



# Improving the Performance of a Solar Still Using a Flat Plate Collector

Seyed Mohammad Sadegh Mousavi Shad<sup>1</sup>, Mohammad Mazidi Sharfabadi<sup>2\*</sup>, Ashkan Abdalisousan<sup>1,3</sup>

1. Department of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Development and Optimization of Energy Technologies Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

3. Department of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Aštara Branch, Aštara, Iran

mazidim@ripi.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4955.3208

Received: April/14/2022

Accepted: November/27/2022

## Introduction

Water is one of the most important resources for the survival of living species on Earth. Since the earth has only a small amount of water resources for drinking purposes, people in rural and urban areas are affected by the consumption of contaminated water, which leads to water-borne diseases. Even groundwater must be properly treated before it can be used for consumption. Saltwater contains dissolved and undissolved contents, and therefore, it is not suitable for domestic use such as cleaning, washing, bathing, etc. [1]. Fresh water is one of the basic human needs, and it is affected by pollution caused by man-made products. Fresh water is available to humans for drinking and agriculture. More than two-thirds of the earth's surface is covered with water. With the increase in population and environmental pollution caused by the development of industry, technological innovations, and transportation, freshwater resources on the surface of the earth are depleting at a higher rate. Also, in dry, mountainous, and desert areas, low rainfall leads to an acute shortage of freshwater resources. For these reasons, desalination of available brackish water sources is of great importance for freshwater production worldwide. In addition, water crises, and the dramatic increase in resource and energy consumption, especially since the industrial revolution, is other problems. Modern lifestyle and population growth have led to an increase in fresh water and energy consumption, which inevitably leads to environmental pollution and fuel shortage problems [2]. In an article, Ghasemipناه [3] investigated the possibility of using solar energy for the treatment and reuse of saline wastewater. The idea of this research

started from the fact that over time, the production amount of salty water with oil in crude oil desalination units is increasing (about 50 m<sup>3</sup>/h). These wastewaters are dangerous for the environment due to their specific qualitative and quantitative characteristics, which include highly soluble salts (50-170 g/L), volatile and non-volatile organic substances, and other pollutants. The solar water softener can separate microbes, pathogens, heavy metals, and salts in water and produce clean and hygienic water. In this experimental study, the effect of coupling the solar still with the collector on the amount of distilled water produced and the effect of other parameters such as solar radiation and water depth to increase the efficiency of the device have been investigated. This type of water softener, with its special and optimal efficiency for sweetening water, has various advantages such as low cost, no need for an operator and specialist for maintenance, easy construction and on-site repair, production of pure and fresh water, and no need for special equipment. In addition, it is complicated to set up.

## Materials and Methods

In this research, a solar still with a width of 75 cm and a length of 125 cm was used with a polymer coating on the bottom of it. The side walls and the floor of the machine are insulated with stone wool ( $k=0.035$  W/m<sup>2</sup>K) with a thickness of 6 cm. The tank of the solar device is waterproof to prevent water leakage and the inner surface is blackened to absorb maximum solar radiation, which is baked in the sun for a while before use to free the paint from any volatile toxins. Otherwise, these toxins evaporate and condense with

drinking water. Silicone rubber sealant was used to prevent leakage from any gaps between the glass cover and the fixed box. The solar still has a black basin with an area of approximately one square meter, which is filled with salt water.

This device consists of a solar flat collector that preheats the water and acts as an amplifier of solar radiation. The solar distillation basin is covered with a transparent glass plate. The angle of the glass is set at  $35^\circ$  so that the freshwater that collects on its bottom surface drips towards a collection pit. Glass also keeps heat inside the device. An inlet pipe and a float for brackish water feeding are installed in the rear wall of the solar still. Holes were made in the body of the device to accommodate the thermocouple. The temperature of the outer surface of the glass, the temperature of the water in the basin, and the temperature of the steam inside it, as well as the inlet and outlet temperatures of the collector, is measured. The schematic of the device is shown in Figure 1.

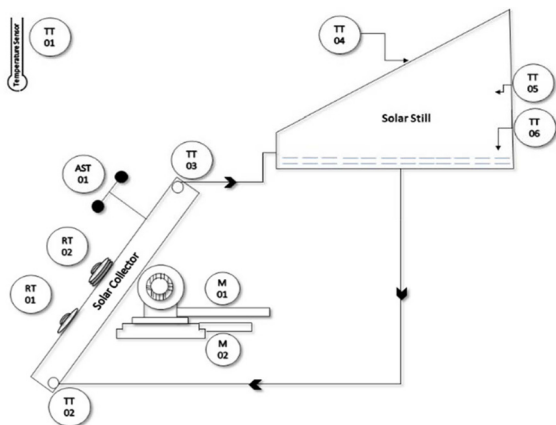


Fig.1 Schematic of the device.

### The Investigation of the Effective Variables on Solar Still with a Collector

This study aims to investigate the increase in the extraction of distilled water as the output of solar still using a flat plate collector. The performance data including the temperature of the salt water as the inlet of the distillation device, the temperature of the glass cover of the distillation device, the temperature of the inlet and outlet water of the collector, and the vapors of the solar still were continuously recorded. The collector was installed on an angled plate and to adjust the desired angle, a motor was installed to apply desired angles. According to the geographical location of the solar test bed (Research Institute of Petroleum Industry in Tehran) and conducting the test in the summer season, to receive the maximum solar radiation, the collector is placed towards the south. In this experiment, an attempt was made to investigate the effect of daily temperature and radiation conditions on the amount of freshwater produced by the solar still and the effectiveness of coupling it with a flat plate solar collector device. The daily changes in

solar radiation, ambient temperature, and wind speed for tests with the collector on September 3, 2022 are shown in Figure 2. The daily changes in solar radiation, ambient temperature, and wind speed for tests without a collector on October 8, 2022 are shown in Figure 3.

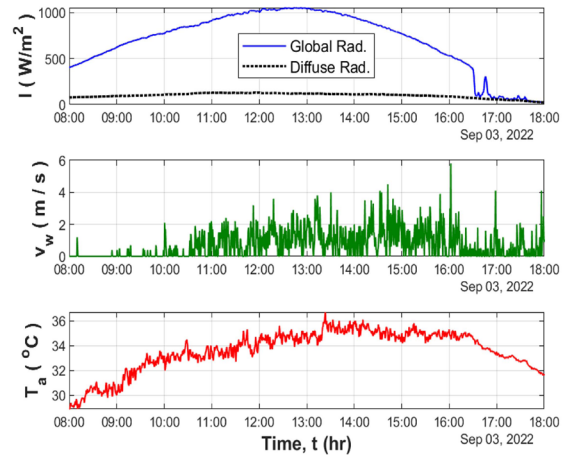


Fig. 2 Changes in radiation intensity, wind speed, and ambient temperature during September 3.

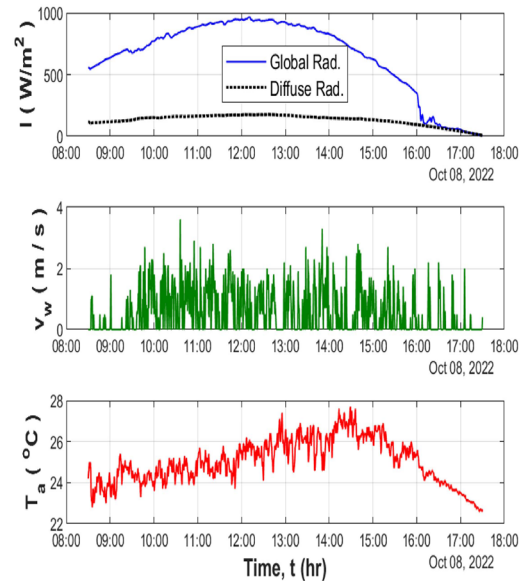


Fig. 3 Changes in radiation intensity, wind speed, and ambient temperature during October 8.

### Studying the Operation of a Solar Still with a Collector during a Day

According to the figures, it is clear that the intensity of solar radiation is the most important parameter affecting the performance of the flat plate collector system and the ambient temperature is effective on the thermal waste of the collector, solar still, and glass surface temperature. With the wind blowing, the heat transfer coefficient increases. The wind has the opposite effect on the ambient temperature. The temperature changes of the environment implicitly caused changes in the maximum temperature of saline. The temperature of the environment between 9:00 am

to 3:30 pm was in the range between 27 to 37 °C. The outlet water temperature of the collector is the highest recorded temperature of the system. All temperatures show similar increasing trends with increasing solar radiation during the day. The effects of coupling the solar still with the flat plate solar collector are shown in Figure 4.

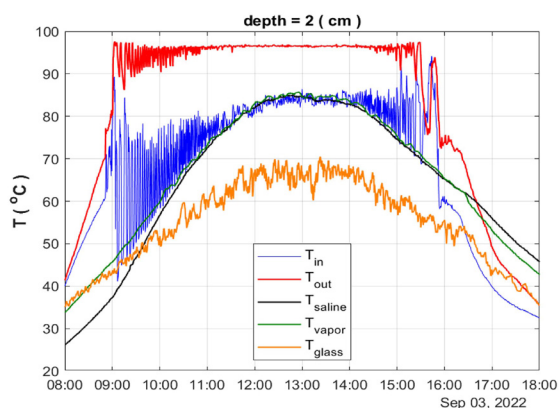


Fig.4 Changes in collector inlet and outlet, water vapor, solar water, and glass surface temperatures during September 3.

### Studying the Operation of a Solar Still without a Collector during a Day

The operation of the solar still without a collector is shown in Figure 5. All temperatures showed similar increasing trends with increasing solar radiation during the day. The water vapor temperature is the highest recorded temperature of the system. The highest ambient temperature occurred between 9 am to 3:30 pm, which was in the temperature range between 20 to 30 °C.

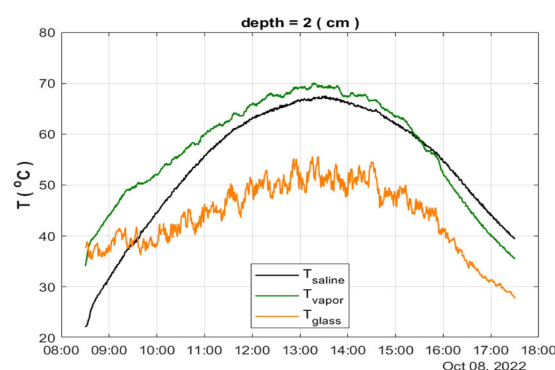


Fig. 5 Changes in water vapor, pond water, and glass surface temperatures during October 8.

## Results and Discussion

### Examining the Experimental Results

In Table 1, to compare the performance of solar distillation ponds with and without the use of a collector, the parameter of daily water production in liters has been used, and the amount of water produced at different depths has been compared. Also, the hardness of produced distilled water was calculated with the Lamotte TDS6 hardness tester and shown in Table 1. As can be seen, for the depth of 2 cm of water in the ponds, the amount of distilled water production is equal to 5.8 to 5.9 L/day. This value for a depth of 3 cm of water in ponds is from 3.5 to 4.5 L/day and for a depth of 4 cm from 4.6 to 8.4 L/day. According to the results, it is clear that by reducing the water depth, the performance of the system will be better and the water output from the solar distillation system will increase. The most optimal performance is related to the water depth of 2 cm.

Table 1 Amount of distilled water and water TDS

| Depth (cm)          | 2      |        | 3      |        | 4      |        |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| with a Collector    |        |        |        |        |        |        |
| Date                | 12 Sep | 13 Sep | 14 Sep | 15 Sep | 9 Oct  | 10 Oct |
| production (L)      | 5.8    | 5.9    | 5.3    | 4.5    | 4.6    | 4.8    |
| TDS (ppm)           | 10.3   | 8.8    | 12.6   | 7      | 6.7    | 7.9    |
| Without a Collector |        |        |        |        |        |        |
| Date                | 16 Oct |        | 17 Oct |        | 19 Oct |        |
| production (L)      | 3.1    |        | 2.9    |        | 2.4    |        |
| TDS (ppm)           | 13.3   |        | 8.5    |        | 5.5    |        |

### Conclusions

Solar distillation systems are relatively inexpensive and low-tech devices. However, there is still a lot of vacancies for innovation and improvement in them. Solar distillation systems have a significant competitive and economic advantage over other saltwater distillation processes due to the cheapness of energy consumption and its renewable energy along with lower investment and maintenance costs. In this

article, the performance of a solar still with a flat plate solar collector was investigated and compared with the performance of an individual solar still. It was found that the efficiency of the solar still coupled with the collector is 48% higher than the independent solar still. It can be concluded that one of the most important reasons for this increase in productivity is the rise in the temperature of the water in the device's pool.

**References**

- [1]. Kaushal A, (2010) Solar stills: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14, 1: 446-453, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.011>.
- [2]. Abujazar M S S, Fatimah S, Kabeel A E (2017) Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate, *Desalination*, 423: 141-148, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.020>
- [3]. Qasemipanah K (1393) A Study on Treatability of Desalter Unit Wastewater by Solar Still Method, *Petroleum Research*, 24, 78: 84-91, <https://doi.org/10.1001.1.23452900.1393.24.78.8.1>

# بهبود عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی با استفاده از کلکتور صفحه تخت

سید محمدصادق موسوی شادا<sup>۱</sup>، محمد مزیدی شرف‌آبادی<sup>۲\*</sup> و اشکان عبدالی سوسن<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

## چکیده

در این مقاله از ترکیب کلکتور خورشیدی صفحه تخت با دستگاه تقطیر خورشیدی برای نم‌زدایی از آب استفاده شده است. هدف از این مطالعه، افزایش خروجی دستگاه تقطیر خورشیدی از طریق بهبود عملکرد با استفاده از یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت و بررسی تأثیر عمق آب بر میزان آب مقطر تولیدشده است. اثر پارامترهای مختلف، همانند عمق آب، دمای محیط، سرعت باد و تابش خورشیدی برای افزایش بهره‌وری مطالعه شده است. نتایج نشان داد که کویل کردن یک دستگاه تقطیر خورشیدی با یک کلکتور خورشیدی، بهره‌وری را تا ۴۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین، میزان عمق آب موجود در دستگاه تقطیر بر تولید آب مقطر مؤثر است و مشخص شد که با کاهش عمق از ۳ cm به ۲ cm میزان آب شیرین تولیدی ۸/۵٪ افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌ها نشان داد که حجم آب مقطر خروجی از دستگاه، برای عمق‌های ۲ cm تا ۴ cm به‌طور متوسط ۴/۶ تا ۵/۹ L/day با استفاده از کلکتور و ۲/۴ تا ۳/۱ L/day بدون به‌کارگیری آن است. متوسط شدت تابش و سرعت باد در طول آزمون با کلکتور به ترتیب  $1035 \text{ W/m}^2$  و  $3/7 \text{ m/s}$  و در آزمون بدون کلکتور  $980 \text{ W/m}^2$  و  $4/2 \text{ m/s}$  بود.

**کلمات کلیدی:** نم‌زدایی، کلکتور خورشیدی صفحه تخت، دستگاه تقطیر خورشیدی، آب مقطر.

## مقدمه

از طریق آب می‌شود. حتی آب‌های زیرزمینی نیز باید قبل از استفاده برای مصرف به‌درستی تصفیه شوند. آب‌شور حاوی محتویات محلول و حل‌نشده است و از این‌رو برای مصارف خانگی نظیر تمیزکاری، شستشو، حمام کردن و غیره مناسب نیست [۱]. آب شیرین یکی از نیازهای اساسی انسان است و تحت تأثیر آلودگی ایجادشده توسط محصولات ساخت بشر قرار می‌گیرد. آب شیرین برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی در دسترس انسان است. بیش

آب یکی از منابع مهم برای بقای گونه‌های زنده بر روی زمین است. از آنجایی که زمین تنها مقدار کمی منابع آب برای مصارف شرب دارد، مردم مناطق روستایی و شهری تحت تأثیر مصرف آب آلوده قرار می‌گیرند که منجر به بیماری‌های سرایت‌کننده

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی

mazidim@ripi.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4955.3208)

و تولید آب شیرین، از نیروی محرکه الکتریکی یا مکانیکی و یک غشای جداکننده استفاده می‌شود. در سراسر جهان از انرژی خورشیدی غیرفعال برای واحدهای تقطیر خورشیدی به دلیل سادگی در ساخت، بهره‌برداری و هزینه کم استفاده می‌شود. آب‌شور در دستگاه ریخته و زیر نور خورشید قرار داده می‌شود. این دستگاه آب را با استفاده از گرمای خورشید تبخیر و سپس تقطیر می‌کند. این دستگاه می‌تواند آب آشامیدنی که غلظت نمک و مواد مضر برای سلامتی و سطح بهداشتی آن کم باشد را با استفاده از انرژی خورشیدی تأمین کند. از تقطیر خورشیدی می‌توان در تولید آب آشامیدنی استفاده کرد. تقطیر خورشیدی راه‌حل نسبتاً ساده برای منابع شیرین‌سازی آب‌شور است. تقطیر یکی از فرآیندهایی است که برای تصفیه آب به کار می‌رود و بدین منظور می‌توان از هر منبع گرمایی استفاده کرد. در روش تقطیر خورشیدی، با استفاده از انرژی خورشید، آب تبخیر شده و بخار آب پس از میعان به‌عنوان آب خالص استفاده می‌شود. استفاده از روش تقطیر خورشیدی راه‌حلی برای تأمین آب در مناطق دورافتاده می‌باشد که با کمبود آب آشامیدنی و منابع انرژی متداول مانند گرما و شبکه برق روبرو هستند [۴]. سرمستی امامی و همکاران [۵] اصول و مبانی عملکرد دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از منابع در دسترس را بررسی کردند و دریافتند که عواملی مانند فاصله شیشه تا سطح آب‌شور، جهت دستگاه و شیب شیشه، جنس صفحه جذب‌کننده، اختلاف دمای شیشه و سطح آب‌شور، سرعت وزش باد و دبی جرمی آب‌شور ورودی بر روی بازده دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی تأثیر دارند. در ارتباط با میزان تأثیر این عوامل نتایج متفاوتی گزارش شده است. بنابراین نیاز به طراحی و ساخت دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی با توجه به جغرافیای منطقه امری ضروری به‌شمار می‌آید. لارنس و همکاران [۶] نشان دادند که رنگ بر عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی به‌ویژه برای

از دوسوم سطح زمین با آب پوشیده شده است. با افزایش جمعیت و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پیشرفت صنعت، نوآوری‌های فناوری و حمل‌ونقل، منابع آب شیرین روی سطح زمین با نرخ بیشتری رو به اتمام است. همچنین در نواحی خشک، کوهستانی و بیابانی، بارش کم باران منجر به کمبود حاد منابع آب شیرین می‌شود. با این دلایل، نمک‌زدایی از منابع آب‌شور در دسترس از اهمیت به‌سزایی برای تولید آب شیرین در سراسر جهان برخوردار است. علاوه بر این، بحران‌های آبی، افزایش چشمگیر مصرف منابع و انرژی، به‌ویژه از زمان انقلاب صنعتی، مشکل دیگری است. سبک زندگی مدرن و رشد جمعیت، منجر به افزایش مصرف آب شیرین و انرژی شده که به‌طور اجتناب‌ناپذیری منجر به آلودگی محیط‌زیست و مشکلات کمبود سوخت می‌شود [۲]. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ به دلیل کیفیت پایین آب شیرین، بسیاری از نقاط جهان با کمبود آب آشامیدنی مواجه خواهند شد [۳]. همچنین، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۶۰٪ آب مورد نیاز جمعیت کره زمین از طریق فرآیند نمک‌زدایی تأمین شود. نمک‌زدایی خورشیدی به دو دسته عمده نمک‌زدایی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. سیستم نمک‌زدایی مستقیم انرژی خورشیدی را استحصال می‌کند و آب‌شور را مستقیماً به آب مقطر تبدیل می‌کند. در روش غیرمستقیم ابتدا انرژی خورشیدی تبدیل به انرژی الکتریکی یا مکانیکی می‌شود و سپس این انرژی برای جداسازی مکانیکی استفاده می‌شود. روش‌های جداسازی مکانیکی عمدتاً مبتنی بر اسمز معکوس هستند. روش‌های تصفیه متعددی برای نمک‌زدایی از آب دریا ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه اصلی فرآیندهای غشایی و حرارتی طبقه‌بندی نمود. در فرآیندهای حرارتی از فرآیند تبخیر برای تبدیل آب به بخار استفاده می‌شود و با میعان بخار تولیدی، آبی کم‌نمک تولید می‌گردد. در فرآیندهای غشایی برای جداسازی نمک‌های محلول

عمق زیاد آب اثر قابل توجهی دارد و رنگ سیاه عملکرد بهتری نسبت به رنگ‌های بنفش و قرمز دارد. میناسیان و الکرراقول [۷] یک دستگاه حوضچه معمولی (نصب‌شده در سایه و دارای پوشش) را به یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نوع فیتیله‌ای وصل کردند تا آب‌شور پسماند داغ که از فتیله خارج می‌شود، مستقیماً به داخل آن وارد شود. نتایج نشان داد، آب مقطر تولیدی سالانه ۸۵٪ بیشتر از حوضچه معمولی و ۴۳٪ بیشتر از نوع فیتیله‌ای بود. اخیراً سینها و همکاران [۸] یک سیستم تقطیر خورشیدی را به‌عنوان جایگزین سرمایه‌گذاری برای سیستم آبگرم‌کن خورشیدی ارزیابی کردند. یک تحلیل فنی-اقتصادی برای هر دو سیستم در شرایط اقتصادی یکسان و با در نظر گرفتن ظرفیت برابر انجام شد. نتیجه‌گیری شد که هزینه انرژی حاصل از سیستم تقطیر خورشیدی بسیار کمتر از هزینه انرژی آبگرم‌کن است و به دلیل سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر هزینه بهره‌برداری سالانه آبگرم‌کن خورشیدی بزرگ‌تر از سیستم تقطیر خورشیدی می‌باشد. قاسمی پناه و همکاران [۹] در مقاله‌ای به بررسی امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تصفیه و استفاده مجدد از پساب‌های نمکی پرداخته‌اند. ایده شکل‌گیری این پژوهش از آنجا آغاز شد که باگذشت زمان، مقدار تولید آب‌های شور همراه نفت در واحدهای نمک‌زدایی از نفت خام رو به افزایش است (حدود  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ). این پساب‌ها به دلیل خصوصیات کیفی و کمی خاص که شامل نمک‌های محلول بالا ( $170-50 \text{ g/L}$ )، مواد آلی فرار و غیرفرار و سایر آلاینده‌ها، مخاطره‌آمیز برای محیط‌زیست می‌باشد. آب‌شیرین‌کن خورشیدی قادر است میکروب‌ها، عوامل بیماری‌زا، فلزات سنگین و نمک‌های موجود در آب را جدا کند و آب بهداشتی و خالص تولید نماید.

انرژی خورشیدی را می‌توان توسط چندین سیستم خورشیدی متنوع مهار کرد. ساده‌ترین سیستم، جمع‌کننده خورشیدی است [۱۰]. علاوه بر این،

با استفاده از جفت کردن یک واحد نمک‌زدایی با کلکتور لوله خلاً می‌توان گرادیان دمای بالاتری و در نتیجه بهره‌وری بیشتری را حاصل نمود [۱۱]. سودا و همکاران [۱۲] نشان دادند که نوع دو اثر حوضچه خورشیدی تقریباً ۶۵٪ عملکرد بالاتری نسبت به نوع تک اثر آن دارد. برای بازده روزانه بالاتر، اختلاف دمای بین حوضچه و پوشش شیشه‌ای باید همیشه زیاد باشد. این را می‌توان با اتصال حوضچه دستگاه به یک منبع گرمایش خارجی (کلکتور خورشیدی یا سیستم گرمای متمرکز کننده خورشیدی) و تنظیم جریان آب روی پوشش شیشه‌ای به دست آورد. آن‌ها اثر جریان آب روی پوشش شیشه‌ای و جریان آب داغ در حوضچه پایینی را از طریق یک کلکتور صفحه تخت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سرعت جریان آب در بالای پوشش شیشه بالایی هیچ اثر قابل توجهی ندارد که ممکن است به دلیل انرژی کم در دسترس در پوشش شیشه‌ای بالایی باشد. همچنین، برای جلوگیری از تلفات حرارتی، کلکتور باید در طول ساعات غیر آفتابی از حوضچه جدا شود. در سیستم یکپارچه پیشنهاد شده توسط تیواری و رای [۱۳] آب بین دستگاه تقطیر خورشیدی و کلکتور به کمک پمپ کوچکی به گردش درمی‌آید. گرمای حاصل از کلکتور مستقیماً به دستگاه تقطیر خورشیدی می‌رسد و سرعت تبخیر دستگاه را افزایش می‌دهد. تولید آب روزانه ۲۴٪ بیشتر از تولید دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور است. دستگاه تقطیر خورشیدی باید به‌اندازه کافی بالا قرار گیرد تا فشار کافی برای جریان ترموسیفون ایجاد شود.

کوپر [۱۴] تأثیر زاویه شیب کلکتور را بر روی ضریب اتلاف حرارتی مطالعه کرد. مشخص شد که این ضریب با افزایش زاویه شیب کلکتور به‌آرامی افزایش و این روند تا زاویه  $60^\circ$  ادامه می‌یابد و در این زاویه ضریب به‌شدت افزایش می‌یابد. کاظمی و سعدآبادی [۱۵] تحقیقی با عنوان تعیین زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت در تهران

حوضچه دستگاه خورشیدی ضد آب ساخته شده است تا از نشت آب جلوگیری شود و سطح داخلی برای جذب حداکثر تابش خورشیدی سیاه شده است که قبل از استفاده مدتی در آفتاب پخته شود تا رنگ از هرگونه سموم فرار آزاد شود. در غیر این صورت، این سموم همراه با آب آشامیدنی تبخیر و متراکم می‌شوند. درزگیر لاستیکی سیلیکونی برای جلوگیری از نشتی از هرگونه شکاف بین پوشش شیشه و جعبه ثابت استفاده شد. دستگاه تقطیر خورشیدی دارای یک حوضچه سیاه‌رنگ به مساحت تقریبی یک مترمربع است که با آب‌شور پر شده است. این دستگاه از یک کلکتور تخت خورشیدی که آب را از قبل گرم می‌کند تشکیل شده است و به‌عنوان تقویت‌کننده تابش خورشیدی عمل می‌کند. حوضه تقطیر خورشیدی با صفحه‌ای از شیشه شفاف پوشانده شده است. زاویه شیشه  $35^\circ$  تنظیم شده تا آب شیرینی که در سطح زیرین آن جمع می‌شود به سمت یک گودال جمع‌آوری چکانده شود. شیشه همچنین گرما را در داخل دستگاه نگه می‌دارد. یک لوله ورودی و شناور برای تغذیه آب‌شور در دیواره عقب دستگاه تقطیر خورشیدی نصب شده است. سوراخ‌هایی در بدنه دستگاه تعبیه شد تا ترموکوپل در آن قرار گیرد. دمای سطح خارجی شیشه، دمای آب در حوضچه و دمای بخار داخل آن و همچنین دما ورودی و خروجی کلکتور اندازه‌گیری می‌شوند. نمای کلی بستر آزمون در شکل ۱ و شماتیک دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

مشخصات تجهیزات اندازه‌گیر موجود در بستر آزمون در جدول ۱ و مشخصات کلکتور مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. برنامه آگیری حوضچه در ساعات اولیه روز قبل از رسیدن پرتوهای خورشید به حوضچه انجام می‌شد. معمولاً به مدت یک روز آب شیرین از دستگاه تولید و بعد از اتمام کار نسبت به تخلیه و شستشو حوضچه اقدام می‌شد. هر آزمون دو بار تکرار می‌شد.

انجام داده‌اند که در آن هدف خود را تعیین شیب کلکتورهای صفحه تخت رو به جنوب، در دوره‌های زمانی گوناگون، برای شهر تهران اعلام کرده‌اند. برای نیل به این هدف، ابتدا با استفاده از میانگین ماهیانه تشعشع روزانه روی صفحه افق، میزان تابش پراکنده روی صفحه افقی را با استفاده از یک مدل تجربی تعیین کرده‌اند. سپس میزان تابش را روی صفحه شیب‌دار توسط یک مدل ریاضی در شیب‌های مختلف محاسبه کرده و با مقایسه تابش در شیب‌های گوناگون، مقدار شیب بهینه ماهیانه را بر اساس بیشینه تابش  $35^\circ$  تعیین کرده‌اند. موسی‌زاده و همکاران [۱۶] نشان دادند که راندمان یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت به پارامترهای مختلفی وابسته است. زاویه قرارگیری کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی برای اولین بار در شهر تهران از روش آزمایشگاهی بررسی شده که طی چندین آزمایش، زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی برای فصل‌های مختلف سال تعیین شده است. برای مثال، زاویه بهینه کلکتورها در فصل تابستان و زمستان بین  $2^\circ$  تا  $52^\circ$  تعیین شده است.

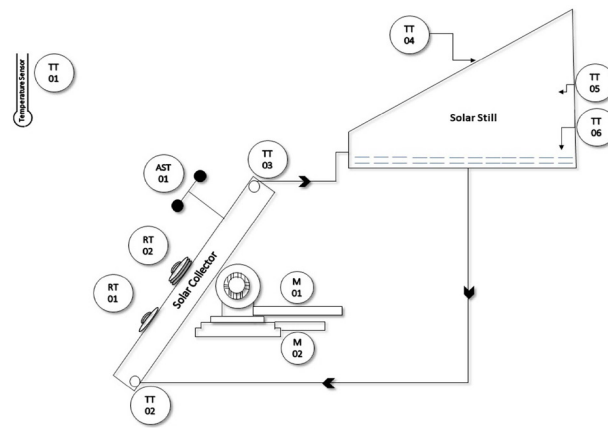
در این مطالعه تجربی اثر کوپل کردن دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور بر روی میزان آب مقطر تولیدی و اثر سایر پارامترها نظیر تابش خورشیدی و عمق آب برای افزایش بهره‌وری دستگاه بررسی شده است. این نوع آب شیرین‌کن با کارایی خاص و بهینه‌ای که برای شیرین کردن آب دارد، از مزایای مختلفی نظیر هزینه پایین، عدم نیاز به اپراتور و کارشناس متخصص جهت نگهداری، ساخت آسان و تعمیر در محل، تولید آب خالص و شیرین، عدم نیاز به تجهیزات خاص و پیچیده برای راه‌اندازی نیز برخوردار است.

#### مطالعه تجربی

در این تحقیق از حوضچه‌ای به عرض ۷۵ cm و طول ۱۲۵ cm با پوشش پلیمری کف حوضچه استفاده شد. دیوارهای جانبی و کف دستگاه با پشم سنگ  $(k=0.035 \text{ W/m}^2\text{K})$  به ضخامت ۶ cm عایق شده است.



شکل ۱ نمای کلی آزمایشگاه خورشیدی.



شکل ۲ شماتیک بستر آزمون.

جدول ۲ مشخصات کلکتور صفحه تخت

| نوع / مقدار | ویژگی‌ها                     |
|-------------|------------------------------|
| ۳۲/۲        | سطح ناخالص (m <sup>2</sup> ) |
| ۲۵/۲        | سطح جاذب (m <sup>2</sup> )   |
| ۲۰          | جرم کلکتور بدون سیال (kg)    |
| شیشه        | جنس پوشش                     |
| ۱           | تعداد پوشش                   |
| آب          | سیال کاری                    |

جدول ۱ مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری

| تجهیز                        | تگ     | دقت اندازه‌گیری     |
|------------------------------|--------|---------------------|
| دمای محیط                    | TT-۰۱  | +۰/۰۱ °C            |
| دمای ورودی کلکتور            | TT-۰۲  | +۰/۰۱ °C            |
| دمای خروجی کلکتور            | TT-۰۳  | +۰/۰۱ °C            |
| دمای شیشه                    | TT-۰۴  | +۰/۰۱ °C            |
| دمای بخار                    | TT-۰۵  | +۰/۰۱ °C            |
| دمای آب نمک                  | TT-۰۶  | +۰/۰۱ °C            |
| بادسنج                       | AST-۰۱ | +/- ۰/۱ m/s         |
| تشعشع سنج                    | RT-۰۱  | < ۴W/m <sup>2</sup> |
| تشعشع سنج با رینگ سایه‌انداز | RT-۰۲  | < ۴W/m <sup>2</sup> |
| موتور ردیاب خورشیدی (۱)      | M-۰۱   | -                   |
| موتور ردیاب خورشیدی (۲)      | M-۰۲   | -                   |

خورشیدی با استفاده از یک دستگاه کلکتور صفحه تخت می‌باشد. داده‌های عملکردی شامل دمای آب‌شور به‌عنوان ورودی دستگاه تقطیر، دمای پوشش شیشه‌ای دستگاه تقطیر، دمای آب ورودی و خروجی کلکتور و بخارات دستگاه تقطیر خورشیدی به‌طور مداوم ثبت شده‌اند. کلکتور روی یک صفحه زاویه‌دار نصب شد و برای تنظیم زاویه مدنظر، موتوری جهت اعمال زوایای دلخواه تعبیه گردید. با توجه به موقعیت جغرافیای محل قرارگیری بستر خورشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران) و انجام آزمون در فصل تابستان، جهت دریافت حداکثر تابش خورشیدی، کلکتور به سمت جنوب قرار گرفته و بر اساس مرجع [۱۵] زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت  $35^\circ$  نسبت به افق در نظر گرفته شده است. در این آزمایش سعی بر آن شد تا میزان تأثیر شرایط دمایی و تابشی روزانه بر میزان تولید آب شیرین تولیدی دستگاه تقطیر خورشیدی و میزان اثربخشی کوپل کردن آن با یک دستگاه کلکتور خورشیدی صفحه تخت بررسی شود. تغییرات روزانه تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد برای آزمون‌های با کلکتور در روزهای مختلف در شکل‌های ۳ الی ۸ نشان داده شده‌اند.

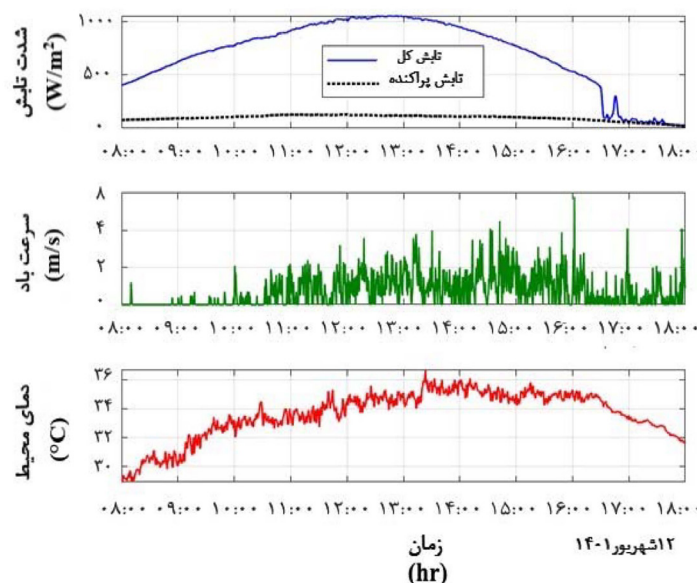
در طول انجام آزمایش‌ها در فرم‌های تهیه‌شده کلی اطلاعات لازم از قبیل وضعیت هوا، نوع آب و کیفیت آب تصفیه‌شده و مقادیر تولید آب به‌صورت روزانه ثبت می‌شد. از غروب خورشید تا طلوع آفتاب روز بعد کل حجم آب تولیدی شبانه، یک‌بار و قبل از ساعت ۸ صبح اندازه‌گیری می‌شد.

### نتایج و تفسیر آن‌ها

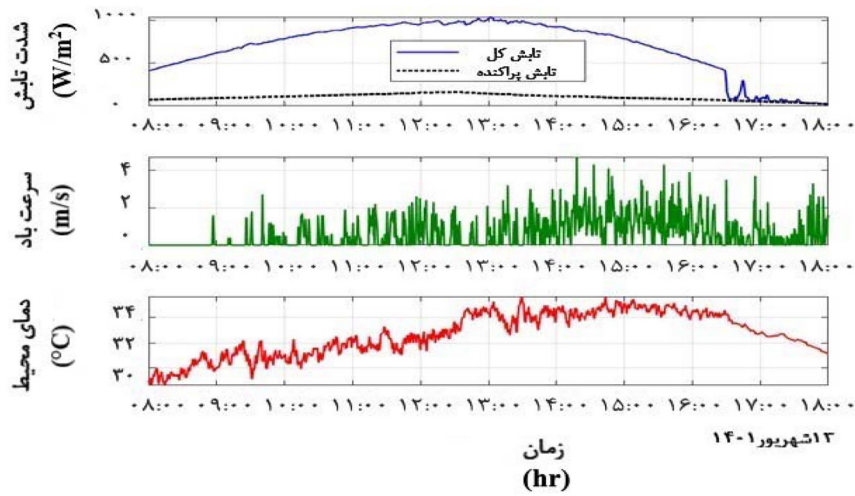
در این مقاله، دو آزمایش به‌صورت جداگانه انجام شد و نتایج آن تحلیل و بررسی شد. در آزمایش اول عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی با یک کلکتور صفحه تخت به‌طور روزانه بررسی شد و در آزمایش دوم یک دستگاه تقطیر خورشیدی به‌طور مستقل آزمایش شد. در این پژوهش، هر دو سیستم به مدت ۹ روز در ماه‌های شهریور و مهر سال ۱۴۰۱ در محل پژوهشگاه صنعت نفت و تحت شرایط دمایی و تابشی متفاوت به‌طور مداوم مطالعه شدند.

مطالعه کارکرد دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور در طول یک روز

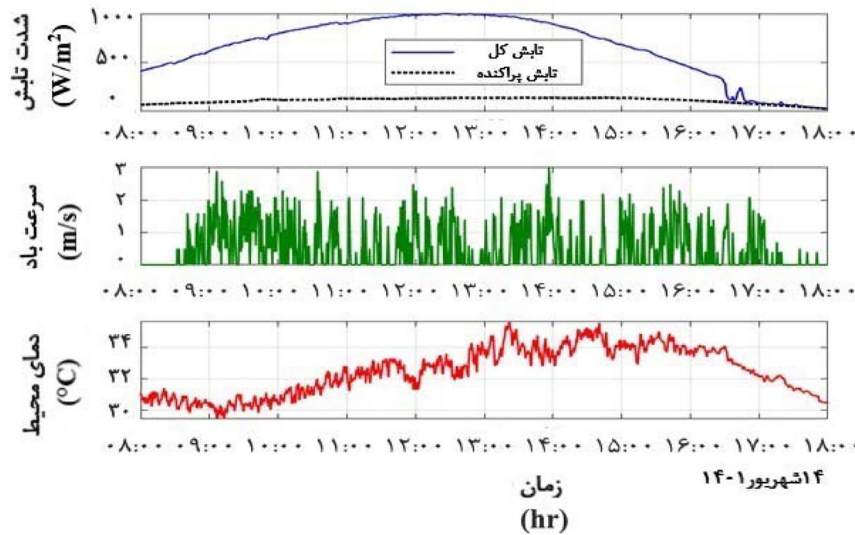
هدف از این مطالعه، بررسی میزان افزایش استحصال آب تقطیرشده به‌عنوان خروجی دستگاه تقطیر



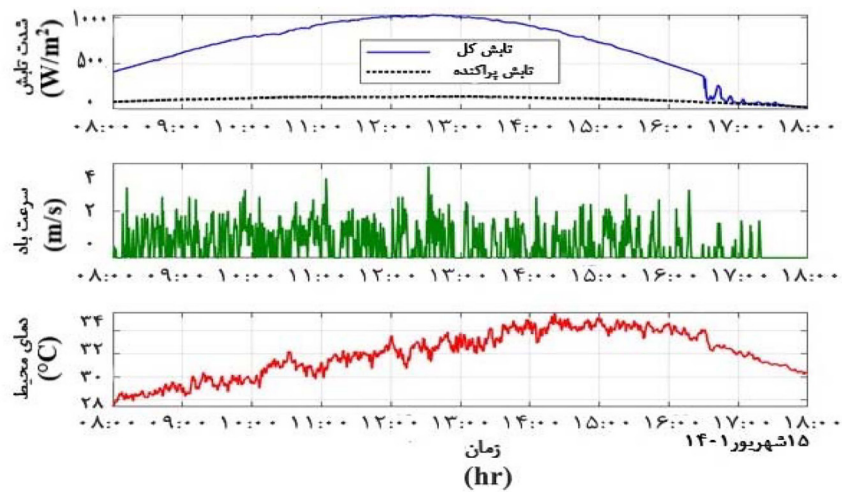
شکل ۳ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۲ شهریور.



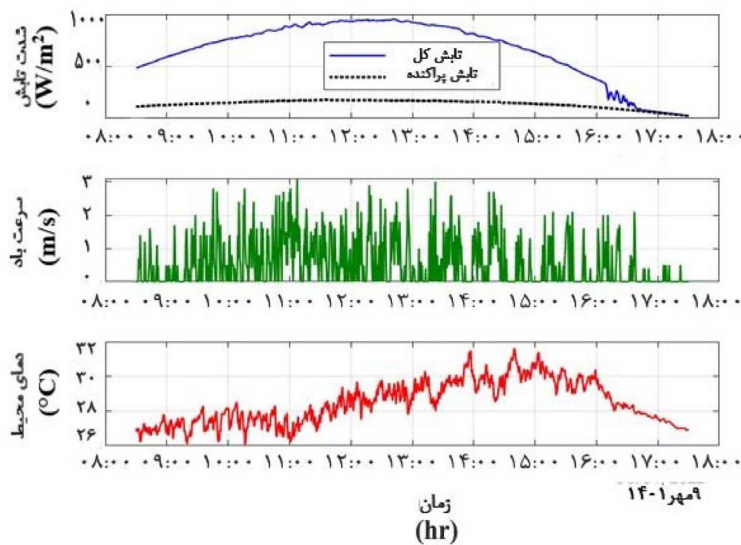
شکل ۴ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۳ شهریور.



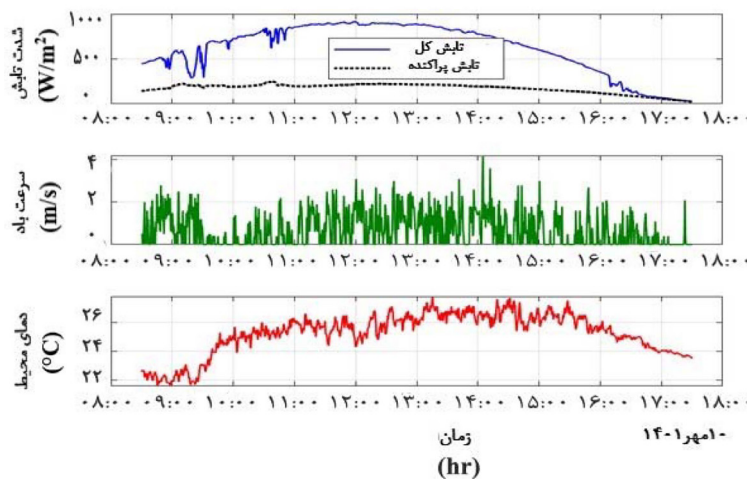
شکل ۵ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۴ شهریور.



شکل ۶ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۵ شهریور.



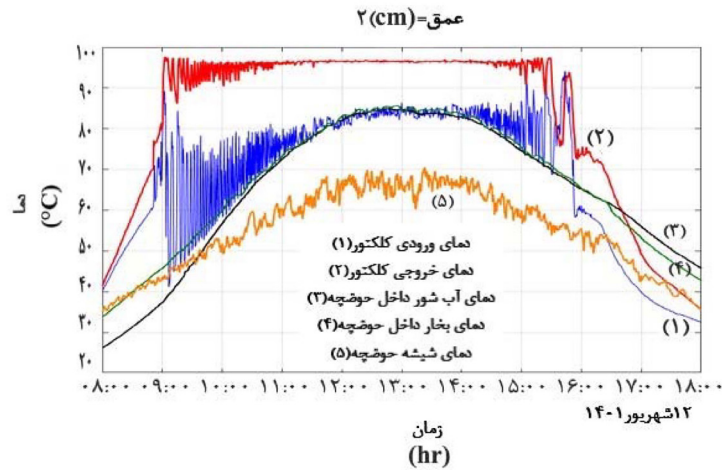
شکل ۷ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۹ مهر.



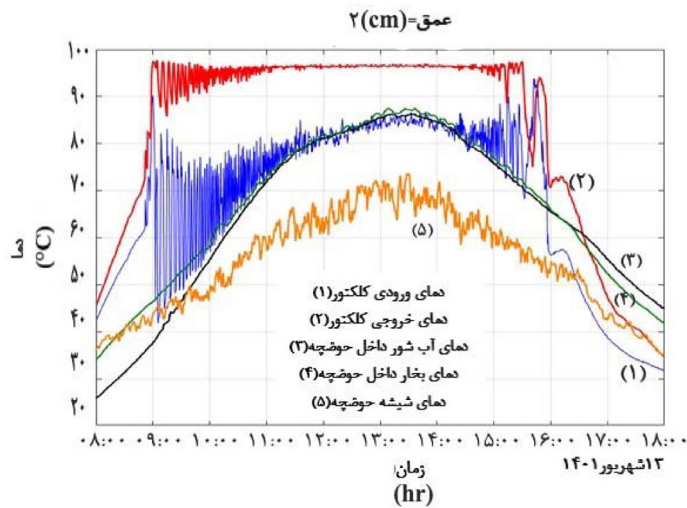
شکل ۸ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۰ مهر.

بالاترین دمای ثبت شده سیستم می باشد. همه دماها روندهای افزایش مشابهی را با افزایش تابش خورشیدی در طول روز نشان می دهند. اثرات کوپل کردن دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور خورشیدی صفحه تخت در شکل های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده است. مطالعه کارکرد دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور در طول یک روز تغییرات روزانه تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد برای آزمون های بدون کلکتور در روزهای مختلف در شکل های ۱۵ الی ۱۷ نشان داده شده اند.

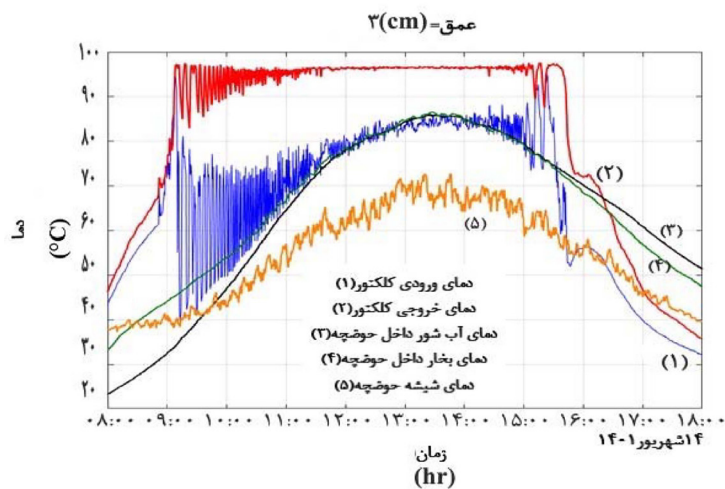
با توجه به شکل ها مشخص می شود که شدت تابش خورشید مهم ترین پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم کلکتور صفحه تخت می باشد و دمای محیط بر روی اتلافات حرارتی کلکتور، حوضچه خورشیدی و دمای سطح شیشه مؤثر است. با وزش باد، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. وزش باد اثری معکوس بر روی دمای محیط دارد. مشخصاً تغییرات دمایی محیط به صورت ضمنی باعث ایجاد تغییراتی بیشترین دمای محیط بین ساعات ۹ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر رخ داده است که در محدوده دمایی بین ۲۷ تا ۳۷ °C بوده است. در مقادیر سایر متغیرها نیز می شود. دمای آب خروجی کلکتور به عنوان



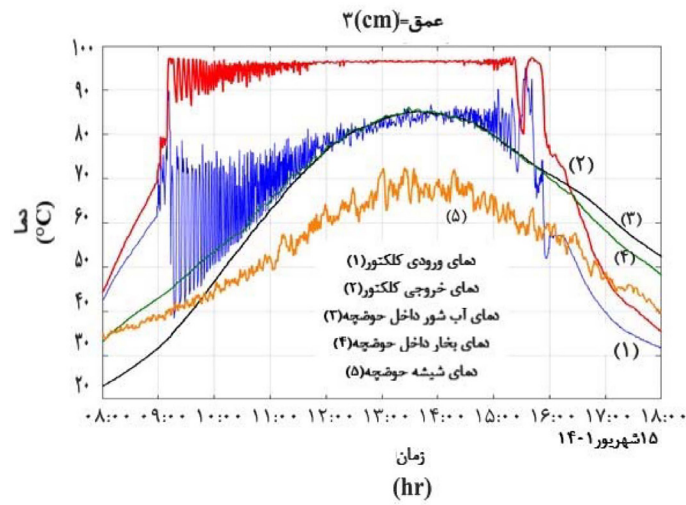
شکل ۹ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۲ شهریور.



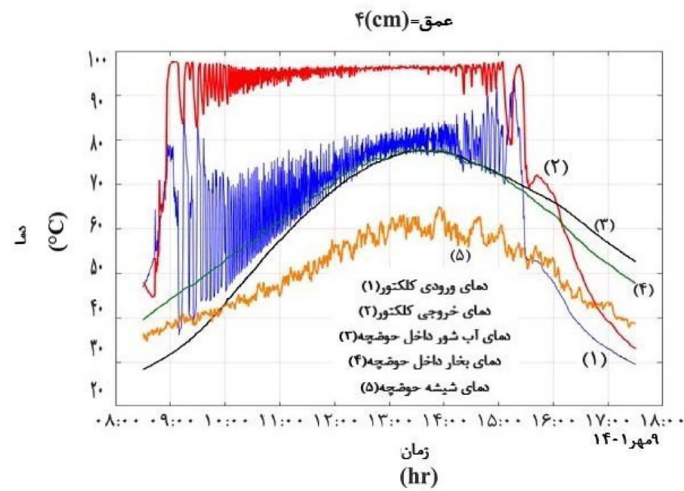
شکل ۱۰ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۳ شهریور.



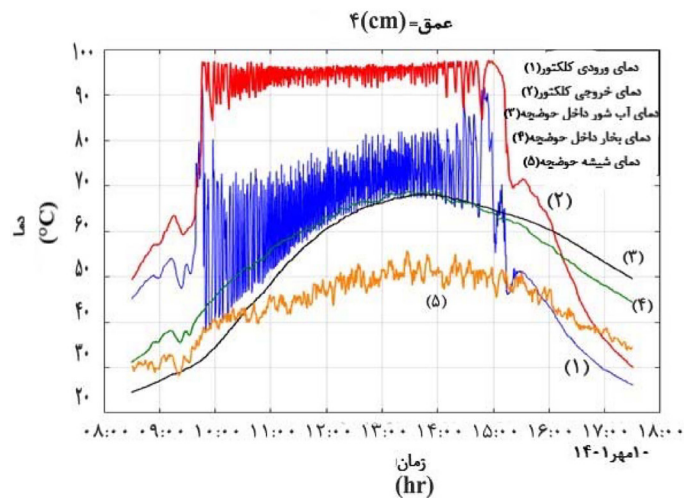
شکل ۱۱ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۴ شهریور.



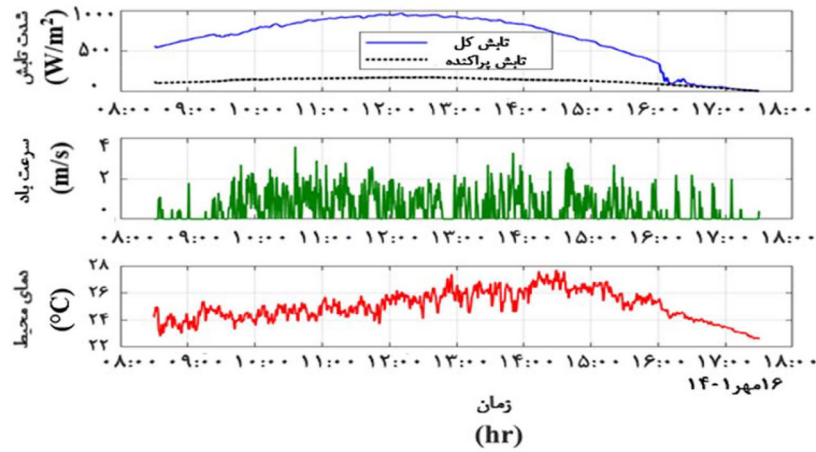
شکل ۱۲ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۵ شهریور.



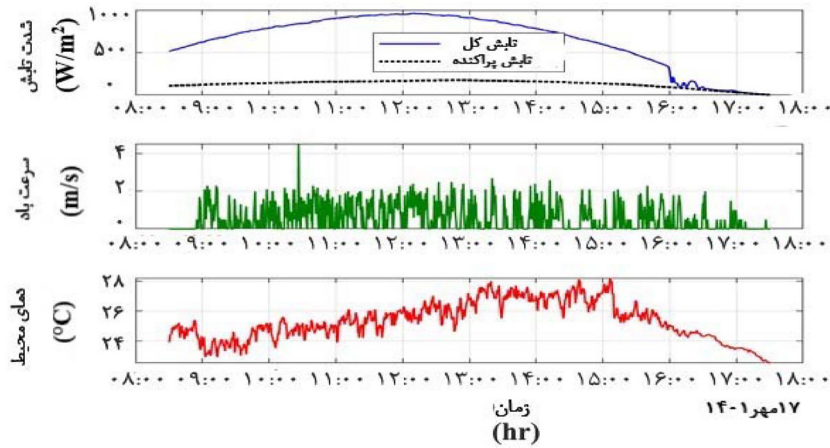
شکل ۱۳ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۹ مهر.



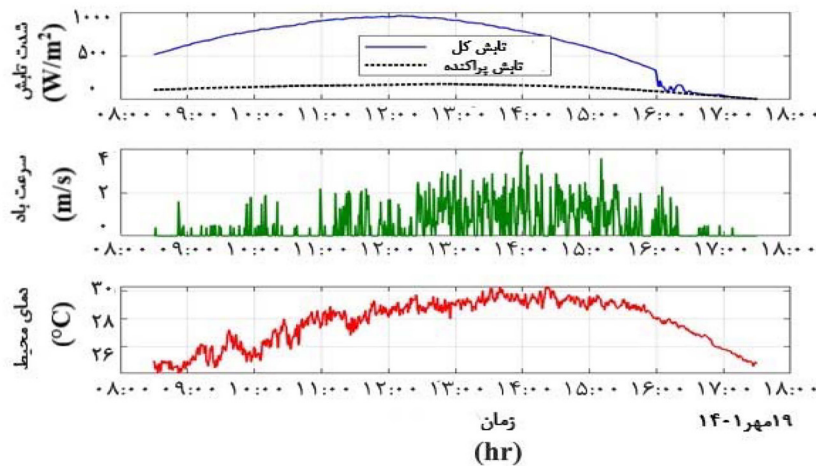
شکل ۱۴ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۰ مهر.



شکل ۱۵ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۶ مهر.



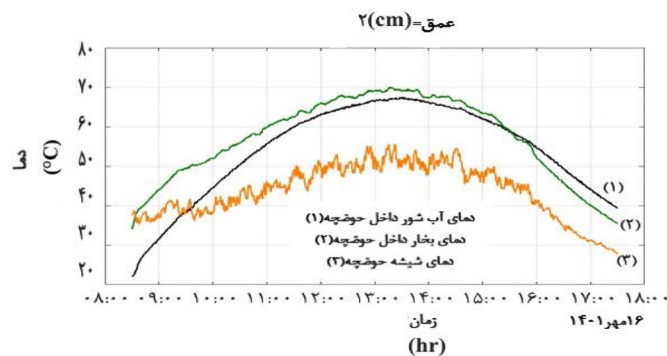
شکل ۱۶ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۷ مهر.



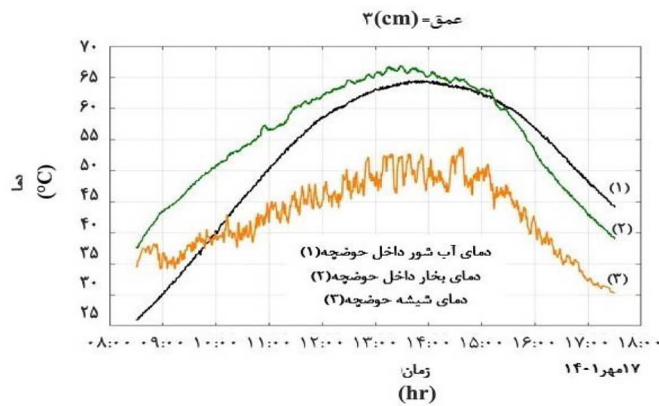
شکل ۱۷ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۹ مهر.

عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نشان داده شده است. همه دماها روندهای افزایش مشابهی را با افزایش تابش خورشیدی در طول روز نشان دادند. دمای بخار آب به‌عنوان بالاترین دمای ثبت‌شده سیستم می‌باشد. بیشترین دمای محیط بین ساعات ۹ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر رخ داده است که در محدوده دمایی بین ۲۰ تا ۳۰ °C بوده است.

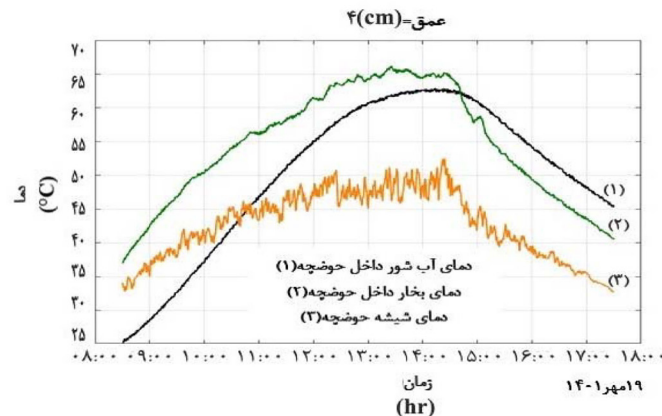
میزان آب مقطر تولیدی و سختی آن در جدول ۳ برای مقایسه عملکرد حوضچه‌های تقطیر خورشیدی با به‌کارگیری کلکتور و بدون آن از پارامتر میزان روزانه تولید آب برحسب لیتر استفاده شده است و مقدار آب تولیدی در عمق‌های مختلف باهم مقایسه شده‌اند. همچنین، سختی آب مقطر تولیدی با دستگاه سختی سنج مدل Lamotte TDS6 محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۸ تغییرات بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۶ مهر.



شکل ۱۹ تغییرات بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۷ مهر.



شکل ۲۰ تغییرات بخار آب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۹ مهر.

جدول ۳ میزان آب مقطر تولیدی و سختی آن.

| عمق (cm)        |           |           |           |           |        |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| ۴               |           | ۳         |           | ۲         |        |
| با کلکتور       |           |           |           |           |        |
| تاریخ           | ۱۲ شهریور | ۱۳ شهریور | ۱۴ شهریور | ۱۵ شهریور | ۹ مهر  |
| میزان تولید (L) | ۵/۸       | ۵/۹       | ۵/۳       | ۵/۴       | ۴/۶    |
| TDS (ppm)       | ۱۰/۳      | ۸/۸       | ۱۲/۶      | ۷         | ۶/۷    |
| بدون کلکتور     |           |           |           |           |        |
| تاریخ           | ۱۶ مهر    |           | ۱۷ مهر    |           | ۱۹ مهر |
| میزان تولید (L) | ۳/۱       |           | ۲/۹       |           | ۲/۴    |
| TDS (ppm)       | ۱۳/۳      |           | ۸/۵       |           | ۵/۵    |

همان‌گونه که دیده می‌شود برای عمق ۲ cm آب در حوضچه‌ها میزان تولید آب تصفیه‌شده برابر ۵/۸ تا ۵/۹ L/day است. این مقدار برای عمق ۳ cm آب در حوضچه‌ها از ۵/۳ تا ۵/۴ L/day و برای عمق ۴ cm از ۴/۶ تا ۴/۸ L/day است. با توجه به نتایج مشخص است که با کاهش عمق آب، عملکرد سیستم بهتر و خروجی آب از سیستم تقطیر خورشیدی افزایش خواهد یافت. بهینه‌ترین عملکرد مربوط به عمق آب ۲ cm است.

می‌توان نتیجه گرفت که تولید آب با به کارگیری کلکتور خورشیدی و زیاد شدن دمای آب حوضچه بیشتر خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد با به کارگیری کلکتور، دمای آب داخل حوضچه به میزان ۲۰ °C نسبت به زمانی که از کلکتور استفاده نشده است افزایش یافته و میزان آب تولیدی ۴۸٪ بیشتر شده است. ایجاد این بهره‌وری بالا در نتیجه کوپل کردن کلکتور با دستگاه خورشیدی انتظار می‌رفت. این‌گونه می‌توان تشریح کرد که کلکتور خورشیدی با گرم کردن آب تغذیه کارایی بالاتری را به فرآیند تقطیر می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

سیستم‌های تقطیر خورشیدی، دستگاه‌های نسبتاً

ارزان و با فناوری پایین هستند. با این حال، هنوز جای زیادی برای نوآوری و بهبود در آن‌ها وجود دارد. سیستم‌های تقطیر خورشیدی مزیت رقابتی و اقتصادی قابل توجهی را نسبت به سایر فرآیندهای تقطیر آب‌شور با توجه به ارزانی انرژی مصرفی و تجدیدپذیری آن در کنار سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری کمتر دارا می‌باشند. در این مقاله عملکرد یک دستگاه تقطیر خورشیدی به همراه یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت بررسی شد و با عملکرد یک دستگاه تقطیر خورشیدی مستقل مقایسه گردید. مشخص شد که بهره‌وری دستگاه تقطیر خورشیدی کوپل شده با کلکتور ۴۸٪ بیشتر از دستگاه تقطیر خورشیدی مستقل است. می‌توان نتیجه گرفت که از جمله مهم‌ترین دلایل این افزایش بهره‌وری افزایش دمای بالاتر آب حوضچه دستگاه می‌باشد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از جناب آقای دکتر غیاثی رئیس محترم واحد مهندسی و خدمات فنی پژوهشگاه صنعت نفت و مهندس کردی مسئول محترم طرح پژوهش‌شده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی که در طول انجام این تحقیق یاری‌رسان بودند ابراز می‌دارند.

مراجع

- [1]. Kaushal A (2010) Solar stills A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1: 446-453, doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.011.
- [2]. Abujazar MSS, Fatihah S, Kabeel A, (2017) Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate, *Desalination*, 423: 141-148, doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.020.
- [3]. Kumar S, Tiwari A, (2008) An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still, *International Journal of Energy Research*, 32, 9: 847-858, doi.org/10.1002/er.1388.
- [4]. Yahya MA, Al-Qodah Z, Ngah CZ, (2015) Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production, A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46: 218-235, doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051.
- [۵]. امیری حمزه ق ر (۲۰۱۸) بررسی اثر تنش شوری بر ترکیب های شیمیایی اسانس گیاه مرزه رشینگری، مجله پژوهش های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران) (علمی)، ۲، ۳۱: ۲۵۷-۲۴۸، ۲۰۱۸.۱.۲۳۸۳۲۵۹۲.۱، doi: 20.1001.1.23832592.1.397.31.2.4.2
- [6]. Lawrence S, Gupta S, Tiwari G, (1988) Experimental validation of thermal analysis of solar still with dye, *International journal of solar energy*, 6, 5: 291-305, doi.org/10.1080/01425918808914235.
- [7]. Fath HE, (1998) Solar distillation a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment, *Desalination*, 116, 1: 45-56 .
- [8]. Sinha S, Kumar S, Tiwari G, (1994) Active solar distillation system—An investment alternative to a solar hot water system, *Energy Conversion and Management*, 35, 7: 583-588.
- [۹]. کریم ق پ (۱۳۹۳) بررسی تصفیه پذیری پساب واحدهای نمک زدایی نفت خام به روش تقطیر خورشیدی، ۲۴، ۷۸، ۹۱-۸۴
- [10]. Ghorbani B, Mehrpooya M, Sadeghzadeh M, (2018) Developing a tri-generation system of power, heating and freshwater (for an industrial town) by using solar flat plate collectors, multi-stage desalination unit and Kalina power generation cycle, *Energy Conversion and Management*, 165: 113-126, doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.040.
- [11]. Chong TL, Huang BJ, PH Wu, Kao YC, (2014) Multiple-effect diffusion solar still coupled with a vacuum-tube collector and heat pipe, *Desalination*, 347: 66-76, doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.023.
- [12]. Sodha Ms, Nayak JK, Tiwari GN, Kumar A, (1980) Double basin solar still. *Energy Conversion and Management*, 20, 1: 23-32, doi.org/10.1016/0196-8904(80)90025-4.
- [13]. Rai S, Tiwari G, (1983) Single basin solar still coupled with flat plate collector, *Energy Conversion and Management*, 23, 3: 145-149, oi.org/10.1016/0196-8904(83)90057-2.
- [14]. Cooper P, (1981) The effect of inclination on the heat loss from flat-plate solar collectors, *Solar Energy*, 27, 5: 413-420, doi.org/10.1016/0038-092X(81)90006-2.
- [15]. Jafarkazemi F, Ali Saadabadi S, Pasdarshahri H, (2012) The optimum tilt angle for flat-plate solar collectors in Iran, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4, 1: 013118, doi.org/10.1063/1.3688024.
- [16]. Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, (2009) A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 8: 1800-1818, doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022.