نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۵۱۳ تا ۱۵۳۰
DOI: 10.22060/mej.2018.14556.5887

مطالعه تجربی و تحلیل اقتصادی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با شرایط مختلف

محمد وفائی[۱]، محمد برزگر نژاد[۲]، علی اربابی [۲]، سید احسان شکیب*[۲]، محمد مصطفی غفوریان[۱]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران.

خلاصه: کمبود آب شیرین به‌عنوان یک بحران جدی در دنیا و تلاش برای پیدا کردن راه‌حل، یکی از مهم‌ترین بحث‌های روز دنیا می‌باشد که پژوهشگران زیادی را به خود مشغول ساخته است. در این پژوهش یک دستگاه آب شیرین خورشیدی آبشاری با بازتابنده خارجی طراحی و ساخته شد و در ۸ روز متوالی مورد آزمایش قرار گرفت. جهت افزایش تولید این آب‌شیرین‌کن روش‌های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت که عبارت‌اند از ۱) تعبیه تعدادی فین روی پله‌ها و در مسیر گذر آب به‌منظور ایجاد نقاط داغ، ۲) استفاده از بازتابنده‌های داخلی در پایه پله‌ها و ۳) استفاده از چگالنده خارجی برای افزایش میزان چگالیده بخار تولیدی. سپس سیستم موردمطالعه با ترکیب این روش‌ها به‌صورت دوتایی و سه‌تایی در هشت حالت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج به همراه تحلیل اقتصادی و قیمت تمام‌شده محصول ارائه شد. نتایج نشان داد استفاده از همه روش‌های موردنظر به‌صورت هم‌زمان، منجر به تولید بیشترین میزان آب شیرین می‌شود. این در حالی است که کمترین قیمت آب شیرین تولیدی در حالت پایه با فین‌های تعبیه‌شده، مقدار ۱۳۴۱/۵ ریال بر لیتر به دست می‌آید. از سوی دیگر ازنظر راندمان، در حالتی که در آب‌شیرین‌کن از یک چگالنده خارجی استفاده گردد بیشترین راندمان حاصل می‌شود و حالت پایه با فین جایگاه سوم را در بین هشت حالت موردمطالعه دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۰۱

کلمات کلیدی:
آب‌شیرین‌کن خورشیدی
راهکارهای افزایش تولید
ارزیابی اقتصادی
راندمان
قیمت محصول

۱- مقدمه

آب یکی از فراوان‌ترین منابع روی زمین است که حدود ۷۵ درصد سطح زمین را پوشانده است. با این‌حال کمبود آب آشامیدنی در بسیاری از کشورها یک بحران است. برای مقابله با کمبود آب باید بهترین و اقتصادی‌ترین راه شیرین سازی آب انتخاب شود [۱]. یکی از منابع تأمین انرژی لازم برای شیرین سازی آب‌های شور، انرژی خورشید است که به دلیل عدم نیاز به فناوری‌های پرهزینه و پیشرفته می‌تواند به‌عنوان یک منبع مفید به کار گرفته شود. از دیگر مزایای استفاده از انرژی خورشید صرفه‌جویی در مصرف نفت و گاز، آلوده نشدن محیط‌زیست، رشد و توسعه اقتصادی و استهلاک کم است [۲]. تا به امروز تحقیق‌های متعددی درزمینه آب‌شیرین‌کن و افزایش محصول آن انجام‌گرفته که برخی از مطالعات و تحقیقات با توجه به پژوهش‌های پیش رو در ادامه موردبحث قرارگرفته است. اومارا[۱] و همکاران [۳] عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای با صفحه فین‌دار، صفحه شیاردار و صفحه تخت را در شرایط آب و هوایی یکسان با عمق آب ۵۰ میلی‌متر مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که محصول آب‌شیرین‌کن با صفحه فین‌دار و شیاردار نسبت به صفحه تخت به ترتیب ۴۰ و ۲۱٪ افزایش دارد. اومارا و همکاران [۴] برای افزایش انرژی ورودی و محصول آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی از بازتابنده‌های داخلی و خارجی (بالا و پایین) برای آن استفاده کردند. نتایج، افزایش ۱۲۵٪ محصول را نسبت به آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای ساده نشان دادند. هزینه هر لیتر آب شیرین تولیدی آب‌شیرین‌کن پلکانی با بازتابنده‌ها و آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای به ترتیب ۰/۰۴۸ و ۰/۰۳۱ دلار به دست آمد. باردوج[۲] و همکاران [۵] برای افزایش محصول آب‌شیرین‌کن خورشیدی از کانال‌های پلاستیکی به‌عنوان چگالنده استفاده کردند. نتایج نشان دادند که اگر دمای آب ورودی ۷۳ °C باشد تولید محصول نیز ۰/۷۵ لیتر بر ساعت

1 Omara

2 Bhardwaj

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: se.shakib@buqaen.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

است. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از خنک‌کننده تبخیری یا استفاده از جریان هوا بر روی کانال‌ها تولید محصول را تا بیش از ۰/۹۵ لیتر بر ساعت افزایش می‌دهد. کومار[1] و همکاران [۶] برای افزایش کارایی آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای تک شیبه از سیستم تحریک‌کننده که باعث شکستن لایه‌مرزی آب و افزایش سطح تماس آب با هوا می‌شود به همراه فن و چگالنده خارجی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که محصول تولیدی ۳۹/۴۹٪ نسبت به آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای ساده افزایش‌یافته است. گناناراج[2] و همکاران [۷] یک آب‌شیرین‌کن دو حوضچه‌ای طراحی کردند که حوضچه بالایی آن به‌صورت پلکانی و در سطح پله‌ها از مواد ذخیره کننده انرژی استفاده شده بود. آن‌ها این آب‌شیرین‌کن را به دو بازتابنده خارجی مجهز کردند و هم‌چنین با کلکتور صفحه تخت به همراه یک استخر خورشیدی کوچک ترکیب کردند. نتایج افزایش محصول ۵۷/۸۳- ۱۲۷/۶۵٪ را در آزمایش‌های مختلف نسبت به آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای ساده نشان دادند. ربهی[3] و همکاران [۸] برای بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای از صفحه جاذب دارای فین و چگالنده خارجی استفاده کردند. نتایج افزایش ۴۱/۹۵٪ محصول آب‌شیرین‌کن دارای فین و چگالنده نسبت به آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای فاقد فین و چگالنده را نشان دادند. هانسن[4] و موروگاول[5] [۹] برای بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار، آن را با یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای ساده و یک تانک ذخیره کننده آب گرم ترکیب کردند. آن‌ها همچنین سه نوع صفحه تخت، شیاردار و فین شکل را به‌عنوان صفحه جاذب آب‌شیرین‌کن شیب‌دار استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بهترین نوع صفحه جاذب فین شکل است و راندمان سیستم ترکیبی با این نوع صفحه جاذب ۴۶/۹٪ است. کابیل[6] و همکاران [۱۰] برای افزایش بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای در آن از ماسه به‌عنوان مواد ذخیره کننده انرژی و پارچه کنف به‌عنوان فتیله استفاده کردند. نتایج نشان دادند که میزان محصول تولیدی و راندمان آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده نسبت به آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای ساده افزایش‌یافته است. سعدی[7] و همکاران [۱۱] برای افزایش محصول آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای یک آب‌شیرین‌کن پلکانی جدید پیشنهاد دادند. آن‌ها از تبخیرکننده داخلی که دارای چندین سینی است استفاده کردند و بدین‌وسیله سطح تبخیر را افزایش دادند. نتایج آن‌ها افزایش محصول ۴۷/۱۵- ۱۰۴/۷۳٪ را در فصول مختلف سال نشان داد. کابیل و همکاران [۱۲] به مطالعه تأثیر چند ماده تغییر فاز دهنده آلی و غیر آلی بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج نشان دادند که ضخامت این مواد تأثیر چندانی بر محصول آب‌شیرین‌کن ندارد و بهینه‌ترین ماده تغییر فاز دهنده را A۴۸ معرفی کردند.

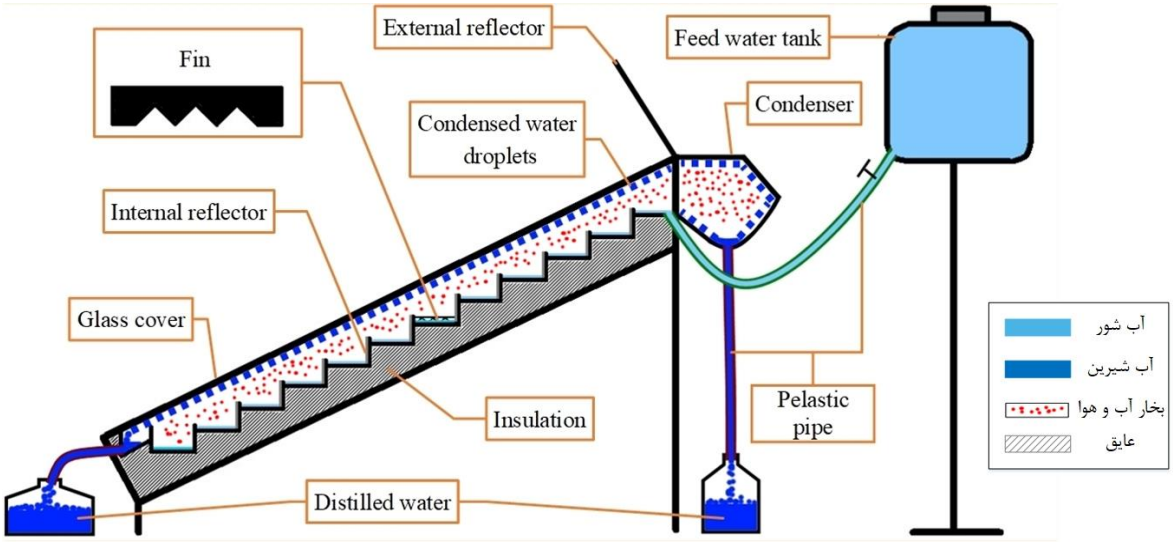
مطالعه‌ها نشان می‌دهد که بحث استفاده از سیستم‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی ازجمله مواردی است که در سال‌های اخیر با اقبال زیادی مواجه شده است. با این‌وجود در مقاله‌های معدودی به مطالعه تجربی این سیستم‌ها با ترکیب چند روش افزایش محصول تولیدی پرداخته شده است. درواقع مطالعه چگونگی استفاده و ترکیب روش‌های افزایش محصول تولیدی و نیز مطالعه تجربی آن ازجمله مواردی است که خلأ آن در ادبیات موضوع کاملاً مشهود است. در همین راستا در این پژوهش با در نظر گرفتن عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، مدلی از یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی آبشاری طراحی و ساخته شده است. در این سیستم برای افزایش محصول تولیدی در قسمت جلویی هر پله آب‌شیرین‌کن، آب‌بندهایی تعبیه‌شده تا آب مسیر مارپیچی را طی کند و زمان بیشتری با صفحه جاذب انرژی در تماس باشد. به‌منظور ایجاد نقاط داغ در سطح پله‌ها و افزایش نرخ تبخیر، از فین‌های فلزی در سطح پله‌ها استفاده گردید. همچنین روش‌های دیگری مانند استفاده از بازتابنده‌های داخلی در قسمت پایه پله‌ها برای انعکاس پرتوهای خورشید به کف پله‌ها و افزایش دمای آن‌ها و نیز استفاده از چگالنده خارجی برای کمک به چگالیده بخار تولیدی در آب‌شیرین‌کن ازجمله مواردی است که در این پژوهش بررسی شده است درنهایت استفاده از ترکیب این روش‌ها به‌صورت دوتایی و سه‌تایی مورد آزمایش قرارگرفته است و نتایج عملکردی و اقتصادی ارائه می‌شود.

۲- توصیف سیستم

با توجه به اینکه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تقطیری در اشکال زیادی ساخته می‌شوند، با مطالعه ادبیات موضوع و کارهای گذشته،

1 Kumar
2 Gnanaraj
3 Rabhi
4 Hansen
5 Murugavel
6 Kabeel
7 Saadi

یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی آبشاری طراحی و ساخته شد. شکل ۱ شماتیک سیستم آب‌شیرین‌کن آبشاری ساخته‌شده را نشان می‌دهد و با توجه به این شکل جریان آب شور از منبع وارد سطح اولین پله آب شیرین کن می‌شود و به دلیل تعبیه آب بندهایی جلو هر پله آب مسیر مارپیچ را در طول پله‌های آب‌شیرین‌کن طی می‌کند. قسمتی از بخارهای تشکیل شده، روی پوشاننده شیشه‌ای آب شیرین کن تقطیر شده و قطرات آب در قسمت پایین پوشاننده شیشه‌ای جمع‌آوری می‌شوند. بخشی دیگر از بخارهای تشکیل شده وارد چگالنده خارجی می‌شوند و در آنجا تقطیر شده و از کف چگالنده به ظرف جمع‌آوری آب شیرین انتقال می‌یابند. یکی از مسائل مهم در کارکرد آب‌شیرین‌کن‌های تقطیری افزایش نرخ تبخیر است که این مسئله با افزایش دمای فضای داخلی تبخیرکننده و حوضچه آب می‌تواند صورت پذیرد. برای دست‌یابی به این هدف، در نقاط مختلف سطح پله‌ها تعدادی فین گالوانیزه و در سطح عمودی پله‌ها بازتابنده‌های داخلی از جنس فولاد زنگ نزن تعبیه شد تا در سطوح پله‌ها نقاط داغ ایجادشده و دمای کف پله‌ها بالاتر رود و در نتیجه میزان تبخیر افزایش یابد. فین‌ها که در شکل ۱ قابل‌مشاهده هستند طوری ساخته و نصب شدند که در جریان آب خللی ایجاد نشود. همچنین از بازتابنده خارجی برای انعکاس پرتوهای خورشید به کف پله‌ها نیز استفاده شده است. شکل ۲ مدل واقعی این آب‌شیرین‌کن



شکل ۱: شماتیک کلی آب‌شیرین‌کن خورشیدی آبشاری همراه با فین، بازتابنده داخلی، خارجی و چگالنده

Fig. 1. Total schematic of cascade solar water desalination with fin, condenser, internal and external reflector

شکل ۲: نمایی از آب‌شیرین‌کن آبشاری ساخته‌شده

Fig. 2. A schematic of cascade solar water desalination

Table 1. Geometrical specifications of desalination of case study

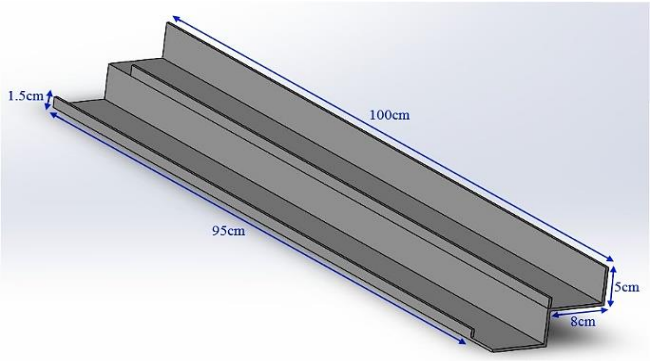
جدول ۱: مشخصات هندسی آب‌شیرین‌کن موردمطالعه

مشخصات	مقدار
تعداد پله	۱۱
ارتفاع پله‌ها (cm)	۵
طول هر پله (cm)	۱۰۰
عرض هر پله (cm)	۸
جنس بازتابنده‌ها	فولاد زنگ نزن ۳۰۴
نوع شیشه	شیشه سکوریت باضخامت ۱۰ میلی‌متر
ضریب شکست شیشه	۱/۵ -۱/۶
جنس چگالنده	فولاد زنگ نزن ۳۰۴
جنس فین‌ها	گالوانیزه

خورشیدی با جنس ورق گالوانیزه با ابعاد ۲×۱ مترمربع را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی و دیگر پارامترهای این آب‌شیرین‌کن در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ قابل‌مشاهده است در آب‌شیرین‌کن ساخته‌شده، در لبه هر پله از آب‌بندهایی به ارتفاع ۱/۵ سانتی متر و طول ۹۵ سانتی‌متر استفاده‌شده تا آب یک مسیر مارپیچ طولانی را در طول پله‌ها طی کند با این هدف که زمان بیشتری با صفحه جاذب انرژی در تماس باشد و بتواند گرمای بیشتری را جذب کند. از سوی دیگر برای جذب حداکثر نور خورشید، رنگ صفحه باید تیره باشد که جهت نیل به این منظور، از رنگ کوره‌ای مشکی مات برای ورق استفاده شده است. همچنین از پشم‌شیشه برای عایق کردن و جلوگیری از اتلاف حرارت استفاده شده است. جنس قاب دستگاه از ورق پلاستیکی پی‌وی‌سی و پایه فلزی از جنس آهن انتخاب شده است و پوشاننده آب‌شیرین‌کن از صفحه شیشه‌ای باضخامت ۱۰ میلی‌متر است. جنس بازتابنده‌ها نیز فولاد زنگ نزن است که در برابر رطوبت و زنگ‌زدگی مقاوم است.

شکل ۴ چگالنده مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که از ورق فولاد زنگ نزن ساخته شده است. به‌منظور هرچه خنک‌تر کردن چگالنده، از ورق پلاستیکی پلی کربنات به‌عنوان سایه‌بان استفاده شده است.



شکل ۳: هندسه پله‌های آب‌شیرین‌کن به همراه آب‌بند و ابعاد آن

Fig. 3. Geometry of desalination stairs along with weir and dimensions

شکل ۴: چگالنده آب‌شیرین‌کن به همراه سایه‌بان

Fig. 4. Desalination condenser along with canopy

۳- شرایط انجام آزمایش

به‌منظور ارزیابی جامع سیستم آب‌شیرین‌کن آبشاری، هفت حالت مختلف به همراه حالت پایه آب‌شیرین‌کنی در روزهای مختلف موردبررسی و تحلیل قرار گرفت. منظور از حالت پایه، آب‌شیرین‌کن صرفاً با یک بازتابنده خارجی است. سپس روش‌های پیشنهادی برای

افزایش محصول آب‌شیرین‌کن به‌صورت جداگانه و ترکیبی اعمال‌شده و در روزهای مختلف بر روی آب‌شیرین‌کن آزمایش شد. حالت‌های مختلف آزمایش‌شده عبارت‌اند از:

حالت اول: حالت پایه آب‌شیرین‌کن

حالت دوم: استفاده از فین در سطح پله‌های آب‌شیرین‌کن

حالت سوم: استفاده از بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

حالت چهارم: استفاده از فین و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

حالت پنجم: استفاده از چگالنده خارجی در آب‌شیرین‌کن

حالت ششم: استفاده از چگالنده خارجی و فین در آب‌شیرین‌کن

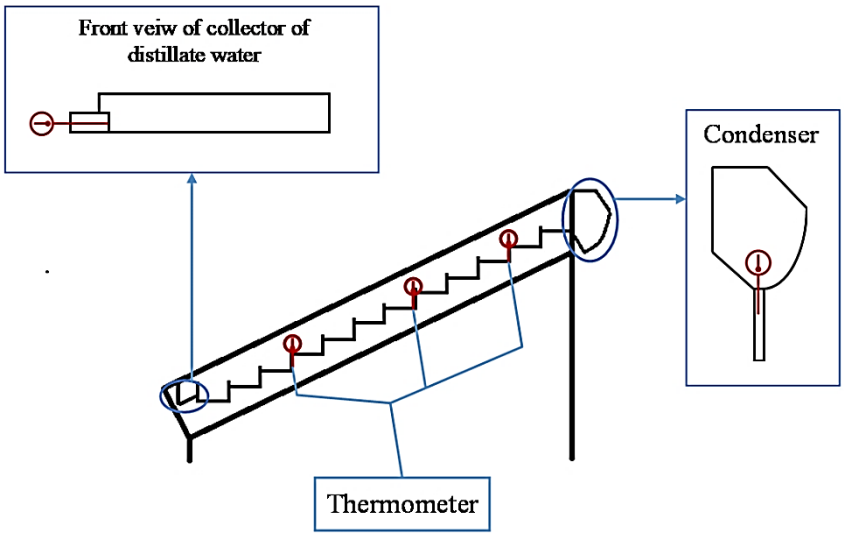
حالت هفتم: استفاده از چگالنده خارجی و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

حالت هشتم: استفاده از چگالنده خارجی، فین و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

ساین[1] و تیواری[2][۱۳] ثابت کردند، زمانی بیشترین محصول سالانه حاصل می‌شود که شیب آب‌شیرین‌کن برابر با عرض جغرافیایی منطقه در نظر گرفته شود. کلیه آزمایش‌ها در شهر قائن با عرض جغرافیایی ۳۲-۳۳ درجه واقع در استان خراسان جنوبی انجام گرفت و زاویه قرارگیری آب‌شیرین‌کن نسبت به افق برابر با عرض جغرافیایی منطقه تنظیم شد. در این پژوهش از وزش باد صرف‌نظر شده و آزمایش‌ها در شرایط جوی پایدار انجام‌گرفته است. به‌منظور ایجاد جریان با دبی ثابت از یک مخزن آب مرتفع جهت تغذیه آب‌شیرین‌کن استفاده شد، تا جریان آب پایا باشد. میزان کل املاح موجود در آب‌شور مورد آزمایش در تمامی آزمایش‌ها ppm ۱۲۵۰ است. همچنین از پنج دماسنج (نوع k با دقت ۰/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) برای اندازه‌گیری دمای فضای داخل، دمای آب شیرین خروجی اصلی و دمای آب شیرین خروجی از چگالنده استفاده شده است که موقعیت آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. حروف اختصاری استفاده‌شده در نمودارها برای دماها و میزان آب شیرین تولیدی هر قسمت به شرح زیر است. لازم به ذکر است که دماها برحسب درجه سانتی‌گراد و میزان آب شیرین تولیدی برحسب میلی‌لیتر بر مترمربع است.

T_{in}: دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن را که توسط سه ترمومتر که در سه ناحیه روی پایه پله‌ها نصب شده‌اند، گزارش می‌کند.

T_{mf}: دمای آب شیرین خروجی اصلی که توسط یک ترمومتر در قسمت خروجی آب شیرین اصلی اندازه‌گیری شده است را گزارش می‌کند.



شکل ۵: شماتیک موقعیت دماسنج‌ها در محفظه داخلی سیستم آب‌شیرین‌کن

Fig. 5. Schematic position of the thermometers in the internal chamber of the desalination system

1 Singh
2 Tiwari

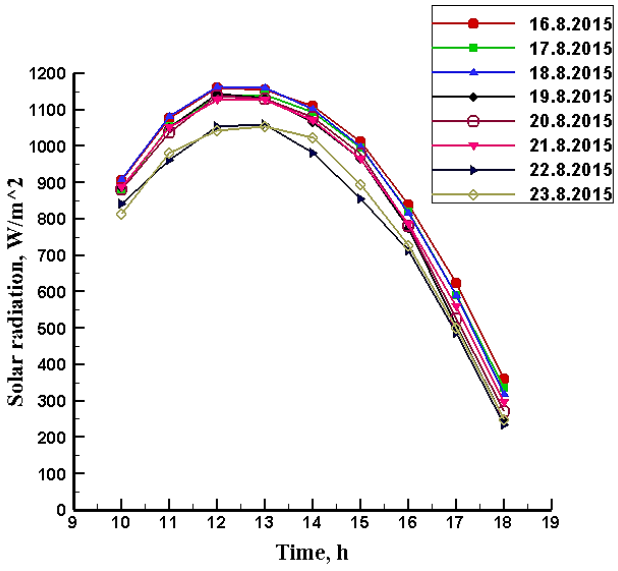
T_{cf}: دمای آب شیرین خروجی چگالنده که توسط یک ترمومتر در خروجی چگالنده اندازه‌گیری می‌شود.

T_a: دمای محیط

P_m: میزان آب شیرین تولیدی خروجی اصلی

P_c: میزان آب شیرین تولیدی خروجی چگالنده

آزمایش‌ها در ۸ روز متوالی از تاریخ ۲۰۱۵/۸/۱۶ (۱۳۹۴/۵/۲۵) تا ۲۰۱۵/۸/۲۴ (۱۳۹۴/۶/۲) به‌صورت ۲۴ ساعته انجام گرفته است که تغییرات تابش خورشیدی برحسب ساعت در روزهای آزمایش در شکل ۶ ارائه شده است. داده‌های موجود از اداره هواشناسی شهر قائن تهیه شده است. با توجه به شکل مذکور، مشاهده می‌شود که بیشترین تابش خورشیدی در ساعت‌های ۱۲ و ۱۳ بوده درحالی‌که در نمودارهای هر حالت آزمایش مشاهده شد که بیشترین دمای داخل محفظه معمولاً در ساعت‌های ۱۴ و ۱۵ است به این دلیل که دستگاه آب‌شیرین‌کن در هر حالت آزمایش رو به جنوب بوده و در ساعت‌های ۱۲ تا ۱۳ خورشید به دستگاه به‌طور عمود نمی‌تابد. بیشترین مقدار تابش، در روز اول آزمایش یعنی ۲۰۱۵/۸/۱۶ (۱۳۹۴/۵/۲۵) بوده که در این روز بیشینه تابش در ساعت ۱۲ با مقدار ۱۱۵۹ وات بر مترمربع بوده است. شدت تابش روزانه در هر روز آزمایش نسبت به روز قبل کمتر شده که در دو روز آخر آزمایش به کمترین مقدار خود در این بازه زمانی رسیده است. در روز هفتم یعنی ۲۰۱۵/۸/۲۲ (۱۳۹۴/۵/۳۱) و روز هشتم آزمایش یعنی ۲۰۱۵/۸/۲۳ (۱۳۹۴/۶/۰۱) بیشترین مقدار تابش به ترتیب ۱۰۶۱ و ۱۰۵۵ وات بر مترمربع و در ساعت ۱۳ بوده است.



شکل ۶: نمودار شدت تابش برحسب ساعت در روزهای مختلف آزمایش

Fig. 6. Diagram of radiation intensity in different test days

۴- راندمان آب‌شیرین‌کن

به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن از راندمان مطابق رابطه (۱) استفاده خواهد شد. این رابطه نشان می‌دهد که راندمان برابر با نسبت مقدار انرژی مفید استفاده‌شده برای شیرین سازی آب به مقدار تابش کل خورشید است [۱ و ۲].

$$\eta = \frac{Mh_{fg}}{I \times 3600} \qquad (۱)$$

که در آن M کل آب شیرین تولیدی، h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب ($۲۲۵۷\ \mathrm{kJ/kg}$ در فشار ۱ اتمسفر برای آب) و I شدت تابش خورشیدی است.

۵- تحلیل اقتصادی

با توجه به اهمیت ارزیابی اقتصادی در تولید یک محصول، در این پژوهش در کنار مسائل فنی به تحلیل اقتصادی سیستم به‌منظور محاسبه قیمت آب شیرین تولیدی پرداخته می‌شود. در حقیقت قیمت آب شیرین تولیدی توسط سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی به میزان محصول تولیدی، شدت تابش خورشید و نیز پارامترهای اقتصادی نظیر هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگهداری، اسقاطی و ... وابسته است [۱۴ و ۱۵]. ازاین‌رو در تحلیل اقتصادی سیستم موردمطالعه از روش یکنواخت سالیانه[1]، به‌عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های تحلیل‌های اقتصادی استفاده می‌شود. در حقیقت این روش تنها روشی است که نتیجه یکسانی برای مقایسه و تحلیل اقتصادی سیستم‌های متفاوت با عمر متفاوت دارد. روش یکنواخت سالیانه، درآمدها و هزینه‌های سیستم را به دریافت و پرداخت سالیانه تبدیل می‌کند. این روش با توجه به اطلاعات طرح تحت نام هزینه یکنواخت سالیانه، $EUAC$ و یا تحت نام درآمد یکنواخت سالیانه، $EUAB$ شناخته می‌شود [۱۵ و ۱۶]. که در ادامه برای ارزیابی اقتصادی سیستم آب‌شیرین‌کن به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

1 Equivalent annual benefit (EUA)

$$EUAC = AFC + AMC + \sum_{d=1}^{365}\sum_{j=1}^{N} Op_j \qquad (۲)$$

$$EUAB = ASV \qquad (۳)$$

که در این روابط AMC هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه[1]، Op_j هزینه‌های عملکردی[2]، AFC هزینه ثابت سالانه[3] سیستم و j شمارنده تجهیزات و d شمارنده روزهای سال می‌باشد. در ادامه برای توضیح بیشتر، روابط مربوط به هرکدام تعریف شده است.

$$P = \sum_{j=1}^{N} In_j \qquad (۴)$$

$$AFC = P * CRF \qquad (۵)$$

$$AMC = \sum_{d=1}^{365}\sum_{j=1}^{N} Ma_j = 0.19\,AFC \qquad (۶)$$

$$S = \sum_{j=1}^{N} SV_j = 0.2P \qquad (۷)$$

$$ASV = S \times SSF \qquad (۸)$$

In_j هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه‌ی[4] تجهیزات و P هزینه اولیه[5] سیستم است که طبق رابطه (۴) برابر مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات مختلف می‌باشد و توسط رابطه (۵) هزینه اولیه سیستم، با ضریب CRF به هزینه سالانه تبدیل خواهد شد. در رابطه (۶)، Ma_j هزینه تعمیرات[6] تجهیزات مختلف است و به‌صورت درصدی از مقدار هزینه ثابت سالانه در نظر گرفته می‌شود. SV_j هزینه‌های اسقاطی[7] تجهیزات مختلف و S مجموع هزینه اسقاطی سیستم می‌باشد. هزینه اسقاطی سیستم نیز مقدار ارزشی است که سیستم در پایان عمر مفید خود دارد که این هزینه در رابطه (۷) آورده شده و معمولاً درصدی از هزینه اولیه سیستم در نظر گرفته می‌شود. مطابق رابطه (۸) هزینه اسقاطی سیستم با ضریب SSF به ASV، یا هزینه اسقاطی سالانه[8] تبدیل می‌شود [۱۷-۱۴].

خالص یکنواخت سالانه[9] $NEUA$ نیز طبق رابطه (۹) ارزیابی می‌شود که در حقیقت اختلاف هزینه‌های سیستم از درآمدهای سالانه سیستم است. درنهایت، رابطه (۱۰) نیز قیمت آب تولیدی بر واحد لیتر CPL را با استفاده از میانگین محصول تولیدی سالانه[10] AP نشان می‌دهد.

$$NEUA = EUAC - EUAB \qquad (۹)$$

$$CPL = NEUA / AP \qquad (۱۰)$$

در روابط (۵) و (۸) دو پارامتر CRF و SSF به ترتیب ضریب بازیافت سرمایه[11] و ضریب وجوه استهلاکی[12] می‌باشند که توسط روابط (۱۱) و (۱۲) ارزیابی خواهند شد.

$$CRF = \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \qquad (۱۱)$$

$$SSF = \frac{i}{(1+i)^k - 1} \qquad (۱۲)$$

که i و k به ترتیب نرخ بهره و تعداد سال بهره‌برداری از سیستم می‌باشند. در واقع ضریب بازیافت سرمایه (CRF) هزینه‌های اولیه را با توجه به نرخ بهره در تعداد سال بهره‌برداری، به پرداخت‌های مساوی توزیع می‌کند و ضریب وجوه استهلاکی (SSF) مقدار ارزش آینده تجهیزات را (ارزش اسقاطی) با توجه به نرخ بهره در تعداد سال بهره‌برداری توزیع می‌کند [۱۹-۱۷]. در این مطالعه به‌منظور انجام تحلیل اقتصادی، عمر تجهیزات ۱۰ سال و نرخ بهره ۱۵ درصد فرض شده است که با توجه به این فرضیات مقادیر دو ضریب بازیافت سرمایه CRF=۰/۱۹۹۳ و وجوه استهلاکی SSF=۰/۰۴۹۳ به‌دست می‌آیند.

شایان توجه است که هزینه‌های عملکردی (Op) سیستم شامل هزینه‌های مصرف سوخت و الکتریسیته است که توسط رابطه (۱۳)

1 Annual maintenance cost
2 Operational cost
3 Annual fixed cost
4 Investment
5 Present worth
6 Maintenance
7 Salvage value
8 Annual salvage value
9 Net Equivalent uniform annual
10 Average annual productivity
11 Capital recovery factor
12 Sinking fund factor

ارزیابی می‌شود.

$$Op = (E_b \varepsilon_e) + (\dot{m}_f \varepsilon_f) \quad (۱۳)$$

پارامترهای ε_f و ε_e به ترتیب قیمت خرید سوخت و الکتریسیته می‌باشند. در این پروژه هزینه‌ای برای خرید سوخت و الکتریسیته صرف نشده است بنابراین مقادیر صفر برای دو پارامتر ε_f و ε_e در نظر گرفته خواهد شد.

در جدول ۲ هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگهداری و اسقاطی سیستم به همراه خالص یکنواخت و میانگین محصول تولیدی سالانه برای آب‌شیرین‌کن را در هر حالت آزمایش نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که مبنای محاسبات قیمت آب شیرین تولیدی سال ۱۳۹۴ می‌باشد زیرا که آزمایش‌ها در این سال انجام شده است.

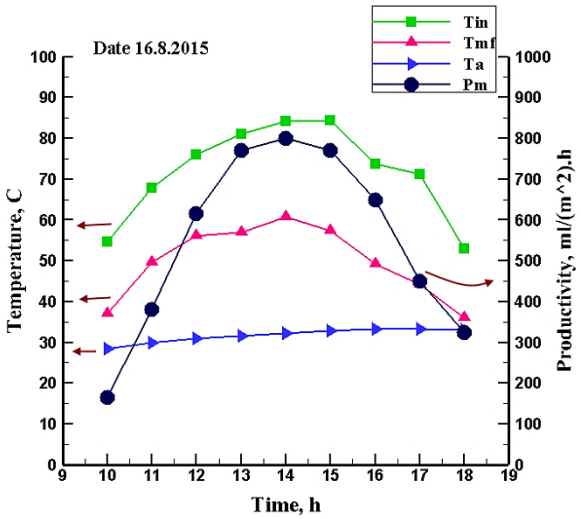
۶- بحث و نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف آزمایش به‌صورت نمودارهای دما و محصول تولیدی برحسب ساعت در ادامه ارائه می‌گردد. شکل‌های ۷ تا ۱۵ داده‌های ثبت‌شده برای دمای محفظه آب‌شیرین‌کن، دمای هوا، دمای چگالنده و نیز حجم آب شیرین چگالنده (در صورت وجود چگالنده)، دما آب شیرین تولیدی و نیز حجم کل آب شیرین تولیدی را در ساعت‌های مختلف و روزهای مختلف یک ماه نشان می‌دهند. به‌عنوان نمونه در شکل ۷ که نتایج برای حالت پایه نشان داده شده است، ماکزیمم دما در ساعت ۱۴ با مقدار ۸۴ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است و دمای آب شیرین تولیدی تا ۶۰/۸ درجه سانتی‌گراد بالا رفته است. دمای محیط تقریباً از ساعت ابتدایی تا ساعت انتهایی آزمایش افزایش‌یافته و ماکزیمم دما در این روز ۳۳/۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. در این حالت منحنی دمای آب شیرین خروجی تقریباً از لحاظ افت‌وخیز دمایی مشابه دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن است. با توجه به منحنی محصول تولیدی، بیشترین حجم آب شیرین تولیدی این روز در بازه بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ با ۸۰۰ میلی‌لیتر گزارش شده است. همچنین مجموع حجم آب شیرین تولیدی در این روز ۵۱۰۰ میلی‌لیتر ثبت شده است.

Table 2. . Initial, repair and maintenance and salvage costs along with net equivalent uniform and average annual productivity of system

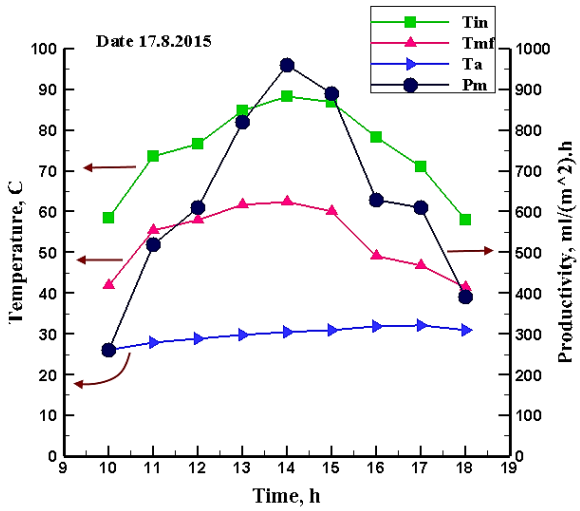
جدول ۲: هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگهداری و اسقاطی سیستم، به همراه خالص یکنواخت و میانگین محصول تولیدی سالانه سیستم

سیستم در هر حالت آزمایش	هزینه اولیه (ریال×۱۰^۳)	هزینه ثابت سالانه ((ریال×۱۰^۳)\سال)	هزینه اسقاطی (ریال×۱۰^۳)	هزینه اسقاطی سالانه ((ریال×۱۰^۳)\سال)	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه ((ریال×۱۰^۳)\سال)	خالص یکنواخت سالانه ((ریال×۱۰^۳)\سال)	میانگین محصول تولیدی سالانه (لیتر\سال)
حالت اول	۶۵۰۰	۱۲۹۵/۱	۱۳۰۰	۶۴/۰۲۸	۲۴۶/۰۸	۱۴۷۷/۲	۹۸۵
حالت دوم	۶۷۰۰	۱۳۳۵	۱۳۴۰	۶۵/۹۹۸	۲۵۳/۶۵	۱۵۲۲/۶	۱۱۳۵
حالت سوم	۷۰۰۰	۱۳۹۴/۸	۱۴۰۰	۶۸/۹۵۳	۲۶۵/۰۱	۱۵۹۰/۸	۱۱۱۸
حالت چهارم	۷۲۰۰	۱۴۳۴/۶	۱۴۴۰	۷۰/۹۲۳	۲۷۲/۵۸	۱۶۳۶/۳	۱۰۸۷
حالت پنجم	۷۳۰۰	۱۴۵۴/۵	۱۴۶۰	۷۱/۹۰۸	۲۷۶/۳۶	۱۶۵۹	۱۰۷۰
حالت ششم	۷۵۰۰	۱۴۹۴/۴	۱۵۰۰	۷۳/۸۷۸	۲۸۳/۹۳	۱۷۰۴/۴	۱۱۱۶
حالت هفتم	۷۸۰۰	۱۵۵۴/۲	۱۵۶۰	۷۶/۸۳۳	۲۹۵/۲۹	۱۷۷۲/۶	۱۰۸۵
حالت هشتم	۸۰۰۰	۱۵۹۴	۱۶۰۰	۷۸/۸۰۳	۳۰۲/۸۶	۱۸۱۸/۱	۱۱۷۲



شکل ۷: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه

Fig. 7. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode



شکل ۸: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با فین

Fig. 8. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with fins

۶- ۱- استفاده از فین در سطح پله‌های آب‌شیرین‌کن

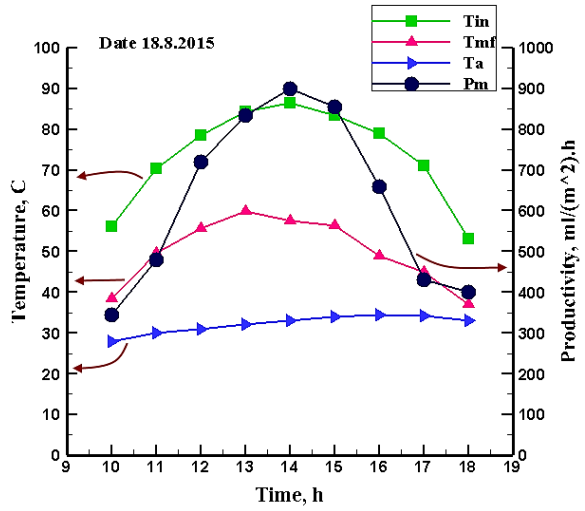
در این حالت چهار فین بر روی هر پله به‌منظور افزایش دمای داخلی و درنتیجه افزایش نرخ تبخیر آب‌شور استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ و جدول ۳ مشاهده می‌شود بیشترین دمای محیط داخل آب‌شیرین‌کن در این روز ساعت ۱۴ با دمای ۸۸/۳ درجه سانتی‌گراد است. بیشترین دمای آب خروجی نیز در ساعت ۱۴ با دمای ۶۲/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین دمای محیط تا ساعت ۱۷ رو به افزایش بوده که در بیشترین حالت به دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است. بیشترین حجم آب شیرین خروجی این روز در بازه بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ و مقدار ۹۶۰ میلی‌لیتر است. مجموع آب شیرین استحصال‌شده در این روز ۵۹۸۰ میلی‌لیتر است که نسبت به حالت بدون فین ۸۸۰ میلی‌لیتر یعنی ۱۷/۲۵٪ افزایش محصول داشته است. این افزایش همان‌طور که گفته شد به دلیل ایجاد نقاط داغ و جذب گرمای بیشتر در سطح تصویر شده یکسان است که باعث شده دمای آب داخل محفظه بیشتر و درنتیجه محصول تولیدی افزایش یابد.

۶- ۲- استفاده از بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

در این حالت از ۱۰ عدد ورق فولاد زنگ نزن با طول ۹۵ و عرض ۶/۵ سانتی‌متر به‌عنوان بازتابنده استفاده‌شده تا پرتوهایی از خورشید که به این ورق‌ها می‌تابند به کف پله‌ها منعکس شوند. همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود بیشترین دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن ۸۶/۴ درجه سانتی‌گراد در ساعت ۱۴ است. دمای آب شیرین خروجی برای این روز در ساعت ۱۳ دارای بیشترین مقدار یعنی ۵۹/۸ درجه سانتی‌گراد است. دمای محیط روند صعودی تا ساعت ۱۷ داشته و بیشترین مقدار آن ۳۴/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین محصول تولیدی ۹۰۰ میلی‌لیتر و بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ است. کل محصول تولیدی در این آزمایش ۵۸۸۰ میلی‌لیتر است که نسبت به حالت پایه آب‌شیرین‌کن محصول خروجی ۱۵/۲۹٪ افزایش داشته است. افزایش محصول نسبت به حالت پایه به این دلیل است که پرتوهای خورشید رسیده به ورق‌های فولادی بکار برده شده در پایه پله‌ها به سطح پله‌ها منعکس‌شده و باعث افزایش دمای سطح پله‌ها و درنتیجه افزایش محصول شده‌اند.

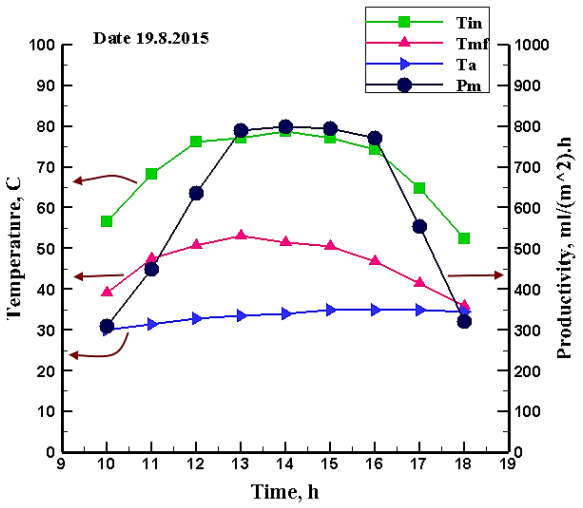
۶- ۳- استفاده از فین و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

در این قسمت به حالت پایه آب‌شیرین‌کن به‌طور هم‌زمان فین و بازتابنده‌های داخلی اضافه شد و دستگاه مورد آزمایش قرار گرفت. برای فضای داخلی آب‌شیرین‌کن در این آزمایش با توجه به شکل ۱۰ بیشترین دما در ساعت ۱۴ و مقدار ۷۸/۷ درجه سانتی‌گراد ثبت گردیده است. به‌طورکلی دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن تا ساعت ۱۴ روند صعودی و بعدازآن روند نزولی را طی می‌کند. بیشترین دمای



شکل ۹: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با بازتابنده داخلی

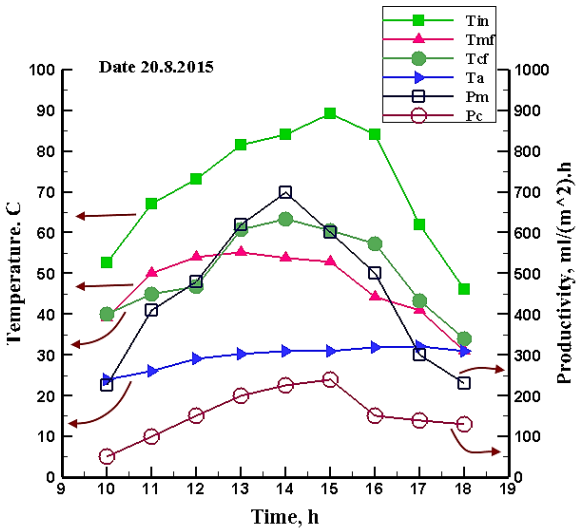
Fig. 9. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with internal reflectors



شکل ۱۰: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با فین و بازتابنده‌های داخلی

Fig. 10. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with fins and internal reflectors

محیط و آب شیرین خروجی در ساعت ۱۳ است که به ترتیب دارای مقادیر ۳۴/۸ و ۵۳/۲ درجه سانتی‌گراد هستند. کل محصول تولیدی در این آزمایش ۵۷۰۰ میلی‌لیتر است که بیشترین محصول تولیدی بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ بوده و مقدار ۸۰۰ میلی‌لیتر ثبت شده است. این حالت ۱۱/۷۶٪ افزایش محصول نسبت به حالت پایه را داشته است. کاهش محصول در این آزمایش نسبت به آزمایش حالت پایه با فین و بازتابنده داخلی به‌صورت مجزا به این دلیل است که وقتی از ترکیب فین و بازتابنده استفاده شود بخار تولیدی درون محفظه زیاد می‌شود ولی سطح کافی یا فضای کافی برای چگالیده این حجم زیاد بخار وجود ندارد. از طرف دیگر به دلیل حجم زیاد بخار در داخل محفظه مقداری از بخارهای چگالیده شده روی شیشه سکوریت به سطح پله‌ها سقوط کرده و جزو آب شیرین خروجی اندازه‌گیری شده به‌حساب نمی‌آیند.



شکل ۱۱: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با چگالنده خارجی

Fig. 11. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with external condenser

۶- ۴- استفاده از چگالنده خارجی در آب‌شیرین‌کن

در این حالت استفاده از چگالنده خارجی برای کمک به چگالیده بخارهای اضافی تولیدشده در محفظه اصلی آب‌شیرین‌کن پیشنهاد و اجرا گردید. شکل ۱۱ نتایج مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن ۸۹/۲ درجه سانتی‌گراد در ساعت ۱۵ است که در جدول ۳ ارائه شده است. بیشترین حجم آب شیرین خروجی اصلی ۷۰۰ میلی‌لیتر در بازه ساعت ۱۳ تا ۱۴ و بیشترین حجم آب شیرین خروجی چگالنده ۲۴۰ میلی‌لیتر و در بازه ساعت ۱۴ تا ۱۵ است. همچنین با توجه به مجموع ۵۶۰۰ میلی‌لیتر آب شیرین تولیدی در این روز افزایش ۹/۸٪ محصول را نسبت به حالت پایه داشته است. دلیل این افزایش، کمک چگالنده به چگالیده بخار اضافی در ساعت‌هایی از روز است که بخار تولیدی زیادی در محفظه وجود دارد.

۶- ۵- استفاده از چگالنده خارجی و فین در آب‌شیرین‌کن

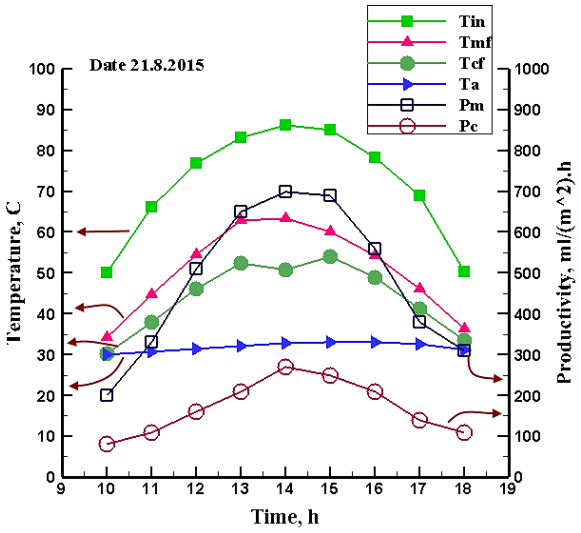
بیشترین دمای فضای داخل آب‌شیرین‌کن و آب شیرین خروجی اصلی در این حالت با توجه به شکل ۱۲ به ترتیب ۸۶/۱ و ۶۳/۳ درجه سانتی‌گراد و در ساعت ۱۴ بوده است. بیشترین دمای آب شیرین خروجی چگالنده در ساعت ۱۵ و مقدار ۵۴ درجه سانتی‌گراد است و همچنین بیشترین دمای محیط در ساعت‌های ۱۵ و ۱۶ با مقدار ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد است. بیشترین حجم آب شیرین خروجی اصلی و خروجی چگالنده در بازه بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ با مقدار ۷۰۰ و ۲۷۰ میلی‌لیتر ثبت شده است. مجموع آب شیرین تولیدی در این روز ۵۸۷۰ میلی‌لیتر است که نسبت به حالت پایه ۱۵/۱٪ افزایش محصول داشته است. اضافه کردن فین به حالت پایه با چگالنده باعث افزایش محصول به‌اندازه ۴/۸٪ نسبت به حالت بدون فین شده است که این افزایش محصول به دلیل افزایش دمای سطح آب‌شیرین‌کن توسط فین‌ها بوده است.

۶- ۶- استفاده از چگالنده خارجی و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

بیشترین دمای داخل محفظه و آب شیرین خروجی اصلی با توجه به شکل ۱۳ در ساعت ۱۴ ثبت شد و به ترتیب دارای مقادیر ۸۴ و ۶۳/۲ درجه سانتی‌گراد است. بیشترین دمای آب شیرین خروجی چگالنده و دمای محیط به ترتیب ۵۳ و ۳۱/۵ درجه سانتی‌گراد در ساعت ۱۵ است. بیشترین حجم آب شیرین خروجی اصلی و خروجی چگالنده در بازه بین ساعت‌های ۱۳ تا ۱۴ با مقدار ۶۹۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر ثبت شده است. مجموع آب شیرین تولیدی در این روز ۵۶۸۵ میلی‌لیتر است که نسبت به حالت پایه ۱۱/۴۷٪ افزایش محصول داشته است و نیز این حالت نسبت به حالت پایه با چگالنده ۱/۵٪ افزایش محصول داشته است.

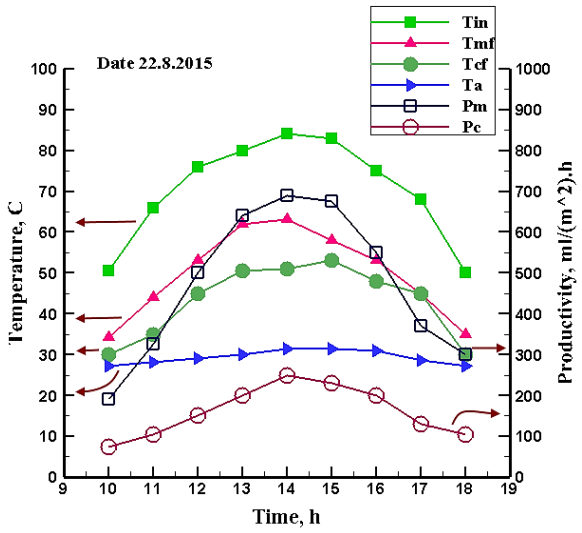
۶- ۷- استفاده از چگالنده خارجی، فین و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

با توجه به شکل ۱۴ بیشترین دمای داخل محفظه در ساعت ۱۴ و با مقدار ۷۹ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. بیشترین دمای آب شیرین خروجی اصلی ۶۱ درجه سانتی‌گراد و در ساعت ۱۳ ثبت شده است. دمای آب شیرین خروجی چگالنده در بیشترین حالت به ۴۴ درجه سانتی‌گراد رسیده است. دمای محیط که مطابق روزهای قبل روند افزایشی داشته و در ساعت ۱۶ به دمای ۳۱/۸ درجه رسیده است. بیشترین تولید مربوط به قسمت اصلی بوده که بیشترین تولید در بازه بین ساعت ۱۴ تا ۱۵ و با ۷۵۵ میلی‌لیتر بوده است. بیشترین تولید آب



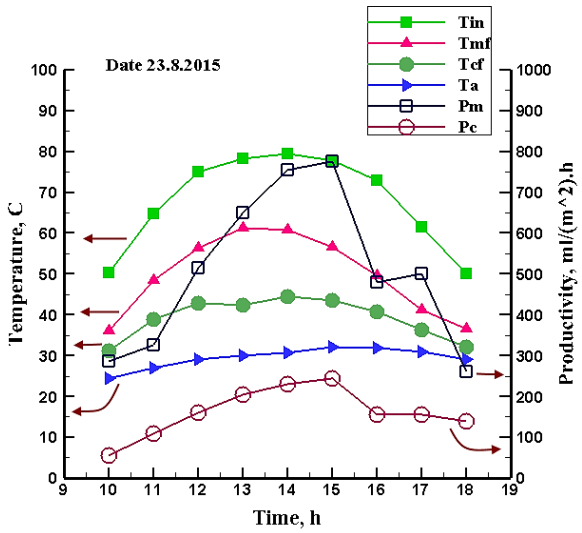
شکل ۱۲: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با چگالنده خارجی و فین

Fig. 12. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with external condenser and fin



شکل ۱۳: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با چگالنده خارجی و بازتابنده‌های داخلی

Fig. 13. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with external condenser and internal reflectors



شکل ۱۴: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب‌شیرین‌کن در حالت پایه با چگالنده خارجی، فین و بازتابنده‌های داخلی

Fig. 14. Temperatures and product diagrams for desalination system in base mode with external condenser, fin and internal reflectors

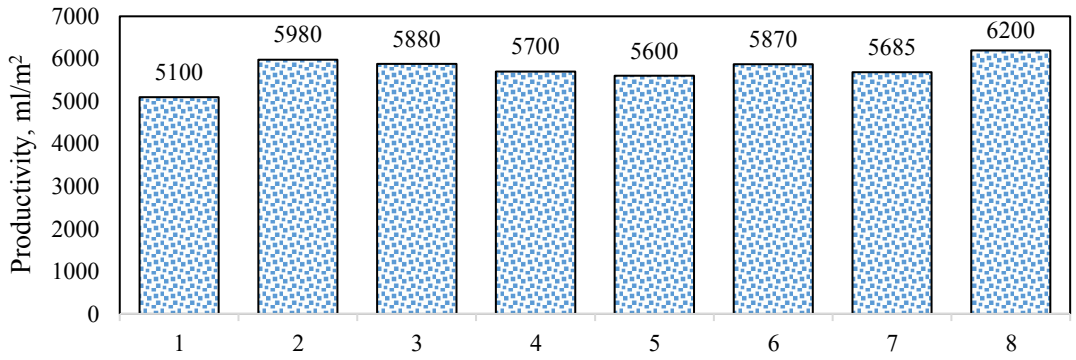
شیرین قسمت چگالنده بین بازه ساعت ۱۴ تا ۱۵ و با ۲۴۵ میلی‌لیتر بوده است. مجموع محصول تولیدی برای قسمت اصلی و چگالنده به ترتیب ۴۶۷۰ و ۱۵۳۰ میلی‌لیتر و درمجموع آب شیرین تولیدی سیستم در این حالت ۶۲۰۰ میلی‌لیتر است که ۲۱/۵۷٪ افزایش محصول را نسبت به حالت پایه و ۱۰/۷٪ افزایش محصول نسبت به حالت پایه با چگالنده داشته است. استفاده از چگالنده توانست مشکل اعظم ترکیب فین و بازتابنده‌های داخلی که همان زیادشدن بخار در قسمت اصلی بود را حل کند. در این حالت بخار اضافی به قسمت چگالنده رفته و به دلیل فضای سردتر در آن قسمت سریع‌تر چگالیده و تخلیه شد.

شکل ۱۵ میزان آب شیرین تولیدی را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شکل اعداد روی محور افقی معرف حالت آزمایش می‌باشند که عدد ۱ مربوط به حالت پایه آب‌شیرین‌کن، عدد ۲ مربوط به حالت استفاده از فین‌ها، عدد ۳ مربوط به استفاده از بازتابنده‌های داخلی، عدد ۴ مربوط به ترکیب فین‌ها و بازتابنده‌های داخلی، عدد ۵ مربوط به حالت استفاده از چگالنده، عدد ۶ مربوط به حالت ترکیب چگالنده با فین‌ها، عدد ۷ مربوط به حالت ترکیب چگالنده با بازتابنده‌های داخلی و عدد ۸ مربوط به حالت ترکیب چگالنده و فین‌ها و بازتابنده‌های داخلی است. بیشترین مقدار محصول تولیدی در حالت ۸ و کمترین مقدار محصول در حالت پایه است.

جدول ۳ مقادیر مربوط به بیشینه مقدار پارامترهای به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز راندمان آب‌شیرین‌کن را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد استفاده از چگالنده خارجی در حالت ۸ منجر به رسیدن به راندمان ۱/۳۸±۵۲ ٪ می‌گردد که می‌تواند مربوط به افزایش تولید محصول در این حالت نسبت به حالت‌های قبلی باشد.

۶- ۸- نتایج اقتصادی

شکل ۱۷ نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. قیمت آب شیرین تولیدی در حالت پایه با فین (حالت ۲) کمترین و در حالت پایه با چگالنده و بازتابنده‌های داخلی (حالت ۷)



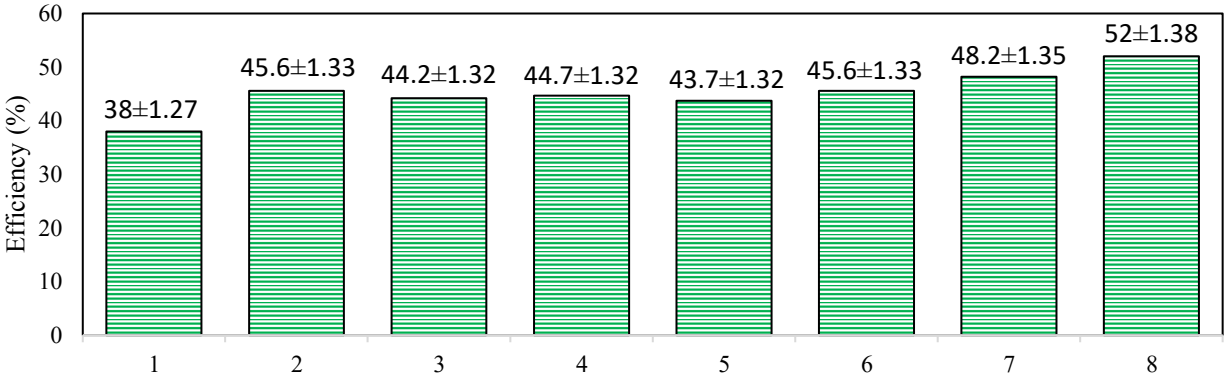
شکل ۱۵: مقایسه محصول تولیدی در هر آزمایش باحالت پایه

Fig. 15. Comparison of the fresh water produced in each experiment with base mode

Table 3. Results of a maximum parameters obtained in different modes

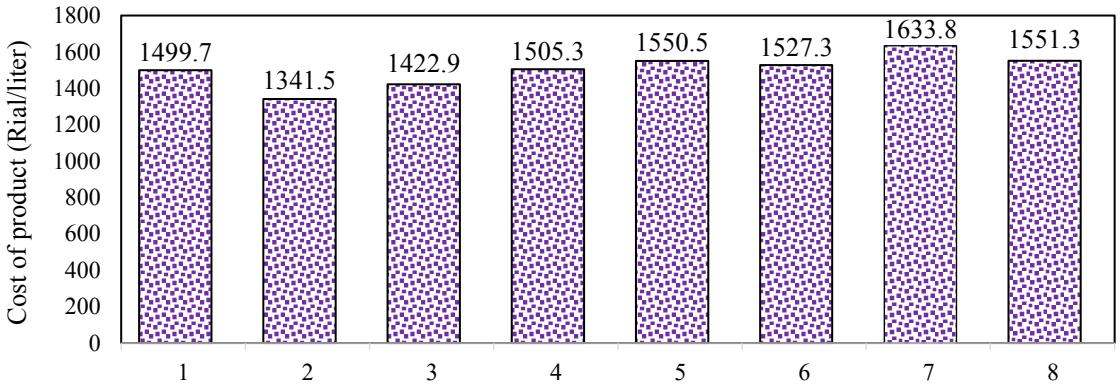
جدول ۳: نتایج مربوط به بیشینه مقدار پارامترهای به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف

	T_{in} (°C)	T_{cf} (°C)	T_a (°C)	T_{mf} (°C)	P_m (ml/m^2)	P_c (ml/m^2)
حالت ۱	۸۴	-	۳۳/۳	۶۰/۸	۸۰۰	-
حالت ۲	۸۸/۳	-	۳۲	۶۲/۵	۹۶۰	-
حالت ۳	۸۶/۴	-	۳۴/۳	۵۹/۸	۹۰۰	-
حالت ۴	۷۸/۷	-	۳۴/۸	۵۳/۲	۸۰۰	-
حالت ۵	۸۹/۲	۶۳/۴	۳۲/۱	۵۵/۳	۷۰۰	۲۴۰
حالت ۶	۸۶/۱	۵۴	۳۳/۱	۶۳/۳	۷۰۰	۲۷۰
حالت ۷	۸۴	۵۳	۳۱/۵	۶۳/۲	۶۹۰	۲۵۰
حالت ۸	۷۹	۴۴	۳۱/۸	۶۱	۷۵۵	۲۴۵



شکل ۱۶: راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن در هر حالت به همراه عدم قطعیت

Fig. 16. Daily efficiency of desalination in any configuration with uncertainly



شکل ۱۷: قیمت آب شیرین تولیدی در هر آزمایش برحسب (ریال/ لیتر)

Fig. 17. The cost of fresh water produced in any experiment (Rials / Lite)

بیشترین مقدار را دارد. حالت ۲ از نظر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمترین مقدار را بعد از حالت پایه به خود اختصاص داده و دارای دومین رتبه آب شیرین تولیدی از بین حالت‌های مختلف است که این مساله باعث شده تا کمترین قیمت برای آب شیرین را کسب نماید. با توجه به اینکه در راندمان آب‌شیرین‌کن میزان آب شیرین تولیدی و مقدار تابش متوسط روزانه مؤثر است، مشاهده می‌شود که حالت‌های ۷ و ۸ هرچند که بالاترین قیمت تمام شده آب شیرین را به خوداختصاص داده‌اند اما با توجه به شکل ۱۶ دارای بالاترین راندمان در بین حالات مختلف می‌باشند. این مساله نشان می‌دهد که با توجه به تعریف راندمان، بیشترین میزان تولید آب شیرین را در شدت تابش مشخصی نسبت به بقیه حالات دارا هستند.

جدول ۴ نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر را با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد. این نتایج با توجه به نوع آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی و اصلاحات انجام‌شده بر روی هر سیستم در مراجع مختلف گردآوری شده است. با بررسی نتایج این جدول مشاهده می‌شود که آب‌شیرین‌کن ساخته‌شده در این پژوهش در حالت با فین، عملکرد خوبی در تولید آب شیرین، هزینه تولید محصول و نیز راندمان داشته است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه تجربی و تحلیل اقتصادی روش‌های افزایش محصول تولیدی در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی آبشاری پرداخته شد. برای این منظور، روش‌های افزایش زمان تماس با صفحه جاذب، ایجاد نقاط داغ با استفاده از فین، استفاده از بازتابنده‌های داخلی و نیز چگالنده خارجی مورد مطالعه قرار گرفت و درنهایت ترکیب این روش‌ها به‌صورت دوتایی و سه‌تایی آزمایش شد. نتایج کلی را می‌توان در قالب موارد ذیل بیان نمود.

استفاده از فین‌ها در سطح پله‌ها افزایش ۱۷/۲۵٪ محصول تولیدی و کاهش ۱۰/۵٪ قیمت آب شیرین تولیدی به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی را نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد.

استفاده از بازتابنده‌های داخلی افزایش ۱۵/۲۹٪ محصول خروجی و کاهش ۵/۱۲٪ قیمت آب شیرین تولیدی به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی را نسبت به حالت پایه به دنبال دارد.

بازتابنده خارجی که در قسمت فوقانی دستگاه نصب شده بود در ساعت‌های میانی روز بخشی از تابش وارد نشده به آب شیرین کن مورد مطالعه را به داخل دستگاه و سطح پله‌ها بازگردانده و بر روی چگالنده سایه ایجاد می‌کرد.

استفاده از ترکیب فین و بازتابنده‌های داخلی نسبت به حالت پایه، افزایش محصول و نسبت به آب‌شیرین‌کن همراه با فین و بازتابنده داخلی کاهش محصول را به همراه داشته است. قیمت هر لیتر آب شیرین در این حالت ۰/۳۷٪ و محصول تولیدی در این حالت ۱۱/۷۶٪ نسبت به حالت پایه افزایش یافت.

استفاده از چگالنده ۹/۸٪ افزایش در تولید محصول و ۳/۳۹٪ افزایش

Table 4. Comparison of the results of this study with previous studies

جدول ۴ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین

مرجع	نوع آب‌شیرین‌کن	محصول تولیدی روزانه (ml/m^2)	راندمان (٪)	قیمت آب شیرین ($/l)
اومارا و همکاران[۳]	تک حوضچه‌ای با صفحه جاذب فین‌دار	۴۵۵۰	۴۷/۵	۰/۰۴۱
اومارا و همکاران[۴]	آبشاری با بازتابنده‌های داخلی و خارجی	۸۱۰۰	-	۰/۰۳۱
هانسن و موروگاول[۹]	شیب‌دار با صفحه فین شکل	۳۷۶۰	۳۸/۳	-
سعدی و همکاران[۱۱]	تک حوضچه‌ای با افزودن تبخیرکننده پلکانی	۵۸۲۰	۵۵/۸	۰/۰۱
پژوهش حاضر	آبشاری با بازتابنده خارجی و فین	۵۹۸۰	۴۵/۶۳±۱/۳۳	۰/۰۳۸

قیمت به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی را نسبت به حالت پایه به دنبال داشت.

استفاده از ترکیب چگالنده و فین‌ها نسبت به حالت پایه تولید محصول را ۱۵/۱٪ و قیمت آب شیرین تولیدی را به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی ۱/۸۴٪ افزایش داد.

استفاده از ترکیب چگالنده و بازتابنده‌های داخلی نسبت به حالت پایه محصول را ۱۱/۴۷٪ و قیمت آب شیرین تولیدی را ۸/۹۴٪ به ازای هر لیتر آب شیرین افزایش داد.

استفاده از ترکیب چگالنده، فین‌ها و بازتابنده‌ها نسبت به حالت پایه، ۲۱/۵۷٪ تولید آب شیرین و ۳/۴۴٪ قیمت آب شیرین را به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی افزایش داده و همچنین بیشترین راندمان را به دست می‌دهد.

پیوست الف

عدم قطعیت

عدم قطعیت بنا به آماری بودن یا نبودن، به دو بخش A و B تقسیم می‌گردد. عدم قطعیت استاندارد A با توجه به قوانین آماری که معمولا از تکرار مشاهدات حاصل می‌شود. عدم قطعیت استاندارد نوع B با توجه به منابع اطلاعاتی می‌باشد مانند کالیبراسیون و غیره.

محاسبه عدم قطعیت استاندارد نوع A

ابتدا باید میانگین اندازه‌گیری‌های تکراری از رابطه (الف.۱) محاسبه گردد. سپس طبق رابطه (الف.۲) عدم قطعیت محاسبه می‌شود:

$$W_{T_I} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_i - \bar{T})^2}{n-1}} \qquad \text{(الف.۱)}$$

$$u_A = \frac{W}{\sqrt{n}} \qquad \text{(الف.۲)}$$

که n نشان دهنده‌ی تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

محاسبه عدم قطعیت استاندارد نوع B

این عدم قطعیت دارای محدودیت‌های فراوانی برای محاسبه است. علت این امر نبود اطلاعات کافی در مورد عوامل تاثیرگذار است. بنابراین برای محاسبه آن باید فرضیاتی را بر مسئله حاکم کرد (مانند توزیع یکنواخت).

بر این اساس عدم قطعیت استاندارد نوع B در حالت توزیع یکنواخت از رابطه (الف.۳) محاسبه می‌شود:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad \text{(الف.۳)}$$

در این رابطه a پهنای بین حدود بالا و پایین است.

محاسبه عدم قطعیت متغیر وابسته

اگر کمیت مورد نظر خود تابع چند پارامتر و ابزار اندازه‌گیری دیگر باشد در این صورت از رابطه (الف.۴) برای تعیین عدم قطعیت استفاده می‌شود:

$$u_z = \sqrt{\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \ldots.} \qquad \text{(الف.۴)}$$

در این رابطه u_z عدم قطعیت متغیر وابسته z و عدم قطعیت متغیرهای مستقل x و y متغیرهای مستقل می‌باشند که دارای عدم قطعیت‌های u_x و u_y بوده و توسط یک رابطه به متغیر وابسته z مرتبط هستند.

محاسبه عدم قطعیت ترکیبی

برای ترکیب کلیه عدم قطعیت‌های محاسبه شده، از جذر مجموع مربعات آنها با توجه به رابطه (الف.۵) استفاده می‌شود:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_{1B}^2 + u_{2B}^2 + \ldots u_{nB}^2} \qquad \text{(الف.۵)}$$

در این رابطه u_A عدم قطعیت ناشی از تکرار آزمایش بر اساس ارزیابی نوع A و u_{1B} تا u_{nB} عدم قطعیت‌های از خانواده نوع B شامل عدم قطعیت ناشی از دقت تجهیزات آزمایش، کالیبراسیون، تفکیک پذیری نمایشگر دیجیتال دستگاه اندازه‌گیری و غیره است.

تحلیل خطا

خطای تجهیزات اندازه گیری مورد استفاده در این پژوهش مطابق

Table A1. Measuring equipment along with accuracy and error

جدول الف۱ تجهیزات اندازه‌گیری به همراه دقت و خطا

وسیله	دقت	خطا (٪)
دماسنج	۰/۵ °C	۰/۰۲
پیرانومتر	۱ W/m^2	۰/۴۳
ظرف استوانه ای مدرج	۱ml	۲
کولیس	۰/۰۰۰۱m	۱۰
متر	۰/۰۰۱m	۶/۶

رابطه (الف.۶) محاسبه خواهد شد [۲۰].

$$Error = \frac{AC}{MVM} \quad \text{(الف.۶)}$$

که در آن AC دقت وسیله اندازه‌گیری و MVM کمترین مقدار اندازه‌گیری شده توسط تجهیز در آزمایش‌ها است. تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده به همراه دقت و خطای هر تجهیز در جدول الف۱ آورده شده است.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	پهنای بین حدود بالا و پایین
AC	دقت وسیله اندازه گیری
AFS	هزینه ثابت سالانه، Rial/year
AMC	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه، Rial/year
AP	میانگین محصول تولیدی سالانه، l/year
ASV	هزینه اسقاطی سالانه، Rial/year
CPL	هزینه آب شیرین تولیدی بر واحد لیتر، Rial/l
CRF	ضریب بازیافت سرمایه
d	شمارنده روزهای سال
$EUAB$	درآمد یکنواخت سالیانه، Rial/year
$EUAC$	هزینه یکنواخت سالیانه، Rial/year
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر، J/kg
i	نرخ بهره، ٪
I	شدت تابش خورشیدی، W/m^2
In	هزینه اولیه، Rial
k	تعداد سال بهره‌برداری
M	کل محصول تولیدی، kg/m^2
Ma	هزینه تعمیرات، Rial
MVM	کمترین مقدار اندازه گیری شده توسط تجهیز
n	تعداد مقادیر اندازه گیری شده
$NEUA$	خالص یکنواخت سالانه، Rial/year
Op	هزینه‌های عملکردی، Rial
P	هزینه اولیه سیستم، Rial
P_c	حجم آب شیرین تولیدی خروجی چگالنده، ml/ m^2
P_m	حجم آب شیرین تولیدی خروجی اصلی، ml/ m^2
S	هزینه اسقاطی سیستم، Rial
SSF	ضریب وجوه استهلاکی
SV	هزینه‌های اسقاطی، Rial
T	دما، °C
u	عدم قطعیت
W	میانگین اندازه‌گیری‌های تکراری

علائم یونانی

ε	قیمت خرید
φ	قیمت فروش

زیرنویس

a	محیط
c, cf	آب شیرین خروجی چگالنده
e	الکتریسیته
f	سوخت
in	داخل محفظه آب‌شیرین‌کن
j	شمارنده تجهیزات
m, mf	آب شیرین خروجی اصلی
x	متغیر مستقل
y	متغیر مستقل
z	متغیر وابسته

منابع

[1] M.M. Ghafurian, H. Niazmand, E. Ebrahimnia-Bajestan, Performance Evaluation of Multi-Wall Carbon Nanotube in Solar Fresh Water Production, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2018).

[2] M.M. Ghafurian, H. Niazmand, E. Ebrahimnia-Bajestan, H. Elhami Nik, Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2018).

[3] Z.M. Omara, M.H. Hamed, A.E. Kabeel, Performance of finned and corrugated absorbers solar stills under Egyptian conditions, Desalination, 277(1) (2011) 281-287.

[4] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, M.M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors, Energy Conversion and Management, 78 (2014) 876-881.

[5] R. Bhardwaj, M.V. ten Kortenaar, R.F. Mudde, Inflatable plastic solar still with passive condenser for single family use, Desalination, 398 (2016) 151-156.

[6] R.A. Kumar, G. Esakkimuthu, K.K. Murugavel, Performance enhancement of a single basin single slope solar still using agitation effect and external condenser, Desalination, 399 (2016) 198-202.

[7] S. Joe Patrick Gnanaraj, S. Ramachandran, C. David Santosh, Enhancing the design to optimize the performance of double basin solar still, Desalination, 411 (2017) 112-123.

[8] K. Rabhi, R. Nciri, F. Nasri, C. Ali, H. Ben Bacha, Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser, Desalination, 416 (2017) 86-93.

[9] R. Samuel Hansen, K. Kalidasa Murugavel, Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach, Desalination, 422 (2017) 59-67.

[10] A.E. Kabeel, S.A. El-Agouz, R. Sathyamurthy, T. Arunkumar, Augmenting the productivity of solar still using jute cloth knitted with sand heat energy storage, Desalination, 443 (2018) 122-129.

[11] Z. Saadi, A. Rahmani, S. Lachtar, H. Soualmi, Performance evaluation of a new stepped solar still under the desert climatic conditions, Energy Conversion and Management, 171 (2018) 1749-1760.

[12] A.E. Kabeel, Y.A.F. El-Samadony, W.M. El-Maghlany, Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM, Desalination, 432 (2018) 89-96.

[13] H.N. Singh, G.N. Tiwari, Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions, Desalination, 168 (2004) 145-150.

[14] M.M. Ghafurian, S.E. Shakib, F. Tavakoli Dastjerd, Modeling and optimizing of a combined CHP system, compression chiller and reverse osmosis plant (CHP + C + W) in two strategies of connections with grid, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 37(6) (2015) 1751-1763.

[15] M.M. Oskoonejad, Engineering Economy, in, Amirkabir Publishing, Amirkabir University, Tehran: Iran, 2007.

[16] M.M. Ghafurian, H. Niazmand, New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system, International Journal of Refrigeration, 86 (2018) 89-106.

[17] F. Tavakoli Dastjerd, M.M. Ghafurian, M.H. shafii, investigation of how to choose capacity of gas engine in optimization CCHP systems with GA; Case study: water sports complex, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(1) (2016) 79-92.

[18] S. Sanaye, M.M. Ghafurian, Applying relative equivalent uniform annual benefit for optimum selection of a gas engine combined cooling, heating and power system for residential buildings, Energy and Buildings, 128 (2016) 809-818.

[19] S. Sanaye, M.M. Ghafurian, F. Tavakoli Dastjerd, Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based CCHP system for a hotel building, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 34 (2016) 305-317.

[20] K. Srithar, T. Rajaseenivasan, N. Karthik, M. Periyannan, M. Gowtham, Stand alone triple basin solar desalination system with cover cooling and parabolic dish concentrator, Renewable Energy, 90 (2016) 157-165.

این صفحه عمداً خالی است