آب شیرین	(l / m ² .day)	۴/۱۰۰	۳/۵۲۹	۴/۰۳	۱/۸۱۴
تولید سالیانه (تولید روزانه × ۳۶۵)	(l / m ² .year)	۱۴۹۶/۵	۱۲۸۸/۱۵	۱۵۸۵/۷	۶۶۲/۱
انرژی مفید سالیانه به ازای واحد سطح (تولید سالیانه × حرارت نهان بخار آب) (حرارت نهان بخار = ۰.۶۵ کیلووات ساعت بر لیتر)	(kWh / m ² .yaer)	۹۷۲/۷	۸۳۷/۳۰۲	۱۰۳۰/۷	۴۳۰/۴
هزینه سالیانه آب تقطیر شده به ازای هر لیتر به ازای هر متر مربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر تولید سالیانه)	(\$ / l)	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۸۷	۰/۰۴۲۱	۰/۰۴۷۳
هزینه سالیانه آب تقطیر شده به ازای هر کیلووات ساعت به ازای هر متر مربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر انرژی مفید سالیانه)	(kWh / \$)	۰/۰۱۶۳	۰/۰۲۸۷	۰/۰۶۴۷	۰/۰۷۲۸
هزینه تمام شده به ازای هر لیتر آب شیرین به ازای واحد سطح	(\$ / l)	۰/۰۱۲۱	۰/۰۲۱۲	۰/۰۴۷۸	۰/۰۵۳۷

ازای هر لیتر محاسبه شد و با سایر نتایج مقایسه شد. هزینه آب شیرین تولید شده مطابق با داده‌های ارائه شده برای تحقیق دو و همکاران [۵۰]، فائق و همکاران [۵۱] و مصلح و همکاران [۵۲] به ترتیب ۰/۰۱۲۱، ۰/۰۲۱۲، ۰/۰۴۷۸ دلار به ازای هر لیتر محاسبه شد. ضریب بازگشت سرمایه^۱، ضریب نزول سرمایه^۲، هزینه ثابت سالیانه^۳، ارزش اسقاطی^۴ سالیانه^۵،

دستگاه شامل تجهیزات، جوشکاری و نیروی انسانی (آزمایش ۲)، ۲۶۸ دلار به ازای هر متر مربع تخمین زده شد. طول عمر دستگاه ۲۰ سال در نظر گرفته شد. مساحت زیر تابش در این سیستم (مخزن آب و پنل خورشیدی) ۰/۸۴۳ متر مربع می‌باشد. در جدول ۷ محاسبات اقتصادی انجام شده و با سایر پروژه‌ها مقایسه شده است. میزان اختلاف در سرمایه‌گذاری اولیه با توجه به نوع فن‌آوری مورد استفاده متفاوت می‌باشد. در تحقیق حاضر نیز با توجه به بالا بودن هزینه اولیه پنل خورشیدی، میزان سرمایه‌گذاری اولیه و در نتیجه هزینه تمام شده آب شیرین تولیدی بالا می‌باشد. هزینه تمام شده مطابق با تحلیل اقتصادی به ازای واحد سطح برای مطالعه حاضر ۰/۰۵۳۷ دلار به

- 1 Capital Recovery Factor) CRF(
- 2 Sinking Fund Factor) SFF(
- 3 Annual Fixed Cost) AFC(
- 4 Salvage value
- 5 Annual Salvage Cost) ASC(

فن‌آوری پنل خورشیدی و لوله‌های حرارتی ساخته شد. این آب شیرین‌کن از تجهیزاتی نظیر یک پنل خورشیدی، لوله حرارتی ترموسیفون، مخزن آب و سینی، ورودی آب شور و دو عدد خروجی آب شیرین و پوشش شیشه‌ای شفاف ساخته شد. میزان آب شیرین تولید شده از تقطیر آب شور اندازه‌گیری شد، همچنین دمای قسمت‌های مختلف سیستم از جمله سطح پنل، سطح پوشش شیشه‌ای و سطح لوله حرارتی در کلیه آزمایش‌ها با استفاده از ترموکوپل نوع K مطالعه گردید. بیشینه آب تولید شده در شرایط تقطیر معمولی (آزمایش ۲) مربوط به ساعت ۱۴:۰۰ و به میزان $(\text{kg}/\text{m}^2\text{h})$ 0.2334 از خروجی 0.292 و مقدار $(\text{kg}/\text{m}^2\text{h})$ 0.058 از خروجی ۲ تولید گردید. این پارامتر در حالت غیر فعال (آزمایش ۱) در همان ساعت $(\text{kg}/\text{m}^2\text{h})$ 0.406 حاصل شد. با قرار دادن آینه $(\text{kg}/\text{m}^2\text{h})$ 0.233 آب شیرین تولید شد. بازده حرارتی روزانه برای آزمایش ۱، آزمایش ۲ و آزمایش ۳ به ترتیب $22/4$ ، $16/0$ و $15/89$ درصد محاسبه گردید. بازده الکتریکی روزانه برای آزمایش ۱، آزمایش ۲ و آزمایش ۳ به ترتیب $12/50$ و $12/44$ ، $48/74$ و $22/4$ ، $48/74$ درصد حاصل شد. همچنین این نتیجه حاصل شد که نصب آینه سبب افزایش در میزان آب شیرین و توان تولید شده می‌شود. قرار دادن آینه جنبه اقتصادی دارد به طوری که سبب افزایش تولید میزان آب شیرین و توان الکتریکی می‌شود اما با توجه به افزایش همزمان میزان تولید آب و الکتریسیته و از طرفی افزایش مقدار تابش بر روی سطح پنل خورشیدی تغییرات قابل توجهی در راندمان مشاهده نخواهد شد. هزینه تمام شده برای آب شیرین به ازای هر واحد سطح برای مطالعه حاضر 0.0537 دلار به ازای هر لیتر محاسبه شد که با درآمد ایجاد شده ناشی از فروش انرژی الکتریسیته، هزینه نهایی تمام شده در مقایسه با نتیجه سایر پژوهشگران (0.039 دلار به ازای هر لیتر) بسیار مطلوب ارزیابی شد.

فهرست علائم

مساحت کف مخزن آب شیرین‌کن، m^2	A_{basin}
مساحت آینه، m^2	A_{mirror}
مساحت پنل خورشیدی، m^2	A_{pv}
فیل فاکتور	FF
حرارت نهان آب، J/kg	h_{fg}
شدت تابش بر کف مخزن آب شیرین‌کن، W/m^2	I_{basin}
شدت تابش بر سطح پنل خورشیدی، W/m^2	I_{pv}
شدت تابش روی آینه، W/m^2	I_{mirror}
جریان مدار کوتاه، A	I_{sc}
دبی آب شیرین تولید شده، kg/s	\dot{y}
دمای بیرونی سطح پوشش شیشه‌ای، $^\circ\text{C}$	m
دمای آدیاباتیک سطح لوله حرارتی، $^\circ\text{C}$	T_g
	T_{hp}

هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه^۱، هزینه سالیانه به ازای هر متر مربع^۲ به ترتیب در معادلات زیر بیان شده است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (16)$$

$$AFC = CRF(P) \quad (17)$$

$$S = 0.1(P) \quad (18)$$

$$ASC = SFF(S) \quad (19)$$

$$AMC = 0.15(AFC) \quad (20)$$

$$TAC = AFC - ASC + AMC \quad (21)$$

بعد از محاسبه اقتصادی انجام شده ذکر این نکته الزامی است که سیستم آب شیرین‌کن دارای تولید انرژی الکتریسیته می‌باشد. همان‌طور که بیان شد مقدار 0.894 کیلووات ساعت به ازای هر متر مربع پنل خورشیدی توان الکتریکی تولید می‌کند که می‌توان آن را به شبکه برق سراسری فروخت و به عنوان درآمد طرح در نظر گرفت. هزینه فروش برق به ازای هر کیلووات ساعت در قسمت‌های مختلف جهان متفاوت است. مطابق با داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی^۳، اگر به صورت میانگین هزینه خرید برق 0.101 دلار به ازای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شود با توجه به این که سیستم حاضر روزانه 0.894 کیلووات ساعت به ازای هر متر مربع توان الکتریکی تولید می‌کند دارای درآمد روزانه 0.0902 دلار به ازای هر متر مربع می‌شود. از طرفی هزینه تولید آب نیز 0.0537 دلار به ازای هر لیتر محاسبه گردید که با تولید مقدار $1/814$ لیتر در روز میزان هزینه روزانه 0.0974 دلار به ازای هر متر مربع باید در نظر گرفته شود حال با توجه به درآمد حاصله از فروش برق می‌توان آن را از هزینه تولید آب کم نمود. به این ترتیب با انجام مقایسه بین هزینه نهایی می‌توان هزینه تولید آب (0.072 دلار به ازای هر متر مربع) در پژوهش حاضر را بسیار مطلوب ارزیابی کرد. با تقسیم کردن هزینه تولید آب (دلار به ازای هر متر مربع) بر تولید روزانه آب شیرین، هزینه نهایی تولید آب شیرین بعد از اعمال فروش الکتریسیته به شبکه (0.039 دلار به ازای هر لیتر) محاسبه خواهد شد.

۶- نتیجه گیری

یک سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی تبخیری جدید با بهره‌گیری از

- 1 Annual Maintenance Cost) AMC(
- 2 Total Annual Cost) TAC(
- 3 Energy Information Administration) EIA(

- [12] Tiwari, G., Shukla, S., Singh, I., "Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature" *Desalination*, 154 (2003) 171-185.
- [13] Kumar, S., Tiwari, A., "Design, fabrication and performance of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) active solar still" *Energy Convers. Manag.* 51 (2010) 1219–1229.
- [14] Shitzer, A., Kalmanoviz, D., Zvirin, Y., Grossman, G., "Experiments with a flat plate solar water heating system in thermosyphonic flow" *Sol. Energy*, 22 (1979) 27-35.
- [15] Chun, W., Kang, Y.H., Kwak, H.Y., Lee, Y.S., "An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters" *Appl. Therm. Eng.* 19 (1999) 807-817.
- [16] Yu, Z., Hu, Y., Hong, R., Cen, K., "Investigation and analysis on a cellular heat pipe flat solar heater" *Heat Mass Transf.* 42 (2005) 122-128.
- [17] Rittidech, S., Wannapakne, S., "Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP)" *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1978-1985.
- [18] Hussein, H., "Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes flat plate solar collector with cross flow heat exchanger" *Energy Convers. Manag.* 48 (2007) 1266-1272.
- [19] Azad, E., "Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector" *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32 (2008) 1666-1672.
- [20] Jahangiri Mamouri, S., Gholami Derami, H., Ghiasi, M., Shafii, M.B., Shiee, Z., "Experimental investigation of the effect of using thermosyphon heat pipes and vacuum glass on the performance of solar still" *Energy*, 75 (2014) 501-507.
- [21] Kargar Sharif Abad, H., Ghiasi, M., Jahangiri Mamouri, S., Shafii, M.B., "A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe" *Desalination*, 311 (2013) 206-210.
- [22] Giwa, A., Fath, H., Hasan, S., "Humidification–dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (PV-HDH) for small-scale sustainable water and power production" *Desalination*, 377 (2016) 163–171.
- [23] Omara, Z.M., Abdullah, A.S., Dakrory, T., "Improving the productivity of solar still by using water fan and wind Turbine" *Sol. Energy*, 147 (2017) 181–188.
- [24] Al-Karaghoul, A.A., Alnaser, W.E., "Experimental comparative study of the performances of single and double basin solar-stills" *Appl. Energy*, 77 (2004) 317–325.
- [25] Tiwari, G.N., Singh, S.K., Bhatnagra, V.P., "Analytical thermal modeling of multi-basin solar still" *Energy Convers. Manag.* 34(12) (1993) 1261–1266.
- [26] El-Sebaili, A.A., "Thermal performance of a triple -basin solar still" *Desalination*, 174 (2005) 23–37.
- دمای سطح پنل خورشیدی، °C T_{pv}
ولتاژ مدار باز، V V_{oc}
توان تولیدی توسط پنل، W W_{pv}
بازده حرارتی روزانه سیستم آب شیرین کن η_D
بازده الکتریکی پنل خورشیدی η_e
بازده حرارتی معادل بازده الکتریکی پنل خورشیدی η_E
بازده کلی سیستم (بازده حرارتی+بازده الکتریکی) η_O
بازده حرارتی ساعتی سیستم آب شیرین کن η_H
- مراجع**
- [1] Bazargan, M., Ahmadi, M., "Freshwater production using wet air underground cooling and solar energy" *Journal of Renewable Energy*, 1 (2014) 4-15. (In Persian)
- [2] Lui, J., Dorjderem, A., Fu, J., Lei, X., Lui, H., Macer, D., Qiao, Q., Sun, A., Tachiyama, K., Yu, L., Zheng, Y., "Water ethics and water resource management, Ethics and Climate Change in Asia and the Pacific (ECCAP) Project" UNESCO Bangkok, (2011).
- [3] "Water and Jobs" the United Nations World Water Development Report, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, (2016).
- [4] "Renewable energy desalination: an emerging solution to close the Middle East and North Africa's water gap" MENA Development Report, (2012).
- [5] Manokar, A.M., Murugavel, K.K., Esakkimuthu, G., "Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still-a review" *Renew. Sust. Energ. Rev.* 38 (2014) 309–322.
- [6] Jones, J.A., Lackey, L.W., Lindsay, K.E., "Effects of wind and choice of cover material on the yield of a passive solar still" *Desalin. Water Treat.* 52 (2014) 48–56.
- [7] Nafey, A.S., Abdelkader, M., Abdelmotalip, A., Mabrouk, A., "Parameters affecting solar still productivity" *Energy Convers. Manag.* 41 (2000) 1797–1809.
- [8] Taghvaei, H., Taghvaei, H., Jafarpur, K., Estahbanati, M.R.K., Feilizadeh, M., Feilizadeh, M., Ardekani, A.S., "A thorough investigation of the effects of water depth on the performance of active solar stills" *Desalination*, 347 (2014) 77–85.
- [9] Sanjeev, K., Tiwari, G.N., Singh, H.N., "Annual performance of an active solar distillation system" *Desalination*, 127 (2000) 79–88.
- [10] Sanjeev, K., Tiwari, G.N., "Optimization of daily yield for an active double effect distillation with water flow" *Energy Convers. Manag.* 40 (1999) 703–715.
- [11] El-Sebaili, A.A., "Effect of wind speed on active and passive solar stills" *Energy Convers. Manag.* 45 (2004) 1187–1204.

- transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: an experimental validation" *Desalination*, 246 (2009) 304–318.
- [43] Bicer, Y., Sprotte, A.F.V., Dincer, I., "Concentrated solar light splitting using cold mirrors for photovoltaics and photonic hydrogen production applications" *Appl. Energy*, 197 (2017) 169–182.
- [44] Namjoo, A., Sarhaddi, F., Sobhnamayan, F., Alavi, M.A., Mahdavi Adeli, M., Farahat, S., "Exergy performance analysis of solar photovoltaic thermal (PV/T) air collectors in terms of exergy losses" *Journal of the Energy Institute*, 84 (2011) 132-145.
- [45] Eltawil, M.A., Omara, Z.M., "Enhancing the solar still performance using solar photovoltaic, flat plate collector and hot air" *Desalination*, 349 (2014) 1–9.
- [46] Omara, Z.M., Kabeel, A.E., Abdullah, A.S., Essa, F.A., "Experimental investigation of corrugated absorber solar still with wick and reflectors" *Desalination*, 381 (2016) 111–116.
- [47] El-Sebaei, A.A., Yaghmour, S.J., Al-Hazmi, F.S., Faidah, A.S., Al-Marzouki, F.M., Al-Ghamdi, A.A., "Active single basin solar still with a sensible storage medium" *Desalination*, 249 (2009) 699–706.
- [48] Tiwari, G.N., Vimal Dimri, Y., Singh, U., Chel, A., Sarkar, B., "Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system" *Int. J. Energy Res.*, 31 (2007) 1465–1482.
- [49] Fath, H.E.S., El-Samanoudy, M., Fahmy, K., Hassabou, A., "Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations" *Desalination*, 159 (2003) 69-79.
- [50] Dev, R., Abdul-Wahab, S.A., Tiwari, G., "Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid" *Appl. Energy*, 88 (2011) 252-264.
- [51] Faegh, M., Shafii, M.B., "Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes" *Desalination*, 409 (2017) 128–135.
- [52] Jafari Mosleh, H., Jahangiri Mamouri, S., Shafii, M.B., Hakim Sima, A., "A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic through collector" *Energy Convers. Manag.* 99 (2015) 141–150.
- [27] Badran, A.A., "Inverted trickle solar still: effect of heat recovery" *Desalination*, 133 (2001) 167–173.
- [28] Tiwari, G.N., Singh, H.N., Tripathi, R., "Present status of solar distillation" *Sol. Energy*, 75 (2003) 367–373.
- [29] Yuichi, Y., Haruki, S., "Development of small-scale multi effect solar still" *Int. Sol. Energy Conf.* (2003) 167–173.
- [30] Tanaka, H., Nakatake, Y., "Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter" *Sol. Energy*, 83 (2009) 785–789.
- [31] Dhiman, N.K., "Transient analysis of a spherical solar still" *Desalination*, 69 (1988) 47–55.
- [32] Ismail, B.I., "Design and performance of a transportable hemispherical solar still" *Renew. Energy*, 34 (2009) 145–150.
- [33] Rubio-Cerda, E., Porta-Gandara, M.A., Fernandez Zayas, J.L., "Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still" *Renew. Energy*, 27 (2002) 301–308.
- [34] Huang, B., Lin, T., Hung, W., Sun, F., "Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems" *Sol. Energy*, 70 (2001) 443–448.
- [35] Koech, S.K.R.R.K., Ondieki, H.O., Tonui, J.K., "Performance analysis of a PV/T air system based on heat transfer perspective" *Int. J. Sci. Eng. Res.* 3 (2012) 1–7.
- [36] Teo, H.G., Lee, P.S., Hawlader, M.N.A., "An active cooling system for photovoltaic modules" *Appl. Energy*, 90 (2012) 309–315.
- [37] Narayan, G.P., Sharqawy, M.H., Lienhard, J.H., Zubair, S.M., "Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles" *Desalin. Water Treat.* 16 (2010) 339–353.
- [38] Cuce, E., Cuce, P.M., "Improving thermodynamic performance parameters of silicon photovoltaic cells via air cooling" *Int. J. Ambient Energy*, 35 (2013) 193–199.
- [39] Singh, A., Tiwari, G., Sharma, P., Khan, E., "Optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location" *Energy Convers. Manag.* 36 (1995) 175-181.
- [40] Ji, J., Lu, J.P., Chow, T.T., He, W., Pei, G., "A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water heating system with natural circulation" *Appl. Energy*, 84 (2007) 222-237.
- [41] Saeedi, F., Sarhaddi, F., Behzadmehr, A., "Optimization of a PV/T (photovoltaic/thermal) active solar still" *Energy*, 87 (2015) 142-152.
- [42] Dwivedi, V.K., Tiwari, G.N., "Comparison of internal heat

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

P. Hooshmand, Mo. Behshad Shafii, R. Roshandel, Experimental Investigation of a solar system to produce fresh water from waste heat of photovoltaic module using Heat pipes, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-14.

DOI:

