



Experimental Study and Economic Evaluation of a Cascade Solar Water Desalination Unit in Various Conditions

M. Vafaei¹, M. BarzgarNezhad², A. Arbabi², S. E. Shakib*², M. M. Ghafurian¹

¹Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

²Mechanical Engineering Department, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.

ABSTRACT: Lack of freshwater as a major crisis in the world and an attempt to find a solution is one of the most important debates in the world that has attracted many researchers. In this paper, a cascade solar desalination unit with external reflector has built and experimented in eight days. In order to increase the production of fresh water, various techniques were applied such as 1) installing a number of fins on the stairs and on the waterway to create hot spots, 2) use of internal reflectors at the base of the stairs and 3) use of an external condenser for increasing condensation rate of produced vapor. Then, the system was experimented in eight configuration using combination of above techniques that the experimental results were presented as well as the results of economic analysis. The results showed use of the fins led to the most amount of fresh water although the rest of techniques significantly increased the product. It is worth mentioning that use of the fins led to fresh water with the lowest cost of product in value of 1341.5 Rials/lit. On the other hand, the system with an external condenser had the maximum efficiency and the system with the fins has the third place among the eight study configuration.

Review History:

Received: 5 Jun. 2018

Revised: 12 Oct. 2018

Accepted: 10 Nov. 2018

Available Online: 22 Nov. 2018

Keywords:

Solar desalination

Techniques for increasing product

Economical evaluation

Efficiency

Cost of product

1- Introduction

Water is one of the most abundant resources on earth, covering about 75% of the earth's surface. However, the shortage of drinking water in many countries is a crisis. In order to deal with fresh water leakage, the best and most economical way should be chosen for desalting water. Solar energy is one of the important sources of energy which can be used to desalinate sea water and brackish water due to low cost and simple technologies. Up to the present time several research have been conducted on fresh water and increase the product [1-5].

In this study, a model of a cascade solar water desalination unit has been designed and built. In this system, some weirs are embedded in front of any stairs of desalination in order to force the flowing water to go through the absorber plate to increase the production of fresh water. Moreover, the residence time of water flow is increased in the system. In addition, some metallic fins are inserted to the stairs to create hot spots on the stairs and consequently increase the evaporation rate. Other techniques such as the use of the internal reflectors in the base of the stairs for reflecting the Sun's rays to the floor stairs and increasing water temperature as well as the use of external condenser to rise rate of vapor condensation have been also studied. Finally, the combination of these techniques has been tested binary and ternary and economical results have been presented.

2- Experimental Setup

Fig. 1 shows a schematic diagram of the experimental setup. According to this figure, the flow of saline water from the saline water tank enters to the first stair of the desalination and, due to the weirs embedded in front of each stair, the water tracks the spiral path along the desalination stairs. A portion of the vapor formed is condense on the internal wall of glass cover of the desalination and fresh water droplets are collected at the bottom of the glass cover. The other part of the vapor formed into the external condenser and distilled there and transmitted from the condensing floor into a fresh water container. The increase in evaporation rate is one of the important issues in the operation of evaporation desalination, which can be done by increasing the temperature of the interior space and the water pond. In order to achieve this goal, in the different parts of the stairs, number of galvanized fins and internal reflectors were embedded in stainless steel at the base of the stairs to create hot spots on the stairs and rise the floor temperature of the stairs, resulting evaporation will increase. The external reflector is also used to reflect the rays of the sun to the floor of the stairs. In order to comprehensive assessment, the cascade desalination system, seven different configuration along with the basic configuration were investigated in different days. Various configuration have been tested are:

1. Basic desalination
2. The desalination plant with a number of fins on the stairs of desalination
3. The desalination plant with internal reflectors
4. The desalination plant with fins and internal reflectors
5. The desalination plant with external condenser
6. The desalination plant with external condenser and fins

*Corresponding author's email: se.shakib@buqaen.ac.ir



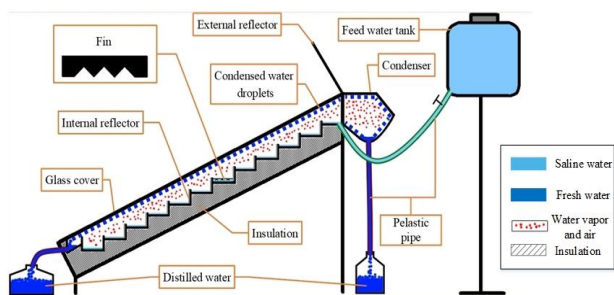


Fig. 1. Total schematic of cascade solar water desalination with fin, condenser, internal and external reflector

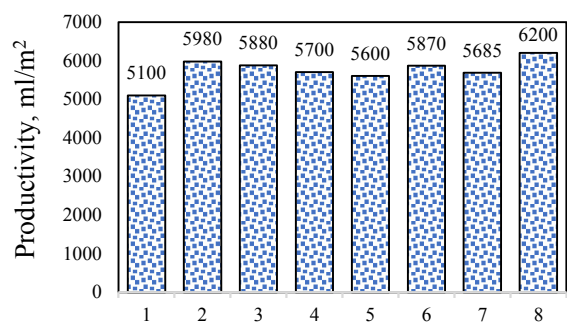


Fig. 2. Comparison of the fresh water produced in each experiment with basic desalination

7. The desalination plant with external condenser and internal reflectors

8. The desalination plant with external condenser, fins and internal reflectors in desalination

All experiments are carried out in Qaen with a latitude of 32-33 degrees in Southern Khorasan and the angle of inclination of the desalination relative to the horizon was equal to the latitude of the region. Experiments have been conducted 24-hour in 8 consecutive days from 16/8/2015 to 24/8/2015.

3- Results and Discussion

Fig. 2 shows the amount of fresh water produced for different configuration. In this figure, the numbers on the horizontal axis represent the test configuration for example the number 1 corresponding to the Basic desalination. The highest amount of product is related to configuration 8 and the lowest amount of the product in the basic desalination.

Fig. 3 shows the efficiency of desalination for different configuration. As seen the use of external condenser (configuration 8) leads to gain efficiency of $52 \pm 1.38\%$, which can be related to an increase in the production of the fresh water comparing with other configurations.

Fig. 4 shows the results of economic evaluation for different configuration. The cost of fresh water produced with the fins (configuration 2) is the lowest and with the external condenser and the internal reflectors (configuration 7) has the highest value. Configuration 2, in term of initial investment cost, has the lowest value after the basic desalination and has the second highest grade of freshwater production among

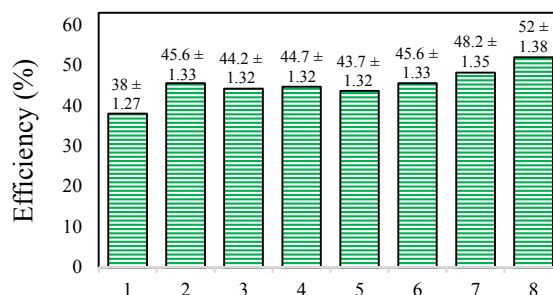


Fig. 3. Daily efficiency of desalination in any configuration with uncertainty

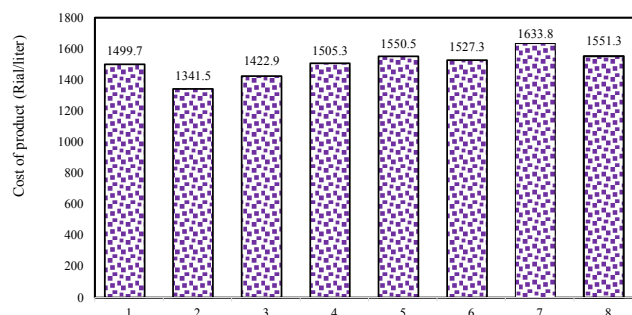


Fig. 4. The cost of fresh water produced (Rials / lit)

different configurations, which has led to the lowest cost of fresh water.

It is worth mentioning that the amount of fresh water produced and the average daily amount of radiation are effective in the efficiency of desalination, it is observed that configurations 7 and 8 have the highest fresh water cost, however according to Fig. 3, have the highest efficiency among different configuration.

4- Conclusions

In this paper, an experimental study and economic analysis a cascade solar desalination was investigated. The object of the present work was applying some techniques for increasing the production of fresh water. Some of the most important results are given below.

- The use of fins on the stairs increased 17.25% the product and reduced the cost of fresh water production by rate of 10.5% compared to the basic desalination.
- The combination of condensers, fins and reflectors increased 21.57% fresh water production and 3.44% cost of fresh water compared to the basic desalination and also gave the highest efficiency.

References

[1] 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.
 [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] R. Samuel Hansen, K. Kalidasa Murugavel, Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach, *Desalination*, 422 (2017) 59-67.



مطالعه تجربی و تحلیل اقتصادی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با شرایط مختلف

محمد وفائی^۱، محمد برزگر نژاد^۲، علی اربابی^۳، سید احسان شکیب^{۴*}، محمد مصطفی غفوریان^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قاتنات، قاتن، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۰۱

کلمات کلیدی:

آب شیرین کن خورشیدی

راهکارهای افزایش تولید

ارزیابی اقتصادی

راندمان

قیمت محصول

خلاصه: کمبود آب شیرین به عنوان یک بحران جدی در دنیا و تلاش برای پیدا کردن راه حل، یکی از مهم ترین بحث های روز دنیا می باشد 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 آب شیرین کن روش های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت که عبارتند از (۱) تعبیه تعدادی فین روی پله ها و در مسیر گذر آب به منظور ایجاد نقاط داغ، (۲) استفاده از بازتابنده های داخلی در پایه پله ها و (۳) استفاده از چگالنده خارجی برای افزایش میزان چگالیده بخار تولیدی. سپس سیستم مورد مطالعه با ترکیب این روش ها به صورت دو تایی و سه تایی در هشت حالت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج به همراه تحلیل اقتصادی و قیمت تمام شده محصول ارائه شد. نتایج نشان داد استفاده از همه روش های مورد نظر به صورت هم زمان، منجر به تولید بیشترین میزان آب شیرین می شود. این در حالی است که کمترین قیمت آب شیرین تولیدی در حالت پایه با فین های تعبیه شده، مقدار ۱۳۴۱/۵ ریال بر لیتر به دست می آید. از سوی دیگر از نظر راندمان، در حالتی که در آب شیرین کن از یک چگالنده خارجی استفاده گردد بیشترین راندمان حاصل می شود و حالت پایه با فین جایگاه سوم را در بین هشت حالت مورد مطالعه دارد.

۱- مقدمه

آب یکی از فراوان ترین منابع روی زمین است که حدود ۷۵ درصد سطح زمین را پوشانده است. با این حال کمبود آب آشامیدنی در بسیاری از کشورها یک بحران است. برای مقابله با کمبود آب باید بهترین و اقتصادی ترین راه شیرین سازی آب انتخاب شود [۱]. یکی از منابع تأمین انرژی لازم برای شیرین سازی آب های شور، انرژی خورشید است که به دلیل عدم نیاز به فناوری های پرهزینه و پیشرفته می تواند به عنوان یک منبع مفید به کار گرفته شود. از دیگر مزایای استفاده از انرژی خورشید صرفه جویی در مصرف نفت و گاز، آلوده نشدن محیط زیست، رشد و توسعه اقتصادی و استهلاک کم است [۲]. تا به امروز تحقیق های متعددی در زمینه آب شیرین کن و افزایش محصول آن انجام گرفته که برخی از مطالعات و تحقیقات با توجه به پژوهش های پیش رو در ادامه مورد بحث قرار گرفته است. اومارا^۱

1 Omara

* نویسنده عهده دار مکاتبات: se.shakib@buqaen.ac.ir

و همکاران [۳] عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه ای با صفحه فین دار، صفحه شیاردار و صفحه تخت را در شرایط آب و هوایی یکسان با عمق آب ۵۰ میلی متر مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که محصول آب شیرین کن با صفحه فین دار و شیاردار نسبت به صفحه تخت به ترتیب ۴۰ و ۲۱٪ افزایش دارد. اومارا و همکاران [۴] برای افزایش انرژی ورودی و محصول آب شیرین کن خورشیدی پلکانی از بازتابنده های داخلی و خارجی (بالا و پایین) برای آن استفاده کردند. نتایج، افزایش ۱۲۵٪ محصول را نسبت به آب شیرین کن تک حوضچه ای ساده نشان دادند. هزینه هر لیتر آب شیرین تولیدی آب شیرین کن پلکانی با بازتابنده ها و آب شیرین کن تک حوضچه ای به ترتیب ۰/۰۴۸ و ۰/۰۳۱ دلار به دست آمد. باردوج^۲ و همکاران [۵] برای افزایش محصول آب شیرین کن خورشیدی از کانال های پلاستیکی به عنوان چگالنده استفاده کردند. نتایج نشان دادند که اگر دمای آب ورودی ۷۳ °C باشد تولید محصول نیز ۰/۷۵ لیتر بر ساعت

2 Bhardwaj



همکاران [۱۱] برای افزایش محصول آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای یک آب شیرین کن پلکانی جدید پیشنهاد دادند. آن‌ها از تبخیرکننده داخلی که دارای چندین سینی است استفاده کردند و بدین وسیله سطح تبخیر را افزایش دادند. نتایج آن‌ها افزایش محصول $47/15 - 104/73\%$ 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 آب شیرین کن خورشیدی پرداختند. نتایج نشان دادند که ضخامت این مواد تأثیر چندانی بر محصول آب شیرین کن ندارد و بهینه‌ترین ماده تغییر فاز دهنده را $A48$ معرفی کردند.

مطالعه‌ها نشان می‌دهد که بحث استفاده از سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی از جمله مواردی است که در سال‌های اخیر با اقبال زیادی مواجه شده است. با این وجود در مقاله‌های معدودی به مطالعه تجربی این سیستم‌ها با ترکیب چند روش افزایش محصول تولیدی پرداخته شده است. در واقع مطالعه چگونگی استفاده و ترکیب روش‌های افزایش محصول تولیدی و نیز مطالعه تجربی آن از جمله مواردی است که خلأ آن در ادبیات موضوع کاملاً مشهود است. در همین راستا در این پژوهش با در نظر گرفتن عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی، مدلی از یک آب شیرین کن خورشیدی آبشاری طراحی و ساخته شده است. در این سیستم برای افزایش محصول تولیدی در قسمت جلویی هر پله آب شیرین کن، آب بندهایی تعبیه شده تا آب مسیر مارپیچی را طی کند و زمان بیشتری با صفحه جاذب انرژی در تماس باشد. به منظور 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 آب شیرین کن از جمله مواردی است که در این پژوهش بررسی شده است در نهایت استفاده از ترکیب این روش‌ها به صورت دوتایی و سه‌تایی مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج عملکردی و اقتصادی ارائه می‌شود.

۲- توصیف سیستم

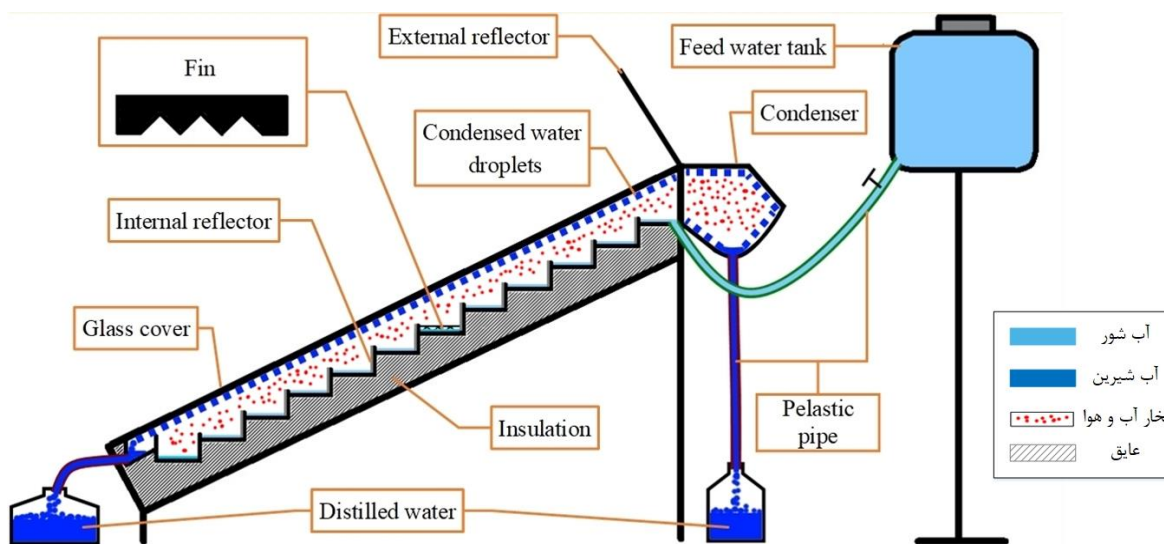
با توجه به اینکه آب شیرین کن‌های خورشیدی تقطیری در اشکال زیادی ساخته می‌شوند، با مطالعه ادبیات موضوع و کارهای گذشته،

است. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از خنک‌کننده تبخیری یا استفاده از جریان هوا بر روی کانال‌ها تولید محصول را تا بیش از $0/95$ لیتر بر ساعت افزایش می‌دهد. کومار^۱ و همکاران [۶] برای افزایش کارایی آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای تک شبیه از سیستم تحریک‌کننده که باعث شکستن لایه مرزی آب و افزایش سطح تماس آب با هوا می‌شود به همراه فن و چگالنده خارجی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که محصول تولیدی $39/49\%$ نسبت به آب شیرین کن تک حوضچه‌ای ساده افزایش یافته است. گناناراج^۲ و همکاران [۷] یک آب شیرین کن دو حوضچه‌ای طراحی کردند که حوضچه بالایی آن به صورت پلکانی و در سطح پله‌ها از مواد ذخیره کننده انرژی استفاده شده بود. آن‌ها این آب شیرین کن را به دو بازتابنده خارجی مجهز کردند و همچنین با کلکتور صفحه تخت به همراه یک استخر خورشیدی کوچک ترکیب کردند. نتایج افزایش محصول $57/83 - 127/65\%$ را در آزمایش‌های مختلف نسبت به آب شیرین کن تک حوضچه‌ای ساده نشان دادند. ربهی^۳ و همکاران [۸] برای بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای از صفحه جاذب دارای فین و چگالنده خارجی استفاده کردند. نتایج افزایش $41/95\%$ محصول آب شیرین کن دارای فین و چگالنده نسبت به آب شیرین کن تک حوضچه‌ای فاقد فین و چگالنده را نشان دادند. هانسن^۴ و موروگاول^۵ [۹] برای بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار، آن را با یک آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای ساده و یک تانک ذخیره کننده آب گرم ترکیب کردند. آن‌ها همچنین سه نوع صفحه تخت، شیاردار و فین شکل را به عنوان صفحه جاذب آب شیرین کن شیب‌دار استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بهترین نوع صفحه جاذب فین شکل است و راندمان سیستم ترکیبی با این نوع صفحه جاذب $46/9\%$ است. کابیل^۶ و همکاران [۱۰] برای افزایش بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای در آن از ماسه به عنوان مواد ذخیره کننده انرژی و پارچه کف به عنوان فیلتر استفاده کردند. نتایج نشان دادند که میزان محصول تولیدی و راندمان آب شیرین کن اصلاح شده نسبت به آب شیرین کن تک حوضچه‌ای ساده افزایش یافته است. سعدی^۷ و

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

در کارکرد آب شیرین کن‌های 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 ایجاد شده و دمای کف پله‌ها بالاتر رود و در نتیجه میزان تبخیر افزایش یابد. فین‌ها که در شکل ۱ قابل مشاهده 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 آب شیرین کن

یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی آبشاری طراحی و ساخته شد. شکل ۱ شماتیک سیستم آب شیرین کن آبشاری ساخته شده 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 بندهای جلو هر پله آب مسیر ماریچج را در طول پله‌های آب شیرین کن 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



شکل ۱: شماتیک کلی آب شیرین کن 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



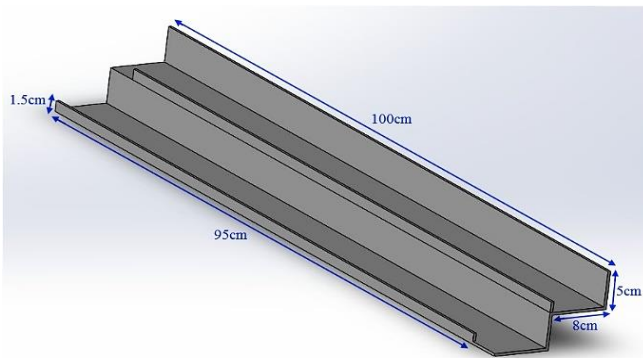
شکل ۲: نمایی از آب شیرین کن آبشاری ساخته شده

Fig. 2. A schematic of cascade solar water desalination

Table 1. Geometrical specifications of desalination of case study

جدول ۱: مشخصات هندسی آب شیرین کن مورد مطالعه

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



شکل ۳: هندسه پله‌های آب شیرین کن به همراه آب بند و ابعاد آن

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



شکل ۴: چگالنده آب شیرین کن به همراه سایه بان

Fig. 4. Desalination condenser along with canopy

خورشیدی با جنس ورق گالوانیزه با ابعاد 2×1 مترمربع را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی و دیگر پارامترهای این آب شیرین کن در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است در آب شیرین کن ساخته شده، در لبه هر پله از آب بندهایی به ارتفاع $1/5$ سانتی متر و طول 95 سانتی متر استفاده شده تا آب یک مسیر ماریج طولانی را در طول پله‌ها طی کند با این هدف که زمان بیشتری با صفحه جذب 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 پشم شیشه برای عایق کردن و جلوگیری از اتلاف حرارت استفاده شده است. جنس قاب دستگاه از ورق پلیاستیکی پی‌وی‌سی و پایه فلزی از جنس آهن انتخاب شده است و پوشاننده آب شیرین کن از صفحه شیشه‌ای با ضخامت 10 میلی‌متر است. جنس بازتابنده‌ها نیز فولاد زنگ نزن است که در برابر رطوبت و زنگ زدگی مقاوم است.

شکل ۴ چگالنده مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که از ورق فولاد زنگ نزن ساخته شده است. به منظور هر چه خنک تر کردن چگالنده، از ورق پلیاستیکی پلی کربنات به عنوان سایه بان استفاده شده است.

مختلف به همراه حالت پایه آب شیرین کنی در روزهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. منظور از حالت پایه، آب شیرین کن صرفاً با یک بازتابنده خارجی است. سپس روش‌های پیشنهادی برای

۳- شرایط انجام آزمایش

به منظور ارزیابی جامع سیستم آب شیرین کن آبخاری، هفت حالت

قرارگیری آب شیرین کن نسبت به افق برابر با عرض جغرافیایی منطقه تنظیم شد. در این پژوهش از وزش باد صرف نظر شده و آزمایش‌ها در شرایط جوی پایدار انجام گرفته است. به منظور ایجاد جریان با دبی ثابت از یک مخزن آب مرتفع جهت تغذیه آب شیرین کن استفاده شد، تا جریان آب پایا باشد. میزان کل املاح موجود در آب شور مورد آزمایش در تمامی آزمایش‌ها ۱۲۵۰ ppm است. همچنین از پنج دماسنج (نوع k با دقت ۰/۵ درجه 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 استفاده شده 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 آب شیرین کن 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.

افزایش محصول آب شیرین کن به صورت جداگانه و ترکیبی اعمال شده و در روزهای مختلف بر روی آب شیرین کن آزمایش شد. حالت‌های مختلف آزمایش شده عبارت‌اند از:

حالت اول: حالت پایه آب شیرین کن

حالت دوم: استفاده از فین در سطح پله‌های آب شیرین کن

حالت سوم: استفاده از بازتابنده‌های داخلی در آب شیرین کن

حالت چهارم: استفاده از فین و بازتابنده‌های داخلی در آب شیرین کن

حالت پنجم: استفاده از چگالنده خارجی در آب شیرین کن

حالت ششم: استفاده از چگالنده خارجی و فین در آب شیرین کن

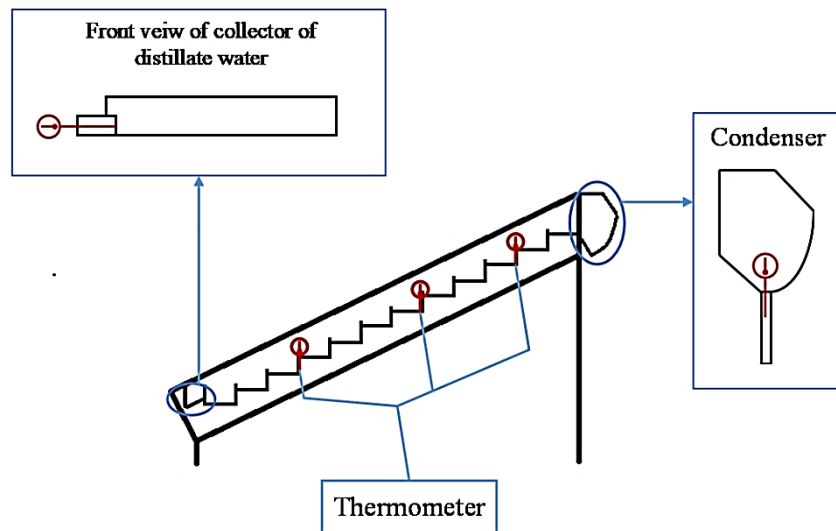
حالت هفتم: استفاده از چگالنده خارجی و بازتابنده‌های داخلی در

آب شیرین کن

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

در آب شیرین کن

ساین^۱ و تیواری^[۱۳] ثابت کردند، زمانی بیشترین محصول سالانه حاصل می‌شود که شیب آب شیرین کن 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



شکل ۵: شماتیک موقعیت دماسنج‌ها در محفظه داخلی سیستم آب شیرین کن

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

- 1 Singh
- 2 Tiwari

زمانی رسیده است. در روز هفتم یعنی ۲۰/۱۵/۸/۲۲ (۱۳۹۴/۵/۳۱) و روز هشتم آزمایش یعنی ۲۰/۱۵/۸/۲۳ (۱۳۹۴/۶/۰۱) بیشترین مقدار تابش به ترتیب ۱۰۶۱ و ۱۰۵۵ وات بر مترمربع و در ساعت ۱۳ بوده است.

۴- راندمان آب شیرین کن

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

$$\eta = \frac{Mh_{fg}}{I \times 3600} \quad (1)$$

که در آن M کل آب شیرین تولیدی، h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب (۲۲۵۷ 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 به منظور محاسبه قیمت آب شیرین تولیدی پرداخته می‌شود. در حقیقت قیمت آب شیرین تولیدی توسط سیستم آب شیرین کن 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]. از این رو در تحلیل اقتصادی سیستم مورد مطالعه از روش یکنواخت سالیانه^۱، به عنوان 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 آب شیرین کن به صورت زیر تعریف می‌شود.

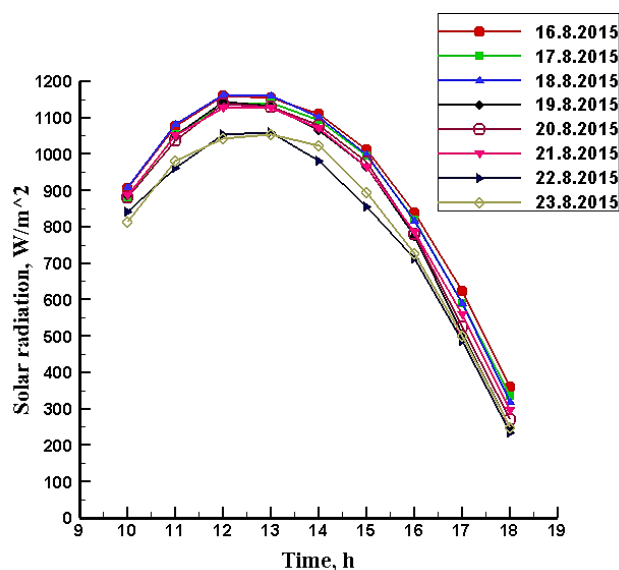
T_{ef} : دمای آب شیرین خروجی چگالنده که توسط یک ترمومتر در خروجی چگالنده اندازه‌گیری می‌شود.

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 ۲۰/۱۵/۸/۱۶ (۱۳۹۴/۵/۲۵) تا ۲۰/۱۵/۸/۲۴ (۱۳۹۴/۶/۲) به صورت 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 آب شیرین کن در هر حالت آزمایش رو به جنوب بوده و در ساعت‌های ۱۲ تا ۱۳ خورشید به دستور عمود نمی‌تابد. بیشترین مقدار تابش، در روز اول آزمایش یعنی ۲۰/۱۵/۸/۱۶ (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



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

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

1 Equivalent annual benefit (EUA)

می‌شود. مطابق رابطه (۸) هزینه اسقاطی سیستم با ضریب SSF به ASV ، یا هزینه اسقاطی سالانه^۸ تبدیل می‌شود [۱۷-۱۴].
خالص یکنواخت سالانه^۹ $NEUA$ نیز طبق رابطه (۹) ارزیابی می‌شود که در حقیقت اختلاف هزینه‌های سیستم از درآمدهای سالانه سیستم است. در نهایت، رابطه (۱۰) نیز قیمت آب تولیدی بر واحد لیتر CPL را با استفاده از میانگین محصول تولیدی سالانه^{۱۰} AP نشان می‌دهد.

$$NEUA = EUAC - EUAB \quad (۹)$$

$$CPL = NEUA / AP \quad (۱۰)$$

در روابط (۵) و (۸) دو پارامتر CRF و SSF به ترتیب ضریب بازیافت سرمایه^{۱۱} و ضریب وجوه استهلاکی^{۱۲} می‌باشند که توسط روابط (۱۱) و (۱۲) ارزیابی خواهند شد.

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

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

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 $CRF = 0.1993$ و وجوه استهلاکی $SSF = 0.0493$ به دست می‌آیند.

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

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

$$EUAB = ASV \quad (۳)$$

که در این روابط AMC هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه^۱، Op_j هزینه‌های عملکردی^۲، AFC هزینه ثابت سالانه سیستم و j شمارنده تجهیزات و d شمارنده روزهای سال می‌باشد. در ادامه برای توضیح بیشتر، روابط مربوط به هر کدام تعریف شده است.

$$P = \sum_{j=1}^N In_j \quad (۴)$$

$$AFC = P * CRF \quad (۵)$$

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

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

$$ASV = S * SSF \quad (۸)$$

In_j هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه^۳ تجهیزات و P هزینه اولیه^۴ 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^۵ تجهیزات مختلف است و به صورت درصدی از مقدار هزینه ثابت سالانه در نظر گرفته می‌شود. SV_j هزینه‌های اسقاطی^۶ 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

8 Annual salvage value
9 Net Equivalent uniform annual
10 Average annual productivity
11 Capital recovery factor
12 Sinking fund factor

1 Annual maintenance cost
2 Operational cost
3 Annual fixed cost
4 Investment
5 Present worth
6 Maintenance
7 Salvage value

ارزیابی می‌شود.

$$Op = (E_b \varepsilon_e) + (\dot{m}_f \varepsilon_f) \quad (13)$$

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

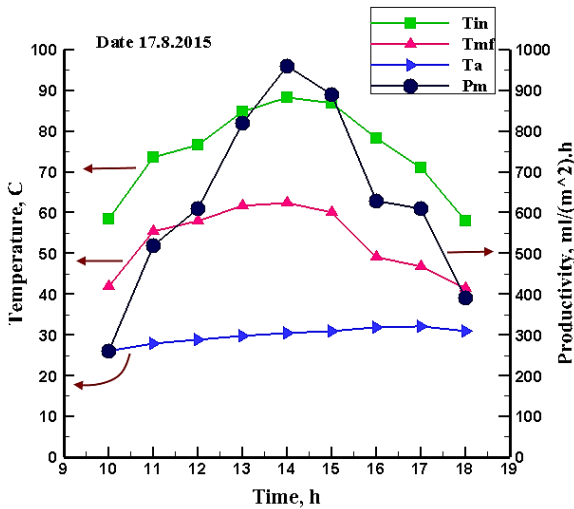
نتایج به‌دست‌آمده از حالت‌های مختلف آزمایش به‌صورت نمودارهای

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 افزایش یافته 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

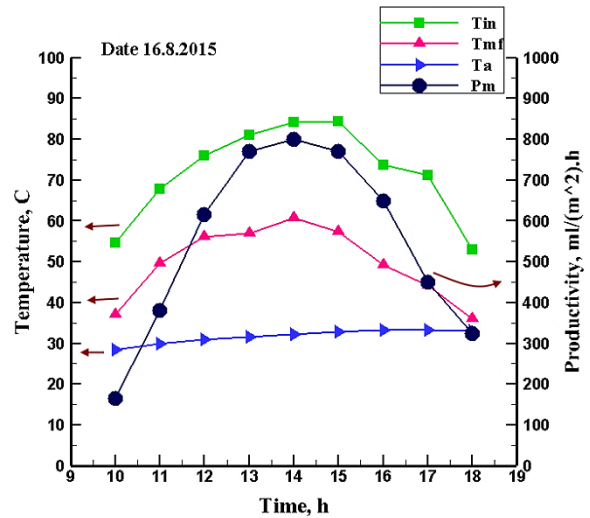
جدول ۲: هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگهداری و اسقاطی سیستم، به همراه خالص یکنواخت و میانگین محصول تولیدی سالانه سیستم

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



شکل ۸: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن در حالت پایه با فین

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



شکل ۷: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن در حالت پایه

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

شکل ۹ مشاهده می شود بیشترین دمای فضای داخل آب شیرین کن ۸۶/۴ درجه سانتی گراد در ساعت ۱۴ است. دمای آب شیرین خروجی برای این روز در ساعت ۱۳ دارای بیشترین مقدار یعنی ۵۹/۸ درجه سانتی گراد است. دمای محیط روند صعودی تا ساعت ۱۷ داشته و بیشترین مقدار آن ۳۴/۳ درجه سانتی گراد می باشد. بیشترین محصول تولیدی ۹۰۰ میلی لیتر و بین ساعت های ۱۳ تا ۱۴ است. کل محصول تولیدی در این آزمایش ۵۸۸۰ میلی لیتر است که نسبت به حالت پایه آب شیرین کن محصول خروجی ۱۵/۲۹٪ افزایش داشته است. افزایش محصول نسبت به حالت پایه به این دلیل است که پرتوهای خورشید رسیده به ورق های فولادی بکار برده شده در پایه پله ها به سطح پله ها منعکس شده و باعث افزایش دمای سطح پله ها و در نتیجه افزایش محصول شده اند.

۶-۳- استفاده از فین و بازتابنده های داخلی در آب شیرین کن

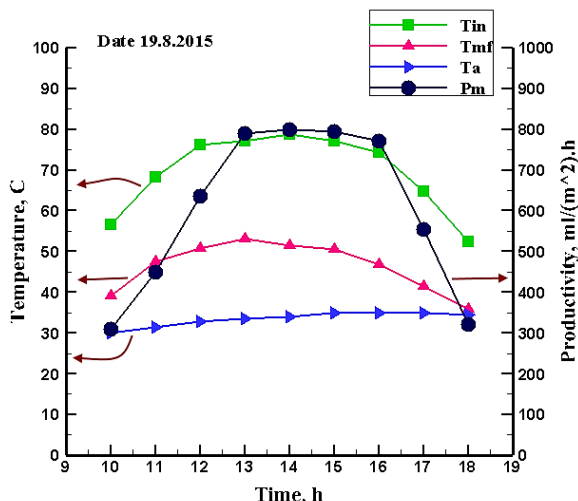
در این قسمت به حالت پایه آب شیرین کن به طور هم زمان فین و بازتابنده های داخلی اضافه شد و دستگاه مورد آزمایش قرار گرفت. برای فضای داخلی آب شیرین کن در این آزمایش با توجه به شکل ۱۰ بیشترین دما در ساعت ۱۴ و مقدار ۷۸/۷ درجه سانتی گراد ثبت گردیده است. به طور کلی دمای فضای داخل آب شیرین کن تا ساعت ۱۴ روند صعودی و بعد از آن روند نزولی را طی می کند. بیشترین دمای

۶-۱- استفاده از فین در سطح پله های آب شیرین کن

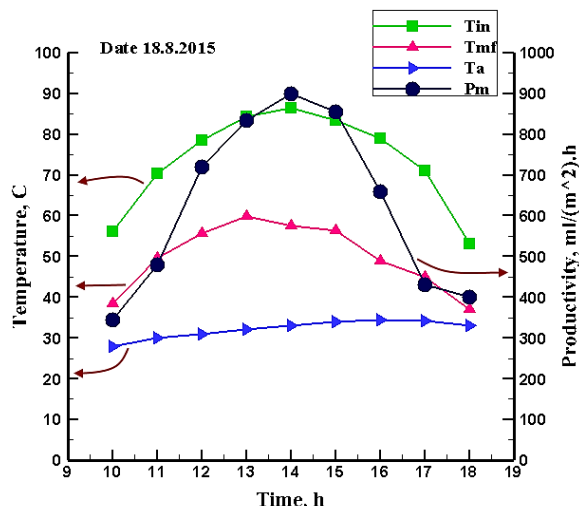
در این حالت چهار فین بر روی هر پله به منظور افزایش دمای داخلی و در نتیجه افزایش نرخ تبخیر آب شور استفاده شده است. همان طور که در شکل ۸ و جدول ۳ مشاهده می شود بیشترین دمای محیط داخل آب شیرین کن در این روز ساعت ۱۴ با دمای ۸۸/۳ درجه سانتی گراد است. بیشترین دمای آب خروجی نیز در ساعت ۱۴ با دمای ۶۲/۵ درجه سانتی گراد بوده است. همچنین دمای محیط تا ساعت ۱۷ رو به افزایش بوده که در بیشترین حالت به دمای ۳۲ درجه سانتی گراد رسیده است. بیشترین حجم آب شیرین خروجی این روز در بازه بین ساعت های ۱۳ تا ۱۴ و مقدار ۹۶۰ میلی لیتر است. مجموع آب شیرین استحصال شده در این روز ۵۹۸۰ میلی لیتر است که نسبت به حالت بدون فین ۸۸۰ میلی لیتر یعنی ۱۷/۲۵٪ افزایش محصول داشته است. این افزایش همان طور 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 در نتیجه محصول تولیدی افزایش یابد.

۶-۲- استفاده از بازتابنده های داخلی در آب شیرین کن

در این حالت از ۱۰ عدد ورق فولاد زنگ نزن با طول ۹۵ و عرض ۶/۵ سانتی متر به عنوان بازتابنده استفاده شده تا پرتوهایی از خورشید که به این ورق ها می تابند به کف پله ها منعکس شوند. همان طور که از



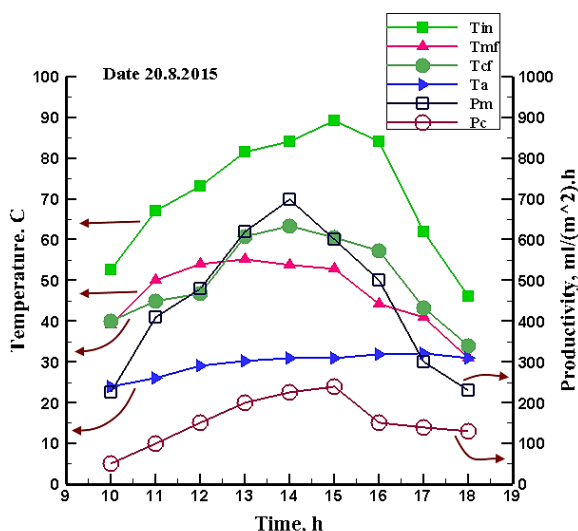
شکل ۱۰: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن در حالت پایه با فین و بازتابنده‌های داخلی



شکل ۹: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن در حالت پایه با بازتابنده داخلی

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

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



شکل ۱۱: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن در حالت پایه با چگالنده خارجی

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

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 به صورت 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 به حساب نمی‌آیند.

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.

۶-۴- استفاده از چگالنده خارجی در آب شیرین کن

در این حالت استفاده از چگالنده خارجی برای کمک به چگالیده بخارهای اضافی تولیدشده در محفظه اصلی آب شیرین کن پیشنهاد و اجرا گردید. شکل ۱۱ نتایج مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دمای فضای داخل آب شیرین کن ۸۹/۲ درجه سانتی‌گراد در ساعت ۱۵ است که در

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.

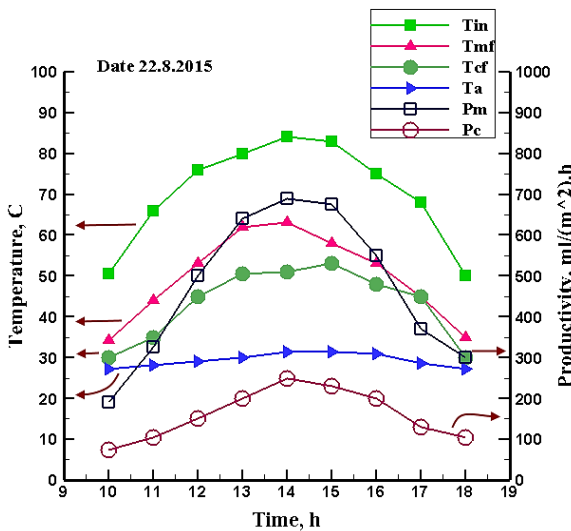
۶-۷- استفاده از چگالنده خارجی، فین و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

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

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 به اندازه ۴/۸٪ نسبت به حالت بدون فین شده است که این افزایش محصول به دلیل افزایش دمای سطح آب‌شیرین‌کن توسط فین‌ها بوده است.

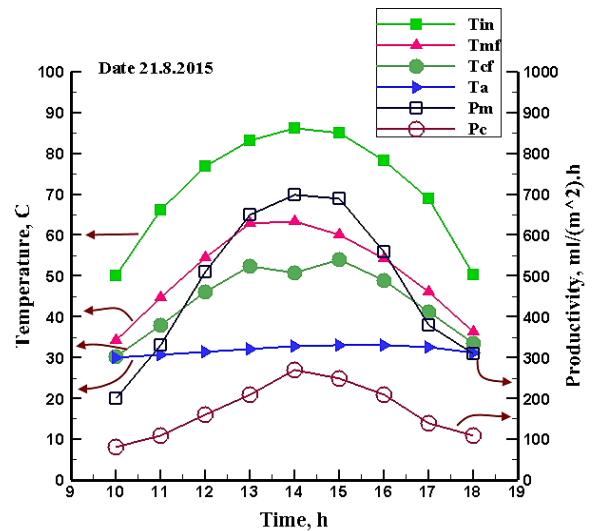
۶-۶- استفاده از چگالنده خارجی و بازتابنده‌های داخلی در آب‌شیرین‌کن

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



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 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

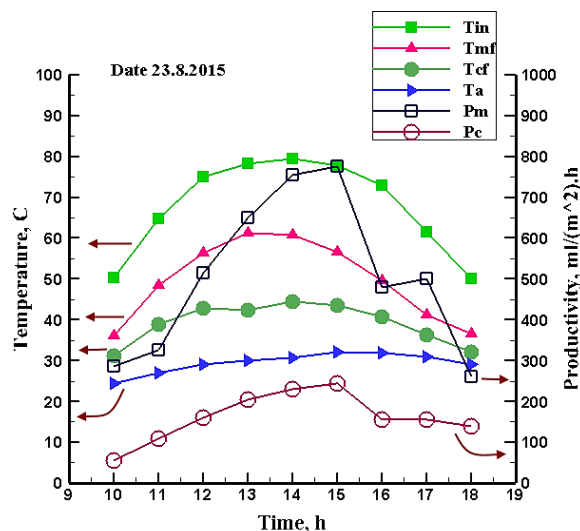
فضای سردتر در آن قسمت سریع تر چگالیده و تخلیه شد.

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 آب شیرین کن، 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 آب شیرین کن را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد استفاده از چگالنده خارجی در حالت ۸ منجر به رسیدن به راندمان $52 \pm 1/38\%$ می‌گردد که می‌تواند مربوط به افزایش تولید محصول در این حالت نسبت به حالت‌های قبلی باشد.

۶-۸- نتایج اقتصادی

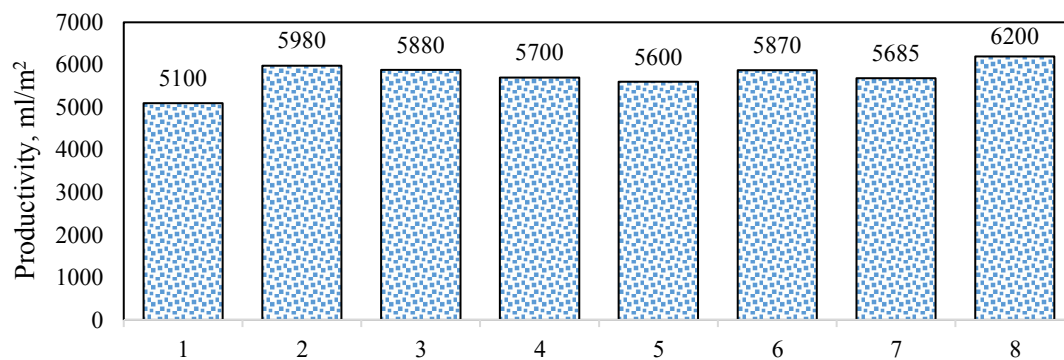
شکل ۱۷ نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. قیمت آب شیرین تولیدی در حالت پایه با فین (حالت ۲) کمترین و در حالت پایه با چگالنده و بازتابنده‌های داخلی (حالت ۷)



شکل ۱۴: نمودار دماها و محصول برای سیستم آب شیرین کن 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 میلی لیتر بوده است. مجموع محصول تولیدی برای قسمت اصلی و چگالنده به ترتیب ۴۶۷۰ و ۱۵۳۰ میلی لیتر و در مجموع آب شیرین تولیدی سیستم در این حالت ۶۲۰۰ میلی لیتر است که $21/57\%$ افزایش محصول را نسبت به حالت پایه و $10/7\%$ افزایش محصول نسبت به حالت پایه با چگالنده داشته است. استفاده از چگالنده توانست مشکل اعظم ترکیب فین و بازتابنده‌های داخلی که همان زیاد شدن بخار در قسمت اصلی بود را حل کند. در این حالت بخار اضافی به قسمت چگالنده رفته و به دلیل



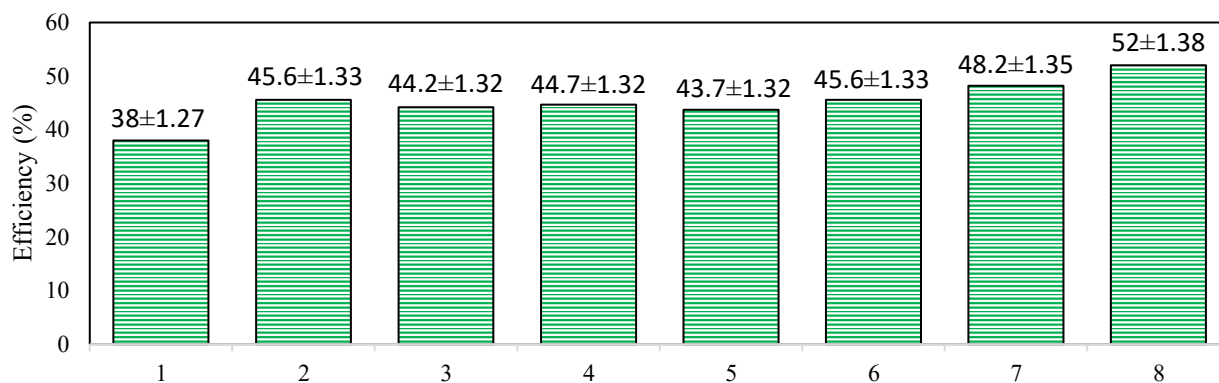
شکل ۱۵: مقایسه محصول تولیدی در هر آزمایش باحالت پایه

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

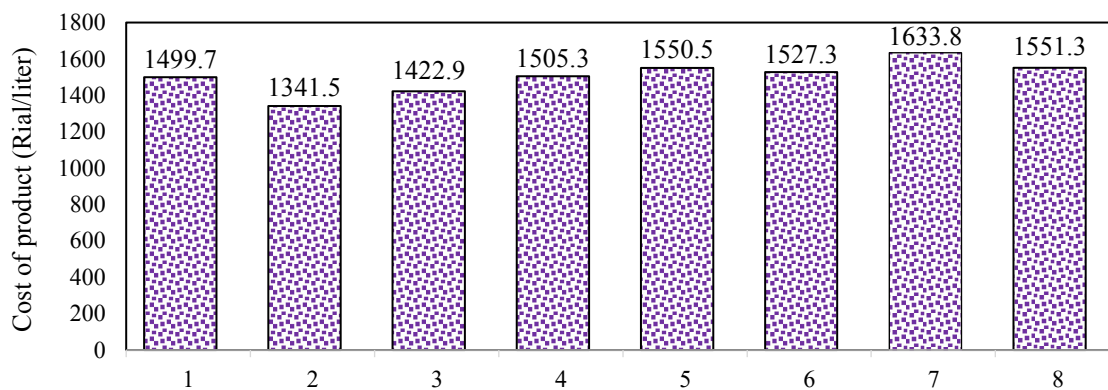
جدول ۳: نتایج مربوط به بیشینه مقدار پارامترهای به دست آمده در حالت‌های مختلف

P_c (ml/m ³)	P_m (ml/m ³)	T_{mf} (°C)	T_a (°C)	T_{cf} (°C)	T_{in} (°C)	
-	۸۰۰	۶۰/۸	۳۳/۳	-	۸۴	حالت ۱
-	۹۶۰	۶۲/۵	۳۲	-	۸۸/۳	حالت ۲
-	۹۰۰	۵۹/۸	۳۴/۳	-	۸۶/۴	حالت ۳
-	۸۰۰	۵۳/۲	۳۴/۸	-	۷۸/۷	حالت ۴
۲۴۰	۷۰۰	۵۵/۳	۳۲/۱	۶۳/۴	۸۹/۲	حالت ۵
۲۷۰	۷۰۰	۶۳/۳	۳۳/۱	۵۴	۸۶/۱	حالت ۶
۲۵۰	۶۹۰	۶۳/۲	۳۱/۵	۵۳	۸۴	حالت ۷
۲۴۵	۷۵۵	۶۱	۳۱/۸	۴۴	۷۹	حالت ۸



شکل ۱۶: راندمان روزانه آب شیرین کن در هر حالت به همراه عدم قطعیت

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



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)

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 در نهایت ترکیب این روش‌ها به صورت 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 کن می‌تواند به ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی را نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد.

استفاده از بازتابنده‌های داخلی افزایش ۱۵/۳۹٪ محصول خروجی و کاهش ۵/۱۲٪ قیمت آب شیرین کن می‌تواند 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 آب شیرین کن 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

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 آب شیرین کن میزان آب شیرین تولیدی و مقدار تابش متوسط روزانه مؤثر است، مشاهده می‌شود که حالت‌های ۷ و ۸ هر چند که بالاترین قیمت تمام شده آب شیرین را به خود اختصاص 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 به دست آمده در پژوهش حاضر را با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد. این نتایج با توجه به نوع آب شیرین کن‌های خورشیدی و اصلاحات انجام شده بر روی هر سیستم در مراجع مختلف گردآوری شده است. با بررسی نتایج این جدول مشاهده می‌شود که آب شیرین کن ساخته شده 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 آب شیرین کن خورشیدی آبشاری پرداخته

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

جدول ۴ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین

مرجع	نوع آب شیرین کن	محصول تولیدی روزانه (ml/m ²)	راندمان (%)	قیمت آب شیرین (\$/l)
اومارا و همکاران [۳]	تک حوضچه‌ای با صفحه جاذب فین دار	۴۵۵۰	۴۷/۵	۰/۰۴۱
اومارا و همکاران [۴]	آبشاری با بازتابنده‌های داخلی و خارجی	۸۱۰۰	-	۰/۰۳۱
هانسن و موروگاول [۹]	شیب دار 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

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 (۳.الف) محاسبه می‌شود:

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

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 (۴.الف) برای تعیین عدم قطعیت استفاده می‌شود:

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

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 (۵.الف) استفاده می‌شود:

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

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 اندازه‌گیری مورد استفاده در این پژوهش مطابق

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 معمولاً 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 (۱.الف) محاسبه گردد. سپس طبق رابطه (۲.الف) عدم قطعیت محاسبه می‌شود:

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

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

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.

هزینه تعمیرات، Rial	Ma
کمترین مقدار اندازه گیری شده توسط تجهیز	MVM
تعداد مقادیر اندازه گیری شده	n
خالص یکنواخت سالانه، Rial/year	$NEUA$
هزینه‌های عملکردی، Rial	Op
هزینه اولیه سیستم، Rial	P
حجم آب شیرین تولیدی خروجی چگالنده، ml/m^3	P_c
حجم آب شیرین تولیدی خروجی اصلی، ml/m^3	P_m
هزینه اسقاطی سیستم، Rial	S
ضریب وجوه استهلاکی	SSF
هزینه‌های اسقاطی، Rial	SV
دم، $^{\circ}C$	T
عدم قطعیت	u
میانگین اندازه‌گیری‌های تکراری	W

علائم یونانی

قیمت خرید	\mathcal{E}
قیمت فروش	φ

زیرنویس

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

منابع

- [1] M.M. Ghafurian, H. Niazmand, E. Ebrahimmnia-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. Ebrahimmnia-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.

Table A1. Measuring equipment along with accuracy and error

جدول الف ۱ تجهیزات اندازه‌گیری به همراه دقت و خطا

وسیله	دقت	خطا (%)
دماسنج	$0.5^{\circ}C$	0.2
پیرانومتر	$1 W/m^2$	0.43
ظرف استوانه ای مدرج	1 ml	2
کولیس	$0.001 m$	10
متر	$0.001 m$	6/6

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 الف ۱ آورده شده است.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

پهنای بین حدود بالا و پایین	a
دقت وسیله اندازه‌گیری	AC
هزینه ثابت سالانه، Rial/year	AFS
هزینه تعمیر و نگهداری سالانه، Rial/year	AMC
میانگین محصول تولیدی سالانه، l/year	AP
هزینه اسقاطی سالانه، Rial/year	ASV
هزینه آب شیرین تولیدی بر واحد لیتر، Rial/l	CPL
ضریب بازیافت سرمایه	CRF
شمارنده روزهای سال	d
درآمد یکنواخت سالیانه، Rial/year	$EUAB$
هزینه یکنواخت سالیانه، Rial/year	$EUAC$
گرمای نهان تبخیر، J/kg	h_{fg}
نرخ بهره، %	i
شدت تابش خورشیدی، W/m^2	I
هزینه اولیه، Rial	In
تعداد سال بهره‌برداری	k
کل محصول تولیدی، kg/m^3	M

- 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.
- [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

