



Experimental Investigation of the Combined Effect of Condenser and Phase Change Materials in the Performance of Single Slope Solar Still

Sayed Mahdi Parwez^{1*}, Mohammad Sefid², Navid Perzai Khabazi³

¹Master's Student in Mechanical Engineering, Department of Renewable Energy, Yazd University, Iran.

²Faculty Member, Professor, Technical and Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Conversion, Yazd University, Iran.

³Faculty Member, Assistant Professor, Technical and Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Conversion, Yazd University, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 12.04.2022

Revised: 03.17.2023

Accepted: 06.10.2023

Keyword:

Solar Still

Phase Change Material

Paraffin Wax

Condenser and Copper Tubes

*Corresponding Author:

Sayed Mahdi Parwez

Email:

sayedmahdiparwez@gmail.com

ABSTRACT

Today, solar desalination is one of the promising solutions for the problem of drinking water shortage, mainly in remote and low-population areas. In the present research, a solar still with passive external condensers was designed. To store the thermal energy in the basin of this solar still, paraffin wax was used in copper tubes as phase change materials. To compare and investigate the performance of the proposed solar still, a conventional solar still with the same specifications and dimensions was built and tested. Both solar stills were investigated on the days of 28 April, 5 and 9 May. The results of the experiments showed that the performance of the proposed solar still was better than the conventional solar still; the highest produced fresh water was 3.55 and 3.04 lit/m² day, respectively, for the proposed and conventional solar stills, which showed a 17% increase in productivity per day. It is clear from past research that the condenser increases the temperature difference between the glass covers and the saltwater of the basin, but causes the temperature of the saltwater basin to decrease. However, in this research, in addition to the increase in the temperature difference between the glass cover and salt water, the amount of salt water also increased, and this trend of increasing temperature was observed until the end of the day in all three experiments, which shows the effective performance of paraffin wax in the basin of solar still.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Fresh water is one of the basic and vital elements for all living organisms on earth and one of the most important bases of industrial development. The amount of water distribution on earth is 2.53% fresh water and 96.54% salt water in the seas and oceans. Currently, 3.7 billion people are affected by shortages of water. A suitable solution for solving the problem of freshwater shortage mainly in remote and low-population areas of the world, is the use of solar energy, which can convert salt water into fresh and potable water. In the present research, a proposed solar still was created by adding an external condenser and PCM in copper tubes from a conventional solar still. The proposed still was then compared with the conventional solar still. Among the advantages of basin solar stills is their simple and cheap structure. These solar stills use solar energy to convert salt water into fresh water and do not produce dangerous gases such as greenhouse gases. The main problem of these solar stills is their low daily productivity. To solve this problem in recent years, researchers have conducted much research and various methods have been presented. Although many studies have been carried out on basin solar stills with phase change materials and condensers separately, the use of a combination of condensers and phase change materials has not been investigated on basin solar stills so far. In this research, a proposed single slope basin solar still was designed and built using paraffin wax as a phase change material in copper tubes. To better investigate the performance of this proposed basin solar still, a conventional solar still with the same dimensions was also built.

Methodology

The main components of the proposed solar still include the structure or basin, condensers and copper tubes, which are shown in Figure (1).

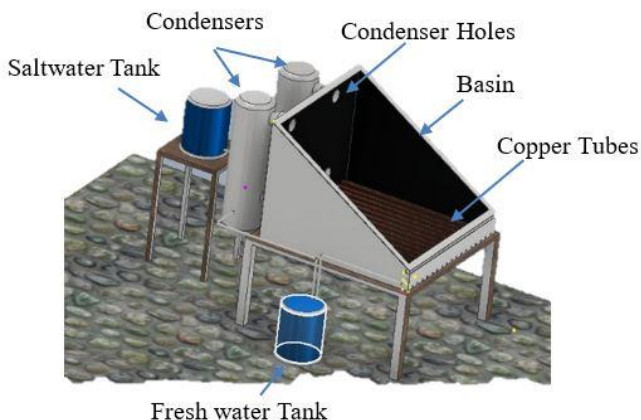


Figure 1. The pattern of proposed solar still.

In this research, the performance of the solar stills was investigated in two stages; the first stage included preliminary experiments and the second stage included the main experiment. The preliminary experiments were conducted in two days. After the completion of the preliminary experiments, the main experiments began and were conducted in three days on April 28, May 5, and May 9, 2022. The experiment method was such that both solar stills started working at sunrise and data collection was carried out from 8:00 am to 7:30 pm (after 19:30, the solar stills did not produce fresh water) and the recording period of each data was 30 minutes. All tests for both solar stills were set at 1 cm of basin water. For all three days, the effect of total solar radiation intensity, wind speed, ambient temperature, temperature of condensers and temperature of copper tubes were evaluated comparatively with the help of graphs and then the results of each day were investigated separately and the performance of the proposed solar was compared with the conventional solar still.

Results and discussion

As previously mentioned, the results of each experiment day were evaluated separately. To investigate the results of the first day of the experiment, the performance of the proposed and conventional solar still was used in the graphs obtained from the data of the saltwater temperature in the basin and the glass cover temperature from both solar stills. The amount of freshwater produced at the end of the day for both solar stills were measured and evaluated comparatively. Similarly, the investigation of the second and third-day experiments were also carried out, and the summary of the evaluations of the three days of experiments are shown in Table (1).

Table 1. Performance of both solar stills in three experiments.

Experiment	Productivity (SSS) ¹	Productivity (ISS) ²	Maximum temperature difference of ISS glass cover compared to SSS	Increase productivity
First	2.6 (L/m ² -day)	2.83 (L/m ² -day)	12.1 (c°)	11 %
Second	2.96 (L/m ² -day)	3.38 (L/m ² -day)	16.8 (c°)	15 %
Third	3.04 (L/m ² -day)	3.55 (L/m ² -day)	16.6 (c°)	17 %

As can be observed from Table (1), the efficiency of both solar stills is different in each experiment, which is related to the environmental parameters. But the productivity rate in all three experiments in the proposed solar still was higher than in the conventional still and demonstrating the effective performance of condensers and paraffin wax in the proposed solar still.

¹ Standard solar still (conventional solar still)

² Improved solar still (proposed solar still)

Conclusion

Based on the results, it was determined that the proposed solar still performed better than the conventional solar still in all experiments. In general, by studying the literature of the research on condenser solar stills, it has been proven that the condenser increases the temperature difference between the glass covers and the saltwater of the basin, which cause the temperature of the saltwater basin to decrease. However, in this research, in addition to the increase in the temperature difference between the glass cover and salt water, the amount of salt water also increased, and this trend of increasing temperature until the end of the day was observed in all three experiments, illustrating the effective performance of paraffin wax in the basin of the solar still. Because the paraffin wax changed its phase at sunset and its stored thermal energy was transferred to the saltwater, the rapid decrease of saltwater temperature was prevented increasing the daily productivity. The concentration of salt water before the experiment was 2176 ppm, which reached 44.35 ppm after desalination by the device.



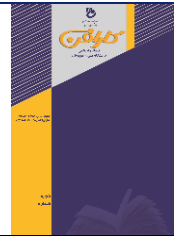
دانشگاه حرفه‌ای
کارافان

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۲، دوره ۲۰، شماره ۳، ۲۳۸-۲۲۱
آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2023.368106.2333



بررسی تجربی اثر ترکیبی کندانسور و مواد تغییر فازدهنده در عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه تک شیب

سید مهدی پرویز^{۱*}، محمد سفید^۲، نوید پیرزایی خبازی^۳

- ۱- دانشجوی بین‌الملل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه یزد، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، استاد، گروه فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، ایران.
- ۳- عضو هیئت علمی، استادیار، گروه فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی یکی از راه‌حل‌های امیدوارکننده برای معضل کمبود آب آشامیدنی، به طور عمده در مناطق دوردست و کم‌جمعیت است. در تحقیق حاضر یک آب شیرین‌کن با کندانسورهای خارجی طراحی شده است. برای ذخیره انرژی گرمایی در حوضچه این آب شیرین‌کن، از مواد تغییر فاز دهنده موم پارافین قرار گرفته در لوله‌های مسی استفاده شده است. به‌منظور مقایسه و بررسی عملکرد آب شیرین‌کن پیشنهادی یک آب شیرین‌کن معمولی با همان مشخصات و ابعاد نیز ساخته شده است. هر دو آب شیرین‌کن در روزهای ۸، ۱۵ و ۱۹ اردیبهشت ماه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نتایج آزمایش‌ها نشان داده که عملکرد آب شیرین‌کن پیشنهادی بهتر از آب شیرین‌کن معمولی بوده است. بیشترین آب شیرین تولید شده ۳۰۴ و ۳۵۵ لیتر بر مترمربع در روز به ترتیب برای آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی به دست آمده که نشان‌دهنده ۱۷ درصد افزایش بهره‌وری در روز است. از پژوهش‌های گذشته مشخص است که کندانسور با آن که اختلاف دما بین پوشش شیشه‌ای و آب‌شور حوضچه را افزایش می‌دهد، باعث کاهش میزان دمای حوضچه نیز می‌شود. اما در این پژوهش نتیجه قابل توجهی که به دست آمده این است که علاوه بر افزایش اختلاف دمایی بین پوشش شیشه‌ای و آب‌شور، میزان دمای آب‌شور نیز افزایش پیدا کرده است و این روند افزایش دما تا پایان روز در هر سه آزمایش مشاهده شده است که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر موم پارافین در حوضچه آب شیرین‌کن می‌باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

کلید واژگان:

آب شیرین‌کن
مواد تغییر فاز دهنده
موم پارافین
کندانسور و لوله‌های مسی

*نویسنده مسئول: سید مهدی پرویز

پست الکترونیکی:

sayedmahdiparwez@gmail.com



©2023 the authors. Published by Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقدمه

آب شیرین یکی از عناصر اساسی و حیاتی برای تمام موجودات زنده در سطح زمین بوده و یکی از مهم‌ترین محورهای توسعه صنعت می‌باشد. با توجه به این مسئله که میزان توزیع آب در سطح زمین ۲.۵۳ درصد آب شیرین و ۹۶.۵۴ درصد آب شور در دریا و اقیانوس است، آب شیرین موجود که می‌تواند به طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد، ۰.۳۶ درصد کل آب شیرین سطح زمین را تشکیل می‌دهد [۱]. با این حال، بسیاری از منابع آب شور هستند و یا حاوی باکتری‌های مضر هستند که برای استفاده انسان نامناسب می‌باشد. در حال حاضر ۳.۷ میلیارد نفر در جهان از کمبود آب رنج می‌برند و تا سال ۲۰۵۰ این تعداد می‌تواند تا ۵.۷ میلیارد نفر افزایش یابد [۲]. گزارش جدید توسعه جهانی آب (WWDR)^۱ سازمان ملل (UN) درباره روند فعلی آب پاک نشان می‌دهد که امنیت آب، ظرفیت جمعیت برای دسترسی پایدار به مقادیر کافی و با کیفیت قابل قبول آب در حال حاضر در معرض خطر است و در چند دهه آینده وضعیت بدتر خواهد شد. فشار در سیستم آب تا سال ۲۰۵۰ زمانی افزایش می‌یابد که جمعیت جهان تا ۱۰.۲ میلیارد نفر برسد. این فشار با رشد نابرابر جمعیت در مناطق مختلف غیرمرتبط با منابع محلی تشدید خواهد شد که بیشتر این رشد جمعیت در کشورهای در حال توسعه، ابتدا در آفریقا، و سپس در آسیا پیش‌بینی شده است، جایی که کمبود آب پاک باعث افزایش تنش‌های آبی شده و قسمت‌های بیشتری را تحت تأثیر قرار خواهد داد. در حال حاضر حدود ۴۷ درصد از جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که حداقل یک ماه در سال از کمبود آب رنج می‌برند [۳]. یک راه‌حل مناسب جهت رفع معضل آب شیرین در کشورهای مانند فوق و یا مناطق خشک و دوردست جهان، استفاده از انرژی خورشیدی می‌باشد که می‌توان منابع آب شور را به آب شیرین و آشامیدنی تبدیل نمود. در حال حاضر کشورهای خاورمیانه، خلیج فارس و شمال آفریقا از جمله کشورهایی می‌باشند که از روش‌های شیرین‌سازی آب با استفاده از انرژی خورشیدی استفاده می‌کنند [۴].

کشور ایران ۱.۱ درصد از مساحت جهان را دارا است؛ اما فقط ۰.۳۴ درصد از آب‌های موجود در جهان را در اختیار دارد. این کشور دارای آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و میزان بارندگی در آن یک‌چهارم بارندگی متوسط جهان است. با توجه به ارقام فوق ایران از جمله کشورهای فقیر از لحاظ منابع آبی سرانه در جهان است [۵]. از طرفی ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که کشور ایران از جمله کشورهایی است که دارای پتانسیل بالای تولیدی انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد و می‌تواند فرصت بزرگی جهت رفع بحرانی آب در این کشور باشد [۶]. امروزه از انرژی خورشیدی در سیستم‌های مختلف برای مقاصد گوناگون به کار گرفته می‌شود که پرکاربردترین آنها سیستم‌های فتوولتائیک، سیستم‌های گرم‌کن خورشیدی، سیستم‌های خشک‌کن خورشیدی، خانه‌های خورشیدی و سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی می‌باشد [۷]. از جمله، استفاده از انرژی خورشیدی برای شیرین کردن آب شور دریا به بیش از ۱۳۰ سال قبل باز می‌گردد، اما در حال حاضر از کل حجم آب شیرین شده در جهان، تنها ۰.۰۲ درصد آن از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود [۸]. با توجه به مسئله فوق، در این تحقیق یک آب شیرین‌کن خورشیدی کندانسور دار در موجودیت مواد تغییر فاز دهنده طراحی و به صورت مقایسه‌ای نتایج آن با آب شیرین‌کن معمولی بررسی شده است.

آب شیرین‌کن حوضچه‌ای از جمله دستگاه‌های است که از انرژی خورشیدی در آن به صورت مستقیم استفاده می‌شود. از مزایای آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای می‌توان به ساختمان ساده و ارزان بودن آن اشاره کرد، این دستگاه‌ها برای تبدیل آب شور به آب شیرین از انرژی خورشیدی استفاده کرده و باعث تولید گازهای خطرناک مانند گازهای گلخانه‌ای نمی‌شوند [۹].

¹ World Water Development Report

² United Nations

اشکال اصلی آب شیرین کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای پایین بودن بهره‌وری روزانه آن در واحد سطح است، به‌منظور رفع این اشکال در سال‌های اخیر تحقیقاتی زیادی توسط محققان انجام شده و روش‌های مختلف پیشنهاد شده است. کارتیکیان سلوراج و همکاران [۱۰] در یک تحقیق مروری عوامل مؤثر بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی را بررسی کرده‌اند، آنها، عوامل مانند شدت تابش خورشیدی، تفاوت دما بین آب و دما پوشش، میزان عمق آب، عایق، زاویه شیب، ضخامت پوشش شیشه‌ای، سرعت باد، نوع مواد حوضچه، و مواد ذخیره‌کننده انرژی گرمایی را ارزیابی نموده‌اند. الوان و همکاران [۱۱] در یک تحقیق تجربی به ارزیابی عملکرد ضریب انتقال حرارت و بهره‌وری روزانه آب‌شیرین در دستگاه آب شیرین کن تک شیب پرداخته‌اند. این بررسی در عمق آب ۲،۱ و ۳ سانتی‌متری در سه روز مختلف تابستانی انجام شده‌است. نتایج نشان داده که با کاهش عمق آب حوضچه ضریب انتقال حرارت در داخل آب شیرین کن افزایش می‌یابد و بالاترین ضریب انتقال حرارت هنگامی که عمق آب ۱ سانتی‌متر بوده است به‌دست آمده است.

یکی از عوامل مؤثر در آب شیرین کن‌ها مواد ذخیره انرژی حرارتی بوده که نگی و همکاران [۱۲] در یک تحقیق مروری مطالعات خود را در این مورد انجام داده‌اند. آنها کاربرد های سیستم‌های حرارتی با مواد ذخیره انرژی را برای افزایش کارایی این سیستم‌ها ارزیابی نموده‌اند. نتایج از این تحقیق نشان داده که آب شیرین کن‌ها با مواد تغییر فاز دهنده یک سیستم مؤثر برای جایگزینی با آب شیرین کن‌های معمولی است. عادل انور محمد عمرا و همکاران [۱۳] بررسی مروری را بالای انواع مواد تغییر فاز دهنده انجام داده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داده که در میان مواد تغییر فاز دهنده، مواد آلی^۱ مانند پارافین به دلیل خصوصیات عمومی و اقتصادی مانند ذخیره‌سازی متوسط، ایمنی، در دسترس بودن، قابلیت اطمینان و ذوب یکنواخت بیشتر در مطالعات مربوط به بهبود بهره‌وری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کار تجربی وارون کومار سونکر و همکاران [۱۴] اثر سه نوع مواد تغییر فاز دهنده را در آب شیرین کن تک شیب ارزیابی کرده‌اند. آنها مواد پارافین، اسید استئاریک و اسید لوریک را در استوانه‌های مسی پُر کرده و در کف حوضچه قرار داده‌اند؛ اثرات عمق آب حوضچه بر کل تقطیر برای هر سه مواد را ارزیابی کرده و نتایج به‌دست آمده نشان داده که تقطیر کل در مقایسه با اسید استئاریک ۱۷،۶ درصد، اسید لوریک ۲۱،۵ درصد و موم پارافین ۹،۲ درصد با تغییر ارتفاع آب حوضچه از ۱ تا ۵ سانتی‌متر کاهش یافته است. ساتیش کومار و همکاران [۱۵] عملکرد یک آب شیرین کن تک شیب معمولی را با آب شیرین کن فین دار به صورت مقایسه‌ای بررسی کرده است. فین^۲ها (سطح اضافه) متصل به کف حوضچه توسط موم پارافین پُر شده است. آزمایش‌ها برای سه عمق آب ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر انجام شده و نتایج نشان داده که ادغام فین‌ها و مواد ذخیره انرژی به آب شیرین کن معمولی با عمق آب حوضچه ۲ سانتی‌متری بالاترین بهره‌وری را داشته است. آرون بیهورا و همکاران [۱۶] اثر ترکیب موم پارافین با مواد نانوذرات اکسید مس در آب شیرین کن حوضچه‌ای بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده که استفاده از ترکیب موم پارافین با مواد نانوذرات اکسید مس بهره‌وری روزانه دستگاه را افزایش می‌دهد. کبیل و همکاران [۱۷] در یک تحقیق مروری، انواع کندانسورها و اثر آنها در بهره‌وری آب‌شیرین کن‌های خورشیدی را ارزیابی کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داده‌است؛ از آنجا که میعان در کندانسور انجام می‌شود دمای داخلی پوشش شیشه‌ای دستگاه به طور قابل توجهی کاهش یافته در نتیجه این تفاوت دما بین پوشش شیشه‌ای و آب شور باعث سرعت فرایند چگالش می‌شود. موهایسن و همکاران [۱۸] در یک تحقیق تجربی آب‌شیرین کن خورشیدی تک شیب کندانسور دار را در مشهد بررسی کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده‌است که دستگاه آزمایش شده با کندانسور فین دار و بدون فین به ترتیب ۸۶ و ۹۲،۳ درصد افزایش بهره‌وری روزانه نسبت به دستگاه معمولی موجود در تهران دارد. احمد و همکاران [۱۹] چهار نوع کندانسور در آب شیرین کن معمولی ارزیابی کرده‌اند. کندانسورها از جنس شیشه، صفحه آلومینیومی، صفحه آلومینیومی (هیت سینک)^۳ فین دار و صفحه آلومینیومی پوشیده شده با یک چتر ساخته شده است. آزمایش‌ها به

¹ Organic

² Fin

³ Heat sink

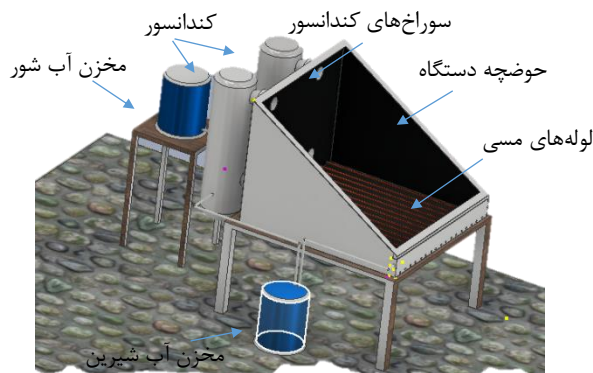
طور مقایسه‌ای انجام شده و نتایج نشان داده که استفاده از کندانسور هیت سینک با فین‌ها بهره‌وری دستگاه را ۳۱ درصد نسبت به دستگاه مرجع (آب شیرین‌کن با کندانسور شیشه‌ای) افزایش داده است. اما در تحقیق متفاوت از رحمانی و همکاران [۲۰] اثر منفی کندانسور خارجی بر عملکرد آب‌شیرین‌کن معمولی خورشیدی بررسی شده است. نتایج نشان داده که اتصال کندانسور خارجی به آب‌شیرین‌کن معمولی همیشه عملکرد مثبت از خود نشان نمی‌دهد بلکه ارتباط نزدیک با شرایط آب‌وهوایی منطقه دارد. در تحقیق تجربی دینش مواد و همکاران [۲۱] افزایش بهره‌وری آب شیرین‌کن حوضچه‌ای متصل به کندانسور خارجی زیرک‌زایکی و لوله‌خلاف را در مقایسه با آب شیرین‌کن معمولی بررسی نموده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داده که حداکثر خروجی تقطیر برای آب شیرین‌کن اصلاح شده و معمولی به ترتیب ۳.۹۲ و ۲.۲۶ کیلوگرم بر متر مربع رسیده است.

هرچند تحقیقات زیادی در مورد آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای با مواد تغییر فاز دهنده و کندانسور به‌صورت جداگانه انجام شده است؛ ولی تاکنون استفاده از ترکیب آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای کندانسور دار و مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفته نشده است. در این تحقیق یک آب شیرین‌کن تک‌شیب حوضچه‌ای پیشنهادی طراحی و ساخته شده است، از موم پارافین به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده در لوله‌های مسی استفاده شده است. برای بررسی بهتر عملکرد این آب شیرین‌کن پیشنهادی یک آب شیرین‌کن معمولی با ابعاد یکسان نیز ساخته شده است.

روش‌ها و مواد

روش طراحی و ساخت دستگاه

در این بخش به شرح روش طراحی و ساخت اجزایی اصلی آب شیرین پیشنهادی مانند بدنه، لوله‌های مسی و کندانسورها پرداخته شده است. شکل (۱) نشان‌دهنده طرح‌واره آب شیرین‌کن پیشنهادی می‌باشد.



شکل ۱. طرح‌واره آب شیرین‌کن پیشنهادی.

بدنه یا حوضچه هر دو شیرین‌کن از آهن گالوانیزه با ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شده که دارای ابعاد ۵۵ در ۵۵ سانتی‌متر مربع می‌باشد. ارتفاع دیواره جلوی آن ۱۰ سانتی‌متر و از عقب ۴۴.۳۷ سانتی‌متر بوده، زاویه شیب آب شیرین‌کن ۳۲ درجه مطابق به زاویه تابش خورشیدی شهر یزد می‌باشد. برای جذب بیشتر انرژی گرمایی خورشید داخل حوضچه رنگ مشکی شده و در سطح شیب‌دار از پوشش شیشه‌ای به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارت در کف و دیواره‌های حوضچه از فوم پلی‌اتیلن (ضریب هدایت حرارتی ۰.۰۴۲ وات بر متر-کالوین) با ضخامت

۵ سانتی‌متر به‌عنوان عایق استفاده شده است. جریان ساخت حوضچه آب شیرین‌کن پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. حوضچه آب شیرین‌کن پیشنهادی.

در آب شیرین‌کن پیشنهادی از ۲۷۰ گرم موم پارافین که مشخصات آن در جدول (۱) ذکر شده در ۲۹ عدد لوله‌ای مسی با قطر خالص ۶.۳۵ میلی‌متر، ضخامت ۰.۷۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۴.۸۵ و طول ۵۴ سانتی‌متر برای ذخیره انرژی گرمایی استفاده شده است. لوله‌های مسی طوری در کف حوضچه قرار گرفته‌اند که توسط بست‌های مخصوص به اندازه ۲ میلی‌متر از کف ارتفاع دارند، بدین معنا که لوله‌های مسی دقیقاً در وسط آب قرار گرفته‌اند. شکل (۳) نصب لوله‌های مسی را در کف حوضچه نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات موم پارافین.

شماره	مشخصات	مقدار
۱	نقطه ذوب	۶۸-۴۶ (°C)
۲	چگالی	۹۰۰ (Kg/m ³)
۳	گرمای همجوشی	۲۲۶ (KJ/Kg)
۴	گرمای ویژه	۲.۹ (°KJ/Kg-C)
۵	ضریب هدایت حرارتی	۰.۲۴ (°W/m ³ -C)



شکل ۳. لوله‌های مسی در حوضچه آب شیرین‌کن.

پس از نصب لوله‌های مسی نوبت به نصب کندانسورها در آب شیرین کن پیشنهادی می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش اختلاف دما بین آب حوضچه و پوشش شیشه‌ای آب شیرین کن، باعث بهبود بهره‌وری آن می‌شود. برای بالا نگه‌داشتن این اختلاف دما در آب شیرین کن پیشنهادی حاضر از کندانسورهای خارجی غیرفعال استفاده شده است. دیوار پشتی حوضچه دارای چهار سوراخ به قطر ۶ سانتی‌متر بوده که دو سوراخ پایینی ۵ سانتی‌متر از کف و دو سوراخ بالایی هم ۵ سانتی‌متر از پوشش شیشه‌ای فاصله دارند. دو کندانسور استوانه‌ای شکل از آهن گالوانیزه با ضخامت ۰.۴ میلی‌متر، قطر ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۴ سانتی‌متر ساخته شده است. کندانسورها به طور موازی در دیوار پشتی آب شیرین کن توسط اتصالی‌های گالوانیزه با قطر ۶ سانتی‌متر نصب گردیده و روی اتصال‌ها با فوم پلی‌اتیلن عایق شده است. شکل (۴) جریان نصب کندانسورها در بدنه آب شیرین کن را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نصب کندانسور به بدنه آب شیرین کن.

نحوه عملکرد دستگاه پیشنهادی

نحوه عملکرد آب شیرین کن پیشنهادی بدین صورت است که تابش خورشید از طریق پوشش شیشه‌ای شیب‌دار به داخل حوضچه نفوذ می‌کند و در داخل حوضچه به سمت کف، دیواره‌ها و لوله‌های مسی می‌تابد، در نتیجه مقداری از تابش به موم پارافین موجود در لوله‌های مسی و آب‌شور در کف جذب می‌شود که باعث شده آب‌شور به دمایی پایین‌تر از دمای جوش خود و دمایی بالاتر از دمای پوشش شیب‌دار برسد. سطح روی آب‌شور تبخیر شده و مخلوط از بخار و هوا سطح آب را ترک می‌کند؛ این مخلوط بخار و هوا دارای دمای بیشتر و چگالی کمتر نسبت به مخلوط آب و هوا در نزدیکی پوشش شیشه‌ای بوده و باعث ایجاد جریان جابه‌جایی در حوضچه می‌شود؛ کندانسورها باعث افزایش این جریان جابه‌جایی می‌گردند. چون دمای کندانسورها نسبت به دمای داخل حوضچه کمتر بوده باعث افزایش اختلاف دمایی بین پوشش شیشه‌ای و آب‌شور شده سرعت فرایند جابه‌جایی زیاد می‌شود. مخلوط بخار آب و هوا اشباعی که از سطح آب‌شور به سمت بالا حرکت کرده با تماس به پوشش شیشه‌ای که دمای پایین‌تری دارد خنک می‌شود. سپس به حالت مایع اشباع رسیده و چگالیده می‌شود. به‌صورت یک فیلم نازک روی پوشش شیشه‌ای تشکیل شده و به دلیل وجود شیب پوشش، به سمت پایین لغزیده و در نهایت به مخزن ذخیره آب شیرین می‌ریزد. همچنین مقداری از مخلوط آب و هوا که در جریان فرایند وارد کندانسورها شده است به مایع اشباع تبدیل شده از طریق لوله‌های خروجی به مخزن ذخیره منتقل می‌شود. با کاهش دمای آب‌شور حوضچه در زمان غروب آفتاب موم پارافین تغییر فاز داده و انرژی گرمایی ذخیره شده در آن آزاد می‌شود. این انرژی گرمایی از طریق لوله‌های مسی به آب‌شور جذب شده، شدت کاهش دمای آب‌شور را کمتر

کرده و در نتیجه باعث افزایش بازده آب شیرین کن می‌شود. شکل (۵) نمای کلی آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمای کلی آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی.

دستگاه‌های اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری دما از دو عدد دیتالاگر ۴ کاناله مدل TES-۱۳۸۴ استفاده شده است. در آزمایش‌ها دمای درون آب شور حوضچه‌ها، دمای داخلی پوشش شیشه‌ای هر دو آب شیرین کن، دمای لوله‌های مسی و دمای داخل کندانسورها در آب شیرین کن پیشنهادی توسط سنسورهای دما اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی کل از سولار متر مدل TES-۱۳۲ استفاده شده که سنسور این دستگاه اندازه‌گیری بر روی صفحه پوشش شیب‌دار نصب شده است. برای اندازه‌گیری شدت باد از بادسنج مدل AVM-۰۷ استفاده گردیده است. همچنین برای اندازه‌گیری میزان آب شیرین تولید شده آب شیرین کن‌ها از یک بشر آزمایشگاهی با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتری استفاده شده است. در جدول (۲) مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری.

شماره	دستگاه اندازه‌گیری	مدل	دقت دستگاه
۱	۲ دیتالاگر ۴ کاناله	TES-۱۳۸۴	۰.۱ (°C)
۲	سولار متر	TES-۱۳۲	۰.۱ - ۱ (w/m ²)
۳	بادسنج	AVM-۰۷	۰.۰۱ (m/s)
۴	کنداکتیو متر	AZ-۸۶۵۰۳	

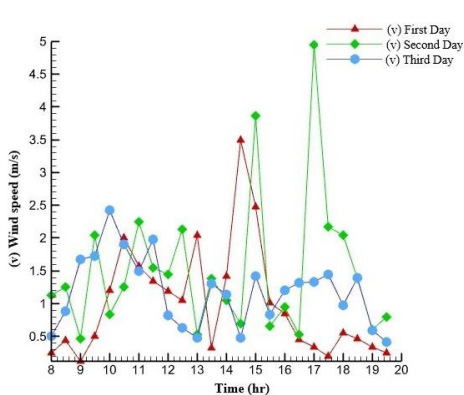
روش انجام آزمایش

به‌منظور بررسی عملکرد آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی، این دو آب شیرین کن در روزهای مختلفی از اردیبهشت ماه ۱۴۰۱، در پشت‌بام ساختمان دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. هر دو آب شیرین کن در محلی که در طول روز هیچ سایه‌ای بر روی آنها نبوده، آزمایش شده‌اند.

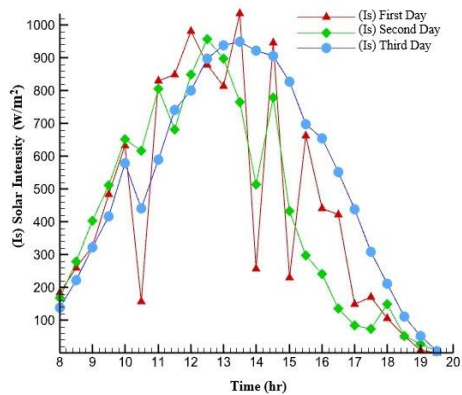
در این پژوهش بررسی عملکرد آب شیرین کن‌ها در دو مرحله انجام شده که مرحله اول شامل آزمایش‌های اولیه و مرحله دوم شامل آزمایش‌های اصلی می‌باشد. آزمایش‌های اولیه در دو روز، ۶ و ۷ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۱ انجام شده که هدف آن بررسی آب‌بندی آب شیرین کن‌ها، عملکرد سنسورها، دیتالاگرها و در نهایت اطمینان از عملکرد کلی هر دو آب شیرین کن بوده است. بعد از اتمام آزمایش‌های اولیه؛ آزمایش‌های اصلی آغاز شده و در سه روز ۸، ۱۵ و ۱۹ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۱ مصادف با ۲۸ آوریل، ۵ می و ۹ می، سال ۲۰۲۲ انجام شده است. روش آزمایش‌ها طوری بوده که هر دو آب شیرین کن با طلوع آفتاب شروع به کار کرده و از ساعت ۸ صبح تا ۱۹:۳۰ شب (از این ساعت به بعد دستگاه‌ها دیگر تولید آب شیرین نداشته‌اند) داده‌برداری انجام شده است و بازه زمانی ثبت هر داده ۳۰ دقیقه بوده، تمام آزمایش‌ها برای هر دو آب شیرین کن در ارتفاع ۱ سانتی‌متر آب حوضچه تنظیم شده است. برای هر سه روز آزمایش اثر شدت تابش خورشیدی کل، سرعت باد، دمای محیط، دمای کندانسورها و دمای لوله‌های مسی به طور مقایسه‌ای به کمک نمودارها ارزیابی شده و سپس نتایج هر روز آزمایش به صورت جداگانه بررسی گردیده و میزان عملکرد آب شیرین کن پیشنهادی با آب شیرین کن معمولی مقایسه شده است.

نتایج و بحث

شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نشان‌دهنده نمودار تغییرات شدت تابش خورشیدی کل و تغییرات سرعت باد در طول سه روز آزمایش هستند.

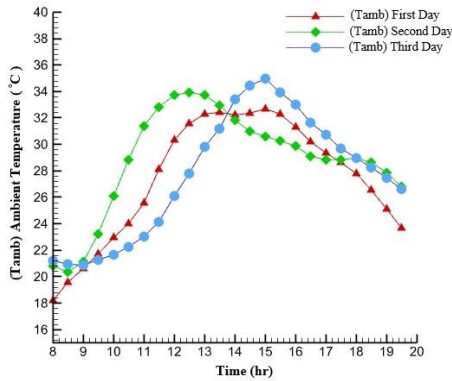


شکل ۷. سرعت باد در روزهای آزمایش.



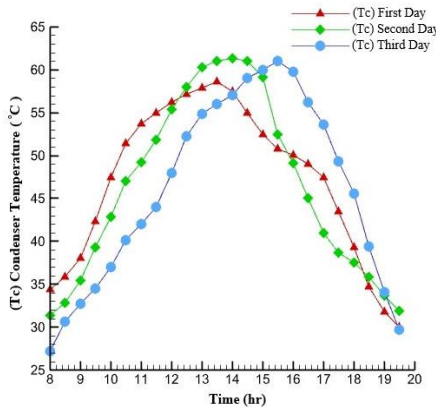
شکل ۶. شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایش.

با توجه به شکل (۶)، مشاهده می‌شود که بیشترین شدت تابش در آزمایش روز سوم بوده‌است؛ اما در آزمایش روزهای اول و دوم در بعضی ساعات روز کاهش تابش را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تغییرات دمای محیط در شکل (۸) آورده شده است.

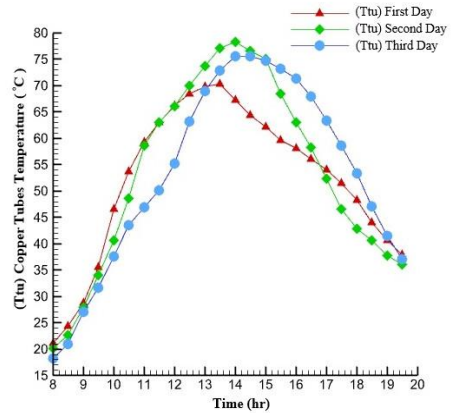


شکل ۸. دمای محیط در روزهای آزمایش.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات دما کندانسور و لوله‌ای مسی در جریان سه روز آزمایش است.



شکل ۹. دمای لوله‌های مسی در روزهای آزمایش.

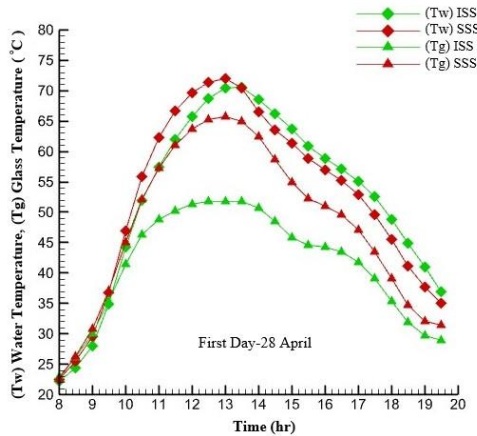


شکل ۱۰. دمای داخل کندانسورها در روزها آزمایش.

نمودارها در شکل (۹) و (۱۰) بیان می‌کنند که دمای داخل کندانسورها به مراتب کمتر از دمای لوله‌های مسی در حوضچه آب شیرین‌کن پیشنهادی است که دلیل آن عدم عایق کاری و عدم تابش خورشید بر کندانسورها می‌باشد. برای بررسی نتایج آزمایش روز اول، عملکرد آب شیرین‌کن پیشنهادی (ISS) و معمولی (SSS) به طور مقایسه‌ای بررسی گردیده است. شکل (۱۱) نمودارهای تغییرات دمای آب شور حوضچه و دمای پوشش شیشه‌ای هر دو آب شیرین‌کن را به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد.

¹ Improved solar still (proposed solar still)

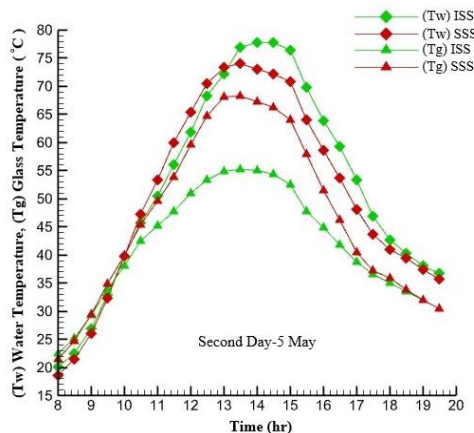
² Standard solar still (conventional solar still)



شکل ۱۱. تغییرات دمای آب حوضچه و شیشه (ISS) و (SSS) در آزمایش اول.

طوری که از شکل (۱۱) مشخص است، در این آزمایش بیشترین میزان دمای آب شور در حوضچه ۷۱.۷ و ۷۲.۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی است، همچنین بیشترین دمای پوشش شیشه‌ای ۵۳ و ۶۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی بوده که نشان‌دهنده ۱۲.۱ درجه سانتی‌گراد اختلاف دما بین آب شور حوضچه و پوشش شیشه‌ای در آب شیرین کن پیشنهادی نسبت به آب شیرین کن معمولی است. آب شیرین تولید شده از آب شیرین کن پیشنهادی و معمولی در پایان این آزمایش به ترتیب ۲.۶ و ۲.۸۳ لیتر بر مترمربع در روز بوده است.

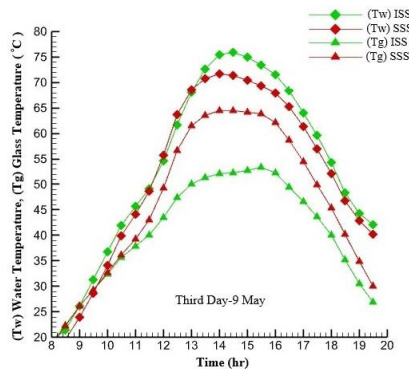
برای بررسی نتایج آزمایش روز دوم، عملکرد هر دو آب شیرین کن همانند آزمایش روز اول ارزیابی شده است. شکل (۱۲) نمودارهای تغییرات دمای آب شور حوضچه و دمای پوشش شیشه‌ای هر دو آب شیرین کن را به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تغییرات دمای آب حوضچه و شیشه (ISS) و (SSS) در آزمایش دوم.

همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، بیشترین دمای آب‌شور حوضچه برای آب شیرین‌کن پیشنهادی و آب شیرین‌کن معمولی به ترتیب ۷۷.۹ و ۷۴.۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نتیجه بررسی آزمایش روز دوم به دست آمده که در این آزمایش برعکس آزمایش روز اول بیشترین میزان دمای آب‌شور در آب شیرین‌کن پیشنهادی نسبتاً افزایش یافته است. همچنین میزان دما پوشش شیشه‌ای ۵۵.۳ و ۶۸.۶ سانتی‌گراد به ترتیب برای آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی بوده و بیشترین اختلاف دما بین پوشش شیشه‌ای و آب‌شور حوضچه در آب شیرین‌کن پیشنهادی ۱۶.۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به آب شیرین‌کن معمولی می‌باشد. میزان آب شیرین تولید شده ۲.۹۶ و ۳.۳۸ لیتر بر مترمربع در روز به ترتیب برای آب شیرین‌کن معمولی و پیشنهادی است.

به همین ترتیب بررسی نتایج آزمایش روز سوم همانند روزهای قبلی انجام شده است، طوری که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود بیشترین میزان دمای آب‌شور حوضچه ۷۶.۳ و ۷۲.۳ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی رسیده و همچنین میزان دما پوشش شیشه‌ای در ساعت ۱۴ بعدازظهر به بیش‌ترین حد رسیده که ۵۲.۵ و ۶۵.۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی می‌باشد. اختلاف دمای بین پوشش شیشه‌ای آب‌شور حوضچه در آب شیرین‌کن پیشنهادی ۱۶.۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دستگاه معمولی بوده و میزان آب تولید شده به ترتیب برای آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی ۳.۵۵ و ۳.۰۴ لیتر بر مترمربع در روز است.



شکل ۱۲. تغییرات دمای آب حوضچه و شیشه (ISS) و (SSS) در آزمایش سوم.

خلاصه نتایج آزمایش‌ها برای هر دو آب شیرین‌کن پیشنهادی و معمولی در جدول (۳) ذکر شده است. همان‌طوری که از جدول (۳) مشخص است در همه آزمایش‌ها آب شیرین‌کن پیشنهادی عملکرد بهتر نسبت به آب شیرین‌کن معمولی دارد و بیشترین افزایش بهره‌وری را در آب شیرین‌کن پیشنهادی ۱۷ درصد نسبت به آب شیرین‌کن معمولی نشان می‌دهد.

جدول ۳. عملکرد هر دو دستگاه در سه آزمایش.

آزمایش	میزان بهره‌وری (SSS) L/m ² -day	میزان بهره‌وری (ISS) L/m ² -day	حداکثر اختلاف دمای پوشش شیشه‌ای ISS نسبت به SSS (°c)	افزایش بهره‌وری در ISS (%)
اول	۲.۶	۲.۸۳	۱۲.۱	۱۱
دوم	۲.۹۶	۳.۳۸	۱۶.۸	۱۵
سوم	۳.۰۴	۳.۵۵	۱۶.۶	۱۷

عدم قطعیت در آزمایش‌ها

در انجام هر آزمایش خطا رخ می‌دهد. وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده و روش‌های به کار رفته منجر به درجاتی از خطا یا عدم دقت در اندازه‌گیری پارامترها می‌شوند. خطای کل شامل خطای بایاس و خطای آماری است. برای تعیین عدم قطعیت ابتدا باید میزان تغییرات پارامترهای مستقل مشخص شود. فرض کنید مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها به منظور (n) تعداد متغیرهای تجربی انجام شده است، از نتایج محاسبه شده برای آزمایش پارامتر R به دست می‌آید. بدین ترتیب:

$$r = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

اگر فرض شود ω_r عدم قطعیت در نتیجه و $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ عدم قطعیت در متغیرهای مستقل باشد، عدم قطعیت با توجه به معادله پیشنهادی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\omega_r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial x_1} \omega_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial x_2} \omega_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial x_n} \omega_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

در جدول (۴) تعیین مقدار میانگین عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده برای سه روز آزمایش بیان شده است.

جدول ۴. عدم قطعیت نسبی.

شماره	پارامتر اندازه‌گیری	میانگین عدم قطعیت (%)
۱	شدت تابش خورشید	۰.۰۲۴
۲	دمای آب حوضچه	۰.۲۱۹
۳	سرعت باد	۱.۳۶۴
۴	دما محیط	۰.۳۶۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش گردیده تا تأثیر ترکیبی از مواد تغییر فاز دهنده و کندانسور خارجی غیرفعال در آب شیرین‌کن‌های معمولی بررسی گردد. برای این کار یک دستگاه پیشنهادی با اضافه کردن کندانسورهای خارجی و موم پارافین در لوله‌های مسی از یک آب شیرین‌کن معمولی طراحی و ساخته شده است. با توجه به نمودارهای به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- آب شیرین‌کن پیشنهادی در تمام آزمایش‌ها عملکرد بهتر نسبت به آب شیرین‌کن معمولی دارد.
- با مطالعه پیشینه تحقیق در مورد آب شیرین‌کن‌های کندانسور دار ثابت شده که کندانسورها با وجود آن که اختلاف دما بین پوشش شیشه‌ای و آب شور حوضچه را افزایش می‌دهند، میزان دما آب شور حوضچه را نیز کاهش می‌دهند که این کاهش دما باعث کم‌شدن بهره‌وری روزانه آب شیرین‌کن‌های کندانسور دار می‌شود.
- در این پژوهش نتیجه قابل توجهی که به دست آمده این است که علاوه بر افزایش اختلاف دما پوشش شیشه‌ای و آب شور، برعکس مطالعات قبلی میزان دمای آب شور در حوضچه نیز افزایش یافته و این افزایش دما تا پایان آزمایش‌ها (بعد از غروب آفتاب) ادامه داشته که یگانه علت آن موجودیت موم پارافین در حوضچه آب شیرین‌کن بوده است، چون موم پارافین موجود در لوله‌های مسی در زمان غروب آفتاب تغییر فاز داده و انرژی

گرمای ذخیره آن به آب شور منتقل می شود این امر باعث شده تا از کاهش سریع دما آب شور جلوگیری گردیده و میزان بهره‌وری روزانه افزایش یابد.

– میزان غلظت آب شور قبل از آزمایش‌ها ۲۱۷۶ ppm بوده که بعد از شیرین‌سازی توسط آب شیرین‌کن به ۴۴.۳۵ ppm رسیده است.

فهرست علائم

Is – شدت تابش خورشیدی

ISS - آب شیرین‌کن پیشنهادی (بهبود یافته)

SSS - آب شیرین‌کن معمولی

Tamb – دمای محیط

Tc – دمای کندانسور

Tg - دمای پوشش شیشه‌ای

Ttu – دمای لوله‌های مسی

Tw - دمای آب شور

v – سرعت باد

References

- [1] Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Eisa, A. (2019). Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still. *Renewable Energy*, 132, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.147>
- [2] United Nations World Water Assessment Programme. (2018). *The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water*. Unesco. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
- [3] Tiwari, G. N., & Sahota, L. (2017). *Advanced solar-distillation systems: Basic Principles, Thermal Modeling, and Its Application*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4672-8>
- [4] Alshail, K. (2020). *Analysis of solar energy in desalination plants in Saudi Arabia* [PhD, University of Granada]. Granada, Spain. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/63503>
- [5] Bazargan, M., & Ahmadi Ali Beiglooei, M. (2014). Production of fresh water using underground cooling of moist air and solar energy. *Journal of Renewable and New Energy*, 1(1), 4-15. https://www.jrenew.ir/article_49017.html?lang=en
- [6] Mollahosseini, A., Abdelrasoul, A., Sheibany, S., Amini, M., & Salestan, S. K. (2019). Renewable energy-driven desalination opportunities - A case study. *Journal of environmental management*, 239, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.044>
- [7] Shalaby, S. M., Kabeel, A. E., & El-Bialy, E. (2019). Investigation and Improvement of the Humidification–Dehumidification Solar Water Desalination System Implemented Wick as Packing Material. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142(1), 1-26. <https://doi.org/10.1115/1.4044578>
- [8] Armstrong, P. (2021). *Solar humidifier in a humidification-dehumidification type desalination system*. (United States Patent No. US10981805B2). Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US10981805B2/en>

- [9] Bagheri Esfa, H., Rostamzadeh, R., & Rostamzadeh, M. (2019). Investigation of different solar water desalination systems. *Mechanical Engineering*, 28(1), 24-34. https://mm.ep.isme.ir/article_35743.html
- [10] Selvaraj, K., & Natarajan, A. (2018). Factors influencing the performance and productivity of solar stills - A review. *Desalination*, 435, 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.031>
- [11] Alwan, N. T., Shcheklein, S., & Ali, O. (2021). Investigation of the coefficient of heat transfer and daily cumulative production in a single-slope solar distiller at different water depths. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(21), 2820-2837. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1842561>
- [12] Negi, P., Dobriyal, R., Singh, D. B., & Badhotiya, G. K. (2021). A review on passive and active solar still using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, 46(20), 10433-10438. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.996>
- [13] Omara, A. A. M., Abuelnuor, A. A. A., Mohammed, H. A., & Khiadani, M. (2019). Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(3), 1585-1617. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08645-3>
- [14] Sonker, V. K., Chakraborty, J. P., Sarkar, A., & Singh, R. K. (2019). Solar distillation using three different phase change materials stored in a copper cylinder. *Energy Reports*, 5, 1532-1542. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.023>
- [15] Sathish Kumar, T. R., Jegadheeswaran, S., & Chandramohan, P. (2018). Performance investigation on fin type solar still with paraffin wax as energy storage media. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7882-7>
- [16] Behura, A., & Gupta, H. K. (2021). Use of nanoparticle-embedded phase change material in solar still for productivity enhancement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3904-3907. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.285>
- [17] Kabeel, A., Omara, Z., Essa, F., & Abdullah, A. (2016). Solar still with condenser—A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 839-857. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.020>
- [18] Mohaisen, H. S., Esfahani, J. A., & Ayani, M. B. (2021). Improvement in the performance and cost of passive solar stills using a finned-wall/built-in condenser: An experimental study. *Renewable Energy*, 168(1), 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.056>
- [19] Hassan, H., & Abo-Elfadl, S. (2017). Effect of the condenser type and the medium of the saline water on the performance of the solar still in hot climate conditions. *Desalination*, 417, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.014>
- [20] Rahmani, A., Khemmar, F., & Saadi, Z. (2021). Experimental investigation on the negative effect of the external condenser on the conventional solar still performance. *Desalination*, 501, 114914. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114914>
- [21] Mevada, D., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2021). Investigation on evacuated tubes coupled solar still with condenser and fins: Experimental, exergo-economic and exergo-environment analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27(6), 101217. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101217>
- [22] Panchal, H., & Sathyamurthy, R. (2017). Experimental analysis of single-basin solar still with porous fins. *International Journal of Ambient Energy*, 41(5), 563-569. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1360206>