Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(6) (2020) 383-386
DOI: 10.22060/mej.2018.14032.5784

Thermoeconomic Analysis of a Double Slope Basin Solar Still Equipped to Phase Change Material and Photovoltaic Thermal Collector

E. Hedayati-Mehdiabadi, F. Sarhaddi*, F. Sobhnamayan

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT: In present study the thermoeconomic analysis of a double slope basin solar still equipped to phase change material and photovoltaic thermal collector is carried out. The governing equations of problem are obtained by writing energy balance for different components of the system. The goal of governing equations solution is the calculation of glass cover temperature, absorber temperature, saline water temperature, phase change material temperature, freshwater productivity and the useful heat gain of photovoltaic thermal collector. Also, the output electrical power of photovoltaic module is calculated by four parameters current-voltage model. Present study numerical results are in good agreement with experimental data. The system performance evaluation is carried out from the viewpoint of freshwater productivity and energy efficiency for the sample winter and summer day of Zahedan. Results show that the freshwater productivity increases to 10.6% by increasing of mass flow rate from 0.001 to 0.01 kg/s. Increase of saline water mass of basin from 20 to 30 kg decreases the freshwater productivity to 4.8% during the day. On the other hand, it increases the freshwater productivity to 7.43% during the night. The energy efficiency is 37.5% less on winter day than summer day. The freshwater production cost is obtained 0.0314 $/l.m2.

Review History:

Received: 1 Feb. 2018
Revised: 15 Mar. 2018
Accepted:20 May 2018
Available Online: 26 May 2018

Keywords:

Double slope basin solar still
Energy analysis
Economic analysis
Photovoltaic thermal collector
Phase change material

1- Introduction

In recent years, the scarcity of fresh water has become one the main challenges faced for the continuation of human life. Drinking water resources constitute about three percent of the total volume of water on Earth, and ocean water cannot be utilized directly due to its salt content of about 3.5 percent [1]. Therefore, people need to find ways of providing drinking water to overcome this problem. In countries like Iran, use of solar energy for distillation of salty seawater can be a suitable method for producing fresh water. Al-harahsheh et al. [2] studied the experimental performance of a double slope basin solar still connected to a conventional solar energy collector. They used a series of cylindrical blocks containing a Phase Change Materials (PCM) for this solar still. Their system could produce about 4300 mL/m2.day. Forty percent of this fresh water was produced during the night by the phase change material.

The innovation in the present research was the concurrent use of phase change materials and PhotoVoltaic Thermal (PV/T) collector in a double slope basin solar still, something that was not carried in previous research [1-4]. The PV/T collector helped improve fresh water production during sunlight hours through preheating the salt water, and the PCM allowed fresh water production during the night. However, the thermo-economic analysis of the hybrid system was not carried out.

2- Governing Equations of the System

A hybrid system was employed in this study consisting of a double slope basin solar still together with PMC and a PV/T collector, and fresh water was produced day and night due to of the presence of the PMC. Fig. 1 presents a general view of the studied system. Energy balance equations were written for the various components of the system to analyze energy and the performance of the solar still together with the PMC and the PV/T collector. Analysis of these equations yielded a nonlinear system of ordinary differential equations to find the various temperatures of system components. Since the energy source for the system was solar energy during the day and the PCM at night, energy equations were written for the charge and discharge states. Energy balance for the western glass, the water in the basin, the absorber plate, and the PCM in the charge state are presented below, respectively [1-4]:

$$\begin{aligned}&\alpha_g G_{sw} A_g + h_{W-gw} A_b (T_W - T_{gw}) = h_{c,gw-a} A_g (T_{gw} - T_a)\\&+h_{r,gw-sky} A_g (T_{gw} - T_{sky}) + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge})\\&+M_g c_g \frac{dT_{gw}}{dt}\end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}&\tau_g \alpha_W G_s A_b + h_{c,b-W} A_b (T_b - T_W) + \dot{Q}_c\\&= h_{W-gw} A_b (T_W - T_{gw}) + h_{W-ge} A_b (T_W - T_{ge})\\&+M_W c_W \frac{dT_W}{dt}\end{aligned} \quad (2)$$

*Corresponding author's email: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

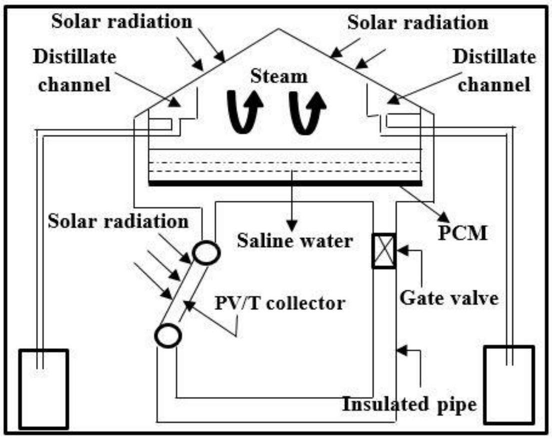


Fig. 1. Double slope basin solar still equipped with PCM and PV/T collector

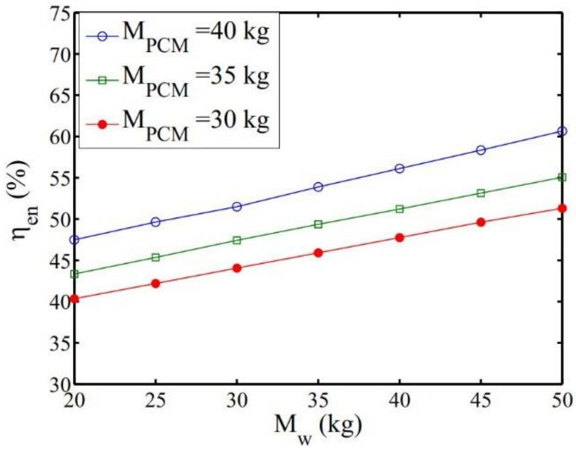


Fig. 2. Average daily energy efficiency based on changes in PCM and water masses

Table 1. Validation results of the present research

Parameter	Error (%)
Temperature of the water in the basin	6.8
Temperature of the glass condenser	7.32
Temperature of the collector cell	3.8
Temperature of the outflow from the collector	3.1

$$\tau_g \tau_W \alpha_b G_s A_b = h_{c,b-W} A_b (T_b - T_W) + \frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) + M_b c_b \frac{dT_b}{dt} \tag{3}$$

$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) = \frac{k_{ins}}{X_{ins}} A_b (T_{PCM} - T_a) + M_{equ} \frac{dT_{PCM}}{dt} \tag{4}$$

The rate of evaporation energy related to the solar still and the mass of fresh water produced by the system are obtained from the following equations.

$$\dot{q}_{ev} = h_{ev} A_b (T_w - T_g) \tag{5}$$

$$m_w = \frac{\dot{q}_{ev} \Delta t}{h_{fg}} \tag{6}$$

The energy efficiency the PV/T solar still is defined as the ratio of the desirable output energy to the net energy entering the system.

3- Validation

Since no comprehensive research was found to exactly match the present one, the validation process took place in the two stages shown in Table 1. The first stage was validation of the code written for the PV/T collector through comparison with data related to the testing setup of the PV/T collector located at the Mechanical Engineering Department of University of Sistan and Baluchestan. The second stage was validation of the code written for the double slope basin solar still employing the experimental data reported by Tiwari et al. [4].

Table 1 indicates the simulation results matched previous empirical data well.

4- Results

Fig. 2 shows the average daily energy efficiency based on changes in PCM and water masses.

As shown in Fig. 2, the average daily energy efficiency improved with increases in water mass and also improved with increases in PCM mass.

The present study used the economic analysis performed by Fath et al. [5]. The estimated cost of the machine (the price of dollar at Tomans 4200) was 337 dollars. According to the mentioned economic analysis, the production cost per unit area was 0.0314 dollar per liter of produced fresh water.

5- Conclusions

Main conclusions of the present study are as follows:

•Numerical simulation results in the present study for the double slope basin solar still, and for the PV/T collector connected to it, are in good agreement with those of previous experimental research.

•Increases in the mass of salt water inside the basin at first reduced but then increased the daily energy efficiency of the system. However, the daily energy efficiency improved on average.

•The performed economic analysis and its comparison with those of similar studies show that the suggested system is a cost-effective one and, in addition to producing water, generates electricity.

References

[1] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, Energy Conversion and Management, 49(10) (2008) 2602-2608.

[2] M. Al-harahsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, Z. Alzghoul, Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, Applied Thermal Engineering, 128 (2018) 1030-1040.

[3] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, Irreversibility rates in a solar photovoltaic/thermal water collector: An experimental study, Heat Transfer Research, 48(8) (2017) 741-756.

[4] V. Dwivedi, G. Tiwari, Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode, Desalination, 250(1) (2010) 49-55.

[5] H.E.S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, A. Hassabou, Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations, Desalination, 159(1) (2003) 69-79.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۵۳۱ تا ۱۵۵۰
DOI: 10.22060/mej.2018.14032.5784

تحلیل ترمواقتصادی آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

عرفان هدایتی مهدی‌آبادی، فرامرز سرحدی*، فاطمه صبح‌نمایان

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران

خلاصه: در تحقیق حاضر به تحلیل ترمواقتصادی آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداخته شده است. معادلات حاکم بر مسئله توسط نوشتن موازنه انرژی برای اجزاء مختلف سیستم به دست آمده است. هدف از حل معادلات حاکم محاسبه دمای پوشش شیشه‌ای، دمای صفحه جاذب، دمای آب شور، دمای ماده تغییر فاز، میزان تولید آب شیرین و نرخ حرارت جذب‌شده توسط گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد. همچنین توان الکتریکی خروجی مدول فتوولتائیک توسط مدل چهار پارامتری جریان–ولتاژ محاسبه شده است. نتایج عددی تحقیق حاضر در توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. بررسی عملکرد سیستم از منظر تولید آب شیرین و راندمان انرژی برای روز زمستانی و روز تابستانی شهر زاهدان انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی از ۰/۰۰۱ kg/s به ۰/۰۱ kg/s میزان تولید آب شیرین ۱۰/۶٪ افزایش می‌یابد. افزایش جرم آب‌شور درون حوضچه از ۲۰ kg به ۳۰ kg در روز، میزان تولید آب‌شیرین را در حدود ۴/۸٪ کاهش می‌دهد ولی در شب، در حدود ۷/۴۳٪ افزایش می‌دهد. راندمان انرژی در روز زمستانی نسبت به روز تابستانی به میزان ۳۷/۵٪ کمتر است. از تحلیل اقتصادی سیستم هزینه تولید آب‌شیرین به ازای واحد سطح برابر با ۰/۰۳۱۴ دلار برای هر لیتر به دست آمد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

کلمات کلیدی:
آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه
تحلیل انرژی
تحلیل اقتصادی
گردآورنده فتوولتائیک حرارتی
ماده تغییر فاز

۱– مقدمه

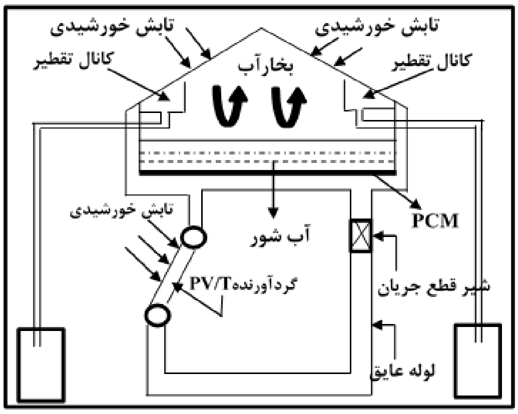
در سال‌های اخیر کمبود آب شیرین به یکی از چالش‌های اصلی برای ادامه حیات بشری تبدیل شده است. منابع آب‌های آشامیدنی در حدود ۳ درصد از آب‌های کل روی زمین را تشکیل می‌دهند و استفاده از آب اقیانوس‌ها به دلیل داشتن حدود ۳/۵ درصد املاح مختلف به‌طور مستقیم قابل‌استفاده نیستند [۱]. آب آشامیدنی نباید بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر املاح داشته باشد، در صنعت هم آب‌های سخت با املاح زیاد علاوه بر امکان خوردگی، با ایجاد رسوب در لوله‌ها و دستگاه‌ها مشکلاتی در تأسیسات ایجاد و سرمایه‌های هنگفتی را به هدر می‌دهد. به همین دلیل جامعه بشری برای رهایی از این مشکل نیازمند راه‌هایی برای تأمین آب آشامیدنی و شرب است. با توجه به هزینه بالا و مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی خورشیدی در کشورهایی همچون ایران جهت تقطیر خورشیدی آب‌شور دریاها و یا منابع آب‌های زیرزمینی نامطلوب می‌تواند راه مناسبی برای تولید آب شیرین باشد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

۱– ۱– آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

رایج‌ترین نوع سیستم‌های نمک‌زدایی خورشیدی در مقیاس خانگی، آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای[1] هستند. در این میان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی دوشیبه[2] به دلیل داشتن دو شیشه چگالنده، امکان استفاده از تابش خورشیدی را در اغلب ساعات روز فراهم می‌آورند. بازده تولید آب شیرین حوضچه‌های خورشیدی چندان بالا نیست. ازاین‌رو می‌توان با اتصال این آب‌شیرین‌کن‌ها به گردآورنده‌های خورشیدی، راندمان آن‌ها را قدری افزایش داد. گردآورنده خورشیدی نقش پیش‌گرم‌کن آب‌شور را ایفا کرده و با ازدیاد دمای آب‌شور درون حوضچه راندمان سیستم را افزایش می‌دهد. اگر گردآورنده خورشیدی از نوع فتوولتائیک حرارتی[3] انتخاب شود، می‌تواند توان الکتریکی لازم برای پمپاژ آب‌شور را در حالت جابجایی اجباری در سیستم آب‌شیرین‌کن فراهم آورد. شب هنگام به دلیل عدم وجود

1 Basin solar stills
2 Double slope solar still
3 PhotoVoltaic/Thermal collector (PV/T)



شکل ۱: آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به مواد تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Fig. 1. Basin type double slope solar still equipped with phase change material and photovoltaic thermal collector

تابش خورشید امکان تولید آب شیرین توسط این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها وجود ندارد. با مجهز کردن آب‌شیرین‌کن به ماده تغییر فاز[1] می‌توان امکان تولید آب شیرین را در شب فراهم آورد. چون در طی روز ماده تغییر فاز قادر به ذخیره‌سازی حرارت اتلافی از آب‌شیرین‌کن بوده و شب هنگام با بازپس دادن حرارت ذخیره‌شده در خود، باعث تبخیر آب شور و ادامه یافتن تولید آب شیرین در سیستم می‌شود. اتصال گردآورنده فتوولتائیک حرارتی و استفاده از ماده تغییر فاز در آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه جهت بهبود تولید آب شیرین موضوع مورد بررسی تحقیق حاضر می‌باشد. نمونه‌ای از آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

مواد تغییر فاز دهنده[2] حاوی ترکیبات عالی و یا معدنی می‌باشند که قابلیت جذب و ذخیره نهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را در درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد در طی فرایند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بلعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه‌ی تغییر فاز درون خود حفظ نماید.

۱- ۲- مروری بر پژوهش‌های گذشته

لاوازیه در سال ۱۸۶۲ از دو عدسی بزرگ شیشه‌ای جهت متمرکز کردن نور خورشید روی ظروف حاوی آب املاح دار استفاده کرد و با این روش آب مقطر تولید نمود]۲[. اولین شخصی که دستگاه تقطیر خورشیدی را طراحی نمود، ویلسون در سال ۱۸۷۲ بود [۲]. او هر روز آب املاح‌دار را در مخزن دستگاه می‌ریخت و این آب در اثر تابش خورشید تبخیر می‌گردید و درنتیجه روی جداره داخلی پوشش شیشه‌ای چگالش می‌یافت و به این روش آب مقطر تهیه می‌گردید. در سال ۲۰۰۹ السبایی و همکاران [۳] به بررسی عملکرد حرارتی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای مجهز به مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان منبع ذخیره‌سازی انرژی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پس از غروب آفتاب تا صبح روز بعد، مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان منبع حرارتی برای آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای عمل خواهد کرد. همچنین قابلیت تولید دستگاه آب‌شیرین‌کن آن‌ها در یک روز تابستانی به مقدار ۹/۰۰۵ $day.kg/m^2$ با یک بازدهی ۸۴ درصد بود. در سال ۲۰۱۰ دیودی و تیواری [۴] به مدل‌سازی حرارتی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه فعال تحت گردش طبیعی آب پرداختند و نشان دادند که عملکرد روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه غیرفعال در حدود ۱/۸۴ kg/m^2 می‌باشد؛ در حالی‌که عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه فعال تحت شرایط یکسان در حدود ۲/۸ kg/m^2 است. در سال ۲۰۱۶ آسبیک و همکاران [۵] به تجزیه و تحلیل انرژی دستگاه تقطیر خورشیدی مجهز به منبع ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار انرژی تلف‌شده در طی دوره تابش خورشید به خصوص از صفحه جاذب قابل ملاحظه است. لذا با اتصال منبع ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب می‌توان انرژی حرارتی تلف‌شده را ذخیره نمود و شب هنگام برای تولید آب شیرین استفاده کرد. رهبر و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷ به مطالعه تجربی راندمان اکسرژی و تحلیل اقتصادی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه مجهز به ماژول گرمایی ترموالکتریک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که راندمان اکسرژی در طول زمان آزمایش افزایش می‌یابد و ماکزیمم راندمان اکسرژی سیستم در حدود ۲۵ درصد بوده و در ساعت ۳ بعدازظهر اتفاق می‌افتد و معمولاً تغییرات راندمان اکسرژی و دمای محیط، یک‌روند متضادی دارا می‌باشند. همچنین از منظر اقتصادی به این نتیجه رسیدند که هزینه تولید آب برای روز و شب به ترتیب ۰/۱۴۲۲ و ۰/۲۳۷ دلار برای هر لیتر می‌باشد که نشان می‌دهد هزینه تولید آب در شب در حدود٪ ۱۶۰ بیشتر از روزها می‌باشد. در سال ۲۰۱۷ یزدان پناهی و سرحدی [۷] به بررسی تجربی

1 Phase Change Material (PCM)
2 Phase Change Material (PCM)

نرخ برگشت‌ناپذیری در یک گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مینیمم عدد برگشت‌ناپذیری کل سیستم در نرخ جریان جرمی بهینه ۰/۰۰۲ kg/s رخ می‌دهد. عدد برگشت‌ناپذیری اختلاف دمای گردآورنده و خورشید با مقدار ۶۶٪ بیشترین سهم را در برگشت‌ناپذیری کل سیستم دارد و همچنین سهم عدد برگشت‌ناپذیری مربوط به اتلاف گرما و اصطکاک جریان آب قابل صرف‌نظر است. الهاراشه و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای متصل به گردآورنده خورشیدی معمولی پرداختند. همچنین آن‌ها جهت ذخیره انرژی از یکسری بلوک‌های استوانه‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده در حوضچه آب‌شیرین‌کن استفاده کردند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها در طول شبانه‌روز قادر به تولید آب شیرین در حدود ۴۳۰۰ $day.ml/m^2$ است که در حدود ۴۰ درصد از این آب شیرین تولیدی شب هنگام به واسطه استفاده از ماده تغییر فاز دهنده تولید شده است.

۱- ۳- نوآوری تحقیق حاضر

استفاده همزمان از ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است در تحقیقات گذشته [۸-۱] انجام نشده است. گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در ساعات آفتابی روز با پیش‌گرمایش آب شور به بهبود تولید آب شیرین کمک می‌کند و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده امکان تولید آب شیرین را شب هنگام نیز فراهم می‌کند. همچنین تحلیل ترمواقتصادی سیستم ترکیبی مدنظر تحقیق حاضر، انجام نشده است.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این قسمت به تحلیل انرژی سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداخته می‌شود. هدف از تحلیل انرژی، به دست آوردن روابطی برای محاسبه دمای قسمت‌های مختلف سیستم همچون دمای شیشه شرقی، دمای شیشه غربی، دمای صفحه جاذب، دمای ماده تغییر فاز دهنده و دمای آب شور درون حوضچه می‌باشد. با نوشتن موازنه انرژی برای اجزاء مختلف سیستم، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی مقدار اولیه برای یافتن دماهای ذکر شده به دست خواهد آمد.

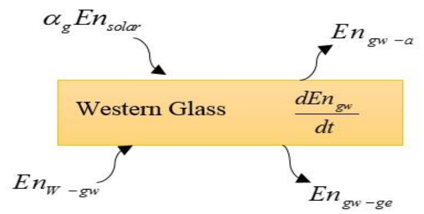
۲- ۱- تعریف مسئله

هدف اصلی این تحقیق بررسی تئوری میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برای یک روز زمستانی و تابستانی و همچنین تأثیر پارامترهای عملکردی و طراحی بر راندمان انرژی است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شد، سیستم موردنظر ترکیبی از یک آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی همراه با ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد و عمل تولید آب در کل شبانه‌روز با توجه به حضور متده تغییر فاز دهنده انجام می‌پذیرد. با توجه به این که در سیستم موردنظر منبع تأمین انرژی در روز خورشید و در شب ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد، به همین دلیل معادلات انرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای دو حالت شارژ و تخلیه نوشته شده است.

۲- ۲- تحلیل انرژی آب‌شیرین‌کن در حالت شارژ

موازنه‌های انرژی مربوطه برای قسمت‌های مختلف سیستم در حالت شارژ در ادامه بیان‌شده است.

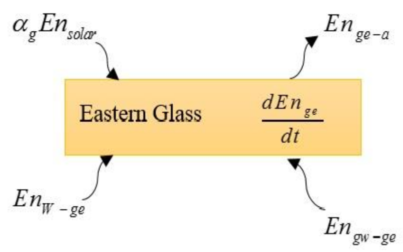
۲- ۲- ۱- موازنه انرژی برای شیشه غربی. [۳ و ۴]



$$\begin{aligned}\alpha_g G_{sw} A_g + h_{W-gw} A_b (T_W - T_{gw}) = {} & h_{c,gw-a} A_g (T_{gw} - T_a) + h_{r,gw-sky} A_g (T_{gw} - T_{sky}) \\ & + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) + M_g c_g \frac{dT_{gw}}{dt}\end{aligned} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، پارامترهای α_g، G_{sw}، A_g، h_{W-gw}، A_b، T_W، T_{gw}، T_a، T_{ge}، $h_{c,gw-a}$، $h_{r,gw-sky}$، $h_{r,gw-ge}$، M_g و c_g به ترتیب ضریب جذب شیشه، شدت تابش خورشید به شیشه غربی، مساحت شیشه، ضریب انتقال حرارت کلی بین آب و شیشه غربی، مساحت صفحه جاذب، دمای آب، دمای شیشه غربی، دمای محیط، دمای شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه غربی و محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه غربی و دمای مؤثر محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه غربی و شیشه شرقی، جرم شیشه و ظرفیت گرمایی شیشه می‌باشد.

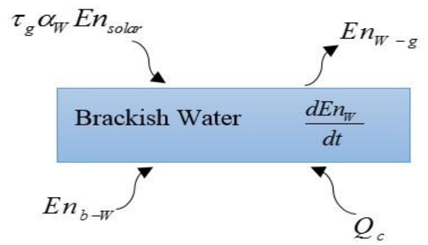
۲- ۲- ۲- موازنه انرژی برای شیشه شرقی. [۳ و ۴]



$$\begin{aligned}&\alpha_g G_{se} A_g + h_{W-ge} A_b (T_W - T_{ge})\\&+ h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) = h_{c,ge-a} A_g (T_{ge} - T_a)\\&+ h_{r,ge-sky} A_g (T_{ge} - T_{sky}) + M_g c_g \frac{dT_{ge}}{dt}\end{aligned} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) پارامترهای G_{se}، h_{W-ge}، $h_{c,ge-a}$، $h_{r,ge-sky}$ و T_{sky} به ترتیب شدت تابش خورشید به شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت کلی بین آب و شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه شرقی و محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه شرقی و دمای مؤثر آسمان است.

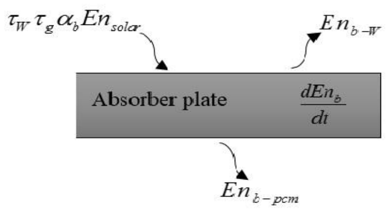
۲- ۲- ۳- موازنه انرژی آب درون حوضچه. [۳ و ۴]



$$\begin{aligned}&\tau_g \alpha_W G_s A_b + h_{c,b-W} A_b (T_b - T_W) + \dot{Q}_c =\\&h_{W-gw} A_b (T_W - T_{gw}) + h_{W-ge} A_b (T_W - T_{ge})\\&+ M_W c_W \frac{dT_W}{dt}\end{aligned} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) پارامترهای τ_g، α_W، G_s، $h_{c,b-W}$، Q_c، M_W و c_W به ترتیب ضریب عبور شیشه، ضریب جذب آب، میانگین شدت تابش خورشیدی ورودی به شیشه غربی و شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و آب، حرارت مفید اضافه‌شده از گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی، جرم آب و ظرفیت گرمایی ویژه آب می‌باشد.

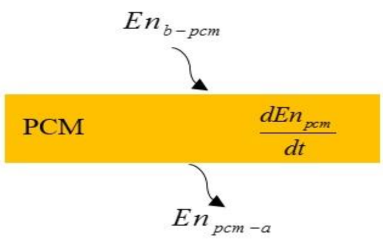
۲- ۲- ۴- موازنه انرژی صفحه جاذب. [۳ و ۴]



$$\begin{aligned}&\tau_g \tau_W \alpha_b G_s A_b = h_{c,b-W} A_b (T_b - T_W)\\&+ \frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) + M_b c_b \frac{dT_b}{dt}\end{aligned} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) پارامترهای τ_W، T_b، k_{PCM}، X_{PCM}، T_{PCM}، M_b و c_b به ترتیب ضریب عبور آب، دمای صفحه جاذب، هدایت‌پذیری ماده تغییر فاز دهنده، ضخامت ماده تغییر فاز دهنده، دمای ماده تغییر فاز دهنده، جرم صفحه جاذب و ظرفیت گرمایی ویژه صفحه جاذب می‌باشد.

۲- ۲- ۵- موازنه انرژی ماده تغییر فاز دهنده [۳ و ۴]



$$\begin{aligned}&\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) = \frac{k_{ins}}{X_{ins}} A_b (T_{PCM} - T_a)\\&+ M_{equ} \frac{dT_{PCM}}{dt}\end{aligned} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵) پارامترهای k_{ins} و X_{ins} به ترتیب هدایت‌پذیری حرارتی عایق و ضخامت ماده عایق می‌باشد.

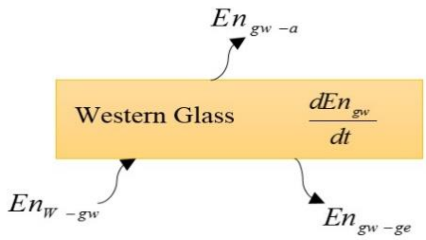
M_{equ} ظرفیت حرارتی معادل ماده تغییر فاز دهنده است که در فازهای مختلف از رابطه (۶) به دست می‌آید [۳]:

$$\begin{aligned}&M_{equ} = M_{PCM} C_{s,PCM} \quad , \quad T_{PCM} < T_m\\&M_{equ} = M_{PCM} L_{PCM} \quad , \quad T_m \le T_{PCM} \le T_m + \delta'\\&M_{equ} = M_{PCM} C_{L,PCM} \quad , \quad T_{PCM} > T_m + \delta'\end{aligned} \qquad (۶)$$

۲-۳- تحلیل انرژی آب‌شیرین‌کن در حالت تخلیه

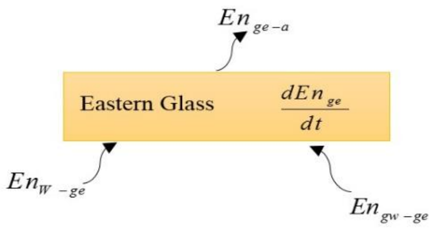
اکنون به موازنه انرژی برای اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی در حالت تخلیه یعنی زمانی که تابش خورشید وجود ندارد و آب‌شیرین‌کن حرارت خود را از ماده تغییر فاز دهنده تأمین می‌کند پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- موازنه انرژی برای شیشه غربی



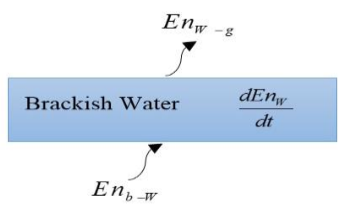
$$h_{W-gw}A_b(T_W-T_{gw})=h_{c,gw-a}A_g(T_{gw}-T_a)+h_{r,gw-sky}A_g(T_{gw}-T_{sky})+h_{r,gw-ge}A_g(T_{gw}-T_{ge})+M_g c_g\frac{dT_{gw}}{dt} \qquad (۷)$$

۲-۳-۲- موازنه انرژی برای شیشه شرقی



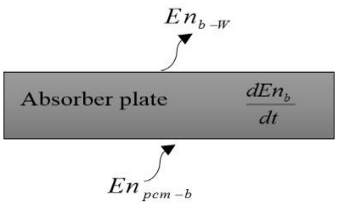
$$h_{W-ge}A_b(T_W-T_{ge})+h_{r,gw-ge}A_g(T_{gw}-T_{ge})=h_{c,ge-a}A_g(T_{ge}-T_a)+h_{r,ge-sky}A_g(T_{ge}-T_{sky})+M_g c_g\frac{dT_{ge}}{dt} \qquad (۸)$$

۲-۳-۳- موازنه انرژی آب درون حوضچه



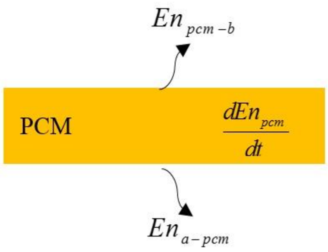
$$h_{c,b-W}A_b(T_b-T_W)=h_{W-gw}A_b(T_W-T_{gw})+h_{W-ge}A_b(T_W-T_{ge})+M_W c_W\frac{dT_W}{dt} \qquad (۹)$$

۲-۳-۴- موازنه انرژی صفحه جاذب



$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}}A_b(T_{PCM}-T_b)=h_{c,b-W}A_b(T_b-T_W)+M_b c_b\frac{dT_b}{dt} \qquad (۱۰)$$

۲-۳-۵- موازنه انرژی ماده تغییر فاز دهنده



$$\frac{M_{equ}}{\Delta t}=\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}}A_b(T_{PCM}-T_b)+\frac{k_{ins}}{X_{ins}}A_b(T_{PCM}-T_a) \quad . \quad T_m\le T_{PCM}\le T_m+\delta'$$

$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}}A_b(T_{PCM}-T_b)+\frac{k_{ins}}{X_{ins}}A_b(T_{PCM}-T_a)=M_{equ}\frac{dT_{PCM}}{dt} \qquad (۱۱)$$

با حل معادلات مذکور دمای اجزای مختلف سیستم به دست می‌آید. با استفاده از دماهای به‌دست‌آمده می‌توان گرمای نهان تبخیر آب تبخیر شده را توسط که در محاسبه جرم آب شیرین تولید شده لازم است از رابطه (۱۲) به دست آورد [۹].

$$h_{fg} = 2.4935 \times \left(10^6 - 947.79T_i + 0.13132T_i^{\,2} - 0.0047974T_i^{\,3}\right) \qquad T_i \le 70$$

(۱۲)

$$h_{fg} = 3.1615\left(10^6 - 761.6T_i\right) \qquad T_i \ge 70$$

T_i متوسط دماهای آب، شیشه شرقی و شیشه غربی می‌باشد که از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$T_i = \frac{T_{gw} + T_{ge} + T_W}{3} \tag{۱۳}$$

۲- ۴- تحلیل حرارتی و الکتریکی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

هدف از تحلیل حرارتی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی به دست آوردن روابطی برای محاسبه پارامترهایی همچون دمای سطح مدول فتوولتائیک، دمای خروجی و نرخ حرارت جذب‌شده توسط گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد. با نوشتن موازنه انرژی برای اجزای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل لایه سلول‌های فتوولتائیک، صفحه جاذب و جریان سیال داخل کانال می‌توان عباراتی برای دمای پارامترهای ذکرشده به دست آورد که این روابط در مرجع]۷[ذکر شده است. نرخ حرارت مفید جذب‌شده در گردآورنده فتوولتائیک حرارتی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_c = F_R bL[(\alpha\tau)_{eff} G_c - u_l(T_{f,in} - T_a)]$$

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{u_l bL}\left[1 - \exp\left(\frac{-F' u_l bL}{\dot{m}C_p}\right)\right]$$

(۱۴)

در رابطه (۱۴) پارامترهای F_R، b، L، $(\alpha\tau)_{eff}$، G_c، u_l، $T_{f,in}$، T_a و F' به ترتیب ضریب برداشت گرما، عرض گردآورنده، طول گردآورنده، ضریب جذب-انتقال مؤثر، شدت تابش خورشیدی به گردآورنده، ضریب اتلاف حرارت کلی گردآورنده، دمای آب ورودی به گردآورنده، دمای محیط و ضریب بازده گردآورنده نامیده می‌شوند که نحوه محاسبه هر یک به تفضیل در مرجع [۱۰] آورده شده است. تحلیل الکتریکی که در تحقیقات گذشته استفاده شده است دارای نقص‌هایی می‌باشد. اولاً در شدت تابشی خورشیدی پایین، راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک را برابر با راندمان الکتریکی در شرایط مرجع می‌دهد. ثانیاً جزئیات تغییرات پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدارباز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را بیان نمی‌کند. در تحقیق حاضر جهت محاسبه راندمان مدول فتوولتائیک از مدل چهار پارامتری جریان-ولتاژ استفاده می‌شود؛ مدل چهار پارامتری برای معرفی منحنی ($I - V$) سلول خورشیدی به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۱۰].

$$I = I_L - I_O\left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{a}\right) - 1\right] \tag{۱۵}$$

چهار پارامتر این مدل R_s، I_L، I_O و a به ترتیب مقاومت سری، جریان نوری، جریان اشباع معکوس و ضریب مطلوبیت می‌باشند. برای محاسبه چهار پارامتر موردنظر از روابط (۱۶) تا (۱۹) استفاده می‌شود [۱۰].

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \tag{۱۶}$$

$$I_{O,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp(V_{oc,ref}/a_{ref})} \tag{۱۷}$$

$$a_{ref} = \frac{2V_{mp,ref} - V_{oc,ref}}{\left(\frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref} - I_{mp,ref}}\right) + Ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \tag{۱۸}$$

$$R_{s,ref} = \frac{a_{ref} Ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right) + V_{oc,ref} - V_{mp,ref}}{I_{mp,ref}} \tag{۱۹}$$

در شرایط مرجع، مقادیر $I_{mp,ref}$، $V_{mp,ref}$، $I_{sc,ref}$ و $V_{oc,ref}$ توسط سازندگان مدول‌های فتوولتائیک ارائه می‌شوند. برای محاسبه ولتاژ و جریان و پارامترهای مدل در شرایط جدید (T_c, G_c)، از یکسری معادلات انتقال استفاده می‌شود که به‌صورت روابط (۲۰) تا (۲۷) آورده شده‌اند [۱۰].

$$R_s = R_{s,ref} \tag{۲۰}$$

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \tag{۲۱}$$

$$\frac{I_O}{I_{O,ref}}=\left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3\exp\left[\left(\frac{\varepsilon_s N_c}{a_{ref}}\right)\left(1-\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)\right] \quad (۲۲)$$

$$I_L=\frac{G}{G_{ref}}\left[I_{L,ref}+\alpha\left(T_c-T_{c,ref}\right)\right] \quad (۲۳)$$

$$\Delta T=T_c-T_{c,ref} \quad (۲۴)$$

$$\Delta I=\alpha\left(\frac{G}{G_{ref}}\right)\Delta T+\left(\frac{G}{G_{ref}}-1\right)I_{sc,ref} \quad (۲۵)$$

$$I_{new}=I_{ref}+\Delta I \quad (۲۶)$$

$$V_{new}=V_{ref}+\Delta V \quad (۲۷)$$

در این معادلات α, N_c, ε و β به ترتیب انرژی شکاف باند، تعداد سلول‌ها در مدول خورشیدی، ضرایب دمایی ولتاژ و جریان است. توان الکتریکی خروجی از مدول فتوولتائیک و راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک به ترتیب به‌صورت روابط (۲۸) و (۲۹) تعریف می‌شوند:

$$P_{el}=V_{mp}I_{mp} \quad (۲۸)$$

$$\eta_{el}=\frac{V_{mp}I_{mp}}{G_c A_c} \quad (۲۹)$$

۲- ۵- تابش خورشید بر سطح شیب‌دار

در معادلات بخش‌های قبل به شدت تابش خورشیدی (G) روی سطوح مختلف نیاز می‌باشد؛ لذا در این بخش به محاسبه شدت تابش خورشیدی پرداخته شده است. تابش کل برای هر سطح شیب‌دار (شیب = β) در هر راستا (برای راستای شرقی، جنوبی، غربی و شمالی) 90°، 0°، -90° و 180° در عرض جغرافیایی (φ) را می‌توان با کمک رابطه لیو و جردن [۱۱] محاسبه کرد:

$$G_t=G_N\cos\theta_i+G_dR_d+\rho R_r(G_b+G_d) \quad (۳۰)$$

که در آن G_d، G_b، G_N، R_d، R_r و θ_i به ترتیب تابش پراکنده بر سطح افقی، تابش مستقیم زمینی دریافت شده بر سطح زمین، تابش خورشیدی در سطح زمین، ضریب جریان تابش مستقیم تابش شده، بخش بازتابیده شده و زاویه تابش می‌باشند. همچنین ρ ضریب بازتابش زمین می‌باشد (در زمین معمولی برابر ۰/۲ است).

۲- ۶- راندمان انرژی

راندمان انرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی متصل به گردآورنده فتوولتائیک حرارتی به‌صورت نسبت انرژی مطلوب خروجی به انرژی خالص ورودی به سیستم تعریف می‌شود. راندمان انرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی متصل به گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برای دو حالت شارژ و تخلیه به ترتیب به‌صورت روابط (۳۱) و (۳۲) بیان می‌شوند. در رابطه (۳۱) ضریب C_f برای تبدیل انرژی الکتریکی به معادل حرارتی آن استفاده شده است. چون کیفیت انرژی حرارتی و الکتریکی یکسان نمی‌باشد.

$$\eta_{en}=\frac{h_{ev,ge}A_b(T_w-T_{ge})+h_{ev,gw}A_b(T_w-T_{gw})}{A_bG_s+NA_cG_c}+\frac{\dfrac{V_{mp}I_{mp}-\dfrac{\dot{m}_w\Delta P}{\eta_p\rho}}{C_f}}{A_bG_s+NA_cG_c} \quad (۳۱)$$

$$\eta_{en}=\frac{h_{ev,ge}A_b(T_w-T_{ge})+h_{ev,gw}A_b(T_w-T_{gw})}{\dot{Q}_{PCM,dis}} \quad (۳۲)$$

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- اعتبارسنجی

مجموعه روابط (۱) تا (۱۱) تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی را می‌دهد. هدف از حل این دستگاه یافتن دما اجزاء مختلف سیستم است. جهت اطمینان از درستی کد نوشته شده برای حل دستگاه معادلات مذکور نیاز به اعتبارسنجی آن با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. چون تحقیق جامعی که دقیقاً منطبق بر تحقیق حاضر باشد یافت نشد، لذا فرایند اعتبارسنجی در دو مرحله به شرح زیر صورت می‌گیرد:

اعتبارسنجی کد نوشته‌شده برای شدت تابش خورشیدی و گردآورنده

جدول ۱: پارامترهای جوی، عملکردی و طراحی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Table 1. Atmospheric, operating and design parameters of photovoltaic thermal collector

پارامتر گردآورنده فتوولتائیک	مقدار	پارامتر گردآورنده فتوولتائیک	مقدار
نوع مدول	Monocrystalline silicon (۹۰W)	شدت تابش خورشیدی در شرایط مرجع	G_{ref}=۱۰۰۰W/m^2
طول مدول فتوولتائیک	L = ۱/۳ m	دمای محیط در شرایط مرجع	$T_{a,ref}$ = ۲۹۸/۱۵K
عرض مدول فتوولتائیک	b = ۰/۵ m	دمای سطح مدول فتوولتائیک در شرایط مرجع	$T_{c,ref}$ =۲۹۸/۱۵K
جریان اتصال کوتاه در شرایط مرجع	$I_{sc,ref}$ =۵/۲۹ A	راندمان الکتریکی در شرایط مرجع	$\eta_{el,ref}$ = ۰/۱
ولتاژ مداrباز در شرایط مرجع	$V_{oc,ref}$ = ۲۱ V	ضریب دمایی جریان	A/ºC=۲/۰۶m α
جریان در نقطه توان ماکزیمم برای شرایط مرجع	$I_{mp,ref}$ = ۴/۲۹ A	ولتاژ در نقطه توان ماکزیمم برای شرایط مرجع	$V_{mp,ref}$ = ۱۸/۳ V
ضخامت صفحه جاذب	L$_p$ = ۰/۰۰۲ m	قابلیت هدایت صفحه جاذب	K_p = ۴۰۰ W/m.K

جدول ۲: پارامترهای عملکردی و طراحی آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه

Table 2. Design parameters of the basin type double slope solar still

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مساحت حوضچه	A_b = ۲ m^2	ضریب هدایت عایق	K_{ins} = ۰/۰۳۵W/m.K
زاویه پوشش شیشه‌ای	θ = ۱۵°	ارتفاع حوضچه	H = ۰/۳ m
مساحت پوشش شیشه‌ای	A_g = ۱/۰۳۵ m^2	ضخامت صفحه جاذب	L_b= ۰/۰۰۲ m
جرم شیشه	M_g = ۹/۹۳kg	ضخامت عایق	L_{ins}= ۰/۰۰۵ m
جرم صفحه جاذب	M_b = ۱۰/۸ kg	ضریب هدایت صفحه جاذب	K_b = ۲۷۳ W/m.K

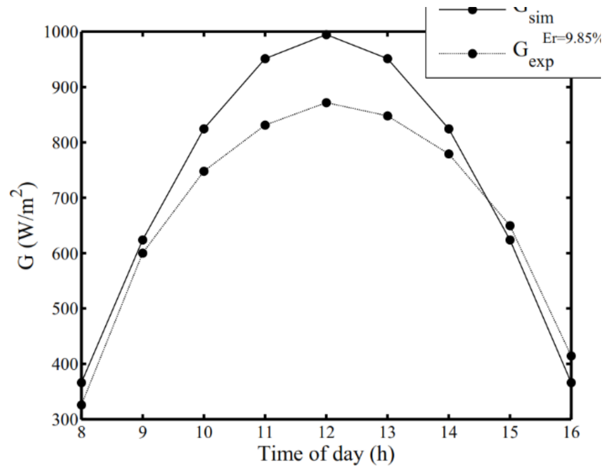
فتوولتائیک حرارتی توسط مقایسه با داده‌های دستگاه آزمایش گردآورنده فتوولتائیک حرارتی مستقر در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان.

اعتبارسنجی کد نوشته‌شده برای آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای دوشیبه با داده‌های آزمایشگاهی تایواری و همکاران [۴].

یک نمونه آزمایشگاهی از گردآورنده فتوولتائیک حرارتی که شامل یک مدول سیلیکونی ۹۰ وات متصل به یک گردآورنده حرارتی می‌باشد در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان طراحی و ساخته شده است. در شکل ۲ نمایی از دستگاه مذکور نشان داده شده است. پارامترهای مختلف جوی و عملکردی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای آب ورودی و خروجی، دمای سلول خورشیدی، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، جریان در نقطه توان ماکزیمم و ولتاژ در نقطه توان ماکزیمم در روز ۲۴ آبان ۱۳۹۴ تحت شرایطی که گردآورنده رو به سمت جنوب با زاویه ۳۰ درجه قرار داشته است اندازه‌گیری

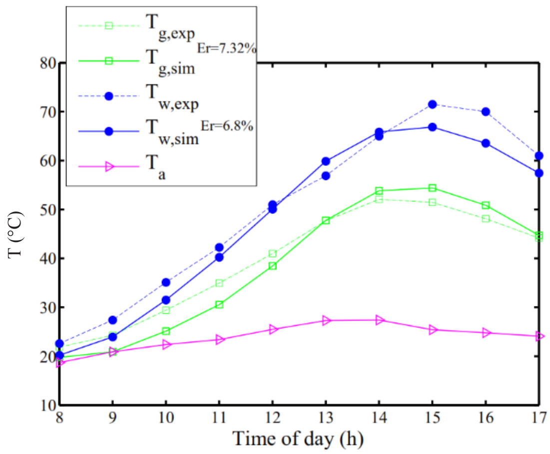
شکل ۲: تصویری از دستگاه آزمایش فتوولتائیک حرارتی مستقر در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان

Fig. 2. Picture of the photovoltaic thermal collector setup at Department of Mechanical Engineering in University of Sistan and Baluchestan



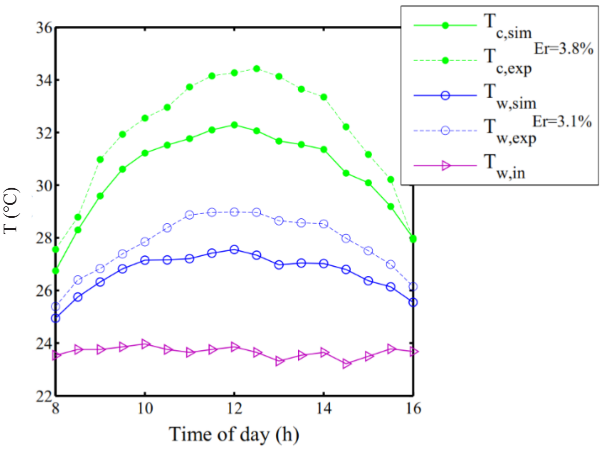
شکل ۳: داده‌های شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی و تجربی برحسب زمان آزمایش

Fig. 3. Experimental and simulated data of solar radiation intensity versus the experiment time



شکل ۴: مقادیر تجربی و شبیه‌سازی دماهای مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه

Fig. 4. Experimental and simulated values of the various temperatures of the basin type double slope solar still



شکل ۵: دماهای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برحسب زمان آزمایش

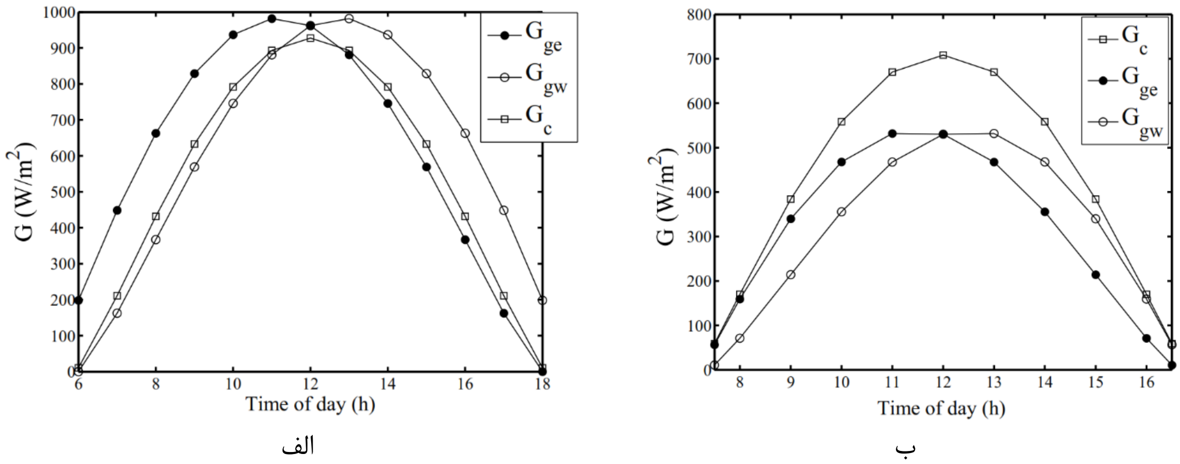
Fig. 5. Different temperatures of the photovoltaic thermal collector versus the experiment time

شده است. از آن جایی‌که در تحقیق حاضر شدت تابش خورشیدی برای روز زمستانی و تابستانی توسط رابطه لیو و جردن [۱۱] محاسبه می‌شود؛ لذا علاوه بر پارامترهای حرارتی و الکتریکی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی، مقادیر شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی با داده‌های تجربی دستگاه آزمایش دانشگاه سیستان و بلوچستان مقایسه شده است. در جدول ۱ پارامترهای جوی، عملکردی و طراحی گردآورنده فتوولتائیک‌حرارتی و در جدول ۲ مشخصات آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای آورده شده است.

در شکل ۳ داده‌های شدت تابش خورشیدی برحسب زمان آزمایش برای دو حالت شبیه‌سازی و تجربی نشان داده شده است.

در شکل ۳ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی شدت تابش خورشیدی شده است. خطای نسبی شدت تابش مذکور برابر با ۹/۸ درصد می‌باشد.

در شکل ۴ مقادیر تجربی و شبیه‌سازی دماهای مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی شامل دمای پوشش شیشه‌ای، دمای آب و دمای محیط برحسب زمان آزمایش و در شکل ۵ دماهای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل دمای مدول فتوولتائیک، دمای آب خروجی و دمای آب ورودی



شکل ۶: تغییرات روزانه شدت تابش خورشیدی در روز الف) ۱۵ تیر، ب)۲ دی

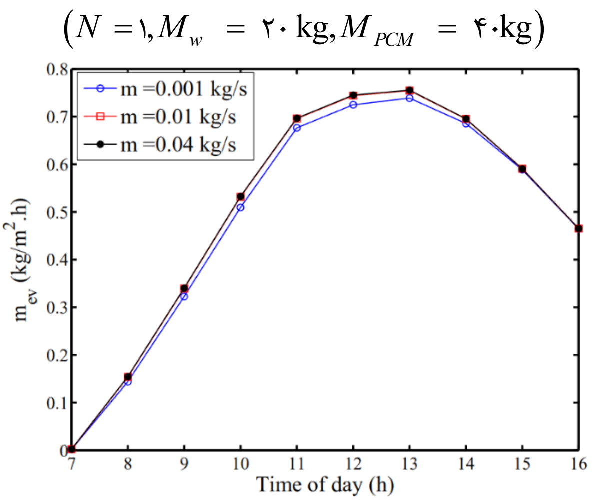
Fig. 6. Daily changes in solar radiation on (a) 6 July and (b) 23 December

برحسب زمان آزمایش ترسیم شده است.

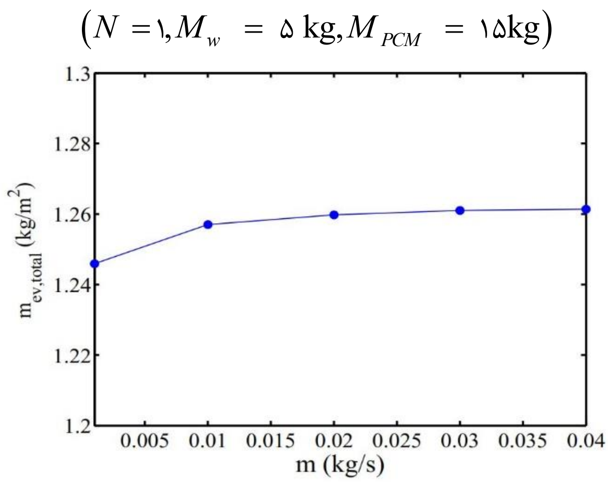
مطابق شکل ۴ مقایسه‌ای بین مقادیر تجربی مربوط به تحقیق تایواری و دیویدی [۴] و مقادیر شبیه‌سازی تحقیق حاضر برای دماهای آب‌شور درون حوضچه و پوشش شیشه‌ای انجام شده است. خطای نسبی متوسط دماهای مذکور به ترتیب برابر با ٪۶/۸ و ٪۷/۳۲ می‌باشد. با توجه به شکل ۵ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی دماهای مدول فتوولتائیک و دمای آب خروجی انجام شده است. خطای نسبی متوسط دماهای مذکور به ترتیب برابر ٪۳/۸ و ٪۳/۱ می‌باشد. به دلیل این‌که در ساعات میانی روز مقدار شدت تابش خورشیدی زیاد است و بین مقادیر شبیه‌سازی شده و تجربی شدت تابش در این بازه اختلاف بیشتری وجود دارد، لذا افزایش خطایی بیشتری بین دماهای شبیه‌سازی و تجربی در این محدوده وجود دارد.

۳- ۲- مطالعات پارامتری بر روی میزان تولید آب شیرین

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی و عملکردی شامل دبی جرمی آب‌شور، تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی و جرم آب درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین سیستم پرداخته می‌شود. محدوده تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده برای روز ۱۵ تیر از ۳۰ kg تا ۴۰ kg و برای روز ۲ دی از ۵ kg تا ۱۵ kg در نظر گرفته شده است. به این دلیل که برای روز زمستان دمای محیط به‌طور متوسط ۲۵ ^{o}C و شدت تابش خورشیدی در حدود ٪۵۰ کمتر از روز تابستانی است. از طرفی هدف استفاده از ماده تغییر فاز دهنده رسیدن به دمای نقطه ذوب (۵۶ ^{o}C) برای ذخیره انرژی بیشتر می‌باشد؛ لذا این بازه از جرم برای ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. برای روز زمستانی مقادیر کمتر از ۵ kg با توجه به این‌که مساحت سطح جاذب ۲ m^2 می‌باشد و ماده تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب استفاده می‌شود، منجر به ضخامت بسیار ناچیز برای ماده تغییر فاز دهنده می‌گردد. همچنین افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده بیشتر از مقادیر گفته‌شده، کاهش زیاد دمای ماده تغییر فاز دهنده را به دنبال دارد و به تغییر فاز نمی‌رسد که مطلوب نیست؛ لذا حد بالای آن ۱۵ kg در نظر گرفته شده است. در روز ۱۵ تیر با توجه به بالا بودن شدت تابش خورشیدی و دمای محیط مقادیر کمتر از ۳۰ کیلوگرم، ماده تغییر فاز دهنده را از حالت تغییر فاز خارج می‌کند و دمای آن بیش از (۵۶ ^{o}C) می‌شود که نامطلوب می‌باشد؛ لذا حد پایین آن kg ۳۰ در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات جرم آب‌شور درون حوضچه با توجه به میزان تولید آب شیرین در نظر گرفته شده است. در تابستان برای حوضچه ۲ m^2 در حدود ۱۳ kg آب شیرین تولید می‌شود لذا کمترین مقدار آب‌شور ۲۰ kg در نظر گرفته شده است و برای زمستان در حدود ۲/۶ kg آب شیرین تولید می‌شود، به همین دلیل مقدار ۵ kg برای آب‌شور درون حوضچه در نظر گرفته شده است. ازآنجایی‌که حوضچه دارای یک ظرفیت محدود می‌باشد و از طرفی افزایش جرم آب‌شور باعث سنگینی دستگاه موردنظر می‌شود، مقادیر ماکزیمم آب‌شور درون حوضچه برای تابستان مقدار ۵۰ kg و برای زمستان ۲۰ kg در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تغییرات روزانه شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی‌شده برای روزهای ۱۵ تیر و ۲ دی رسم شده است.



الف



ب

شکل ۷: تأثیر تغییرات دبی جرمی آب‌شور بر میزان تولید آب شیرین سیستم در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

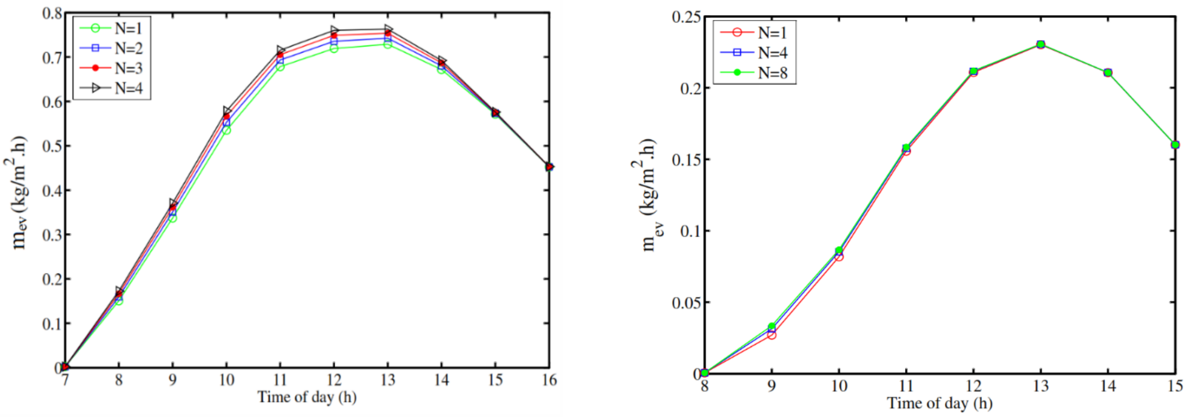
Fig. 7. Effects of changes in mass flow rate of the saline water on the fresh water production on (a) 6 July and (b) 23 December

همان‌طور که در شکل ۶–الف مشاهده می‌شود، شدت تابش خورشیدی برای ۱۵ تیر نسبت به ۲ دی دارای بازه روزانه طولانی‌تر و همچنین مقادیر شدت تابش بیشتری می‌باشد؛ به‌طوری‌که درمجموع حدود ۵۰٪ کاهش شدت تابش خورشیدی برای روز ۲ دی نسبت به ۱۵ تیر مشاهده می‌شود. در شکل ۷ تأثیر تغییرات دبی جرمی آب‌شور بر میزان تولید آب شیرین سیستم در روزهای ۱۵ تیر و ۲ دی مشاهده می‌شود. مقادیر ثابت در ترسیم نمودار مربوطه در بالای آن داده شده است.

افزایش دبی جرمی آب‌شور باعث تبدیل رژیم جریان آرام به مغشوش در گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌شود. لذا دمای آب‌شور درون حوضچه و متعاقب آن نرخ انتقال حرارت تبخیری درون محفظه آب‌شیرین‌کن زیاد می‌شود که این موضوع باعث افزایش تولید آب شیرین می‌گردد. ولی افزایش دمای آب شور درون حوضچه به‌واسطه افزایش دبی جرمی آب‌شور در یک سیستم از یک حد به بعد مطلوب نبوده و باعث اتلافات حرارت از سیستم می‌گردد و این موضوع باعث می‌شود که مقدار تولید آب شیرین در مقادیر جرمی بالا به یک عدد ثابت میل کند. در شکل ۷–الف تأثیر تغییرات دبی جرمی آب‌شور بر میزان تولید آب شیرین به‌صورت روزانه برای مدت‌زمانی که شدت تابش خورشیدی وجود دارد برای ۱۵ تیرنشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که دبی جرمی آب شور از ۰/۰۰۱ kg/s به ۰/۰۱ kg/s تغییر می‌کند میزان تولید آب شیرین در حدود ۱۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر دبی جرمی همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تأثیر بسیار ناچیزی در تولید آب شیرین دارد و می‌توان آن را نادیده گرفت. در زمستان با توجه به این که دمای محیط و شدت تابش خورشیدی افت چشم‌گیری پیدا می‌کند، میزان تولید آب شیرین در کل روز نسبت به تابستان با کاهش قابل‌توجهی می‌شود و به همین دلیل تغییرات دبی جرمی تأثیر چندانی در تولید آب شیرین ندارد. لذا در شکل ۷–ب تأثیر تغییرات دبی جرمی بر میزان کلی تولید آب شیرین بررسی شده است که از دبی جرمی ۰/۰۱ kg/s به بعد تولید آب شیرین تقریباً ثابت است. شکل ۸ تأثیر تغییرات تعداد گردآورنده فتوولتائیک حرارتی بر میزان تولید آب شیرین را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد. افزایش تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی باعث افزایش دمای آب‌شور درون حوضچه و به‌تبع آن افزایش نرخ انتقال حرارت تبخیری درون محفظه آب‌شیرین‌کن و به دنبال آن افزایش مقدار تولید آب شیرین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸–الف مشاهده می‌شود در تابستان بیشترین مقدار تولید آب با افزایش تعداد گردآورنده‌ها از ۱ عدد به ۲ عدد رخ می‌دهد به‌طوری که در حدود ۷ درصد به میزان تولید آب افزوده می‌شود و با افزایش بیشتر تعداد گردآورنده میزان تولید آب شیرین به مقدار ثابتی میل می‌کند. با توجه به شکل ۸–ب

$(\dot{m}=۰/۰۱\text{kg/s}, M_w=۲۰\text{ kg}, M_{PCM}=۴۰\text{kg})$ $(\dot{m}=۰/۰۱\text{kg/s}, M_w=۵\text{ kg}, M_{PCM}=۱۵\text{kg})$

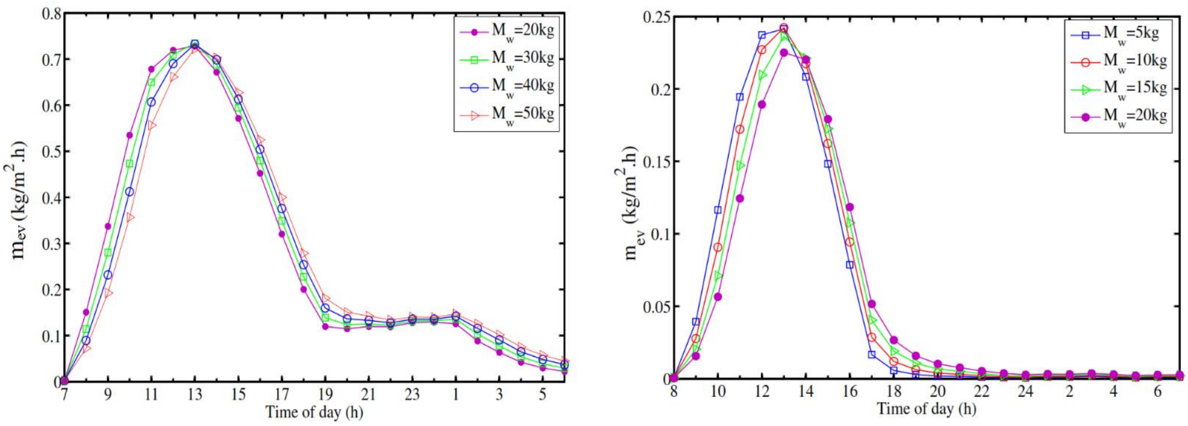


الف ب

شکل ۸: تأثیر تغییرات تعداد گردآورنده فتوولتائیک حرارتی بر میزان تولید آب شیرین در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 8. Effects of the number of photovoltaic thermal collectors on the fresh water production in (a) 6 July and (b) 23 December

$(\dot{m}=۰/۰۱\text{kg/s}, M_{PCM}=۴۰\text{kg}, N=۲)$ $(\dot{m}=۰/۰۱\text{kg/s}, M_{PCM}=۱۵\text{kg}, N=۱)$



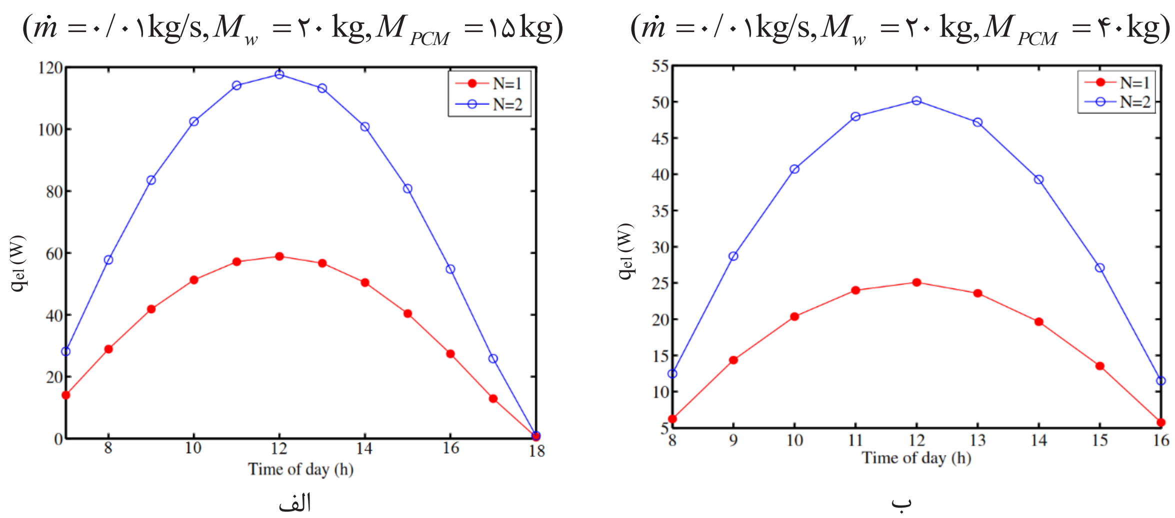
الف ب

شکل ۹: تغییرات جرم آب‌شور درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 9. Changes in the saline water mass into the basin on fresh water production on (a) 6 July and (b) 23 December

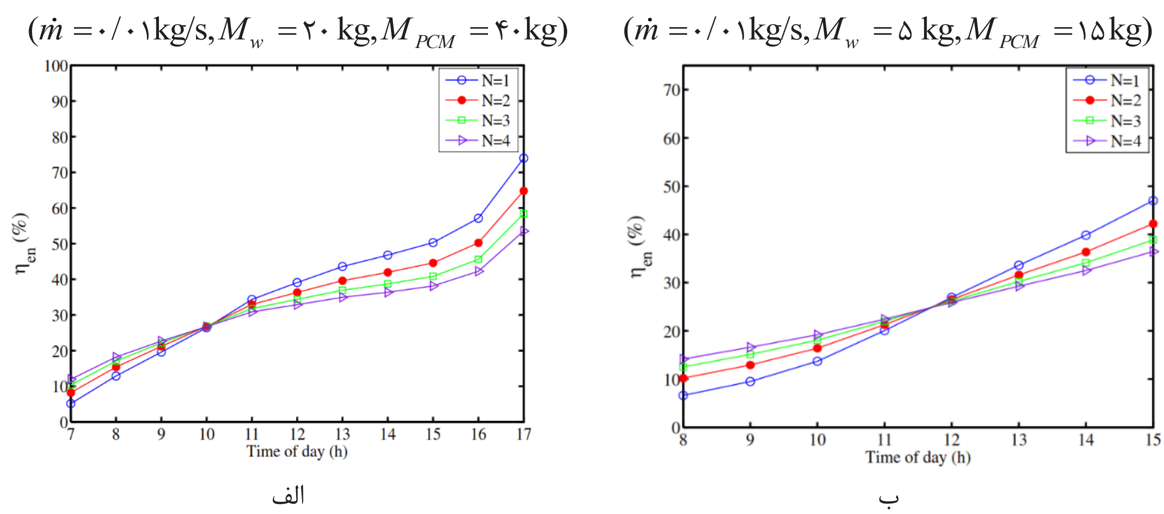
در زمستان به دلیل این که شدت تابش خورشیدی بر روی گردآورنده نسبت به تابستان کاهش فراوانی دارد و همچنین میزان تولید آب شیرین سیستم کم می‌باشد تأثیر افزایش تعداد گردآورنده‌ها بر تولید آب بسیار ناچیز است و می‌توان گفت تعداد گردآورنده مناسب برای سیستم در زمستان همان یک گردآورنده می‌باشد. در شکل ۹ با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب دبی جرمی آب‌شور و تعداد گردآورنده به بررسی تغییرات جرم آب‌شور درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین در دو روز ۱۵ تیر و ۲ دی پرداخته‌شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود افزایش جرم آب درون حوضچه باعث کاهش میزان تولید آب در روز و افزایش مقدار آن در مابقی ساعات شبانه‌روز می‌شود به‌طوری‌که در ۱۵ تیر با افزایش جرم آب از ۲۰ kg به ۳۰ kg میزان تولید آب در روز در حدود ٪ ۴/۸۲ کاهش می‌یابد ولی در شب در حدود ٪ ۷/۴۳ افزایش می‌یابد و به‌طورکلی میزان تولید آب شیرین در شبانه‌روز با افزایش جرم آب‌شور درون حوضچه افزایش می‌یابد. افزایش بیش‌ازحد آب‌شور درون حوضچه هم باعث سنگین شدن سیستم موردنظر



شکل ۱۰: مقدار توان الکتریکی خروجی از سیستم برای روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 10. Output electrical power of the system on (a) 6 July and (b) 23 December

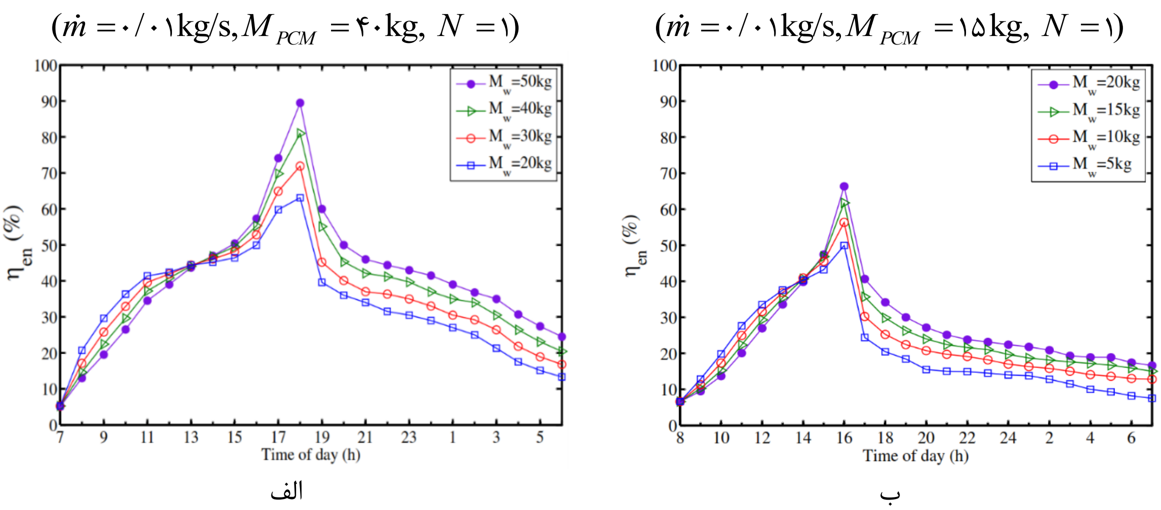


شکل ۱۱: تغییرات راندمان انرژی روزانه سیستم را برحسب تغییرات تعداد گردآورنده برای روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 11. Changes in the daily energy efficiency of the system with changes in numbers of photovoltaic thermal collectors for (a) 6 July and (b) 23 December

می‌شود و هم اینکه درنهایت مقدار تولید آب شیرین به یک عدد ثابت میل می‌کند. ازاین‌رو جرم مطلوب برای ۱۵ تیر kg۵۰ و برای زمستان kg۲۰ در نظر گرفته‌شده است. با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب دبی جرمی آب‌شور، تعداد گردآورنده و جرم آب‌شور درون حوضچه مقدار تولید آب شیرین سیستم در تابستان برابر با ۶/۵ kg/m۲ و در زمستان برابر ۱/۳ kg/m۲ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که مقدار تولید آب در زمستان با توجه به شرایط محیطی کاهش چشم‌گیری نسبت به تابستان دارد. شکل ۱۰ مقدار توان الکتریکی خروجی از سیستم را برای ۲ روز ۱۵ تیر و ۲ دی نشان می‌دهد.q_{el}

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در ساعات اولیه و انتهایی روز به دلیل پایین بودن شدت تابش خورشیدی، توان الکتریکی خالص خروجی نسبت به سایر ساعات روز کمتر می‌باشد. در حوالی ظهر با توجه به بالا بودن شدت تابش خورشیدی می‌توان انتظار داشت که بیشترین توان الکتریکی خالص خروجی در این ساعات رخ می‌دهد. در ۲ دی به دلیل کاهش شدت تابش نسبت به ۱۵ تیر توان الکتریکی خالص خروجی در این روز بیش از



شکل ۱۲: تغییرات روزانه راندمان انرژی برحسب جرم آب‌شور درون حوضچه برای روز الف)۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 12. Daily changes of energy efficiency in terms of the saline water mass in the basin for (a) 6 July and (b) 23 December

۱۰۰٪ کاهش نسبت به تابستان را دارا می‌باشد.

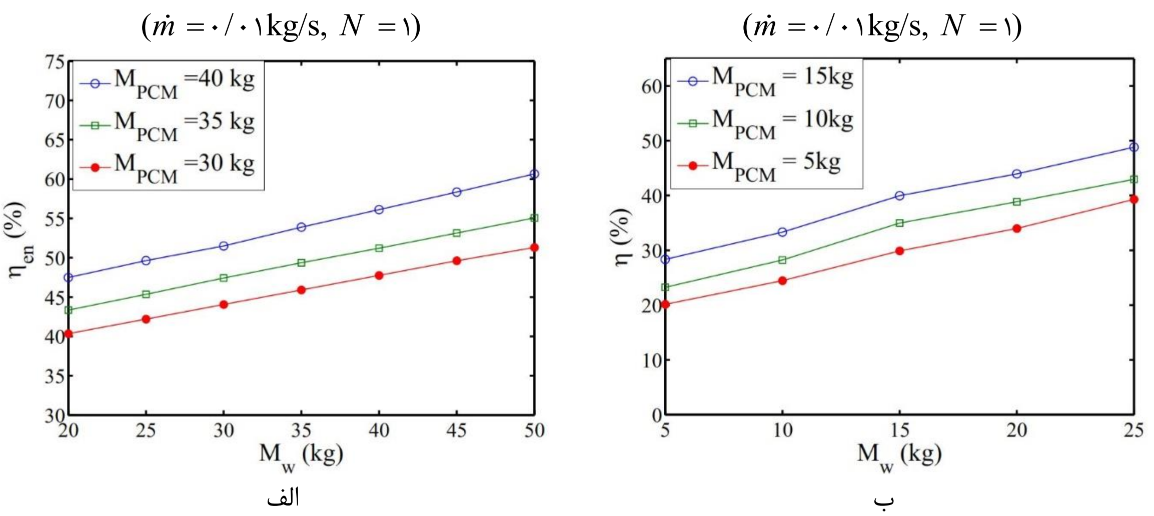
۳- ۳- مطالعات پارامتری از دیدگاه راندمان انرژی

در این بخش به بررسی تغییرات پارامترهای طراحی و عملکردی بر راندمان انرژی روزانه سیستم پرداخته می‌شود. پارامترهای طراحی و عملکردی موردمطالعه شامل دبی خروجی آب‌شور، تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی، جرم آب‌شور درون حوضچه و جرم ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. شکل ۱۱ تغییرات راندمان انرژی روزانه سیستم را برحسب تغییرات تعداد گردآورنده نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱ با افزایش تعداد گردآورنده میزان راندمان انرژی در ابتدای روز افزایش پیدا می‌کند و از ساعاتی به بعد با کاهش مواجه می‌شود زیرا در ابتدای روز شدت تابش خورشیدی بر روی گردآورنده‌ها و همچنین دمای آب درون حوضچه کم می‌باشد. در این حالت افزایش در تعداد گردآورنده منجر به افزایش قابل‌ملاحظه دمای آب درون حوضچه و تولید آب شیرین می‌گردد درنتیجه میزان راندمان انرژی افزایش می‌یابد. باگذشت زمان شدت تابش خورشیدی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از طرفی آب در دمای بالایی می‌باشد و افزایش تعداد گردآورنده‌ها نقش چندانی در ازدیاد دمای آب ندارد که این موضوع منجر به کاهش راندمان انرژی می‌شود. شکل ۱۲ تغییرات روزانه راندمان انرژی برحسب جرم آب‌شور درون حوضچه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، در روز با افزایش ارتفاع آب‌شور درون حوضچه ضریب عبور آب کاهش می‌یابد. کاهش ضریب عبور آب باعث کاهش تابش خورشیدی جذب‌شده توسط صفحه جاذب می‌شود و همچنین افزایش ارتفاع آب‌شور درون حوضچه باعث می‌شود آب با لایه ضخیم‌تر دیرتر تبخیر شود و درنتیجه نرخ انتقال حرارت تبخیری در سیستم کاهش می‌یابد. درمجموع اثر توأم این دو موضوع کاهش راندمان انرژی سیستم را به دنبال دارد؛ اما در شب با توجه به این‌که ماده تغییر فاز دهنده تأمین‌کننده انرژی است و گرمای تولیدشده نیازی به عبور آب ندارد، دمای آب در انتهای روز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به دلیل بالا بودن ظرفیت گرمایی آب، می‌توان گفت که آب مانند یک ماده تغییر فاز دهنده حرارت را در خود نگه می‌دارد و این امر موجب افزایش راندمان سیستم می‌شود و همچنین مقدار جهشی که در راندمان انرژی در انتهای روز مشاهده می‌شود. به این دلیل است که مقیاس سنجش راندمان انرژی تغییر می‌کند و انرژی ورودی به سیستم از آن زمان به بعد توسط ماده تغییر فاز دهنده تأمین می‌شود. شکل ۱۳ راندمان انرژی متوسط روزانه را برحسب تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده و جرم آب نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۳ متوسط راندمان انرژی در شبانه‌روز با افزایش جرم آب افزایش می‌یابد؛ همچنین در این شکل مشاهده می‌شود افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده نیز باعث افزایش متوسط راندمان انرژی می‌شود. در شکل ۱۳ روند تغییرات راندمان انرژی برای ۱۵ تیر و ۲ دی نشان داده شده است که در ۲ دی راندمان انرژی نسبت به ۱۵ تیر به میزان ۳۷/۵٪ کمتر است.



شکل ۱۳: راندمان انرژی متوسط روزانه را برحسب تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده و جرم آب برای روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 13. Average daily energy efficiency with the changes of PCM mass and saline water mass for (a) 6 July and (b) 23 December

۳- ۴- تحلیل اقتصادی

هدف از تحلیل اقتصادی، محاسبه هزینه یک لیتر آب تولید شده می‌باشد. در این تحقیق از تحلیل اقتصادی فت و همکاران [۱۲] استفاده شده است. ازجمله این پارامترهای مؤثر بر هزینه تولید آب شیرین در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی می‌توان به ضریب بازگشت سرمایه، ضریب نزول سرمایه، هزینه ثابت سالیانه، ارزش اسقاطی، ارزش اسقاطی سالیانه، هزینه نگه‌داری و تعمیرات سالیانه و هزینه سالیانه به ازای مترمربع اشاره کرد که به ترتیب توسط روابط (۳۳) تا (۳۹) به دست آورده می‌شوند.

$$CRF = \frac{i\,(۱+i)^n}{(۱+i)^n - ۱} \quad (۳۳)$$

$$SFF = \frac{i}{(۱+i)^n - ۱} \quad (۳۴)$$

$$AFC = CRF\ (P) \quad (۳۵)$$

$$S = 0.1\ (P) \quad (۳۶)$$

$$ASC = SFF\ (S) \quad (۳۷)$$

$$AMC = 0.15\ (AFC) \quad (۳۸)$$

$$TAC = AFC - ASC + AMC \quad (۳۹)$$

در روابط (۳۳) تا (۳۵)، n، i و p به ترتیب طول عمر دستگاه، نرخ تنزیل و هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد. در تحلیل اقتصادی فت و همکارانش [۱۲] به میزان تولید آب شیرین در یک سال نیاز می‌باشد که از حاصل‌ضرب تولید روزانه در ۳۶۵ روز سال به دست می‌آید. ازآنجایی‌که در تحقیق حاضر به بررسی میزان تولید آب شیرین در یک روز گرم تابستانی (۱۴ تیر) و یک روز سرد زمستانی (۲ دی) پرداخته شد و آب شیرین در این دو روز از سال به ترتیب ۶/۵ kg/s و ۱/۳ kg/s به دست آورده شد لذا در محاسبات اقتصادی از میانگین این دو مقدار برای برآورد تولید سالیانه استفاده گردید.

هزینه تمام‌شده دستگاه شامل تجهیزات، جوشکاری و نیروی انسانی می‌باشد که در جدول ۳ قیمت هر یک از اجزا و قیمت نهایی برآورد شده نشان داده شده است.

به‌منظور مقایسه اقتصادی تحقیق حاضر با سایر پروژه‌ها، قیمت تمام‌شده دستگاه با توجه به نرخ دلار (۴۲۰۰ تومان) در حدود ۳۳۷ دلار تخمین زده شده است. در جدول ۴ محاسبات اقتصادی انجام‌شده مربوط به تحقیق

جدول ۳: قیمت اجزای تشکیل دهنده سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Table 3. Price of components for solar still system with photovoltaic thermal collector

اجزا	مقدار	قیمت واحد (تومان)	قیمت کل (تومان)
شیشه باضخامت ۴ میلی‌متر	۳ m^2	۸/۰۰۰	۲۴/۰۰۰
گردآورنده فتوولتائیک حرارتی	۱	۸۰۰/۰۰۰	۸۰۰/۰۰۰
ماده تغییر فاز دهنده (واکس پارافین)	۴۰ kg	۳/۰۰۰	۱۲/۰۰۰
ورق فولادی گالوانیزه	۴ m^2	۱۲/۵۰۰	۵۰/۰۰۰
پمپ آب جریان مستقیم	۱	۲۰۰/۰۰۰	۲۰۰/۰۰۰
لوله گالوانیزه	۴ m	۱۲/۰۰۰	۴۸/۰۰۰
نیروی انسانی	-	-	۱۵۰/۰۰۰
چسب آکواریوم	۲	۱۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰
عایق	۴ m^2	۲/۰۰۰	۶/۰۰۰
قیمت کل	-	-	۱/۴۱۸/۰۰۰

حاضر، تحقیق فائق و همکاران[۱۳] و جعفری‌مصلح و همکاران [۱۴] آورده شده است.

هزینه تمام‌شده مطابق با تحلیل اقتصادی به ازای واحد سطح برای مطالعه حاضر ۰/۰۳۱۴ دلار برای هر لیتر آب شیرین محاسبه شد و همچنین هزینه آب شیرین تولیدشده مطابق با داده‌های ارائه‌شده برای تحقیق فائق و همکاران [۱۳] و جعفری‌مصلح و همکاران [۱۴] به ترتیب ۰/۰۲۱۲ و ۰/۰۴۷۸ دلار برای هر لیتر می‌باشد. با توجه به نرخ دلار (۴۲۰۰ تومان) هزینه آب شیرین تولیدشده برای مطالعه حاضر در حدود ۱۳۱ تومان می‌باشد که می‌توان گفت با توجه به اینکه قیمت یک آب‌معدنی ۱ لیتری در ایران در حدود ۱۰۰۰ تومان است، دستگاه آب‌شیرین‌کن مربوطه صرفه اقتصادی دارد. برای مساحت سطح ۲ m^2 تولید آب شیرین روزانه برابر با ۷/۸ l می‌باشد. حال اگر قیمت آب شیرین را حداقل ۲۰۰ تومان در نظر بگیریم در سال که ۲۸۴۷ لیتر آب شیرین تولید می‌شود در حدود ۵۶۹۴۰۰ تومان کاهش هزینه وجود خواهد داشت. اگر مقدار هزینه انجام‌شده را بر ۵۶۹۴۰۰ تقسیم کنیم تقریباً بعد از ۲/۵ سال هزینه انجام‌شده جبران می‌شود. بعد از محاسبه اقتصادی انجام‌شده ذکر این نکته الزامی است که سیستم آب‌شیرین‌کن دارای تولید انرژی الکتریسیته می‌باشد که می‌توان از برق تولیدی آن استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی متصل به آن در توافق خوبی با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته می‌باشد.

با بررسی‌های انجام‌شده برای دو روز ۱۵ تیر و ۲ دی در شهر زاهدان، میزان تولید کل آب شیرین روزانه و توان الکتریکی کل خالص خروجی روزانه سیستم به ترتیب برابر با ۶/۵ kg/m^2 ،۱/۳ kg/m^2، ۴۷۰ $W.h/m^2$ و ۱۶۰ $W.h/m^2$ می‌باشد که توانایی پتانسیل سیستم در تأمین آب شیرین و برق را برای مصارف خانگی نشان می‌دهد.

مقادیر به‌دست‌آمده برای تولید آب شیرین و توان الکتریکی در ۲ دی نشان می‌دهد که سیستم در زمستان دارای عملکرد چندان مناسبی نمی‌باشد و بیشترین بازده را فصولی که شدت تابش خورشیدی و دمای محیط مناسب باشد، دارد.

تحلیل اقتصادی انجام‌شده و مقایسه با تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که سیستم موردمطالعه ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشد و همچنین علاوه بر تولید آب، انرژی الکتریسیته نیز تولید می‌کند.

با افزایش جرم آب‌شور درون حوضچه راندمان انرژی سیستم به‌صورت روزانه در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد اما درمجموع به‌صورت متوسط روزانه راندمان اکسرژی و انرژی افزایش می‌یابد.

جدول ۴: تحلیل اقتصادی مطالعه حاضر و مقایسه با سایر سیستم‌های آب‌شیرین‌کن

Table 4. Economic analysis of the present study and comparison with other solar still systems

پارامترهای اقتصادی	واحد	فائق و همکاران[۱۳]	جعفری‌مصلح و همکاران[۱۴]	مطالعه حاضر
هزینه سرمایه‌گذاری (p)	$	۲۰۶	۵۶۸	۳۳۷
ارزش اسقاطی (۱۰ درصد سرمایه اولیه) (S)	$	۲۰/۶	۵۶/۸	۳۳/۷
طول عمر دستگاه (n)	years	۲۰	۲۰	۲۰
نرخ تنزیل (i)	(٪)	۱۰	۱۰	۱۰
ضریب بازگشت سرمایه	-	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷
ضریب نزول سرمایه	-	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵
هزینه ثابت سالیانه	$	۲۴/۱۰	۶۶/۷۲	۳۹/۴۲
هزینه اسقاطی سالیانه	-	۰/۳۵۰	۰/۹۹۲	۰/۵۸۹
هزینه نگه‌داری و تعمیرات سالیانه (۱۵ درصد هزینه ثابت سالیانه)	$	۳/۶۱	۱۰/۰۱	۵/۹۱
هزینه سالیانه به ازای مترمربع (هزینه ثابت سالیانه + هزینه تعمیر و نگه‌داری – هزینه اسقاطی سالیانه)	$	۲۷/۳۶	۷۵/۷۳	۴۴/۷۴
تولید روزانه آب شیرین	l/m^2	۳/۵۲	۴/۰۳	۳/۹
تولید سالیانه (تولید روزانه × ۳۶۵)	l/m^2	۱۲۸۸/۱۵	۱۵۸۵/۷	۱۴۲۳/۵
انرژی مفید سالیانه به ازای واحد سطح (تولید سالیانه × حرارت نهان بخارآب) (حرارت نهان بخارآب = ۰/۶۵ kW.h/L)	$kW.h/m^2$	۸۳۷/۳	۱۰۳۰/۷	۹۲۵/۲
هزینه سالیانه آب تقطیرشده به ازای هر لیتر به ازای هر مترمربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر تولید سالیانه)	$	۰/۰۱۸۷	۰/۰۴۲۱	۰/۰۲۷۶
هزینه سالیانه آب تقطیرشده به ازای هر کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر انرژی مفید سالیانه)	$	۰/۰۲۸۷	۰/۰۶۴۷	۰/۰۴۲۶
هزینه تمام‌شده به ازای هر لیتر آب شیرین	$/l	۰/۰۲۱۲	۰/۰۴۷۸	۰/۰۳۱۴

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A (m^2)	مساحت
b (m)	عرض گردآورنده
C (kJ/kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه
$\dot{E}$ (W)	توان
F_R	ضریب برداشت گرما
G (W/m^2)	شدت تابش خورشید
h (W/m^2.K)	ضریب انتقال حرارت
k (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی
L (m)	طول مجرای جریان
m (kg)	مقدار تولید آب شیرین
M (kg)	جرم
$\dot{m}$ (kg/s)	دبی جرمی
P (W)	توان
Q (J)	نرخ انتقال حرارت، توان الکتریکی
q (W)	توان
T (K)	دما
X (m)	مساحت

علائم یونانی

α	ضریب جذب، ضریب دمایی جریان
β (1/K)	ضریب انبساط حجمی
η	راندمان
θ (degree)	زاویه شیب شیشه‌ها
ρ (kg/m^3)	چگالی
σ (J/m^2.kg)	ثابت استفان بولتزمن
τ	ضریب عبور
$\alpha\tau$	ضریب جذب- انتقال مؤثر

زیرنویس

a	محیط
c,b_W	جابه‌جایی جاذب و آب
c,ge_a	جابه‌جایی شیشه شرقی و محیط
c,gw_a	جابه‌جایی شیشه غربی و محیط
c,w_g	جابه‌جایی آب و شیشه
c	گردآورنده
$cell$	سلول
$cond$	هدایت
$conv$	جابه‌جایی
eff	مؤثر
el	الکتریکی
ev	تبخیر
ev,W_g	تبخیری آب و شیشه
e	شیشه شرقی
gw	شیشه غربی
ins	عایق
PCM	مواد تغییر فاز دهنده
r,ge_sky	تشعشعی شیشه شرقی و محیط
r,ge_gw	تشعشعی شیشه شرقی و شیشه غربی
r,gw_sky	تشعشعی شیشه غربی و محیط
r,W_g	تشعشعی آب و شیشه
sw	خورشید و شیشه غربی
se	خورشید و شیشه شرقی
sky	محیط مؤثر
w	آب، غربی
W_gw	آب و شیشه غربی

منابع

[1] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, Energy Conversion and Management, 49(10) (2008) 2602-2608.

[2] E. Delyannis, Historic background of desalination and renewable energies, Solar Energy, 75(5) (2003) 357-366.

[3] A. El-Sebaii, A. Al-Ghamdi, F. Al-Hazmi, A.S. Faidah, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, Applied Energy, 86(7-8) (2009) 1187-1195.

[4] V. Dwivedi, G. Tiwari, Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode, Desalination, 250(1) (2010) 49-55.

[5] M. Asbik, O. Ansari, A. Bah, N. Zari, A. Mimet, H. El-Ghetany, Exergy analysis of solar desalination still

[10] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, M. Mahdavi Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, Solar Energy, 118 (2015) 197-208.

[11]B.Y.H. Liu, R.C. Jordan, Daily insolation on surfaces tilted towards equator, ASHRAE Transactions, 67 (1962) 526-541.

[12] H.E.S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, A. Hassabou, Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations, Desalination, 159(1) (2003) 69-79.

[13] M. Faegh, M.B. Shafii, Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes, Desalination, 409 (2017) 128-135.

[14] H. Jafari Mosleh, S. Jahangiri Mamouri, M. Shafii, A. Hakim Sima, A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic trough collector, Energy Conversion and Management, 99 (2015) 141-150.

combined with heat storage system using phase change material (PCM), Desalination, 381 (2016) 26-37.

[6] N. Rahbar, A. Gharaiian, S. Rashidi, Exergy and economic analysis for a double slope solar still equipped by thermoelectric heating modules-an experimental investigation, Desalination, 420 (2017) 106-113.

[7] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, Irreversibility rates in a solar photovoltaic/thermal water collector: An experimental study, Heat Transfer Research, 48(8) (2017) 741-756.

[8] M. Al-harahsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, Z. Alzghoul, Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, Applied Thermal Engineering, 128 (2018) 1030-1040.

[9] F. Sarhaddi, F. Farshchi Tabrizi, H.A. Zoori, S.A.H.S. Mousavi, Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis, Energy Conversion and Management, 133 (2017) 97-109.

این صفحه عمداً خالی است