



Investigation of the Effect of Parameters Related to the Absorbent Fabric on the Performance of The Stepped Solar Still Using the Taguchi Method

M. Khalili^{1,2*}, M. Taheri^{1,2}, H. Hooshangi¹, F. Shakeri¹, A. R. Tahmasbi¹

¹ Department of Engineering, Arak University, Arak, Iran

² Institute of Advanced Technology, Arak University, Arak, Iran

ABSTRACT: Providing fresh water has been one of the most important concerns of mankind and various methods have been used to solve this concern. In this regard, one of the simplest devices is the stepped solar still. In this research, the effect of using fabric as an absorbent material and its related parameters on the amount of freshwater production has been investigated experimentally. In this regard, stepped solar still has been built and the parameters related to the fabric and their interactions have been tested. These parameters were: type, color, number of layers, and the angle of the fabric relative to the surface of the steps, as well as the height of the water weir in each step. The experiments were designed using the Taguchi method. Among the examined parameters, the color and the material of the fabric have been identified as the most effective factors in increasing the volume of produced fresh water. The results showed that the maximum water production during the day was 2790 ml/m² using black cotton fabric in three layers with an angle of 90 degrees relative to the steps' surface and a water weir height of 1 cm.

Review History:

Received: Jul. 23, 2022

Revised: Jan. 31, 2023

Accepted: Feb. 07, 2023

Available Online: Feb. 15, 2023

Keywords:

Stepped solar still

increasing desalination efficiency

absorbent fabric

design of experiment

Taguchi method

1- Introduction

There are many ways to distill salt water and produce fresh water. Furthermore, many devices have been created and used in this field. The stepped solar still is one of the most common devices in this field. El-Agouz [1] investigated and compared the stepped solar still device with the conventional type. As a result of investigating the effect of installing a storage tank and black cloth on the efficiency of distillation on the stepped solar still device, he has found that the yield of the modified device is 20% higher than the normal type.

Xiao et al. [2] have presented a new type of stepped solar still with a channel under the fixed basin of the device in order to increase the amount of heat transfer and have investigated the effects of this channel on the efficiency of fresh water. Their results showed that when the depth of the channel is equal to 1 cm, the heat transfer rate from the surface of the stairs of the device to the water is improved by 44%, and as a result, the average temperature of the salt water inside the device and the overall extraction rate of the device have respectively improved up to 16.4% and 51.7%.

Kabeel et al. [3] investigated the use of a wick on the sides of each stair of a stepped solar still to increase water extraction. The results showed that the use of the wick increased the efficiency of the device by 53% at a cost of

\$0.039 per liter of water. Alaudeen et al. [4] investigated the effect of various variables of the stepped solar still. The topics investigated by them were the use of heat storage materials as well as wicks. The results have shown that the use of pebbles as a heat storage material as well as the use of wick have increased the rate of evaporation and water extraction from the device.

In the conducted research, the effect of variables such as the use of absorbent materials, heat storage materials, the installation of internal and external reflectors, etc., on the increase of water extraction from solar stills has been studied. The investigation of these variables has been done in order to increase the water temperature, increase the distillation rate, reduce costs, and generally with the main goal of improving the performance of the solar still. In the current research, the fabric is used as a cheap and available absorbent material, and its related parameters have been investigated to improve the performance of the device as an innovation. The fabrics used in this research were cotton, dense fustian, and polyester fustian. The studied parameters were: type of fabric, color of fabric, number of layers of fabric, angle of fabric relative to the surface of the stairs, and height of water weir. Another innovation of this research was to examine all five parameters simultaneously.

*Corresponding author's email: m-khalili@araku.ac.ir



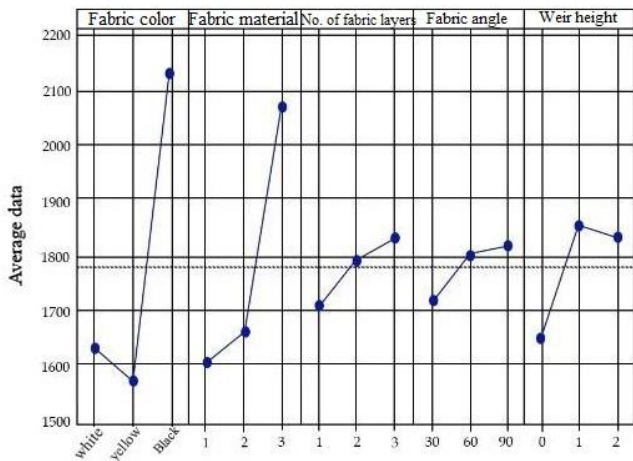


Fig. 1. The graph of the average effect of variables on the amount of produced water in the experiments

2- Methodology

In this research, a stepped solar still similar to the dimensions and sizes of other researchers has been manufactured, and by conducting various experimental tests on it in Arak city in the months of June and July, the effect of using fabric on the performance and amount of fresh water production has been investigated. Finally, in order to obtain the regression equations related to the amount of water production according to the experiment variables, statistical and theoretical work has been done.

3- Results and Discussion

Following the experiments, the results were analyzed. The effect of each of the five parameters on the amount of fresh water produced has been investigated using different methods, including the Manova test, regression analysis, and the Taguchi method. The results of the experiments showed that among the 3 types of fabrics, cotton, dense fustian, and polyester fustian had the highest water absorption, respectively. In terms of absorbing sunlight and heat, black is the most effective of the three fabric colors, followed by yellow and white. Also, the results have shown that with the increase in the number of fabric layers, more water remains in the stairs, so the amount of fresh water production in the device has increased. Another checked parameter was the fabric angle. Among the selected angles, the 90-degree angle had the highest efficiency in the device, and after that, 60 and 30 degrees have been effective in increasing the efficiency of the device. The height of the water weir was the final parameter considered, with the highest efficiency in the state with a weir height of 1 cm, then in the state with a weir height of 2 cm, and finally in the state without a water weir. The results of all experiments are summarized in Fig. 1.

4- Validation

In order to better compare the results and draw correct conclusions, in Fig. 2, the hourly average amount of water production per surface unit in the current research is

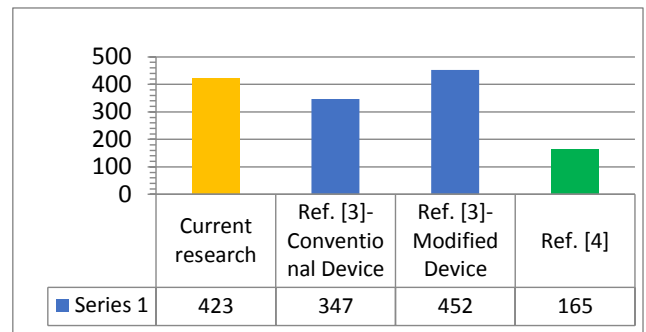


Fig. 2. Comparing the amount of hourly average of produced water in milliliters per square meter in this study with other similar research

compared with references [3] and [4]. As can be seen, the current research compared to the conventional device in reference [3] as well as the research done in reference [4] has achieved better results, and compared to the modified device in reference [3], there is only a 6% difference. Therefore, the results obtained in this research are appropriate and have an acceptable trend.

5- Conclusion

The results obtained from this research showed that the best type of absorbent fabric to be used in a stepped solar still was cotton, which has better water absorption due to its fiber type and the density of its texture. Also, black has performed better due to absorbing more energy than other investigated colors. In addition, when using more layers of absorbent fabric, the amount of water absorbed increased, and as a result, the output of fresh water was higher. Also, the maximum amount of water extraction during the day in various experiments from 10:00 a.m. to 16:00 p.m. was equal to 2790 ml/m², using three layers of black cotton fabric at an angle of 90 degrees with respect to the surface of the stairs and with 1 cm-high water weirs.

References

- [1] S. El-Agouz, Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation, Energy Conversion and Management, 86 (2014) 186-193.
- [2] L. Xiao, R. Shi, S.-Y. Wu, Z.-L. Chen, Performance study on a photovoltaic thermal (PV/T) stepped solar still with a bottom channel, Desalination, 471 (2019) 114129.
- [3] A. Kabeel, A. Khalil, Z. Omara, M. Younes, Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, Desalination, 289 (2012) 12-20.
- [4] A. Alaudeen, K. Johnson, P. Ganasundar, A.S. Abuthahir, K. Srithar, Study on stepped type basin in a solar still, Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26(2) (2014) 176-183.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Khalili, M. Taheri, H. Hooshangi, F. Shakeri, A. R. Tahmasbi, Investigation of the Effect of Parameters Related to the Absorbent Fabric on the Performance of The Stepped Solar Still Using the Taguchi Method, Amirkabir J. Mech Eng., 55(1) (2023) 7-10.

DOI: [10.22060/mej.2023.21619.7477](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21619.7477)





بررسی تأثیر متغیرهای مرتبط با پارچه جاذب بر عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از روش تاگوچی

محمد خلیلی^{۱*}، معین طاهری^{۱،۲}، حسن هوشنگی^۱، فائزه شاکری^۱، امیررضا طهماسبی^۱

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
۲- پژوهشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

کلمات کلیدی:

آب شیرین کن خورشیدی پلکانی
افزایش استحصال شیرین‌سازی
پارچه جاذب
طراحی آزمایش
روش تاگوچی

خلاصه: تأمین آب شیرین همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر بوده و روش‌های مختلفی برای رفع این دغدغه مورد استفاده قرار گرفته است. از ساده‌ترین دستگاه‌های ساخته شده تصفیه آب شور به کمک انرژی خورشید، دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی است. در این پژوهش به بررسی تجربی تأثیر استفاده از پارچه به‌عنوان ماده جاذب و متغیرهای مربوط به آن بر میزان تولید آب شیرین پرداخته شده است. در این راستا یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساخته شده و متغیرهای مرتبط با پارچه و برهمکنش آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفته است. متغیرهای بررسی شده در آزمایش عبارت‌اند از: جنس پارچه، رنگ پارچه، تعداد لایه‌های پارچه در سطح پلکان دستگاه، زاویه پارچه نسبت به سطح پلکان و ارتفاع سرریز آب در هر پله. طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی انجام گرفته است. از میان متغیرهای بررسی شده، رنگ و جنس پارچه به‌عنوان مؤثرترین عوامل بر افزایش حجم آب شیرین مشخص شده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین استحصال آب در طول روز به میزان ۲۷۹۰ میلی‌لیتر بر مترمربع با استفاده از پارچه از جنس تنظیف سیاه در سه لایه و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح پله و همچنین با ارتفاع سرریز آب ۱ سانتی‌متر بوده است.

۱- مقدمه

الاغوز [۱] به بررسی و مقایسه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با نمونه معمولی پرداخته است. وی در نتیجه بررسی تأثیر نصب مخزن ذخیره و پارچه سیاه بر بهره‌وری تقطیر بر روی دستگاه آب شیرین کن پلکانی دریافته است که استحصال آب شیرین کن خورشیدی پلکانی اصلاح شده ۲۰ درصد بیشتر از نمونه معمولی است. جائر و گانسان [۲] به بررسی استفاده از شن و ماسه، قطعات بتنی و آجری به عنوان مواد ذخیره‌کننده گرما بر عملکرد دستگاه خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. آزمایش در ابتدا بدون هیچ ماده ذخیره‌کننده گرما و سپس با شن و ماسه و قطعات بتنی و آجری برای استفاده از انرژی خورشید در ساعات شب انجام شده است. در این تحقیق بیشترین استحصال دستگاه به میزان ۲۸/۲۷ درصد با استفاده از قطعات بتنی بدست آمده که ۱۱/۶ درصد بیشتر از قطعات آجری بوده است. پنچال و همکاران [۳] از نانوذره منیزیم اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید در غلظت‌های متغیر از ۰/۱ تا ۰/۲ برای ارزیابی خروجی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی استفاده کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که

یکی از مهم‌ترین مسائل برای بشر از ابتدای تاریخ تا به امروز به‌دست‌آوردن آب شیرین برای مصارفی همچون پختن غذا، آشامیدن و کشاورزی بوده است. برای رفع این نیاز و پیدا کردن آب مناسب و کافی، گاهی انسان‌ها مجبور به سفر به مناطق دیگر می‌شدند. مسئله کمبود آب شیرین باعث شد که بشر به دنبال یافتن راهی برای تبدیل آب شور به آب شیرین باشد. با پیشرفت علم، روش‌های متعددی برای تولید آب شیرین مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها استفاده از دستگاه‌های آب شیرین کن خورشیدی پلکانی است. محققین بسیاری به بررسی متغیرها و عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد دستگاه پرداخته‌اند. یکی از این متغیرها استفاده از ماده جاذب در سطح پلکان دستگاه بوده است. در ادامه با مطالعه برخی تحقیقات پیشین به بررسی میزان تأثیر ماده جاذب در استحصال دستگاه، انواع مواد جاذب و دلایل استفاده از آن‌ها در دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی پرداخته شده است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m-khalili@araku.ac.ir

بوده است. به علاوه استحصال روزانه دستگاه بین ۲۸/۳۳ و ۲۹/۵ درصد در زمان آزمایش متغیر بوده است.

دیگر متغیر مهم و تأثیرگذار بر عملکرد دستگاه میزان عمق آب در سطح هر پله است. میزان این متغیر به سادگی قابل کنترل بوده و اهمیت آن در افزایش دما و سرعت تبخیر بسیار قابل توجه است. پژوهش‌های زیر به اهمیت این متغیر اشاره داشته‌اند.

نوگر یا و همکاران [۸] در یک تحقیق نظری و با بررسی سایر پژوهش‌ها عوامل مؤثر بر خروجی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بر اساس نتایج مطالعه آن‌ها کاهش عمق آب شور به دلیل افزایش دما باعث افزایش بهره‌وری دستگاه شده است. همچنین استفاده از اسفنج، سنگ‌ریزه، فتیله و جاذب مشکی در سطح پلکان باعث افزایش استحصال دستگاه گشته است. هزینه تخمینی برای تقطیر ۱ لیتر آب شور در دستگاه‌های مختلف آب‌شیرین‌کن پلکانی از ۰/۱۵ تا ۰/۳۲ دلار و در دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن مختلف تک حوضچه‌ای از ۰/۰۲ تا ۰/۴۳ دلار متغیر بوده است.

ژیاو و همکاران [۹] نوع جدیدی از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با یک کانال در زیر پایه ثابت با هدف افزایش انتقال حرارت ارائه داده‌اند و اثرات این کانال را بر بهره‌وری تولید آب شیرین بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد زمانی که عمق کانال برابر با ۱ سانتی‌متر باشد، نرخ انتقال حرارت از سطح پلکان دستگاه به آب تا ۴۴ درصد بهبود یافته و در نتیجه میانگین دمای آب شور درون دستگاه تا ۱۶/۴ درصد و همچنین میزان استحصال کلی دستگاه تا ۵۱/۷ درصد بهبود یافته است.

استفاده از آینه به عنوان بازتابنده نور خورشید در سطح پلکان دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و باهدف افزایش دمای دستگاه نیز یکی دیگر از نوآوری‌ها در تحقیقات بوده است. عمرا و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی عملکرد سیستم نمک‌زدایی، به مقایسه بین دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با بازتابنده‌های داخلی و به ارتفاع ۵ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر و دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی معمولی با همان ابعاد در شرایط آب‌وهوایی یکسان پرداخته‌اند. در این پژوهش، تأثیر نصب آینه بازتابی در دیوار عمودی پله‌های ثابت بر بهره‌وری تقطیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که در طول آزمایش بهره‌وری دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی اصلاح شده همراه با بازتابنده داخلی تا ۵۶ درصد بیشتر از دستگاه‌های معمولی است.

ساتون و همکاران [۱۱] یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با

استفاده از نانوذرات باعث افزایش استحصال دستگاه تا حدود ۴۵/۸ درصد گشته است. همچنین تقطیر آب به هنگام استفاده از نانوذرات منیزیم اکسید نسبت به تیتانیوم دی‌اکسید، به علت کاهش ظرفیت حرارتی ویژه و هدایت حرارتی بالا بیشتر بوده است.

فیاض و همکاران [۴] اثر ذرات فلزی تیتانیوم و آلومینیوم را بر دمای سطح پلکان دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها ذرات تیتانیوم با غلظت‌های متفاوت و با رنگ سیاه را مخلوط کرده و از آن در سطح پلکان دستگاه استفاده نموده‌اند. آن‌ها سپس به شناسایی فاز پودر و ویژگی‌های جذب نور با استفاده از طیف سنجی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که بالاترین دمای درون دستگاه ۱۰۰/۳۹ درجه سانتی‌گراد در ۱۰۰۰ مترمکعب آب بوده است که با ۷ درصد تیتانیوم در رنگ سیاه حاصل گشته است. این مقدار ۱۱/۸۷ درصد بیشتر از حالت استفاده از آلومینیوم در سطح پلکان دستگاه و ۵۴/۳۵ درصد نیز بیشتر از حالتی بود که در سطح پلکان از هیچ ماده جاذبی استفاده نگردیده است.

الشیخ و همکاران [۵] یک مطالعه جامع بر روی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی انجام داده‌اند و در آن، عمق آب را به حداقل رسانده‌اند. آن‌ها از موم پارافین مخلوط با نانوذرات آلومینیوم اکسید در کف دستگاه استفاده کرده‌اند. این مسئله بر بهبود عملکرد دستگاه به مقدار ۱۲۸ درصد نسبت به نمونه‌های معمولی تأثیر داشته است.

دیواگر و همکاران [۶] به مطالعه تأثیر استفاده از پودرهای مغناطیسی مانند اکسید آهن سیاه بر روی سطح دستگاه، بر افزایش جذب تابش نور خورشید پرداخته‌اند. پودر اکسید آهن سیاه به‌طور همزمان به عنوان یک ماده ذخیره حرارت خورشید در ساعت‌های اوج تابش و همچنین به صورت یک محیط متخلخل برای حفظ آب در سطح پلکان دستگاه عمل می‌کند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نرخ تبخیر و همچنین جریان همرفتی گرما با استفاده از پودر اکسید آهن سیاه افزایش یافته است.

جنس سطح پلکان دستگاه نیز تأثیر بسزایی در جذب گرما و میزان انتقال حرارت تابشی و همرفتی دارد. در این زمینه پژوهش‌هایی توسط محققین مختلف انجام شده است. از جمله، ابوجزر و همکاران [۷] به ارزیابی کارایی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با صفحه جاذب از جنس مس پرداخته‌اند. متغیرهای بررسی شده در پژوهش آن‌ها ضرایب انتقال حرارت همرفتی، تبخیری، تابشی و همچنین میزان تقطیر آب در هر ساعت بوده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که حداکثر بهره‌وری برای دستگاه خورشیدی پلکانی شیب‌دار در حالت تجربی تقریباً ۱۰۰ میلی‌لیتر بیشتر از حالت معمولی

افزایش داده است. در آزمایش آن‌ها، آهنگ جریان آب ۰/۰۶۸ کیلوگرم بر دقیقه گزارش شده است.

کابیل و همکاران [۱۶] به مطالعه تجربی باهدف افزایش بهره‌وری آب تقطیر شده در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. آن‌ها برای دستیابی به آب شیرین در تمامی بیست و چهار ساعت، از آب گرم‌کن برقی تغذیه شونده از باتری خورشیدی استفاده کرده تا آب حوضچه را در شب و در ساعات اولیه صبح گرم کند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استحصال دستگاه در طول ۲۴ ساعت به مقدار ۱۵۹/۳ تا ۱۷۷/۹ درصد در مقایسه با دستگاه معمولی بیشتر بوده و همچنین راندمان دستگاه با نمک‌زدایی مداوم آب بین ۳/۳۱ تا ۹/۲۷ درصد بوده است.

همچنین برخی از محققین به بررسی اثر متغیرهای نوین دیگری نظیر استفاده از فتیله^۱ و جریان خنک‌کن هوا به دو صورت تجربی و نظری در محاسبه میزان استحصال دستگاه پرداخته‌اند که به طور خلاصه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. کابیل و همکاران [۱۷] به بررسی استفاده از فتیله در یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی به عمق ۵ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر پرداخته‌اند. آن‌ها برای افزایش استحصال از فتیله‌ای در طرفین هر پله استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از فتیله راندمان دستگاه را به مقدار ۵۳ درصد و با هزینه ۰/۰۳۹ دلار به ازای هر لیتر آب افزایش داده است.

علاءالدین و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. موضوعات بررسی شده توسط آن‌ها، استفاده از مواد ذخیره‌ساز گرما و همچنین فتیله‌ها بوده است. نتایج نشان داده است که استفاده از سنگ‌ریزه به‌عنوان ماده ذخیره‌ساز گرما و همچنین بهره بردن از فتیله‌ها باعث افزایش نرخ تبخیر و استحصال دستگاه شده است.

ال‌سبایی و ال‌بیالی [۱۹] به بررسی انواع دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارای تک حوضچه، دو حوضچه و دیگر موارد پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که بهره‌وری روزانه در آب‌شیرین‌کن خورشیدی دو حوضچه‌ای بیشتر از نوع تک حوضچه‌ای ثابت و آب‌شیرین‌کن خورشیدی سه حوضچه عملکرد بهتری نسبت به دو حوضچه و تک حوضچه‌ای داشته است. همچنین با بررسی بر روی جریان خنک‌کننده هوا، به این نتیجه رسیدند که با جریان خنک‌کننده هوا تولید افزایش یافته است. همچنین سعدی و همکاران [۲۰] چند پله داخلی در دیوار پشتی آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای تعبیه

دیوارهای دارای بازتابنده داخلی طراحی کرده‌اند و مجموعه‌ای از لوله‌های خلأ را مورد بررسی قرار داده‌اند. متغیرهای بررسی شده در این آزمایش حجم آب مقطر، حجم آب شور درون دستگاه و میزان تابش نور خورشید بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که در یک روز آفتابی با میزان تابش نور ۱۹/۹۳ مگاژول بر مترمربع، میزان آب تقطیر شده در سطح دستگاه ۵۶۹۰ سانتی‌مترمکعب بر مترمربع و در یک روز ابری با میزان تابش نور ۱۲/۶۳ مگاژول بر مترمربع، میزان آب تقطیر شده در سطح دستگاه ۳۶۴۸ سانتی‌مترمکعب بر مترمربع بوده است. آن‌ها ثابت کردند که عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی حاوی لوله‌های خلأ و بازتابنده داخلی نسبت به نمونه معمولی بهتر است.

عبدالله و همکاران [۱۲] به مطالعه برای بهبود عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. آن‌ها متغیرهایی نظیر نصب آینه بازتابنده در ضلع‌های داخلی و اضافه نمودن پلکان به حوضچه دستگاه را بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نصب آینه‌های بازتابنده عملکرد حرارتی دستگاه را تا ۳۰ درصد و اضافه کردن پلکان به حوضچه دستگاه عملکرد حرارتی دستگاه را تا ۱۸۰ درصد بهبود بخشیده است.

مفتح و همکاران [۱۳] یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی به همراه بازتابنده‌های داخلی و خارجی و کندانسورهای خارجی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار استحصال دستگاه از ۶/۹ کیلوگرم بر مترمربع در دستگاه معمولی به ۸/۹ کیلوگرم بر مترمربع در دستگاه اصلاح شده، افزایش یافته است.

استفاده از صفحات و جمع‌کننده‌های خورشیدی نیز در کارهای محققان به‌منظور افزایش استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مورد اشاره قرار گرفته است. از جمله، مانچاندا و کومار [۱۴] به بررسی تقطیر در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با جمع‌کننده‌های حرارتی و سلول خورشیدی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد دستگاه خورشیدی پلکانی بهبودیافته، میزان تقطیر را تا ۲۰ لیتر در روز افزایش داده و از نظر اقتصادی نیز جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های شیرین کردن آب است. همچنین نارویی و همکاران [۱۵] عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی که به سلول‌های خورشیدی و جمع‌کننده حرارتی مجهز بوده است را به‌صورت عددی و تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که مقدار مطلوبی برای مساحت جمع‌کننده آب و میزان جریان آب شور وجود داشته که استحصال انرژی را به حداکثر می‌رساند. علاوه بر این، اتصال جمع‌کننده آب به دستگاه خورشیدی پلکانی میزان انرژی و بهره‌وری آب شیرین را

کرده‌اند. این کار باعث افزایش بهره‌وری دستگاه در مقایسه با نمونه معمولی شده است.

بوزید و همکاران [۲۱] به بررسی نظری دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. آن‌ها یک مدل ریاضی و تحلیل حرارتی برای ارزیابی دمای سطوح، دمای آب‌شور و دمای حوضچه به روش صریح اویلر به دست آورده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی از نوع معمولی استحصال بالاتری داشته است.

السمدونی و همکاران [۲۲] در پژوهشی به تحلیل نظری نرخ انتقال حرارت تشعشی در داخل دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. آن‌ها ضریب تشعشع بین آب شور و شیشه سطح دستگاه را محاسبه نموده و تأثیر آن را به صورت کیفی و کمی مورد بررسی قرار داده‌اند. زاویه شیب شیشه در پژوهش بررسی شده از ۱۰ تا ۷۰ درجه و میزان تابش خورشید از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر متر مربع بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که تأثیر ضریب شکل تشعشع بر پیش‌بینی عملکرد حرارتی مؤثر بوده و در حالت بیشترین زاویه شیب یعنی ۷۰ درجه و کمترین تابش یعنی ۲۰۰ وات بر متر مربع استحصال دستگاه تا ۱۸/۸ درصد افزایش یافته است.

حمدو و عبداللطیف [۲۳] به بررسی روشی برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. آن‌ها آب شور را به کمک یک منبع گرمایی گرم کرده و وارد دستگاه نموده‌اند. آن‌ها به کمک مدل‌سازی، ضرایب انتقال حرارت و شار گرمایی تبخیر را به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی به دست آورده‌اند. مدل به دست آمده امکان در نظر گرفتن اثرات سیال گرم شده، دمای ورودی، عمق آب دستگاه و رطوبت دستگاه را فراهم می‌نماید. جدول ۱ به طور مختصر نتایج پژوهش‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در پژوهش‌های صورت‌گرفته به بررسی اثر متغیرهایی مانند استفاده از مواد جاذب، مواد ذخیره‌ساز گرما، نصب بازتابنده‌های داخلی و خارجی و ... بر افزایش استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته شده است. بررسی این متغیرها به منظور افزایش دمای آب، افزایش سرعت تقطیر، کاهش هزینه‌ها و به‌طور کلی باهدف اصلی بهبود عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی انجام‌گرفته است. در پژوهش حاضر از پارچه به‌عنوان ماده جاذب برای بالابردن بهره‌وری دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده گردیده که در سایر پژوهش‌ها کمتر مورد توجه بوده است. پارچه در مقایسه با مواد متخلخل دیگر از جمله فتیله که توسط سایر محققین مورد استفاده بوده است، ارزان‌تر و در دسترس بوده و تعبیه و تعویض آن در دستگاه نیز آسان است.

در این تحقیق که در شهر اراک و در ماه خرداد صورت‌گرفته سعی شده تا تأثیر استفاده از پارچه به‌عنوان ماده جاذب گرما و آب و همچنین متغیرهای مرتبط با آن شامل: جنس پارچه، رنگ پارچه، تعداد لایه‌های پارچه در سطح پلکان، زاویه پارچه نسبت به سطح پله و همچنین ارتفاع سرریز بر روی میزان استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد.

۲- توصیف سیستم

۲-۱- طرز کار دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی

امروزه روش‌های بسیاری برای تقطیر آب شور و تولید آب شیرین وجود دارد. همچنین دستگاه‌های زیادی نیز در این زمینه ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی یکی از دستگاه‌های رایج در این زمینه است. اساس کار این دستگاه دو پدیده تبخیر و میعان است و افزایش بهره‌وری در دستگاه نیز به‌وسیله بهبود شرایط تبخیر و میعان صورت می‌گیرد. طرز کار دستگاه به این صورت است که در ابتدا آب شور از مخزن بالای دستگاه وارد پله اول شده و برای افزایش سطح تبخیر به‌صورت مارپیچ تا انتهای پله آخر حرکت می‌کند. نور آفتاب باعث افزایش دمای سیستم و به‌تبع آن تبخیر آب شور و تولید آب شیرین می‌شود. بخار آب تولید شده، با برخورد به شیشه روی دستگاه، تقطیر شده و به مخزن آب شیرین هدایت می‌شود آب شور نیز از سطح پله خارج شده و باز به ابتدای چرخه برمی‌گردد. در این میان، متغیرها و روش‌های بسیاری برای بالابردن سطح تبخیر و یا سرعت میعان وجود دارند تا حجم آب شیرین تولید شده دستگاه را افزایش دهند.

۲-۲- شرح دستگاه آزمایش

در این پژوهش، یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی توسط محققین در دانشگاه اراک ساخته شده و آزمایش‌ها نیز در همان مکان انجام شده است. طرح‌واره‌ای از ساختار کلی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات ظاهری این دستگاه عبارت‌اند از: ۱۱ پله با ابعادی به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر، از جنس ورق گالوانیزه که به علت مقاومت در برابر خوردگی و رسانایی گرمایی بالا و هزینه مقرون‌به‌صرفه آن استفاده شده، یک مخزن جهت تخلیه آب تقطیر شده، یک مخزن آب شور در بالای دستگاه و یک شیشه سکوریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر. در جدول ۲ خصوصیات ابعادی دستگاه نشان داده شده است. همچنین شکل ۲ تصویری واقعی از دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته (ادامه دارد)

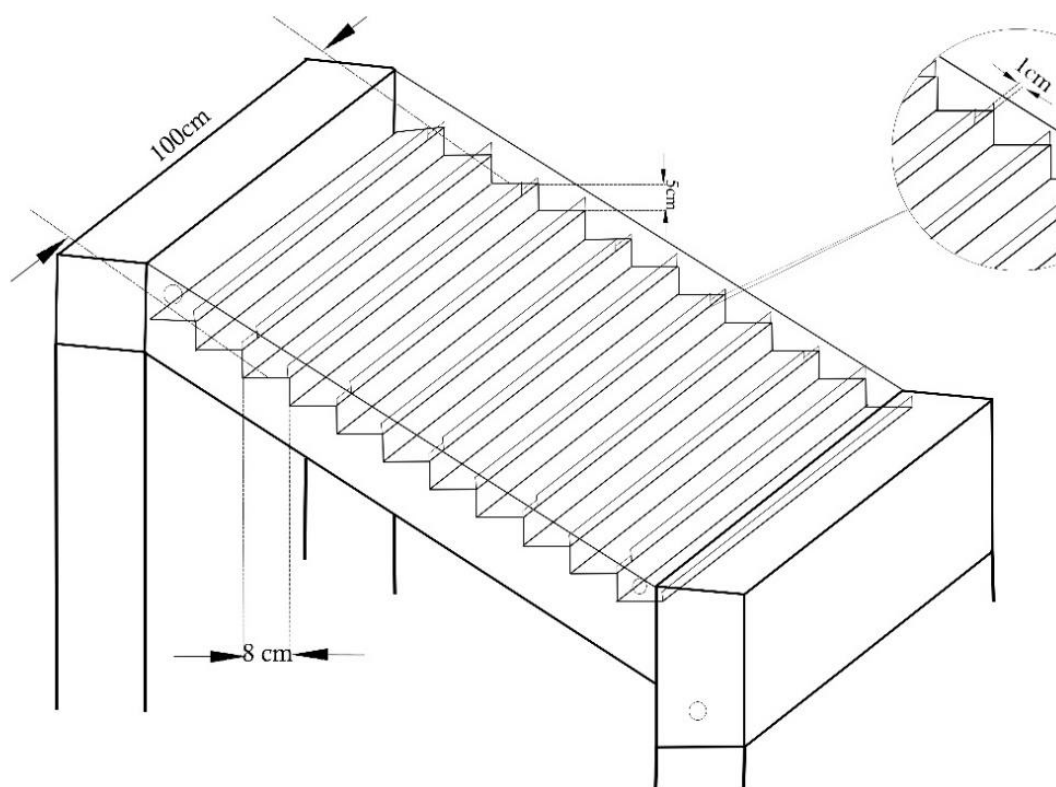
Table 1. Summarizing the results of past research (Continued)

نتیجه	نویسندگان	سال
افزایش ۲۰ درصدی استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن پلکانی با استفاده از نصب مخزن ذخیره و پارچه سیاه.	الاعوز [۱]	۲۰۱۴
افزایش استحصال دستگاه به کمک قطعات بتنی و آجری به‌عنوان ماده جاذب تا ۲۸/۲۷ درصد که بازده با قطعات بتنی به مقدار ۱۱/۶ درصد بیشتر از قطعات آجری بوده است.	جاثر و گانسان [۲]	۲۰۲۲
افزایش استحصال دستگاه به کمک نانوذرات در غلظت‌های متغیر تا ۴۵/۸ درصد.	پنچال و همکاران [۳]	۲۰۱۹
استفاده از نانوذرات تیتانیوم منجر به افزایش ۱۱/۸۷ درصدی دستگاه نسبت به استفاده از نانوذرات آلومینیوم در سطح دستگاه و همچنین افزایش ۵۴/۳۵ درصدی نسبت به حالت بدون ماده جاذب بوده است.	فیاض و همکاران [۴]	۲۰۲۲
استفاده از نانوذرات آلومینیومی مخلوط شده با موم پارافین باعث افزایش استحصال دستگاه تا ۱۲۸ درصد نسبت نمونه‌های معمولی گشته است.	الشیخ و همکاران [۵]	۲۰۲۱
استفاده از پودرهای مغناطیسی بر سطح دستگاه به‌عنوان ماده جاذب منجر به ذخیره حرارت خورشید در ساعت اوج تابش و همچنین ایجاد یک محیط متخلخل برای کنترل عمق آب در سطح پلکان و در نتیجه باعث افزایش استحصال دستگاه شده است.	دیواگر و همکاران [۶]	۲۰۲۲
ساخت پلکان دستگاه از جنس مس باعث افزایش استحصال دستگاه بوده است.	ابوجزر و همکاران [۷]	۲۰۱۸
کاهش میزان عمق آب در سطح پلکان دستگاه باعث افزایش دمای دستگاه و بنابراین افزایش استحصال دستگاه می‌گردد. همچنین استفاده از اسفنج، سنگ‌ریزه، فتیله و جاذب مشکی در سطح پلکان باعث افزایش استحصال دستگاه گشته است. هزینه تخمینی برای تقطیر ۱ لیتر آب شور در دستگاه‌های مختلف آب‌شیرین‌کن پلکانی از ۰/۱۵ تا ۰/۳۲ دلار و در دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن مختلف تک حوضچه‌ای از ۰/۲ تا ۰/۴۳ دلار متغیر بوده است.	نوگریبا و همکاران [۸]	۲۰۲۱
تعبیه کانال با عمق ۱ سانتی‌متر منجر به افزایش انتقال حرارت دستگاه تا ۴۴ درصد و افزایش دمای دستگاه تا ۱۶/۴ درصد و افزایش استحصال کل دستگاه تا ۵۱/۷ درصد گشته است.	ژیائو و همکاران [۹]	۲۰۱۹
نصب آینه به‌عنوان بازتابنده داخلی، استحصال دستگاه را تا ۵۶ درصد افزایش داده است.	عمرا و همکاران [۱۰]	۲۰۱۳
استفاده از لوله‌های خلأ و بازتابنده داخلی منجر به افزایش استحصال دستگاه تا ۵۶۹۰ سانتی‌متر مکعب در یک روز آفتابی و ۳۶۴۸ سانتی‌متر مکعب در یک روز ابری گشته است.	ساتون و همکاران [۱۱]	۲۰۱۷
نصب آینه به‌عنوان بازتابنده داخلی عملکرد حرارتی دستگاه را تا ۳۰ درصد و اضافه نمودن پلکان به دستگاه، عملکرد حرارتی آن را تا ۱۸۰ درصد بهبود بخشیده است.	عبدالله و همکاران [۱۲]	۲۰۰۸
استفاده از بازتابنده‌های داخلی و خارجی به همراه کندانسورهای خارجی منجر به افزایش استحصال از ۶/۹ کیلوگرم بر مترمربع در یک دستگاه معمولی به ۸/۹ کیلوگرم بر مترمربع در دستگاه اصلاح شده گشته است.	مفتح و همکاران [۱۳]	۲۰۱۸
استفاده از جمع‌کننده حرارتی و سلول خورشیدی میزان تقطیر را تا ۲۰ لیتر در روز افزایش داده است.	مانچاندا و همکاران [۱۴]	۲۰۱۸
بررسی عددی و تجربی دستگاه آب‌شیرین‌کن مجهز به سلول‌های خورشیدی و جمع‌کننده‌های حرارتی نشان داده است که مقدار مطلوبی برای مساحت جمع‌کننده‌ها و میزان جریان آب شور وجود داشته و همچنین میزان آهنگ جریان آب تا ۰/۰۶۸ کیلوگرم بر دقیقه گزارش شده است.	نارویی و همکاران [۱۵]	۲۰۱۸
استفاده از آب‌گرم‌کن برقی تغذیه شونده از باتری خورشیدی باعث حفظ حرارت دستگاه در ساعات شب و همچنین افزایش استحصال دستگاه تا مقدار ۱۷۷/۹ درصد در طول ۲۴ ساعت گشته است.	کابیل و همکاران [۱۶]	۲۰۲۱
استفاده از فتیله در طرفین پلکان دستگاه منجر به افزایش استحصال دستگاه تا ۵۳ درصد شده است.	کابیل و همکاران [۱۷]	۲۰۱۲

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته

Table 1. Summarizing the results of past research

استفاده از سنگ‌ریزه به‌عنوان ماده ذخیره‌ساز گرما و حرارت و همچنین بهره‌بردن از فتیله‌ها باعث افزایش نرخ تبخیر در دستگاه شده است.	علاءالدین و همکاران [۱۸]	۲۰۱۴
مقایسه دستگاه آب‌شیرین‌کن تک حوضچه با دو حوضچه نشان داده است که دستگاه آب‌شیرین‌کن دو حوضچه استحصال بیشتری نسبت به دستگاه آب‌شیرین‌کن تک حوضچه داشته است و همچنین با جریان خنک‌کننده هوا تولید افزایش یافته است.	ال‌سبایی و ال‌بیالی [۱۹]	۲۰۱۵
ساخت و تعبیه پله داخلی در دیوار پشتی آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای باعث افزایش استحصال دستگاه شده است.	سعدی و همکاران [۲۰]	۲۰۱۸
بررسی نظری دستگاه آب‌شیرین‌کن به کمک مدل ریاضی و تحلیل نشان داده است که استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن پلکانی از نوع تک حوضچه آن بیشتر است.	بوزید و همکاران [۲۱]	۲۰۱۹
تحلیل نظری نرخ انتقال حرارت تشعشع داخل دستگاه با تغییر زاویه شیب شیشه از ۱۰ تا ۷۰ درجه و میزان تابش خورشید از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع نشان داده است که تأثیر ضریب شکل تشعشع بر پیش‌بینی عملکرد حرارتی مؤثر بوده و در حالت بیشترین زاویه شیشه یعنی ۷۰ درجه و کمترین تابش یعنی ۲۰۰ وات بر مترمربع استحصال دستگاه تا ۱۸/۸ درصد افزایش یافته است.	السمدونی و همکاران [۲۲]	۲۰۱۶
با مدل‌سازی ضرایب انتقال حرارت و شار گرمای تبخیر، تأثیر سیال گرم شده، دمای ورودی، عمق آب دستگاه و رطوبت دستگاه بر افزایش استحصال آن بررسی گردیده است.	حمدو و عبداللطیف [۲۳]	۲۰۱۴



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از ساختار کلی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و سرریزهای در نظر گرفته شده برای آن

Fig. 1. The Schematic of the overall structure of the step solar still device and its water weirs

جدول ۲. ابعاد و مشخصات دستگاه ساخته شده

Table 2. Dimensions and features of the manufactured device

مشخصه	مقدار (تعداد)
تعداد پله	۱۱
ارتفاع هر پله	۵ سانتی متر
طول هر پله	۱۰۰ سانتی متر
عرض هر پله	۸ سانتی متر
نوع شیشه	سکوریت با ضخامت ۱۰
ضریب شکست شیشه	۱/۱-۱/۵



شکل ۲. تصویری از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی ساخته شده

Fig. 2. Picture of the manufactured step solar still device



شکل ۳. قطرات آب تشکیل شده بر سطح شیشه دستگاه در هنگام آزمایش‌ها

Fig. 3. Water droplets formed on the glass surface of the device during the experiments

تشکیل و به سمت پایین جاری شده است، وارد محفظه آب شیرین پایین دستگاه می‌شوند که در ساعات مختلف حجم آنها توسط بشر اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳ قطرات آب تشکیل شده بر سطح شیشه دستگاه هنگام آزمایش را نشان می‌دهد.

بیشترین میزان آب تصفیه شده در طول یک سال در شیبی برابر با عرض جغرافیایی منطقه حاصل می‌شود. از آنجاکه کلیه آزمایش‌ها در شهر اراک و با عرض جغرافیایی ۳۴-۳۵ درجه انجام گرفته است، زاویه قرارگیری آب شیرین‌کن نسبت به افق برابر با عرض جغرافیایی منطقه تنظیم شده است. در این پژوهش از وزش باد صرف‌نظر شده و آزمایش‌ها در شرایط جوی نسبتاً پایدار انجام گرفته است. همچنین از پنج دماستج نوع k با دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف استفاده گردیده است.

در هر سیستم شیرین‌سازی آب شور از جمله آب‌شیرین‌کن خورشیدی رسوب نمک می‌تواند رخ داده و عملکرد آن را تحت‌تأثیر قرار دهد. در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساخته شده در این پژوهش، باتوجه‌به اینکه آب همواره در سطح پلکان جاری بوده و دستگاه نیز در پایان هر آزمایش برای آزمایش بعدی تمیز و آماده‌سازی می‌گشته است، بنابراین رسوب قابل‌توجه نمک در دستگاه در حین انجام آزمایش‌ها مشاهده نشد.

در زمان ساخت دستگاه باید از تراز و صاف بودن پله‌ها اطمینان حاصل نمود، زیرا در صورت عدم تراز بودن ممکن است آب با بخش‌های زیادی از سطح پله در تماس نبوده و در میزان تبخیر و استحصال دستگاه اثر منفی بگذارد. در ابتدا آب شور با غلظت نمک در محدوده ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ ppm از مخزن بالای دستگاه و با دبی ۶۵ میلی‌لیتر در دقیقه پس از اندازه‌گیری و کنترل توسط روتامتر، وارد پله اول می‌شود. پس از پوشیده شدن تمام سطح پله و افزایش سطح آب تا مقدار معین به کمک سرریزهای تعبیه شده، آب وارد پله بعدی شده و به همین ترتیب مسیر ماریپیج خود را تا پله آخر طی می‌کند. ارتفاع این سرریزها به‌عنوان یکی از متغیرهای آزمایش در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ محل و موقعیت این سرریزها بر روی پله‌های دستگاه به‌وضوح قابل‌مشاهده است. پیمودن مسیر ماریپیج آب در دستگاه سبب می‌شود تا آب تمام سطح پله را پر کرده و سطح تبخیر افزایش یابد. بدیهی است که با افزایش سطح تبخیر میزان تبخیر آب نیز افزایش خواهد یافت. در نهایت آب شور توسط شیر خروجی از دستگاه خارج می‌شود و سپس توسط پمپ دوباره به مخزن بالای دستگاه هدایت می‌گردد. تابش خورشید بر شیشه روی دستگاه باعث بالارفتن دما و ایجاد اثر گلخانه‌ای درون دستگاه و تبخیر آب شور می‌گردد. برای جلوگیری از اتلاف انرژی، و حفظ بخار آب تشکیل شده، دستگاه کاملاً عایق‌بندی شده و تمام منافذ آن بسته شده است. قطرات ناشی از میعان بخار آب که بر سطح شیشه شیب‌دار روی دستگاه



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴. تصویری از بافت پارچه‌های الف) تنظیف، ب) متقال متراکم و ج) متقال پلی‌استر

Fig. 4. Picture of the texture of a) Cotton fabric, b) Dense Fustian fabric, and c) Polyester Fustian fabric

۳- ماده جاذب

استفاده از ماده جاذب آب یا گرما یکی از متغیرهای مؤثر در افزایش بهره‌وری دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در پژوهش‌های گذشته تاکنون بوده است. ساتيامورتی و همکاران [۲۴] به بررسی استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون در رنگ سیاه و غلظت‌های متفاوت در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌عنوان ماده جاذب پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که میانگین دمای آب درون دستگاه و بازده آن نسبت به دستگاه بدون سطح جاذب رو به افزایش بوده است. در تحقیق حاضر از پارچه به‌عنوان ماده جاذب، ارزان و در دسترس و همچنین به جهت کنترل مسیر حرکت آب و افزایش سطح تبخیر استفاده شده و به بررسی تأثیر استفاده از پارچه و متغیرهای مرتبط به آن در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته شده است. پارچه‌ها از ۳ جنس: تنظیف، متقال متراکم و متقال پلی‌استر بوده است. در این میان تراکم پارچه و تعداد نخ‌های پارچه در واحد مساحت در متقال متراکم از دو پارچه دیگر بیشتر بوده و پس از آن پارچه تنظیف و در آخر پارچه متقال پلی‌استر کمترین میزان تراکم را دارا است. جنس پارچه تنظیف از پنبه و در دو پارچه دیگر پلی‌استر است. در شکل ۴ تصاویری از بافت این پارچه‌ها آورده شده است. همچنین میزان جذب آب در هرکدام باتوجه‌به جنس و تراکم پارچه نیز متفاوت است. متغیرهای بررسی شده مربوط به ماده جاذب در این آزمایش بررسی اثر رنگ‌های مختلف (سیاه، سفید و زرد)، اثر زاویه پارچه نسبت به سطح پلکان دستگاه (زاویه ۹۰ درجه، ۶۰ درجه و ۳۰ درجه) و اثر جنس ماده جاذب بر عملکرد دستگاه بوده است.

۳-۱- آزمایش جذب آب

این آزمایش جهت مقایسه میزان جذب آب در پارچه‌های تنظیف، متقال پلی‌استر و متقال متراکم انجام شده است. در این راستا پارچه‌ها را در ابعاد مساوی ۱۵×۲/۵ سانتی‌متر بریده و هرکدام را در شرایط آزمایشگاهی یکسان در مقدار معینی آب قرار داده و سپس میزان جذب آب آن‌ها در مدت‌زمان ۲ دقیقه توسط ترازو اندازه‌گیری شده است. معیار استفاده شده به‌منظور مقایسه میزان جذب آب پارچه‌های مختلف، درصد نسبت وزن آب جذب شده به وزن پارچه خشک بوده است. شکل ۵ نمونه پارچه هنگام وزن‌کشی و شکل ۶ نمونه پارچه‌ها را هنگام آزمایش جذب آب نشان می‌دهد.

جدول ۳ خصوصیات و میزان جذب آب پارچه را نشان می‌دهد.

باتوجه‌به نتایج آزمایش، پارچه تنظیف بیشترین میزان جذب آب را به‌ازای واحد وزن پارچه خشک داشته و کمترین مقدار نیز با استفاده از متقال پلی‌استر حاصل شده و میزان جذب آب در متقال متراکم در بین مقدار جذب شده توسط دو پارچه دیگر بوده است.

۴- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

یکی از اهداف طراحی آزمایش این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرایند، بتوان تغییرات خروجی را مشاهده و شناسایی کرد. طراحی آزمایش در این پژوهش با استفاده از روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب انجام شده است. روش تاگوچی بر اساس حداقل منابع، زمان و تعداد آزمایش ممکن سازمان‌دهی می‌شود. از علل کارآمد بودن این روش می‌توان



شکل ۵. نمونه پارچه هنگام وزن کشی

Fig. 5. Fabric sample during weight measurement



شکل ۶. نمونه پارچه‌ها هنگام آزمایش جذب آب

Fig. 6. Fabric samples during the water absorption test

جدول ۳. نتایج آزمایش جذب آب در پارچه‌ها

Table 3. Results of fabrics' water absorption

نوع پارچه	ابعاد	وزن پارچه خشک	وزن پارچه مرطوب	وزن آب جذب شده	درصد نسبت وزن آب جذب شده به وزن پارچه خشک پس از ۲ دقیقه
تنظیف	۲/۵×۱۵ سانتی‌متر	۱/۰ گرم	۲/۴ گرم	۱/۴ گرم	۱۴۰
متقال پلی‌استر	۲/۵×۱۵ سانتی‌متر	۰/۷ گرم	۰/۹ گرم	۰/۲ گرم	۲۸/۶
متقال متراکم	۲/۵×۱۵ سانتی‌متر	۱/۱ گرم	۱/۵ گرم	۰/۴ گرم	۳۶/۴

جدول ۴. عناوین و سطوح متغیرهای در نظر گرفته شده در آزمایش‌های مختلف

Table 4. Titles and levels of variables considered in different experiments

متغیر	واحد	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
جنس پارچه	-	A	متقال پلی‌استر	متقال متراکم	تنظیف
رنگ پارچه	-	B	سفید	زرد	مشکی
تعداد لایه پارچه	-	C	۱	۲	۳
زاویه پارچه	درجه	D	۹۰	۶۰	۳۰
ارتفاع سرریز	سانتی‌متر	E	۰	۱	۲

می‌گردد. در مطالعه‌ای دیگر اسلام و پرامانیک [۲۷] به مقایسه نتایج یک آزمایش به کمک دو روش تاگوچی و نسبت سیگنال به نویز پرداخته‌اند. آزمایش آن‌ها بررسی تأثیر ۳ سطح مختلف از ۴ متغیر ماشینکاری بر زبری سطح بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که نتایج هر دو روش باهم یکسان بوده و مغایرتی نداشته است.

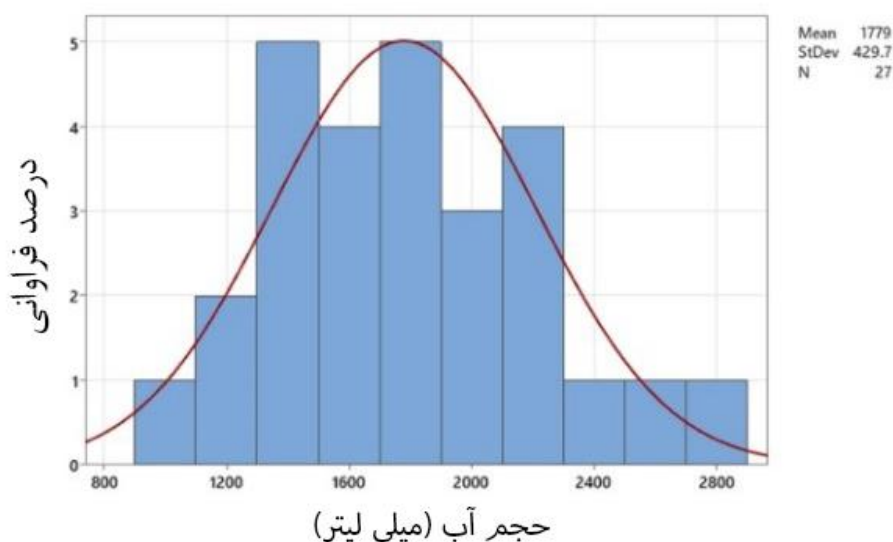
جدول ۴ متغیرها و سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای آن‌ها را در آزمایش‌های این پژوهش نشان می‌دهد. آزمایش‌ها شامل ۵ متغیر و هر متغیر شامل ۳ سطح بوده است. متغیرهای هر آزمایش در جدول ۵ آورده شده است. پس از طراحی آزمایش، متغیرهای در نظر گرفته شده برای هر آزمایش در دستگاه اعمال گشته و آزمایش‌ها انجام شده‌اند. سپس داده‌های حاصل از انجام هر آزمایش با استفاده از معادلات رگرسیون و ارائه نمودارهای مربوطه تحلیل شده‌اند.

به حداقل تعداد آزمایش‌های موردنیاز، امکان بررسی میزان اثرگذاری متغیرها و امکان تحلیل سیگنال به نویز اشاره کرد. در این روش طراحی آزمایش، ابتدا عوامل مؤثر مشخص شده و برای هرکدام، چند حالت در نظر گرفته می‌شود. سپس با توجه به تعداد متغیرهای مؤثر و تعداد سطوح هرکدام از آن‌ها، تعداد آزمایش‌ها مشخص می‌گردد. در ادامه با انجام آزمایش‌ها طبق جدول طراحی آزمایش، نتایج به دست آمده به جدول طراحی آزمایش اضافه شده و تحلیل‌های موردنیاز بررسی می‌شوند [۲۵]. پژوهشگران بسیاری از این روش در مطالعات و انجام آزمایش‌های خود بهره برده‌اند. از جمله، کارنا و سهایی [۲۶] در یک مطالعه اظهار کرده‌اند که بهینه‌سازی متغیرهای یک فرایند برای کنترل عالی بر کیفیت بهره‌وری و جنبه‌های مالی یک آزمایش انجام می‌گردد. کنترل کیفیت به روش تاگوچی به عنوان یک روش مؤثر بر بهبود کیفیت فرایند با هزینه کم انجام

جدول ۵. سطوح متغیرهای در نظر گرفته شده در هر آزمایش

Table 5. Level of variables considered in each experiment

شماره آزمایش	جنس پارچه	رنگ پارچه	تعداد لایه پارچه	زاویه پارچه (درجه)	ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)
۱	۱	۱	۱	۹۰	۰
۲	۱	۱	۲	۶۰	۰
۳	۱	۱	۳	۳۰	۰
۴	۲	۱	۱	۹۰	۱
۵	۲	۱	۲	۶۰	۱
۶	۲	۱	۳	۳۰	۱
۷	۳	۱	۱	۹۰	۲
۸	۳	۱	۲	۶۰	۲
۹	۳	۱	۳	۳۰	۲
۱۰	۳	۲	۱	۶۰	۰
۱۱	۳	۲	۲	۳۰	۰
۱۲	۳	۲	۳	۹۰	۰
۱۳	۱	۲	۱	۶۰	۱
۱۴	۱	۲	۲	۳۰	۱
۱۵	۱	۲	۳	۹۰	۱
۱۶	۲	۲	۱	۶۰	۲
۱۷	۲	۲	۲	۳۰	۲
۱۸	۲	۲	۳	۹۰	۲
۱۹	۲	۳	۱	۳۰	۰
۲۰	۲	۳	۲	۹۰	۰
۲۱	۲	۳	۳	۶۰	۰
۲۲	۳	۳	۱	۳۰	۱
۲۳	۳	۳	۲	۹۰	۱
۲۴	۳	۳	۳	۶۰	۱
۲۵	۱	۳	۱	۳۰	۲
۲۶	۱	۳	۲	۹۰	۲
۲۷	۱	۳	۳	۶۰	۲



شکل ۷. بافت نگاشت درصد فراوانی حجم آب تولیدی در طی آزمایش‌های مختلف

Fig. 7. The graph of the volume percentage of produced water in different experiments

۵- میزان تابش

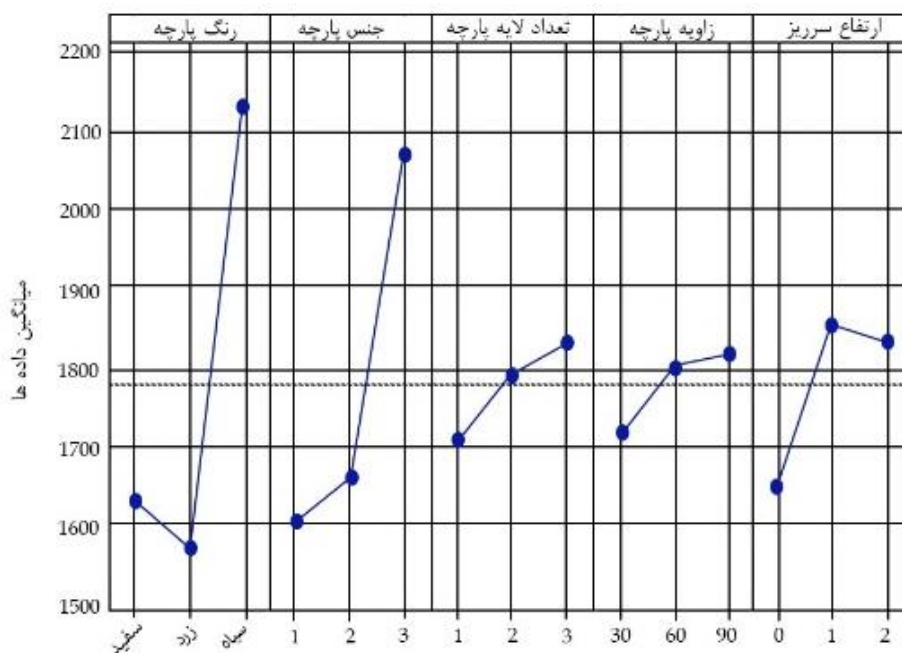
اساس کار دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی وابسته به انرژی خورشید و میزان تابش و گرمای آن است. بدیهی است که هرچه میزان تابش خورشید بیشتر باشد دمای دستگاه بالاتر رفته و بنابراین تبخیر و بازدهی دستگاه نیز افزایش خواهد یافت. ابوجزر و همکاران [۲۸] در پژوهشی به بررسی تأثیر متغیرهای محیطی مانند: شدت تابش، دمای محیط، سرعت باد پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده که عوامل محیطی تأثیر بسیاری در بازدهی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارند. آن‌ها اظهار کرده‌اند افزایش تابش خورشید و کاهش سرعت باد تأثیر بسزایی در بازدهی دستگاه دارد. در این پژوهش که در شهر اراک انجام گرفته است، حداکثر میزان تابش خورشید در طی انجام آزمایش‌های مختلف در حدود ۹۸۰ تا ۱۱۰۰ وات بر مترمربع بوده است که توسط پیرانومتر در محل انجام هر آزمایش و در ساعت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است.

۶- نتایج

۶-۱- نتایج حاصل از تحلیل روش تاگوچی

شکل ۷ نمودار بافت نگاشت درصد فراوانی آب تولیدی در طی آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. باتوجه‌به اینکه میزان آب تقطیر شده در هر محدوده از نمودار حاصل چند آزمایش است، می‌توان دریافت که میانگین حجم کل آب تقطیر شده در تمام طول آزمایش برابر با ۱۷۷۹ میلی‌لیتر بوده است. کمترین میزان آب تقطیر شده در تمام طول آزمایش در حدود ۱۰۰۰ میلی‌لیتر و بیشترین آن بین ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ میلی‌لیتر بوده است. از عوامل اختلاف میان میزان استحصال آب تقطیر شده در طی آزمایش در بازه‌های مختلف می‌توان به برهم‌کنش متغیرهای مختلف با اثرات مثبت و یا منفی بر میزان استحصال دستگاه در یک آزمایش اشاره نمود.

شکل ۸ نمودار تأثیر هر متغیر بر میانگین آب تقطیر شده به‌صورت جداگانه را نشان می‌دهد. باتوجه‌به نمودار می‌توان عملکرد هر متغیر در سطح‌های مختلف را جدا از هم بررسی و عملکرد بهینه یا کمینه را مشخص نمود.



شکل ۸. نمودار میانگین تأثیر متغیرها بر میزان آب تولید شده در طی آزمایش‌ها

Fig. 8. The graph of the average effect of variables on the amount of produced water in the experiments

به اصلاح دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌وسیلهٔ پارچه نخی سیاه، پنبه‌های تکه‌ای، پارچه جوت نازک و ورق اسفنجی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پارچه نخی سیاه مؤثرترین متغیر در بین دیگر متغیرها با رنگ‌های مختلف است. پارچه‌های استفاده شده در این پژوهش به رنگ‌های مشکی، سفید و زرد آزمایش شده‌اند. نمودار شکل ۸ تأثیر رنگ پارچه بر میزان آب شیرین تولید شده را به‌خوبی نشان داده است. همان‌طور که از نمودار نیز مشخص است رنگ مشکی به دلیل جذب بالای نور و گرما، تأثیر بسزایی در افزایش استحصال آب شیرین داشته است و پس از آن رنگ زرد و در آخر رنگ سفید به دلیل بازتاب نور و جذب پایین گرما کمترین میزان تأثیر در تولید آب شیرین را داشته است.

۶-۲-۳- تعداد لایه پارچه

متغیر دیگر بررسی شده در این پژوهش تعداد لایه پارچه بوده است. می‌توان گفت افزایش تعداد لایه‌های پارچه برابر با افزایش ضخامت پارچه و بنابراین افزایش میزان آب در هر پله بوده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۸ نیز مشخص است با بالا رفتن ضخامت پارچه میزان استحصال دستگاه نیز افزایش یافته و تأثیر مثبتی بر عملکرد کلی دستگاه داشته است.

۶-۲-۱- جنس پارچه

در این پژوهش از پارچه به‌عنوان ماده جاذب آب استفاده شده است. یکی از متغیرهای مهم در این امر جنس پارچه است. مبرهن است هرچه جنس پارچه به‌گونه‌ای باشد که جذب آب بهتر صورت گیرد، باعث می‌شود سطح تبخیر آب افزایش یابد. براین‌اساس با افزایش سطح تبخیر و نوع پارچه استفاده شده، میزان آب شیرین تولیدی نیز افزایش می‌یابد. پارچه‌های استفاده شده در این پژوهش به ترتیب تنظیف، متقال متراکم و متقال پلی‌استر بیشترین درصد جذب آب را دارا بوده‌اند. خواص هر یک از پارچه‌ها در بخش ۳ بیان شده است. از مقایسه میان پارچه‌ها می‌توان دریافت پارچه تنظیف نسبت به دو پارچه دیگر عملکرد بهتری داشته و میزان جذب آب در آن بسیار بیشتر بوده است و با مقایسه میان پارچه متقال پلی‌استر و پارچه متقال متراکم درمی‌یابیم که با افزایش تراکم تاروپود پارچه تبخیر نیز افزایش می‌یابد.

۶-۲-۲- رنگ پارچه

رنگ سطح پلکان و یا ماده جاذب تأثیر بسزایی در افزایش استحصال دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارد. موروگاول و اسرینار [۲۹] در پژوهشی



شکل ۹. تصویر نحوه قرارگیری پارچه بر روی پله‌ها به ترتیب در زوایای الف) ۹۰ درجه، ب) ۶۰ درجه و ج) ۳۰ درجه

Fig. 9. Picture of how the fabric is placed on the stairs at the angle of a) 90 degrees, b) 60 degrees, and c) 30 degrees

استحصال بیشتری نسبت به دستگاه معمولی داشته است. این تحقیق با ۳ حالت ارتفاع انجام شد: حالت اول: بدون سرریز حالت دوم: با سرریز به ارتفاع ۱ سانتی‌متر و حالت سوم با سرریز به ارتفاع ۲ سانتی‌متر. در حالت اول، آب بدون پر کردن تمام سطح پله از آن خارج شده و به پله بعدی سرازیر گشته است. این امر سبب کاهش سطح تبخیر و بنابراین کاهش استحصال کل دستگاه بوده است. در حالت دوم با کمک سرریزهای ۱ سانتی‌متری آب ابتدا تمام سطح پله را پر کرده و پس از پر شدن تمام پله به پله بعدی روان شده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۸ مشخص است این حالت بیشترین استحصال را نسبت به دو حالت دیگر داشته است. در حالت سرریز با ارتفاع ۲ سانتی‌متر به دلیل افزایش عمق آب انرژی لازم برای افزایش دما و تبخیر آب بیشتر از حالت قبل است و بنابراین استحصال کمتری نسبت به حالت قبلی داشته. با این حال همچنان در مقایسه با حالت اول به دلیل افزایش سطح تبخیر استحصال قابل توجهی داشته است. شکل ۱۰ تصویری از سرریز آب به ارتفاع ۱ سانتی‌متر را بر روی یک پله از دستگاه نشان می‌دهد.

۶-۳- تحلیل رگرسیون

در مدل‌های آماری، تحلیل رگرسیون، اغلب برای کشف رابطه بین متغیر وابسته با متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. این روش شامل روش‌های زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل متغیرهای خاص با تمرکز بر رابطه بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل است. مولود و عبدالعزیز [۳۱] در

۶-۲-۴- زاویه پارچه

در بررسی معیار زاویه پارچه، باتوجه به اینکه سطح تبخیر در حضور ماده متخلخل با تغییر زاویه پارچه نسبت به افق تغییر می‌کند. هر چه زاویه پارچه نسبت به افق افزایش پیدا کند سطح بیشتری از پارچه در آب قرار می‌گیرد، بنابراین سطح جاذب و سطح تبخیر افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین با افزایش سطح تبخیر در حضور ماده متخلخل میزان بیشتری از آب شور تبخیر می‌شود. در این آزمایش سه زاویه ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که گفته شد زاویه ۹۰ درجه به علت بیشترین سطح تبخیر در حضور ماده متخلخل، بیشترین حجم آب را تولید کرده و پس از آن زاویه ۶۰ درجه و در آخر زاویه ۳۰ درجه در تبخیر آب تأثیرگذار بوده‌اند. شکل ۹ تصویری از نحوه قرارگیری پارچه بر روی پله‌ها را به ترتیب در زوایای ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه نشان می‌دهد.

۶-۲-۵- ارتفاع سرریز

ارتفاع سرریز پله‌ها تأثیر مستقیمی در میزان آب جاری شده درون پله‌ها دارد. هرچه ارتفاع سرریزها بیشتر باشد مقدار آب درون پله‌ها نیز افزایش می‌یابد. عبدالله و همکاران [۳۰] در پژوهشی به مقایسه دو دستگاه آب‌شیرین‌کن معمولی و دستگاه آب‌شیرین‌کن همراه با سرریزهای متغیر و بازتابنده‌های داخلی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که دستگاه آب‌شیرین‌کن همراه با بازتابنده داخلی و ارتفاع سرریز ۰/۵ سانتی‌متری



شکل ۱۰. تصویری از سرریز آب به ارتفاع ۱ سانتی‌متر بر روی یک پله از دستگاه

Fig. 10. Image of a 1 cm height water weir on a stair of the device

در معادله تصمیم گرفت. به طور معمول اگر مقدار P -Value کوچک‌تر یا برابر با عدد $0/05$ باشد، نشان می‌دهد که احتمال وجود خطا، صفر یا خیلی کم است؛ بنابراین اگر P -Value در نتایج یک آزمایش کوچک‌تر از $0/05$ باشد، به این معناست که متغیرها با تقریب خوبی بدون خطا هستند.

پس از انجام آزمایش‌ها و به‌دست‌آوردن خروجی برای هر آزمایش باتوجه‌به طراحی آزمایش و سطح‌های در نظر گرفته شده برای هر متغیر به مبحث رگرسیون پرداخته شده است. در این پژوهش برای تعیین معادله رگرسیون مطلوب، پس از به‌دست‌آوردن اولین معادله به بررسی مقدارهای P -Value برای هر متغیر پرداخته شده است و مقادیر کمتر از $0/05$ حذف شده است [۳۱]. در جدول ۶ متغیرهای مؤثر در معادله رگرسیون و مقدار P -Value هر متغیر را نشان داده شده است. از آنجاکه سطح P -Value هر متغیر استفاده شده در معادله کوچک‌تر از سطح معنی‌دار بوده است، نتیجه می‌شود که متغیرها به طور مستقیم بر نتایج خروجی دارند. رابطه (۱)، معادله رگرسیون آب تقطیر شده را به‌صورت تابعی از متغیرهای ورودی ارائه می‌کند.

$$V = 460.5B + 782E + 147.6A + 164.2C + 14.01D - 1043B \times E - 5.93B \times D + 300.9B \times E \quad (1)$$

باتوجه‌به رابطه (۱) می‌توان ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی به‌منظور

دستیابی به بیشترین حجم آب تقطیر شده را انتخاب کرد.

پژوهشی به بررسی کارایی رگرسیون خطی و یا چند جمله‌ای در مطالعات سایر محققان پرداخته و عملکرد مطالعات به کمک رگرسیون را برای بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها اظهار نموده‌اند که رایج‌ترین و جامع‌ترین الگوریتم آماری، رگرسیون خطی است که برای یافتن رابطه خطی میان یک یا چند متغیر استفاده می‌شود.

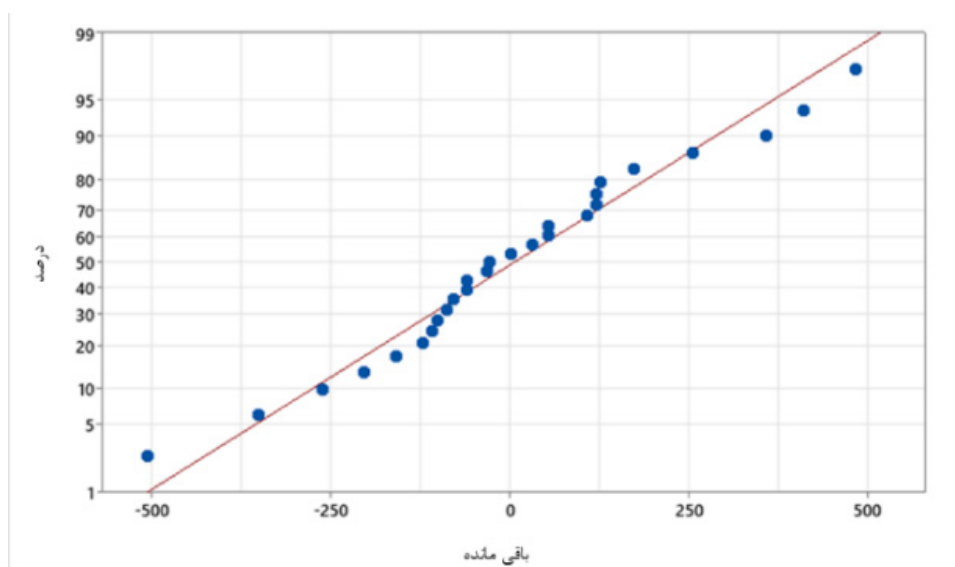
در این پژوهش به ارائه یک مدل رابطه رگرسیون بین متغیرها پرداخته شده است. در این حالت فرض بر این است که یک یا چند متغیر توصیفی که مقدار آن‌ها مستقل از بقیه متغیرها یا تحت کنترل محقق است، می‌تواند در پیش‌بینی متغیر وابسته که مقدارش وابسته به متغیرهای مستقل و تحت کنترل محقق نیست، مؤثر باشد. از آنجایی که ممکن است علاوه بر متغیرهای مستقل، عوامل زیاد و ناشناخته دیگری نیز در تعیین مقدار متغیر وابسته نقش داشته باشند، مدل رگرسیونی با مناسب‌ترین تعداد متغیر مستقل در نظر گرفته شده و میزان خطا به‌عنوان نماینده عوامل تصادفی دیگری که قابل‌شناسایی نیستند، فرض می‌شود. انتظار است که این عوامل تصادفی، کمتر در تغییرات متغیر وابسته نقش داشته باشند. در تحلیل نتایج رگرسیون می‌توان دقت مدل به‌دست‌آمده را با استفاده از مقادیر احتمال P -Value¹ مورد بررسی قرار داد. مقدار P -Value در نتایج معادله رگرسیون کمک می‌کند تا بدون مراجعه به جداول توزیع‌های آماری بتوان در مورد میزان اثرگذاری متغیرها

1 Probability value

جدول ۶. بررسی اثر هر متغیر بر معادله رگرسیون

Table 6. The effect of each variable in the regression equation

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
A	۱۴۷/۶	۶۶/۰	۲/۲۴	۰/۰۳۷	۸/۲۳
B	۴۶۰/۵	۸۹/۵	۵/۱۴	۰/۰۰۰	۱۵/۱۷
C	۱۶۴/۲	۵۵/۹	۲/۹۴	۰/۰۰۸	۵/۹۱
D	۱۴/۰۱	۳/۲۸	۴/۲۷	۰/۰۰۰	۱۸/۳۱
E	۷۸۲	۳۴۴	۲/۲۷	۰/۰۳۵	۷۹/۸۸
B*E	-۱۰۴۳	۳۷۲	۲/۸	۰/۰۱۱	۴۳۶/۲۶
B*D	-۵/۹۳	۱/۷۰	۳/۵۰	۰/۰۰۲	۲۲/۸۴
B*B*E	۳۰۰/۹	۹۰/۷	۳/۳۲	۰/۰۰۴	۱۸۱/۵۸



شکل ۱۱. نمودار توزیع نرمال

Fig. 11. Normal distribution chart

نرمال، می‌توان دریافت معادله رگرسیون و نمودار توزیع نرمال حاصل از آن دقت بالایی داشته و همچنین نشان می‌دهد این مدل از لحاظ فرضیات اولیه مدل رگرسیونی در وضعیت مطلوبی قرار داشته است.

۶-۴- تست مانوا

برای مقایسه میانگین اثرات یک یا چند متغیر مستقل بر روی یک متغیر

۶-۳-۱- تحلیل نتایج بر اساس معادله رگرسیون

نمودار توزیع نرمال یکی از مهم‌ترین توزیع‌های احتمالی پیوسته در نظریه احتمالات است. اهمیت آن در توزیع، هم‌خوانی بسیاری از مقادیر حاصل شده، هنگام نوسان‌های طبیعی و فیزیکی پیرامون یک مقدار ثابت با مقادیر حاصل از این توزیع است. نمودار خط توزیع نرمال و متغیرها در شکل ۱۱ آورده شده است. باتوجه به پراکندگی کم داده‌ها نسبت به خط معادله

جدول ۷. تست مانوا بر روی جنس پارچه

Table 7. Manova test on the fabric material

Criterion	Test Statistic	DF			P
		F	Num	Denom	
Wilks'	۰/۴۹۸۳۲	۷/۰۴۷	۲	۱۴	۰/۰۰۸
Lawley-Hotelling	۱/۰۰۶۷۶	۷/۰۴۷	۲	۱۴	۰/۰۰۸
Pillai's	۰/۵۰۱۶۸	۷/۰۴۷	۲	۱۴	۰/۰۰۸
Roy's	۱/۰۰۶۶۷۶				

$$S = 1 \quad m = 0 \quad n = 6$$

جدول ۸. تست مانوا بر روی رنگ پارچه

Table 8. Manova test on the fabric color

Criterion	Test Statistic	DF			P
		F	Num	Denom	
Wilks'	۰/۴۰۴۷۷	۱۰/۲۹۴	۲	۱۴	۰/۰۰۲
Lawley-Hotelling	۱/۴۷۰۵۴	۱۰/۲۹۴	۲	۱۴	۰/۰۰۲
Pillai's	۰/۵۹۵۲۳	۱۰/۲۹۴	۲	۱۴	۰/۰۰۲
Roy's	۱/۴۷۰۴۵				

$$S = 1 \quad m = 0 \quad n = 6$$

داده‌ها از سطح معنی‌دار α استفاده می‌شود. سطح معنی‌دار $0/05$ نشان‌دهنده یک خطا ۵ درصدی در نتایج است که مبنایی برای سنجش مؤثر بودن یا مؤثر نبودن متغیر موردنظر است [۳۲].

جدول ۷ نشان‌دهنده تست مانوا بر متغیر جنس پارچه است. این جدول نشان می‌دهد که اختلاف میانگین داده‌ها از نظر آماری در سطح معنی‌دار قرار گرفته است؛ بنابراین جنس پارچه (A) در سطح $0/05$ معنی‌دار بوده است. متغیر بررسی شده دیگر تست مانوا بر رنگ پارچه است. جدول ۸ نشان می‌دهد که به دلیل اینکه P کمتر از سطح معنی‌دار α است، پس عامل رنگ پارچه (B) معنی‌دار بوده و در مدل و متغیر پاسخ مؤثر است.

جدول ۹ به تست مانوا بر روی تعداد لایه پارچه می‌پردازد. این جدول نشان می‌دهد که تفاوت میانگین‌ها از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد؛ زیرا میزان P بیشتر از سطح معنی‌دار به‌دست‌آمده است. پس عامل C (تعداد

وابسته بر اساس طرح‌های آزمایشی مختلف، روش‌های آماری متعددی مانند آزمون تی^۱ و آزمون تحلیل واریانس تک متغیری آنوا^۲ بکار گرفته می‌شود. اما در حالتی که بیش از یک متغیر وابسته مدنظر قرار دارد، باتوجه به وابستگی بین متغیرهای وابسته از روش‌های تحلیل چندمتغیره استفاده می‌شود. کومبز و آگینا [۳۲] در پژوهشی به تجزیه و تحلیل واریانس چندمتغیره یک‌طرفه با پراکندگی ناهمسان، پرداخته‌اند. در شرایطی که ماتریس پراکندگی ناهمگن و اندازه‌های نمونه نابرابر مورد انتخاب قرار گرفته، تست مانوا انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تست مانوا بسیار بهتر از سایر آزمون‌ها عمل کرده است.

در این پژوهش برای آزمایش هم‌زمان میانگین داده‌ها به بررسی مقادیر P در جدول‌های آزمایش مانوا پرداخته شده است. معمولاً برای بررسی

1 T-test
2 Anova

جدول ۹. تست مانوا بر روی تعداد لایه پارچه

Table 9. Manova test on the number of fabric layers

Criterion	Test Statistic	DF			P
		F	Num	Denom	
Wilks'	۰/۹۴۴۰۶	۰/۴۱۵	۲	۱۴	۰/۶۶۸
Lawley-Hotelling	۰/۰۵۹۲۶	۰/۴۱۵	۲	۱۴	۰/۶۶۸
Pillai's	۰/۰۵۵۹۴	۰/۴۱۵	۲	۱۴	۰/۶۶۸
Roy's	۰/۰۵۹۲۶				

$$S = \setminus m = \cdot n = ۶$$

جدول ۱۰. تست مانوا بر روی زاویه پارچه

Table 10. Manova test on the fabric angle

Criterion	Test Statistic	DF			P
		F	Num	Denom	
Wilks'	۰/۹۵۶۴۰	۰/۳۱۹	۲	۱۴	۰/۷۳۲
Lawley-Hotelling	۰/۰۴۵۵۸	۰/۳۱۹	۲	۱۴	۰/۷۳۲
Pillai's	۰/۰۴۳۶۰	۰/۳۱۹	۲	۱۴	۰/۷۳۲
Roy's	۰/۰۴۵۵۸				

$$S = \setminus m = \cdot n = ۶$$

در طول انجام آزمایش‌ها در روز از ساعت ۱۰ الی ۱۶ برابر با ۲۷۹۰ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است. محققین دیگری نیز به بررسی استفاده از محیط‌های متخلخل از قبیل فتیله در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. از جمله در پژوهشی کابیل و همکاران از فتیله در طرفین هر پله در یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی برای افزایش میزان استحصال روزانه استفاده کرده‌اند [۱۷]. میزان تولید آب شیرین در پژوهش مذکور از ساعت ۹ الی ۱۹ در حالت مرسوم برابر با ۳۴۷۰ میلی‌لیتر بر مترمربع و در حالت بهبودیافته برابر با ۴۵۲۵ میلی‌لیتر بر مترمربع به‌دست‌آمده است. میزان حداکثر تابش خورشیدی گزارش شده توسط آنها در آزمایش‌های مختلف حدوداً ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ وات بر مترمربع بوده که به حداکثر مقدار تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر بسیار نزدیک است. همچنین در پژوهشی دیگر علاء‌الدین و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر مواد ذخیره‌ساز گرما و فتیله‌ها

لایه پارچه) در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار و مؤثر نمی‌باشد. جدول ۱۰ نشان‌دهنده تست مانوا بر روی زاویه پارچه دستگاه است. این جدول نشان می‌دهد که به دلیل بیشتر بودن مقدار P از سطح معنی‌دار به‌دست‌آمده، تفاوت میانگین‌ها از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. پس عامل D (زاویه پارچه) در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار و مؤثر نمی‌باشد. جدول ۱۱ نشان‌دهنده تست مانوا بر روی ارتفاع سرریز است. این جدول نشان می‌دهد که عامل E (ارتفاع سرریز) به دلیل بیشتر بودن از سطح معنی‌دار α ، بر میزان آب شیرین تولیدی مؤثر نمی‌باشد.

۷- صحت‌سنجی

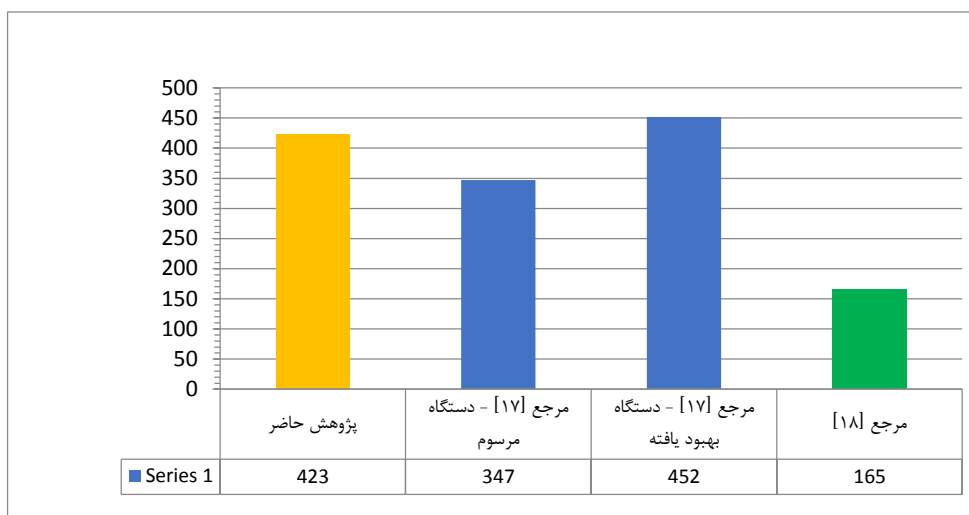
در این پژوهش از پارچه به‌عنوان یک ماده متخلخل جاذب آب و حرارت استفاده در شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میزان استحصال

جدول ۱۱. تست مانوا بر روی ارتفاع سرریز آب

Table 11. Manova test on the height of water weir

Criterion	Test Statistic	DF			P
		F	Num	Denom	
Wilks'	۰/۸۳۲۷۲	۱/۴۰۶	۲	۱۴	۰/۲۷۸
Lawley-Hotelling	۰/۲۰۰۸۹	۱/۴۰۶	۲	۱۴	۰/۲۷۸
Pillai's	۰/۱۶۷۲۸	۱/۴۰۶	۲	۱۴	۰/۲۷۸
Roy's	۰/۲۰۰۸۹				

$$s = \setminus m = \cdot n = ۶$$



شکل ۱۲. مقایسه میزان میانگین ساعتی استحصال با واحد میلی لیتر بر مترمربع در مقاله حاضر نسبت به مقاله‌های مشابه

Fig. 12. Comparing the amount of hourly average of produced water in milliliters per square meter in this study with other similar research

از آنجاکه ساعات انجام آزمایش‌ها در پژوهش حاضر و پژوهش‌های صورت گرفته در مراجع [۱۷ و ۱۸] متفاوت می‌باشد، به منظور مقایسه بهتر نتایج و نتیجه‌گیری صحیح، در شکل ۱۲ میزان میانگین ساعتی استحصال بر واحد سطح در پژوهش حاضر با دو پژوهش دیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پژوهش حاضر در مقایسه با دستگاه مرسوم در مرجع [۱۷] و همچنین پژوهش انجام شده در مرجع [۱۸] نتایج بهتری را

پرداخته‌اند. میزان تولید آب شیرین گزارش شده توسط آنها از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ عصر در بهترین حالت برابر با ۱۳۲۰ میلی لیتر بر مترمربع بوده است. آن‌ها مقدار حداکثر تابش خورشیدی را در کار خود گزارش ننموده‌اند، ولی با توجه به انجام آزمایش‌ها در ماه آپریل و در ایالت تامیل نادو کشور هندوستان می‌توان حداکثر مقدار تابش خورشیدی را با توجه به پایگاه‌های داده موجود در حدود ۹۰۰ تا ۹۵۰ وات بر متر مربع تخمین زد.

حساسیت یک روش آماری است که به منظور شناسایی متغیرهای با بیشترین تأثیر بر خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به کمک آن می‌توان تأثیر متغیرها را در بازه‌ای مشخص شناسایی نمود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه اراک برای حمایت‌های مختلف از جمله، فراهم آوردن امکانات و فضای انجام آزمایش‌های میدانی سپاسگزاری می‌نمایند.

۹- علائم، نشانه‌ها و ارقام

نماد	متغیر
<i>A</i>	جنس پارچه
<i>B</i>	رنگ پارچه
<i>C</i>	تعداد لایه پارچه
<i>D</i>	زاویه پارچه (درجه)
<i>E</i>	ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)
<i>V</i>	حجم آب خروجی تولیدی (میلی‌لیتر)

منابع

- [1] S. El-Agouz, Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation, *Energy Conversion and Management*, 86 (2014) 186-193.
- [2] L.D. Jathar, S. Ganesan, Assessing the performance of concave type stepped solar still with brick, sand, and concrete pieces, *International Journal of Ambient Energy*, 43(1) (2022) 3468-3484.
- [3] H. Panchal, R. Sathyamurthy, A. Kabeel, S. El-Agouz, D. Rufus, T. Arunkumar, A. Muthu Manokar, D.P. Winston, A. Sharma, N. Thakar, Annual performance analysis of adding different nanofluids in stepped solar still, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138 (2019) 3175-3182.
- [4] H. Fayaz, S. Rasachak, M.S. Ahmad, L. Kumar, B. Zhang, M. Mujtaba, M.E.M. Soudagar, R. Kumar, M.R. Omidvar, Improved surface temperature of absorber plate

حاصل نموده و نسبت به دستگاه بهبودیافته در مرجع [۱۷] نیز تنها ۶ درصد اختلاف دارد. بنابراین می‌توان گفت که نتایج به دست آمده در این پژوهش مناسب بوده و روند قابل قبولی داشته است.

۸- جمع بندی

به دلیل آنکه بیشتر سطح کره زمین را آب شور پوشانده است، فرایند نمک‌زدایی توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. یکی از روش‌های نمک‌زدایی، استفاده از انرژی خورشیدی است. یکی از روش‌های استفاده شده برای شیرین‌سازی آب با استفاده از انرژی خورشیدی، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی است. این روش به دلیل صرفه اقتصادی که دارد، به منظور افزایش استحصال آن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در این پژوهش از پارچه جاذب به منظور بهبود عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده شده است. پارچه در مقایسه با مواد متخلخل دیگر از جمله فیلتر که توسط سایر محققین مورد استفاده قرار گرفته، ارزان‌تر و در دسترس بوده و تعبیه و تعویض آن در دستگاه نیز آسان است. همچنین در این پژوهش باهدف شناسایی تأثیر پارچه جاذب بر افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی، پنج متغیر مرتبط با پارچه و سطوح جاذب در سه سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مورد بررسی در این آزمایش عبارت‌اند از: جنس پارچه، رنگ پارچه، تعداد لایه پارچه، زاویه پارچه و ارتفاع سرریز از سطح پله.

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند بهترین جنس پارچه جاذب برای استفاده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی، جنس تنظیف بوده که به دلیل جنس الیاف آن و همچنین تراکم بافت این نوع پارچه، جذب آب در آن بهتر صورت گرفته است. همچنین رنگ مشکی به دلیل جذب انرژی بیشتر نسبت به دیگر رنگ‌های مورد بررسی، عملکرد بهتری داشته است. علاوه بر این، هنگام استفاده از تعداد لایه بیشتر از پارچه جاذب، مقدار جذب آب افزایش یافته و در نتیجه خروجی آب شیرین بیشتر شده است. همچنین بیشترین میزان استحصال آب در طول روز در طی انجام آزمایش‌های مختلف از ساعت ۱۰ الی ۱۶ برابر با ۲۷۹۰ میلی‌لیتر بر مترمربع، با استفاده از سه لایه پارچه از جنس تنظیف سیاه، در زاویه پارچه ۹۰ درجه نسبت به سطح پله و ارتفاع سرریز یک سانتی‌متر به دست آمده است.

در پژوهش‌های آینده می‌توان در کنار بررسی تأثیر متغیرهای دیگر بر خروجی، با استفاده از روش‌های آماری مانند روش آنالیز حساسیت به بررسی کمی و کیفی متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی پرداخت. روش آنالیز

- methods, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(1) (2018) 444-464.
- [15] M. Naroei, F. Sarhaddi, F. Sobhnamayan, Efficiency of a photovoltaic thermal stepped solar still: Experimental and numerical analysis, *Desalination*, 441 (2018) 87-95.
- [16] A. Kabeel, M. Abdelgaied, G. Mahmoud, Performance evaluation of continuous solar still water desalination system, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144 (2021) 907-916.
- [17] A. Kabeel, A. Khalil, Z. Omara, M. Younes, Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, *Desalination*, 289 (2012) 12-20.
- [18] A. Alaudeen, K. Johnson, P. Ganasundar, A.S. Abuthahir, K. Srithar, Study on stepped type basin in a solar still, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 26(2) (2014) 176-183.
- [19] A. El-Sebaii, E. El-Bialy, Advanced designs of solar desalination systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 (2015) 1198-1212.
- [20] Z. Saadi, A. Rahmani, S. Lachtar, H. Soualmi, Performance evaluation of a new stepped solar still under the desert climatic conditions, *Energy Conversion and Management*, 171 (2018) 1749-1760.
- [21] M. Bouzaid, O. Ansari, M. Taha-Janan, N. Mouhsin, M. Oubrek, Numerical analysis of thermal performances for a novel cascade solar desalination still design, *Energy Procedia*, 157 (2019) 1071-1082.
- [22] Y. El-Samadony, W.M. El-Maghlany, A. Kabeel, Influence of glass cover inclination angle on radiation heat transfer rate within stepped solar still, *Desalination*, 384 (2016) 68-77.
- [23] O.A. Hamadou, K. Abdellatif, Modeling an active solar still for sea water desalination process optimization, *Desalination*, 354 (2014) 1-8.
- [24] R. Sathyamurthy, M. Balasubramanian, M. Devarajan, S.W. Sharshir, A.M. Manokar, Experimental study on enhancing the yield from stepped solar still coated using fumed silica nanoparticle in black paint, *Materials Letters*, 272 (2020) 127873.
- [25] A. Atarodi, H. Karami, A. Ardeshir, K. Hosseini, using metallic titanium particles for solar still application, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52 (2022) 102092.
- [5] A.H. Elsheikh, V.P. Katekar, O.L. Muskens, S.S. Deshmukh, M. Abd Elaziz, S.M. Dabour, Utilization of LSTM neural network for water production forecasting of a stepped solar still with a corrugated absorber plate, *Process Safety and Environmental Protection*, 148 (2021) 273-282.
- [6] R. Dhivagar, S. Shoeibi, H. Kargarsharifabad, M.H. Ahmadi, M. Sharifpur, Performance enhancement of a solar still using magnetic powder as an energy storage medium-exergy and environmental analysis, *Energy Science & Engineering*, 10(8) (2022) 3154-3166.
- [7] M.S.S. Abujazar, S. Fatihah, E. Lotfy, A. Kabeel, S. Sharil, Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate, *Desalination*, 425 (2018) 94-103.
- [8] S.K. Nougriaya, M. Chopra, B. Gupta, P. Baredar, Stepped solar still: A review on designs analysis, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021) 5647-5660.
- [9] L. Xiao, R. Shi, S.-Y. Wu, Z.-L. Chen, Performance study on a photovoltaic thermal (PV/T) stepped solar still with a bottom channel, *Desalination*, 471 (2019) 114129.
- [10] Z. Omara, A.E. Kabeel, M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, *Desalination*, 314 (2013) 67-72.
- [11] E. Saettone, Y. Valencia-Tovar, A. Gómez-de-la-Torre-Gastello, Preliminary overview and evaluation of a stepped solar distiller with internal reflective walls and borosilicate vacuum tubes, *Desalination*, 413 (2017) 136-143.
- [12] S. Abdallah, O. Badran, M.M. Abu-Khader, Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still, *Desalination*, 219(1-3) (2008) 222-230.
- [13] A.F. Muftah, K. Sopian, M. Alghoul, Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts, *Desalination*, 435 (2018) 198-209.
- [14] H. Manchanda, M. Kumar, Study of water desalination techniques and a review on active solar distillation

- [29] K.K. Murugavel, K. Srithar, Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water, *Renewable Energy*, 36(2) (2011) 612-620.
- [30] A. Abdullah, M. Younes, Z. Omara, F. Essa, New design of trays solar still with enhanced evaporation methods– Comprehensive study, *Solar Energy*, 203 (2020) 164-174.
- [31] D. Maulud, A.M. Abdulazeez, A review on linear regression comprehensive in machine learning, *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 1(4) (2020) 140-147.
- [32] W.T. Coombs, J. Algina, New test statistics for MANOVA/descriptive discriminant analysis, *Educational and Psychological Measurement*, 56(3) (1996) 382-402.
- Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(1) (2020) 13-26 [In Persian].
- [26] S.K. Karna, R. Sahai, An overview on Taguchi method, *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1) (2012) 1-7.
- [27] M.N. Islam, A. Pramanik, Comparison of design of experiments via traditional and Taguchi method, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 15(03) (2016) 151-160.
- [28] M.S.S. Abujazar, S. Fatihah, A. Kabeel, Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate, *Desalination*, 423 (2017) 141-148.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Khalili, M. Taheri, H. Hooshangi, F. Shakeri, A. R. Tahmasbi, *Investigation of the Effect of Parameters Related to the Absorbent Fabric on the Performance of The Stepped Solar Still Using the Taguchi Method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(1) (2023) 21-44.

DOI: 10.22060/mej.2023.21619.7477



