Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(9) (2022) 421-424
DOI: 10.22060/mej.2022.21132.7382

Experimental Study of the Effect of Distilled Water-Conducting Threads on the Performance of Stepped Solar Still

M. Khalili[1, 2]*, M. Taheri [1, 2], M. Salehi[1], Z. Sadat Eghdami[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
[2] Institute of Advanced Technology, Arak University, Arak, Iran

ABSTRACT: Academics are interested in solar energy for water purification because it is easily accessible. In this investigation, a stepped solar still was constructed and tested experimentally in Arak. Using the Taguchi design of experiment approach, it was determined how the five input parameters-saline water flow rate, device angle, absorber plate color, number, and spacing of distilled water-conducting threads in each row-affected the amount of freshwater production as the output variable. This research is unique in that it uses plastic threads to create channels on the cover glass surface that lead distilled water to the freshwater tank. In addition, the simultaneous study of the effect of input parameters is one of the innovations of this research. The results showed that when the input saline water flow rate was 50 ml/min, the device angle was 40°, the absorber plate was black, the number of water-conducting threads in each row was 2, and the row spacing was 8 mm, the greatest freshwater output of 1975 ml/m^2 was produced. Also, by using two water-conducting threads in each row and spacing them 8 mm apart, the amount of water produced per unit of surface area was increased.

Review History:

Received: Feb. 21, 2022
Revised: Sep. 29, 2022
Accepted: Oct. 19, 2022
Available Online: Nov. 02, 2022

Keywords:

Experimental study
Stepped solar still
Desalination
Water-conducting thread
Taguchi method

1- Introduction

The process of desalination using stepped solar still is one of the older methods of water purification. Due to its economic nature and the use of only solar energy for evaporating saltwater, this method has attracted the attention of various researchers. Balachandran et al. [1] have investigated the increase in the productivity of fresh water in a proposed solar still using new absorbent material. The results showed that the use of more absorbent materials increases the rate of evaporation. In addition, the efficiency of fresh water in the proposed solar still was about 1.5 liters more than the normal solar still. Sakthivel et al. [2] concluded that adding color to the saltwater in the basin has a direct effect on the performance of the solar still device. Nougriaya et al. [3] have studied the factors affecting the output of the stepped solar still. Their research showed that decreasing the depth of salt water due to increasing temperature has increased productivity. The limitation of using the solar still device is the low amount of freshwater production per unit area of the surface. According to the conducted research, it is possible to increase the amount of water produced per unit area by identifying the effective variables and improving them. According to the research done in the past and the identification of the effective parameters, the innovation of current research compared to other research is to create paths on the surface of the glass using thread to conduct the distilled water to the freshwater tank. In addition, another innovation of the current research is the investigation of the effect of simultaneous use of five variables: salt-water inlet flow rate; angle of the device; the color of the absorber plate; number and distance of the conducting threads of distilled water in each row; and the study of their interaction.

2- Methodology

In this study, in order to achieve the optimal number of tests, a set of tests has been designed using the Taguchi design of the experimental approach. It was found how the flow rate of salt water, the angle of the device, the color of the absorber plate, the number of distilled water-conducting threads in each row, and their spacing in each row affected the amount of freshwater produced, which was the output variable.

After determining the level of each parameter in different tests, these tests were conducted from 9 am to 4 pm in Arak city in June and July. In each experiment, the amount of water produced per unit of absorbent surface in each hour of the experiment was recorded.

3- Results and Discussion

After conducting the experiments, the results obtained in different experiments were compared to each other, and the

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

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

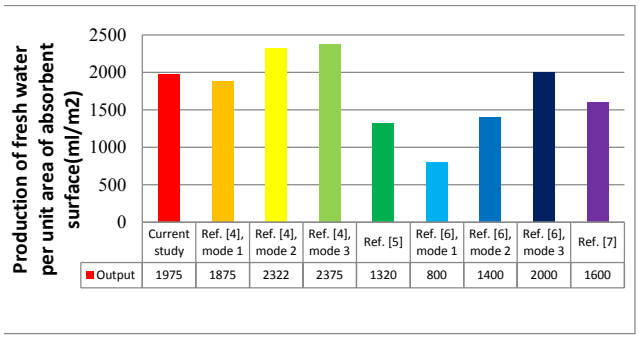


Fig. 1. Comparison of the maximum production of fresh water per unit area of absorbent surface

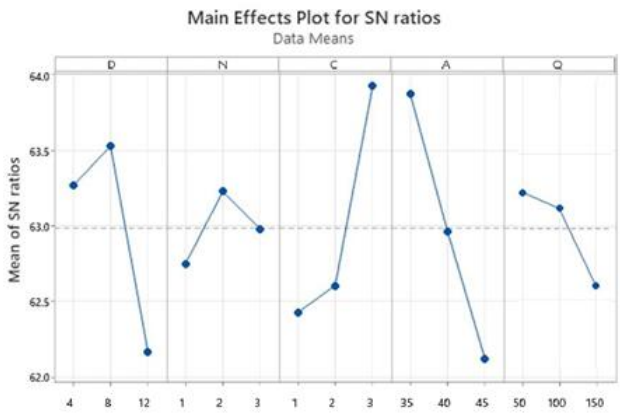


Fig. 2. Normal distribution diagram of the regression equation

effect of each of the above-mentioned five input parameters on the amount of water extraction as an output parameter was studied using different methods such as signal-to-noise analysis and regression analysis.

According to the test results, the maximum amount of water production per unit area was obtained when the inlet flow of salt water was 50 milliliters per minute, the angle of the device was 40 degrees, the color of the absorbing page was black, the number of threads for conducting distilled water in each row was 2, and the distance between the rows was 8. mm. In this case, the output volume obtained was 1975 ml/m^2. The lowest amount of water production per unit area was 1030 ml/m^2 in the case where the inlet flow rate of salt water was 150 milliliters per minute, the angle of the device was 40 degrees, the color of the absorbent plate was silver, the number of distilled water guiding threads in each row was 1, and the distance between the rows was 12 mm.

4- Validation

Fig. 1 shows the highest amount of freshwater production per unit of absorbent surface in the current research, compared to the results of some past research that had conditions closer to the current research. The difference in results between this article and other works is due to factors such as test conditions, test hours, test duration, test location, and so on.

5- Conclusion

The results obtained from the signal-to-noise analysis, according to Fig. 2, and the regression analysis show that the variables of the angle of the device and the color of the absorbent plate had the greatest effect on the amount of freshwater production. Also, the maximum water production volume was obtained when the salt-water inlet flow rate was 50 milliliters per minute, the angle of the device was 35 degrees, the color of the absorbent page was black, the number of distilled water conducting threads in each row was 2, and the distance between the rows of distilled water conducting threads from each other was equal to 8 cm. They were the best levels for each variable.

References

[1] G.B. Balachandran, P.W. David, A.B. Alexander, M.M. Athikesavan, K.K.S. Kumar, V. Palanichamy, A.E. Kabeel, R. Sathyamurthy, F.P.G. Marquez, A relative study on energy and exergy analysis between conventional single slope and novel stepped absorbable plate solar stills, Environmental Science and Pollution Research, 28(41) (2021) 57602-57618.

[2] T. Sakthivel, T. Arjunan, L. Natrayan, P. Kumar, P.P. Patil, R. Manikandan, A. Muniappan, P. Paramasivam, Experimental investigation on the effectiveness of solar still and its effect on adsorption with various dyes, Adsorption Science & Technology, 2022 (2022).

[3] S.K. Nougriaya, M. Chopra, B. Gupta, P. Baredar, Stepped solar still: A review on designs analysis, Materials Today: Proceedings, 46 (2021) 5647-5660.

[4] V. Nagaraju, G. Murali, A.K. Bewoor, R. Kumar, M. Sharifpur, M.E.H. Assad, M.M. Awad, Experimental study on performance of single slope solar still integrated with sand troughs, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50 (2022) 101884.

[5] A.J.N. Khalifa, On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes, Energy conversion and management, 52(1) (2011) 431-436.

[6] M.A.b.H.M. Yakup, A. Malik, Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, Renewable Energy, 24(2) (2001) 223-234.

[7] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John wiley & sons, 2017.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Khalili, M. Taheri, M. Salehi, Z. Sadat Eghdami, Experimental Study of the Effect of Distilled Water-Conducting Threads on the Performance of Stepped Solar Still, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 421-424.

DOI: 10.22060/mej.2022.20343.7212

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۹، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۱۰۳ تا ۲۱۲۰
DOI: 10.22060/mej.2022.21132.7382

مطالعهٔ تجربی اثر نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده بر روی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی

محمد خلیلی [۱ و ۲*]، معین طاهری [۱و۲]، میلاد صالحی [۱]، زهرا سادات اقدامی [۱]

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

خلاصه: باتوجه به دسترسی آسان به انرژی خورشید، تصفیه آب با استفاده از انرژی خورشید موردتوجه پژوهشگران می‌باشد. در این پژوهش، یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی ساخته شده و در شهر اراک موردمطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. به همین منظور، تأثیر پنج متغیر ورودی بر میزان استحصال آب به‌عنوان متغیر خروجی، با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی بررسی شده است. متغیرهای ورودی شامل دبی آب شور، زاویهٔ دستگاه، رنگ صفحهٔ جاذب، تعداد و فاصلهٔ نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف بوده‌اند. این تحقیق ازاین‌جهت منحصربه‌فرد است که از نخ‌های پلاستیکی برای ایجاد مسیرهایی بر روی سطح شیشه استفاده کرده تا آب تقطیر شده را به مخزن آب شیرین هدایت کند. همچنین بررسی هم‌زمان تأثیر پارامترهای ورودی از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین خروجی آب شیرین، به میزان ۱۹۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع، زمانی حاصل می‌شود که دبی ورودی آب شور ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویهٔ دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحهٔ جاذب مشکی، تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب در هر ردیف ۲ عدد و فاصلهٔ ردیف‌ها ۸ میلی‌متر باشد. همچنین استفاده از ۲ عدد نخ هدایت‌کنندهٔ آب در هر ردیف و به فاصلهٔ ۸ میلی‌متر از همدیگر سبب افزایش میزان استحصال آب بر واحد سطح شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:
بررسی تجربی
آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی
نمک‌زدایی
نخ هدایت‌کنندهٔ آب
روش تاگوچی

۱- مقدمه

فرایند نمک‌زدایی به‌وسیله آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی یکی از روش‌های قدیمی تصفیه آب است. همچنین این روش به دلیل اقتصادی بودن و تنها استفاده از انرژی خورشید به‌منظور تبخیر آب شور، موردتوجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. الشیخ و همکاران [۱] به معرفی یک مدل شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت برای پیش‌بینی میزان حجم خروجی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی و روش معمولی پرداخته‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها، میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با نمونه‌های معمولی بیش از ۱۰۰ درصد افزایش‌یافته است.

طوسی و همکاران [۲] دریافتند که دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی دارای سطح متراکم‌تری در مقایسه با آب‌شیرین‌کن معمولی خورشیدی است. آن‌ها چهار دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک پله‌ای، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با کندانسور خارجی، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با مواد تغییرفازدهنده و آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با کندانسور خارجی و مواد تغییرفازدهنده را مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند. نتایج به‌دست‌آمده، اثربخشی استفاده از کندانسور خارجی و مواد تغییرفازدهنده را در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی نشان داده است.

مانچاندا و کومار [۳ و ۴] به مطالعه و توسعهٔ یک رویکرد جدید برای استفاده از فضای خالی در پایین قسمت پلکانی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. در این رویکرد جدید، از یک بازتابنده در زیر دستگاه به‌منظور خشک‌کردن محصولات استفاده شده است. خروجی آب تقطیرشده در دبی کمتر آب شور ورودی به طور محسوسی بیشتر از همین خروجی در دبی بیشتر به‌دست‌آمده است. همچنین آن‌ها به انجام آزمایش بر روی واحد فعال خشک‌کن - تقطیر دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بهره‌وری انرژی با دبی کمتر، بیشتر از سایر دبی‌های مورد بررسی، گزارش شده است.

ویجایا کومار و همکاران [۵] در خصوص تأثیر افزودن یک سیستم رطوبت‌گیر و استفاده از مواد تغییرفازدهنده مانند موم یا پارافین بر روی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی غیرفعال ساده به پژوهش پرداخته‌اند.

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داده که با افزودن مواد تغییرفازدهنده به آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با سیستم رطوبت‌گیر، تولید آب مقطر به‌صورت پیوسته انجام‌گرفته و درنهایت باعث افزایش بازدهی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شده است.

جاثار و همکاران [۶] آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی از نوع مقعر را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و با انجام تجزیه‌وتحلیل آماری به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر کارایی دستگاه پرداخته‌اند. بر اساس نتایج تجربی، یک مدل رگرسیون توسعه‌یافته در نرم‌افزار آماری مینی‌تب پیشنهاد شده است. نتایج آماری نشان داد که مدل پیشنهادی برای تخمین کارایی مناسب بوده است و بر اساس آن بیشترین بهره‌وری روزانه به مقدار ۳/۷ لیتر بر مترمربع در روز در به‌دست‌آمده است.

عیسی و همکاران [۷] باهدف بهبود عملکرد حرارتی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پژوهشی صورت داده‌اند. نتایج تجربی نشان داده که استفاده از آسترهای راه‌راه و خمیده بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی اصلاح‌شده را افزایش داده است.

ماندال و اسلام [۸] به بررسی عددی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی بر پایهٔ نانوسیال پرداخته‌اند. دو نوع نانوسیال آلومینیوم اکسید–آب و مس–آب در داخل آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی مورداستفاده قرار گرفته است. هر دو نانوسیال بهره‌وری ساعتی را افزایش داده‌اند. همچنین مس–آب باعث بهره‌وری بیشتری در مقایسه با آب‌شیرین‌کن خورشیدی بدون نانوسیال شده است.

رامالینگام و همکاران [۹] به بررسی تأثیر استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی و مواد سوختی استفاده شده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی باهدف بهبود راندمان تولید آب شیرین پرداخته‌اند. باتوجه به نتایج تخلخل، جذب، افزایش مویرگی و انتقال حرارت دیسک با جنس الیاف پوسته نارگیل خشک‌شده نسبت به دیگر مواد افزایش بیشتری داشته است.

بالاچاندران و همکاران [۱۰] به بررسی افزایش بهره‌وری آب شیرین تولیدشده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پیشنهادی با استفاده از مواد جاذب جدید پرداخته‌اند. نتایج نشان داده که استفاده از مواد با جذب‌کنندگی بیشتر باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شود. همچنین بهره‌وری آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پیشنهادی حدوداً ۱/۵ لیتر بیشتر از آب‌شیرین‌کن معمولی بوده است.

ساتیامورتی و همکاران [۱۱] دررابطه‌با تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه و در غلظت‌های مختلف بر افزایش بهره‌وری آب شیرین در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به مطالعه پرداخته‌اند. از تحقیقات تجربی مشخص‌شده که افزایش دمای آب و صفحهٔ جاذب تحت‌تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه است. علاوه بر این، نتایج نشان داده بازده کل آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۲۷/۲، ۳۴/۲، ۱۸/۳ و ۱۸/۴ درصد است.

فیاض و همکاران [۱۲] در پژوهش خود به بررسی اثر ذرات فلزی تیتانیوم بر دمای سطحی جاذب آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای افزایش میزان تولید پرداختند. باتوجه به نتایج ثبت شده، در حالت استفاده از تیتانیوم با رنگ سیاه بازده ۵۴/۳۵ درصد نسبت به حالت عادی افزایش داشته است.

شمروخ و اکاوارا [۱۳] به بررسی اثر ترکیب آب‌شیرین‌کن پلکانی با پره‌های مسی، دیوارهای پلکانی و بازتابنده‌های داخلی و خارجی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بازده آب‌شیرین‌کن پلکانی موردنظر نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی بیش از ۱۰۰ درصد افزایش داشته است.

ناگاراجو و همکاران [۱۴] روش جدیدی برای ترکیب شن و ماسه برای افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک شیب با سطح دیافراگم ۱/۵ مترمربع پیشنهاد داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی با فرورفتگی‌های شنی در عمق آب ۱ سانتی‌متری ۶۵/۰۸ درصد به‌دست‌آمده درحالی‌که بدون شن و ماسه در عمق آب ۱ سانتی‌متر به ۳۷/۹ درصد محدود می‌شود.

آموری [۱۵] برای بهبود کارایی نمک‌زدایی از ماده‌ای منحصربه‌فرد و جاذب نور به نام هیدروژل استفاده کرده‌اند. نتایج نشان دادند که این ماده می‌تواند بازده دستگاه را از طریق کاهش اتلاف گرما در فرایند انتقال حرارت ناشی از محلی‌سازی گرما در فصل مشترک آب‌وهوا بهبود بخشد. علاوه بر این، هیدروژل‌ها موادی با دوام، شناور، بازیافتی و ضد رسوب هستند که برای برداشت و تقویت تولید بخار کارآمد هستند.

ساکثیول و همکاران [۱۶] به این نتیجه رسیدند که افزودن رنگ به آب شور درون حوضچه تأثیر مستقیمی بر میزان عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارد.

گناناراج و ولمورگان [۱۷]، با هدف ترکیب متغیرهای مؤثر بر آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌منظور افزایش بهره‌وری، به بررسی اثر چهار متغیر داخلی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با دستگاه آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای با استفاده از روش تاگوچی پرداخته‌اند. آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تک حوضچه‌ای و پلکانی که با روش تاگوچی، سطح هر یک

از متغیرهای آن طراحی‌شده، نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های معمولی به ترتیب ۱۷۵ و ۱۳۲/۲ درصد افزایش بهره‌وری داشته‌اند.

پانچال و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر پره‌های عمودی و شیب‌دار بر روی بازده دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که به علت افزایش دما عملکرد دو دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز شده به پره، عملکرد بهتری نسبت به دستگاه آب‌شیرین‌کن معمولی داشته است.

نوگریایا و همکاران [۱۹] عوامل مؤثر بر خروجی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. تحقیقات نشان داد که کاهش عمق آب شور به دلیل افزایش دما باعث افزایش بهره‌وری شده است.

پانچال و همکاران [۲۰] به بررسی میزان خروجی آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم افزایش داشته است.

ژیائو و همکاران [۲۱] به‌منظور افزایش انتقال حرارت برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی به بررسی و ارائه یک نوع جدید از صفحه‌های حرارتی پرداخته‌اند. نتایج مقایسه‌ها نشان داده که وقتی عمق کانال پایینی ۰/۰۱ متر باشد، میانگین سرعت انتقال حرارت از صفحهٔ جاذب به آب‌شور بهبودیافته است. درنتیجه میانگین دمای آب شور بیشتر شده و به‌تبع آن بهره‌وری روزانه آب شیرین افزایش داشته است. همچنین، میانگین بازده حرارتی و راندمان انرژی افزایش یافته‌اند.

کابیل و همکاران [۲۲] به بررسی چندین متغیر برای بهبود دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که افزایش بهره‌وری آب تقطیرشده روزانه برای یک دستگاه خورشیدی پلکانی با سیستم فتوولتائیک و گردش آب حدود ۷۸/۲۴ درصد بیشتر از یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی معمولی است.

عمرا و همکاران [۲۳] به اصلاح آب‌شیرین‌کن خورشیدی از طریق بازتابنده‌های داخلی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی اصلاح‌شده با بازتابنده افزایش داشته است.

کابیل و همکاران [۲۴ و ۲۵] همچنین در یک پژوهش نظری و تجربی به بررسی عوامل بهبود عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که حداکثر بهره‌وری از دستگاه آب‌شیرین‌کن پلکانی در شرایطی حاصل‌شده که عمق پله ۵ میلی‌متر و عرض پله ۱۲۰ میلی‌متر باشد. علاوه بر این، یکی از عوامل مؤثر بر بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی، عمق آب شور است که با کاهش عمق آب شور دما افزایش‌یافته و تقطیر بیشتری صورت‌گرفته است. همچنین استفادهٔ یکپارچه از آلومینیوم به‌عنوان صفحهٔ جاذب ۵۳ درصد و استفاده از کندانسور خارجی، بازتابنده‌های داخلی و خارجی تا حدود ۱۶۵ درصد باعث افزایش تولید آب شیرین شده است.

خلیفه و حمود [۲۶] به بررسی پارامترهایی از جمله عمق آب شور، زاویه شیشهٔ پوششی و رنگ در یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی بر میزان استحصال آب شیرین پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که بیشترین میزان استحصال آب شیرین در روز در حالتی است که زاویه شیب شیشه نزدیک به عرض جغرافیایی محل آزمایش باشد.

عصاری و همکاران [۲۷] به بررسی عددی میزان بهره‌وری و انتقال حرارت در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با تغییر زاویه پوشش شیشه‌ای و ارتفاع پله‌ها پرداختند. نتایج پژوهش آنها در تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد که برای زاویه شیشه در بازه ۵۵ الی ۶۵ درجه، با افزایش زاویه میزان استحصال و انتقال حرارت بیشتر شده و همچنین در خصوص ارتفاع پله‌ها در بازه انتخابی بین ۱ الی ۶ سانتی‌متر، با افزایش ارتفاع پله، میزان استحصال و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

جدول ۱ به طور مختصر نتایج پژوهش‌های موردمطالعه را نشان می‌دهد.

محدودیت استفاده از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی، میزان کم استحصال آب شیرین بر واحد سطح است. باتوجه به پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان با شناسایی متغیرهای تأثیرگذار و بهبود آن‌ها، میزان استحصال آب بر واحد سطح را افزایش داد. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده در گذشته و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار، نوآوری پژوهش صورت‌گرفته نسبت به دیگر پژوهش‌ها، ایجاد مسیرهایی بر روی سطح شیشه با استفاده از نخ برای هدایت آب تقطیرشده به مخزن آب شیرین می‌باشد. همچنین نوآوری دیگر پژوهش انجام شده بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از پنج متغیر دبی ورودی آب شور، زاویهٔ دستگاه، رنگ صفحهٔ جاذب، تعداد و فاصلهٔ نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف و مطالعه برهم‌کنش آن‌ها است.

۲- دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی

در سیستم‌های تقطیر خورشیدی آب شور را به ظرف کم عمقی که کاملاً آب‌بندی شده و با هوای خارج ارتباطی ندارد، وارد می‌کنند. پوشش شفافی مانند شیشه و یا پلاستیک، سطح فوقانی ظروف مربوطه را می‌پوشاند. انرژی خورشیدی با طول موج‌های مختلف از شیشه گذشته و نور خورشید

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته(ادامه دارد)

Table 1. Summarizing the results of past researches(Continude)

سال	نویسندگان	نتیجه
۲۰۲۱	الشیخ و همکاران [۱]	افزایش ۱۰۰ درصدی میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با نمونه‌های معمولی.
۲۰۲۱	طوسی و همکاران [۲]	اثربخشی استفاده از کندانسور خارجی و مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی.
۲۰۲۱	مانچاندا و کومار [۳ و ۴]	میزان استحصال برای دبی ورودی ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ۱۵ درصد بیشتر نسبت به دبی آب شور با مقدار ۶۵ میلی‌لیتر بر دقیقه است.
۲۰۲۱	ویجایا کومار و همکاران [۵]	استفاده از مواد تغییرفازدهنده، باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.
۲۰۲۱	جاثار و همکاران [۶]	استفاده از آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی مقعر باعث افزایش راندمان می‌شود.
۲۰۲۱	عیسی و همکاران [۷]	استفاده از آسترهای راه‌راه و خمیده بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را افزایش داده می‌دهد.
۲۰۲۱	ماندال و اسلام [۸]	استفاده از نانوسیال میزان استحصال را به‌صورت ساعتی افزایش می‌دهد.
۲۰۲۱	رامالینگام و همکاران [۹]	استفاده از پوست نارگیل خشک شده باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.
۲۰۲۱	بالاچاندران و همکاران [۱۰]	استفاده از مواد با جذب‌کنندگی بیشتر باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شود.
۲۰۲۰	ساتیامورتی و همکاران [۱۱]	استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه باعث افزایش میزان استحصال آب می‌شود.
۲۰۲۲	فیاض و همکاران [۱۲]	استفاده از تیتانیوم با رنگ سیاه باعث افزایش ۵۴/۳۵ درصدی بازده نسبت به حالت عادی می‌شود.
۲۰۲۰	شمروخ و اکاوارا [۱۳]	استفاده از پره‌های مسی و بازتابنده‌های داخلی و خارجی، باعث افزایش عملکرد دستگاه می‌شود.
۲۰۲۲	ناگاراجو و همکاران [۱۴]	استفاده از شن و ماسه بر روی سطح جاذب باعث افزایش راندمان به میزان ۲۷/۱۸ درصد می‌شود
۲۰۲۲	آموری [۱۵]	معرفی یک ماده جاذب نور و نمک‌زدا به نام هیدروژل به‌منظور افزایش بازده شیرین‌سازی.
۲۰۲۲	ساکشیول و همکاران [۱۶]	افزودن رنگ به آب شور درون حوضچه تأثیر مستقیمی بر میزان عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارد.
۲۰۲۰	گناناراج و ولمورگان [۱۷].	با استفاده از روش تاگوچی به بررسی پارامترهای داخلی دو نوع از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه و پلکانی پرداختند
۲۰۲۰	پانچال و همکاران [۱۸]	با استفاده از باله‌های عمودی و شیب‌دار، به علت افزایش دما میزان استحصال دستگاه افزایش می‌یابد.

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته

Table 1. Summarizing the results of past researches

۲۰۲۱	نوگریایا و همکاران [۱۹]	کاهش عمق آب شور باعث افزایش تبخیر بیشتر می‌شود.
۲۰۱۹	پانچال و همکاران [۲۰]	استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم، باعث افزایش میزان استحصال آب می‌شود.
۲۰۱۹	ژیائو و همکاران [۲۱]	به بررسی یک نوع جدید از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته شد و نتیجه حاصل شد بیشترین استحصال زمانی است که عمق کانال پایینی ۰/۰۱ متر باشد.
۲۰۱۹	کابیل و همکاران [۲۲]	استفاده از سیستم فتوولتائیک و گردش آب باعث افزایش حدود ۷۸/۲۴ درصدی بهره‌وری دستگاه می‌شود.
۲۰۱۳	عمرا و همکاران [۲۳]	استفاده از بازتابنده باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.
۲۰۱۲	کابیل و همکاران [۲۴ و ۲۵]	کاهش عمق آب شور باعث تقطیر بیشتر شده و صفحهٔ جاذب از جنس آلومینیوم ۵۳ درصد میزان استحصال را افزایش می‌دهد. استفاده از کندانسور و بازتابنده باعث افزایش ۱۶۵ درصدی میزان استحصال می‌شود.
۲۰۰۹	خلیفه و حمود [۲۶]	زاویهٔ بهینهٔ دستگاه، نزدیک به عرض جغرافیایی محل است.
۲۰۲۲	عصاری و همکاران [۲۷]	با افزایش زاویه پوشش شیشه‌ای میزان استحصال و انتقال حرارت بیشتر شده و همچنین، با افزایش ارتفاع پله نیز میزان استحصال و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

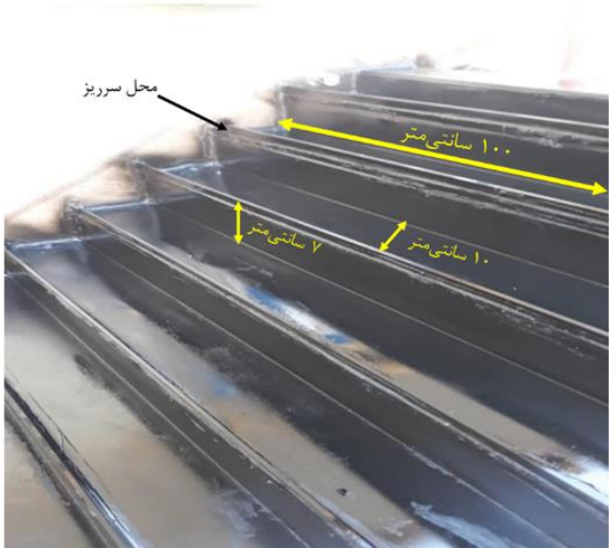
شکل ۱. نمای کلی دستگاه

Fig. 1. Overview of the device

با آب داخل ظرف و سطح جاذب برخورد نموده و آب گرم می‌شود. پوشش شفاف مانع خروج نور خورشید از محفظه شده و بعلاوه باعث می‌شود که افت گرمایی از طریق جابه‌جایی به مقدار زیادی کاهش یابد. به‌این‌ترتیب انرژی گرمایی خورشید در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی محصور شده و موجب افزایش دمای آب و تولید بخار آب در محفظه می‌گردد. به‌تدریج که رطوبت نسبی در محفظه افزایش می‌یابد، بخار آب در اثر دفع گرما از شیشه، روی سطح داخلی شیشه تقطیر شده و آب شیرین حاصله به‌طرف محل جمع‌آوری در انتهای پوشش حرکت می‌کند. به‌این‌ترتیب با استفاده از انرژی خورشید و عمل تقطیر، آب شیرین تهیه می‌شود. آب‌نمک غلیظ شده نیز به طور مداوم یا متناوب از دستگاه خارج می‌شود. مهم‌ترین عامل مؤثر در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شدت نور خورشید است؛ زیرا میزان تولید آب شیرین با شدت تابش خورشید نسبت مستقیم دارد [۲۸].

نحوهٔ عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پلکانی در این پژوهش به صورتی است که آب شور از مخزن بالای دستگاه وارد پلهٔ اول شده و پس از پوشش سطح پلهٔ اول، از سرریز در نظر گرفته شده در انتهای پلهٔ اول، وارد پلهٔ دوم می‌شود. آب شور تا انتهای پلهٔ آخر این مسیر را طی می‌کند و پس از آن به‌وسیلهٔ شیر خروجی از پلهٔ آخر از دستگاه خارج شده و مجدد به مخزن آب شور بالای دستگاه منتقل می‌شود. حرکت مارپیچ آب شور در دستگاه باعث کاهش رسوب آب شور روی سطح و همچنین افزایش فرصت برای جذب انرژی خورشید توسط آب و تبخیر آن می‌شود. دستگاه ساخته شده دارای منبع آب‌شور، در بالای دستگاه و یک منبع جمع‌آوری آب شیرین، در پایین دستگاه می‌باشد. در آخرین پله، خروجی‌ای برای آب شور و هدایت مجدد آن به منبع آب شور در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ نمای کلی بدنهٔ دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساخته شده در این پژوهش نشان شده است.

در مشاهدات میدانی، تأثیر نخ هدایت‌کننده مشخص‌شده است؛ به‌گونه‌ای که در قسمت‌های نزدیک به نخ هدایت‌کننده بر روی شیشه، آب تقطیرشده جریان یافته و با سهولت بیشتری به پایین شیشه و سپس به داخل مخزن آب‌شیرین‌کن هدایت می‌شود. همچنین به‌منظور چرخش آب به‌صورت مارپیچ ۱۰ پله تعبیه شده که در هر پله از سرریزهایی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان‌داده‌شده است، ارتفاع هر پله ۷ سانتی‌متر عرض آن ۱۰۰ سانتی‌متر و طول هر پله ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و به دلیل دما و رطوبت بالای داخل محفظه از ورق گالوانیزه به‌عنوان جنس داخلی دستگاه و پله‌ها استفاده گشته است.



شکل ۲. طراحی پله‌های دستگاه

Fig. 2. Design of device stairs

۳- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین تعداد آزمایش، به طراحی مجموعه‌ای از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. ازجمله روش‌های طراحی آزمایش می‌توان به روش‌هایی مانند تاگوچی، روش سطح پاسخ، یا روش سعی و خطا اشاره کرد. روش تاگوچی با رویکردی کارا برای بهینه‌سازی متغیرهای هر الگوریتم، مجموعهٔ محدودی از آزمایش‌ها را ارائه می‌کند که نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی تمامی ناحیهٔ آزمایشی که توسط فاکتورها و سطوح تنظیم آن‌ها ساخته می‌شود، معتبر هستند. این روش کیفیت را بر اساس انحراف از مقدار مطلوب بیان کرده و دو روش را برای آنالیز داده‌ها پیشنهاد می‌دهد. روش اول روشی استاندارد است که نتایج حاصل از انجام تنها یک‌بار آزمایش را با استفاده از آنالیز میانگین[1] بهینه‌سازی می‌کند. روش دوم، روش آنالیز نسبت سیگنال به نویز[2] است که در آن انحراف‌های ممکن بین داده آزمایشگاهی و مقدار مطلوب را به کمک یک تابع ضرر مدل‌سازی می‌کند. مقدار این تابع باتوجه به ماهیت تابع پاسخ از میان سه حالت هرچه بیشتر بهتر، هرچه کمتر بهتر و هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر بهتر باشد انتخاب می‌شود [۲۹]. در این پژوهش به‌منظور بهینه‌کردن تعداد آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۱/۱ به طراحی آزمایش به روش تاگوچی پرداخته شده است.

در پژوهش انجام شده، به‌منظور بررسی تأثیر هر متغیر، سه سطح برای آن‌ها در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ متغیرهای مورد بررسی به همراه سطح‌های آن‌ها آورده شده است. همچنین جدول ۳، جدول طراحی آزمایش به روش تاگوچی را نشان می‌دهد.

۴- تحلیل نتایج

با انجام آزمایش‌های مختلف مطابق با طراحی آزمایش صورت‌گرفته و با اندازه‌گیری حجم آب خروجی تولیدشده در هر آزمایش، تأثیر هرکدام از متغیرهای دبی ورودی آب شور، زاویهٔ دستگاه، رنگ صفحهٔ جاذب، تعداد و فاصلهٔ نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف مورد بررسی قرار گرفته است. میزان استحصال آب بر واحد سطح، از هر آزمایش با بشر (با دقت ۵ میلی‌لیتر) اندازه‌گیری شده و برای تعیین صحت حجم خوانده شده، باتوجه به چگالی آب و وزن بشر و استفاده از ترازوی دیجیتال وزن آب به‌دست‌آمده از آزمایش اندازه‌گیری شده است. در جدول ۴ و شکل ۳ نتایج خروجی هرکدام از آزمایش‌ها آورده شده است.

با استفاده از نتایج جهت تعیین سطوح با بهترین عملکرد متغیرهای آزمایش، از نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است. نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهندهٔ مقدار حساسیت پارامتر مورد بررسی به متغیرهای غیرقابل‌کنترل در یک آزمایش کنترل شده می‌باشد [۳۰]. متغیرهای غیرقابل‌کنترل، عوامل ایجادکنندهٔ نویز در روند آزمایش هستند که در این آزمایش می‌توان به دمای محیط و شدت میزان وزش باد اشاره کرد.

1 Analysis of Means (ANOM)
2 Signal to noise ratio

جدول ۲. سطح متغیرهای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها

Table 2. Level of variables considered for tests

متغیر	واحد	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
دبی ورودی آب شور	میلی‌لیتر بر دقیقه	Q	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
زاویهٔ دستگاه	درجه	A	۳۵	۴۰	۴۵
رنگ صفحهٔ جاذب	-	C	نقره‌ای	زرد	مشکی
تعداد نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف	-	N	۱	۲	۳
فاصلهٔ ردیف نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده	سانتی‌متر	D	۴	۸	۱۲

جهت استخراج نسبت سیگنال به نویز، از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. به‌منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز و همچنین به‌دست‌آوردن سطوح مناسب هر یک از پارامترهای ورودی، از یک تابع زیان استفاده شده است. تابع زیان از نوع هرچه بیشتر بهتر در نظر گرفته شده، به این دلیل که بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح، مدنظر است؛ بنابراین مشخصه کیفی هرچه بیشتر بهتر بر اساس معادلهٔ (۱) محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$S/N = -10log_{10}(1/n\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Y_i^2}) \quad (۱)$$

که Y_i از نتایج به‌دست‌آمده و n تعداد آزمایش‌ها است.

در شکل ۴ نمودار نسبت سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی آورده شده است. در ادامه، باتوجه به نتایج شکل ۴ تأثیر متغیرهای آزمایش بر روی خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- ۱- متغیر دبی ورودی آب شور ورودی به دستگاه

در پژوهش صورت‌گرفته برای دبی ورودی آب شور، ۳ دبی متفاوت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مورداستفاده قرار گرفت. هدف از بررسی سطوح مختلف دبی، قابل قیاس بودن نتایج این مقاله با کارهای گذشته و سنجش صحت نتایج بوده است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و شکل ۴-الف، این نتیجه دریافت می‌شود که با افزایش دبی ورودی آب شور، میزان استحصال آب بر واحد سطح کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش آن است که با افزایش دبی ورودی، عمق آب شور بر روی پله‌ها نیز افزایش‌یافته و میزان تبخیر سطحی کاهش می‌یابد [۳۱].

۴- ۲- زاویهٔ دستگاه

باتوجه به اینکه مختصات جغرافیایی محل انجام آزمایش ۳۴ درجه شمالی و ۴۹ درجه شرقی بوده است، به‌منظور استفاده بیشتر از انرژی خورشیدی جهت دستگاه به سمت جنوب تنظیم گردیده است. باتوجه به زمان آزمایش که در خرداد و تیرماه انجام شده است و به‌منظور بررسی اثر زاویهٔ شیشه رویی دستگاه بر میزان تولید آب شیرین، سه زاویهٔ ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه موردمطالعه قرار گرفته است. شایان‌ذکر است که پس از انجام آزمایش‌ها، بدین نتیجه رسیده شد که شاید بهتر بود باتوجه به این‌که عرض جغرافیایی ۳۴ درجه است، در طراحی آزمایش، سطوح به‌صورت متقارن حول این زاویه طراحی شوند. یعنی به‌عنوان نمونه ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه که به ترتیب حدوداً برابر زوایای بهینه تابستانی، سالیانه و زمستانی خواهند بود. مطابق با شکل ۴-ب و باتوجه به انجام آزمایش‌ها در فصل تابستان، مشاهده می‌شود که با افزایش زاویهٔ شیشه رویی دستگاه، میزان استحصال آب بر واحد سطح آب‌شیرین‌کن خورشیدی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش زاویهٔ دستگاه در فصل تابستان، میزان انعکاس نور خورشید از روی سطح شیشه افزایش پیدا کرده و عملاً انرژی تابشی کمتری به سطح جاذب می‌رسد [۳۴-۳۲]. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیب بهینه در سال تقریباً برابر با عرض جغرافیایی مکان است [۳۵].

۴- ۳- رنگ صفحهٔ جاذب

یکی از متغیرهای مؤثر در پژوهش‌های انجام شده، رنگ صفحهٔ جاذب بوده است. در این پژوهش به‌منظور توسعهٔ پژوهش‌های گذشته از سه رنگ نقره‌ای، زرد و مشکی استفاده شده است. باتوجه به شکل ۴-پ رنگ مشکی

جدول ۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

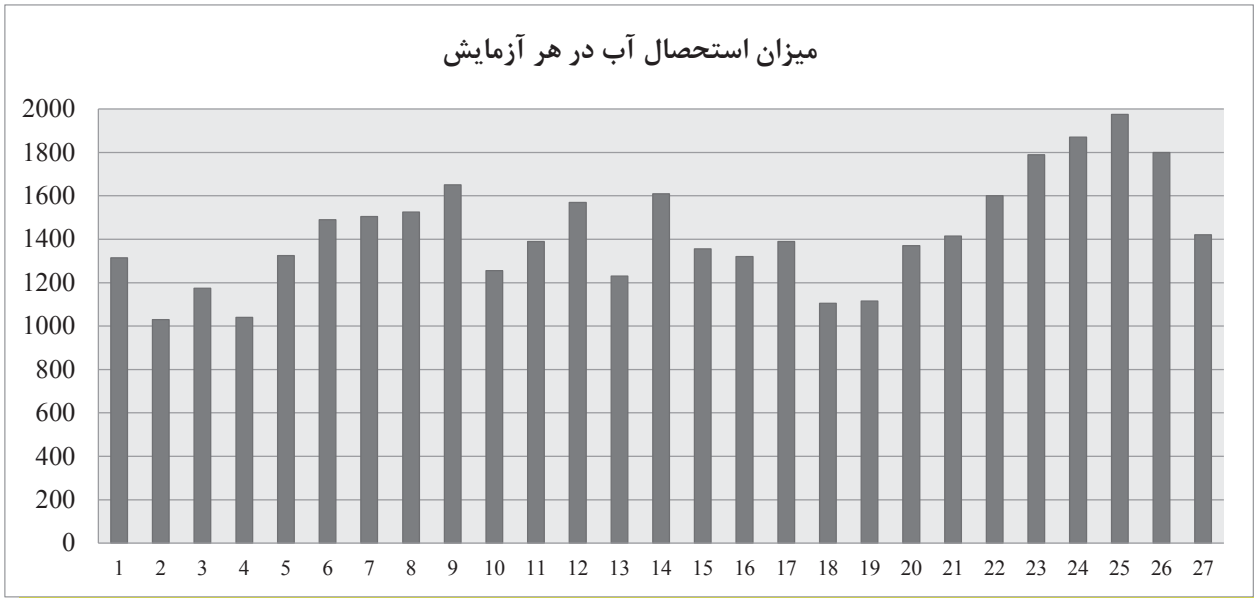
Table 3. Experiment design by Taguchi method

شمارهٔ آزمایش	دبی ورودی (میلی‌لیتر بر دقیقه)	زاویهٔ دستگاه (درجه)	رنگ صفحهٔ جاذب	تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده	فاصلهٔ ردیف‌های نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده (سانتی‌متر)
۱	۱۵۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۲	۵۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۳	۱۰۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۴	۱۵۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۵	۵۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۶	۱۰۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۷	۱۵۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۸	۵۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۹	۱۰۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۱۰	۱۵۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۱	۵۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۲	۱۰۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۳	۱۵۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۴	۵۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۵	۱۰۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۶	۱۵۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۷	۵۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۸	۱۰۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۹	۱۵۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۰	۵۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۱	۱۰۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۲	۱۵۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۳	۵۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۴	۱۰۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۵	۱۵۰	۴۰	مشکی	۲	۸
۲۶	۵۰	۴۰	مشکی	۲	۸
۲۷	۱۰۰	۴۰	مشکی	۲	۸

جدول ۴. میزان استحصال آب در هر آزمایش

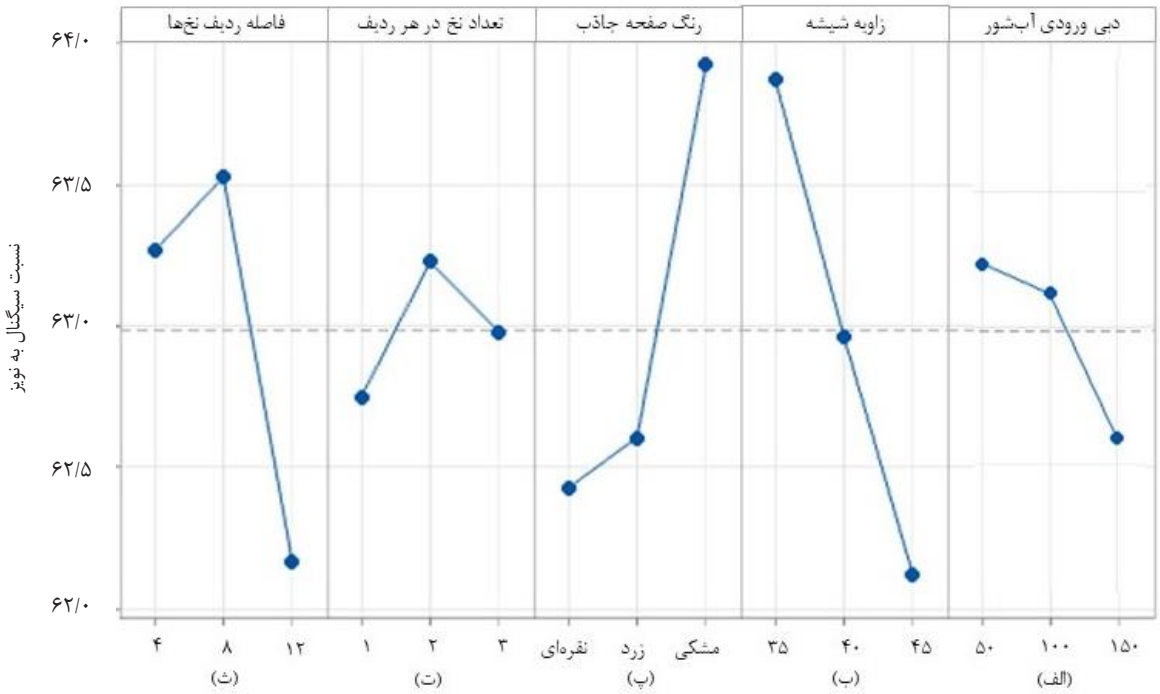
Table 4. The amount of water production in each test

شمارهٔ آزمایش	میزان استحصال آب بر واحد سطح (میلی‌لیتر بر مترمربع)	شمارهٔ آزمایش	میزان استحصال آب بر واحد سطح (میلی‌لیتر بر مترمربع)	شمارهٔ آزمایش	میزان استحصال آب بر واحد سطح (میلی‌لیتر بر مترمربع)
۱	۱۳۱۵	۱۰	۱۲۵۵	۱۹	۱۱۱۵
۲	۱۰۳۰	۱۱	۱۳۹۰	۲۰	۱۳۷۰
۳	۱۱۷۵	۱۲	۱۵۷۰	۲۱	۱۴۱۵
۴	۱۰۴۰	۱۳	۱۲۳۰	۲۲	۱۶۰۰
۵	۱۳۲۵	۱۴	۱۶۱۰	۲۳	۱۷۹۰
۶	۱۴۹۰	۱۵	۱۳۵۵	۲۴	۱۸۷۰
۷	۱۵۰۵	۱۶	۱۳۲۰	۲۵	۱۹۷۵
۸	۱۵۲۵	۱۷	۱۳۹۰	۲۶	۱۸۰۰
۹	۱۶۵۰	۱۸	۱۱۰۵	۲۷	۱۴۲۰



شکل ۳. میزان استحصال آب در هر آزمایش (میلی‌لیتر بر مترمربع)

Fig. 3. The amount of water production in each test (milliliters per square meter)



شکل ۴. نمودار تأثیرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز

Fig. 4. Main Effects Plot for SN ratios

و بعد از آن رنگ زرد بیشترین تأثیر را در افزایش تولید آب شیرین داشته‌اند. دلیل این امر در جذب انرژی خورشید هر یک از رنگ‌ها است، به‌طوری‌که رنگ مشکی، زرد و نقره‌ای به ترتیب بیشترین جذب انرژی خورشید را دارند.

۴- ۴- متغیر تعداد نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده در هر ردیف

به‌منظور هدایت بهتر قطرات آب تقطیر شده بر روی سطح شیشه در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با استفاده از نخ پلاستیکی مسیرهایی ایجاد گردیده است. به این طریق، قطره‌های آب تقطیر شده نزدیک به این نخ‌ها، به‌جای جاری شدن روی سطح شیشه و طی‌کردن مسیر پر پیچ‌وخم و طولانی، در کنار این نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب، مسیری کوتاه‌تر را به سمت مخزن آب شیرین طی می‌کنند.

کاملاً روشن است که با افزایش تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب در هر ردیف، قطرات بیشتری از آب تقطیر شده بر روی شیشه به همدیگر چسبیده و در طول نخ به سمت مخزن جریان پیدا می‌کنند؛ اما زمانی که در طول مسیر، قطرات به‌هم‌چسبیده بیش از اندازه بزرگ شوند، این قطرات به‌جای جاری شدن در طول نخ‌ها به علت وزن زیاد به داخل حوضچه‌ها سقوط می‌کنند. باتوجه به توضیحات داده شده همان گونه که در شکل ۴-ت مشاهده می‌شود، از بین تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب در هر ردیف، تعداد ۲ نخ بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح را نسبت به دو حالت دیگر داشته است.

۴- ۵- متغیر فاصلهٔ بین ردیف‌های نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده

در این پژوهش برای فاصلهٔ میان ردیف‌های نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده، سه فاصلهٔ ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری در نظر گرفته شده است. زمانی که فاصلهٔ میان ردیف‌های نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده ۴ سانتی‌متر باشد، این نخ‌ها مساحت بیشتری از سطح شیشه را پوشانده و علاوه بر این‌که قطرات آب بیشتری بر روی شیشه به سمت مخزن هدایت می‌گردد؛ تا حدی نیز جلوی عبور نور خورشید از شیشه و رسیدن آن به صفحهٔ جاذب گرفته می‌شود. با افزایش فاصلهٔ میان ردیف‌ها به ۸ و ۱۲ سانتی‌متر، انرژی خورشیدی بیشتری نسبت به حالت قبل به صفحهٔ جاذب

می‌رسد. البته می‌بایست به این نکته توجه نمود که در فاصلهٔ ۱۲ سانتی‌متریِ ردیف‌ها نسبت به فاصلهٔ ۸ سانتی‌متری آن‌ها، تعداد نخ کمتری بر روی سطح شیشه استفاده شده و در نتیجه میزان هدایت آب تقطیر شده بر روی شیشه به سمت مخزن نیز کمتر می‌باشد. با عنایت به مطالب گفته شده و باتوجه به شکل ۴-ث فاصلهٔ ۸ سانتی‌متر، فاصلهٔ بهینه میان ردیف‌های نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده می‌باشد.

۴- ۶- تحلیل معادلهٔ رگرسیون

رگرسیون خطی نوعی تابع پیش‌بینی‌کنندهٔ خطی است که در آن یک متغیر وابسته به‌صورت ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود، به این معنی که هرکدام از متغیرهای مستقل در ضریبی که در فرایند تخمین برای آن متغیر به‌دست‌آمده ضرب می‌شوند. جواب نهایی، مجموع حاصل‌ضرب‌ها به‌علاوه یک مقدار ثابت خواهد بود که آن‌هم در فرایند تخمین به‌دست‌آمده است. معادلهٔ (۲) نشان‌دهندهٔ معادلهٔ رگرسیون حاصل از داده‌های به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها می‌باشد، که حجم آب شیرین تولید شده را بر حسب متغیرهای آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} V &= 7.77Q + 15.11A + 447C + \\ &315N - 21.4D - 12.41QC + \\ &10.72QN + 0.0273Q^2C - \\ &0.0313Q^2N - 0.1442QAN + \\ &1.677QC^2 - 2.70AN^2 \end{aligned} \tag{۲}$$

شرح متغیرهای مورداستفاده در معادلهٔ (۲) مطابق با جدول ۲ است. در ادامه به‌منظور تعیین میزان دقت معادلهٔ رگرسیونِ به‌دست‌آمده بر حسب متغیرهای آزمایش و همچنین میزان تأثیرگذاری هر متغیر بر روی خروجی مطلوب (حجم آب شیرین تولیدی)، بررسی‌های بیشتری انجام می‌شود. به این منظور، در جدول ۵ از طریق بررسی مقدار احتمال[1] و مقدار تی[2]، میزان مؤثر بودن هرکدام از متغیرهای موجود در معادلهٔ رگرسیون تعیین می‌گردد. در جدول ۵ متغیرها[3]، ضرایب[4] آن‌ها، خطای استاندارد ضرایب[5] و عامل تورم واریانس[6] نیز ذکر گردیده است.

1 P-Value
2 T-Value
3 Term
4 Coefficient (Coef)
5 Standard Error of Coefficient (SE Coef)
6 Variance Inflation Factor (VIF)

باتوجه به جدول ۵ که با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب به‌دست‌آمده است، به‌استثنای متغیرهای زاویهٔ شیشه (A) و تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیر شده در هر ردیف (D)، باقی متغیرها در سطح معنی‌دار خوبی (مقدار احتمال کمتر از ۰/۰۵) قرار دارند.

همچنین در جدول ۶ باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، آنالیز واریانس خروجی از نرم‌افزار مینی‌تب آورده شده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر متغیرهای معادلهٔ رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش بسزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر متغیرهای ورودی و برهم‌کنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [۳۶]. در این جدول متغیرها، درجه آزادی[7] آن‌ها، مجموع مربعات تنظیم‌شده[8]، میانگین مربعات تنظیم‌شده[9]، مقدار اف[10] و مقدار احتمال ذکر شده‌اند.

صفر بودن مقدار احتمال و برابر بودن مقدار اف با ۲۰۲/۵۲، معنی‌دار بودن مدل را بیان می‌کند.

همچنین، از نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای تأیید این فرض که باقیمانده‌ها به طور معمول توزیع‌شده‌اند، استفاده می‌شود. نمودار احتمال عادی باقیمانده‌ها باید تقریباً از یک خط مستقیم که به آن خط برازش گفته می‌شود، پیروی کند. خط برازش نشان‌دهندهٔ باقی‌مانده‌های مدل و نقاط، مقادیر حقیقی باقی‌مانده‌های به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون هستند. شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل رگرسیون به دلیل نزدیک بودن برهم‌کنش‌ها به خط توزیع نرمال، از لحاظ فرضیات زیربنایی از جمله نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در وضعیت مطلوبی قرار دارد.

در جدول ۷ مدل خلاصه شده آورده شده است. ستون دوم نشان‌دهندهٔ ضریب تعیین[11]، ستون سوم نشان‌دهندهٔ ضریب تعیین تعدیل شده[12] و ستون چهارم نشان‌دهندهٔ ضریب تعیین پیش‌بینی شده[13] است.

ضریب تعیین، نشان‌دهندهٔ آن است که چه میزان از تغییرات متغیر وابسته، تحت‌تأثیر متغیر مستقل بوده و تا چه حدی تغییرات آن مربوط به سایر عوامل موجود می‌باشد. ضریب تعیین همیشه بین ۰ و ۱۰۰ درصد خواهد بود که عدد صفر درصد نشانگر آن است که مدل رگرسیون هیچ ارتباطی بین متغیرهای وابسته و مستقل را در اطراف میانگین آن نشان نمی‌دهد و عدد

7 Degrees of Freedom (DF)
8 Adjusted Sum of Squares (Adj SS)
9 Adjusted Mean of Squares (Adj MS)
10 F-Value
11 R-Squared (R-Sq)
12 Adjusted R-Squared (R-Sq(adj))
13 Predicted R-Squared (R-Sq(pred))

جدول ۵. بررسی اثر هر متغیر بر معادلهٔ رگرسیون

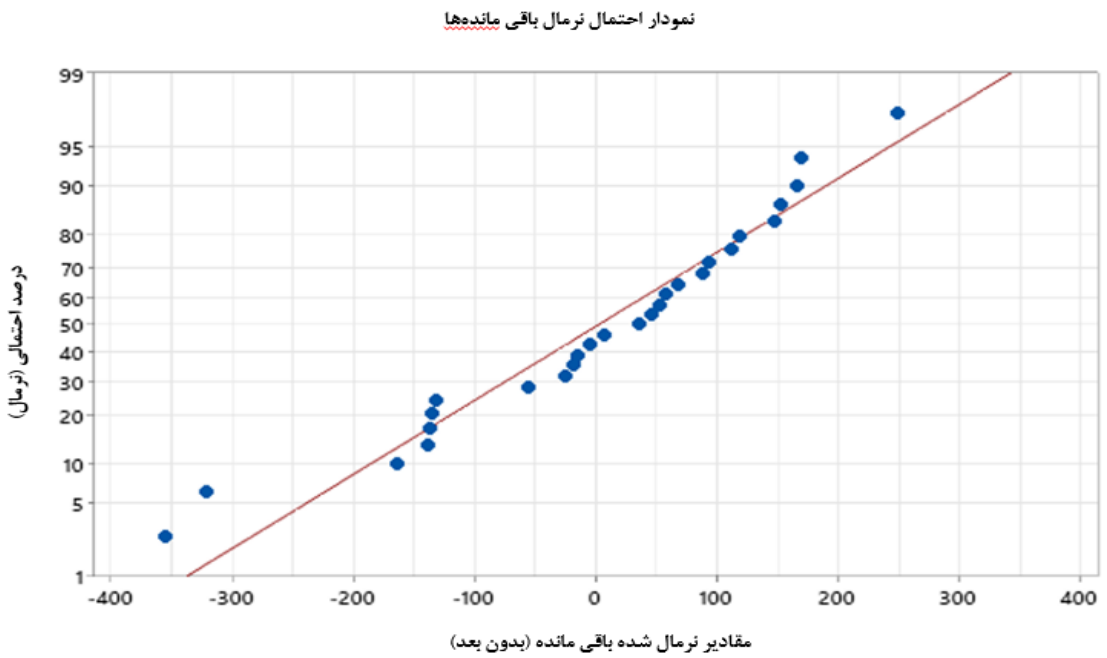
Table 5. Examining the effect of each variable on the regression equation

متغیر	ضرایب	خطای استاندارد ضرایب	مقدار تی	مقدار احتمال	عامل تورم واریانس
Q	۹/۵۷	۳/۲۸	۲/۹۲	۰/۰۰۹	۱۰۹/۵۷
A	۴/۹۰	۵/۲۳	۰/۹۴	۰/۳۶۱	۳۸/۶۲
C	۲۵۶	۱۰۲	۲/۵۰	۰/۰۲۲	۴۲/۸۲
N	۸۵۶	۱۵۷	۵/۴۶	۰/۰۰۰	۱۰۰/۱۲
D	-۲۰/۱	۱۰/۳	-۱/۹۵	۰/۰۶۶	۶/۸۷
$Q*C$	-۶/۷۶	۲/۸۱	-۲/۴۱	۰/۰۲۷	۳۷۵/۵۹
$Q*A*N$	-۰/۰۵۰۱	۰/۰۲۱۷	-۲/۳۱	۰/۰۳۳	۳۶/۳۱
$Q*C*C$	۱/۵۲۵	۰/۶۶۸	۲/۲۸	۰/۰۳۵	۱۴۸/۳۵
$A*N*N$	-۴/۰۰	۱/۱۹	-۳/۳۷	۰/۰۰۳	۶۴/۸۴

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس

Table 6. Variance analysis table

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	مقدار اف	مقدار احتمال
رگرسیون	۹	۵۶۳۳۳۸۵۲	۶۲۵۹۳۱۷	۲۰۲/۵۲	۰/۰۰۰
Q	۱	۲۶۳۲۵۴	۲۶۳۲۵۴	۸/۵۲	۰/۰۰۹
A	۱	۲۷۱۱۷	۲۷۱۱۷	۰/۸۸	۰/۳۶۱
C	۱	۱۹۲۸۹۵	۱۹۲۸۹۵	۶/۲۴	۰۰۲۲
N	۱	۹۲۲۲۲۲	۹۲۲۲۲۲	۲۹/۸۴	۰/۰۰۰
D	۱	۱۱۷۹۶۸	۱۱۷۹۶۸	۳/۸۲	۰/۰۶۶
$Q*C$	۱	۱۷۸۹۹۵	۱۷۸۹۹۵	۵/۷۹	۰/۰۲۷
$Q*A*N$	۱	۱۶۴۳۷۹	۱۶۴۳۷۹	۵/۳۲	۰/۰۳۳
$Q*C*C$	۱	۱۶۱۳۲۲	۱۶۱۳۲۲	۵/۲۲	۰/۰۳۵
$A*N*N$	۱	۳۵۱۱۶۶	۳۵۱۱۶۶	۱۱/۳۶	۰/۰۰۳
خطا	۱۸	۵۵۶۳۲۳	۳۰۹۰۷		
مجموع	۲۷	۵۶۸۹۰۱۷۵			



شکل ۵.مودار توزیع نرمال معادلهٔ رگرسیون

Fig. 5. Normal distribution diagram of the regression equation

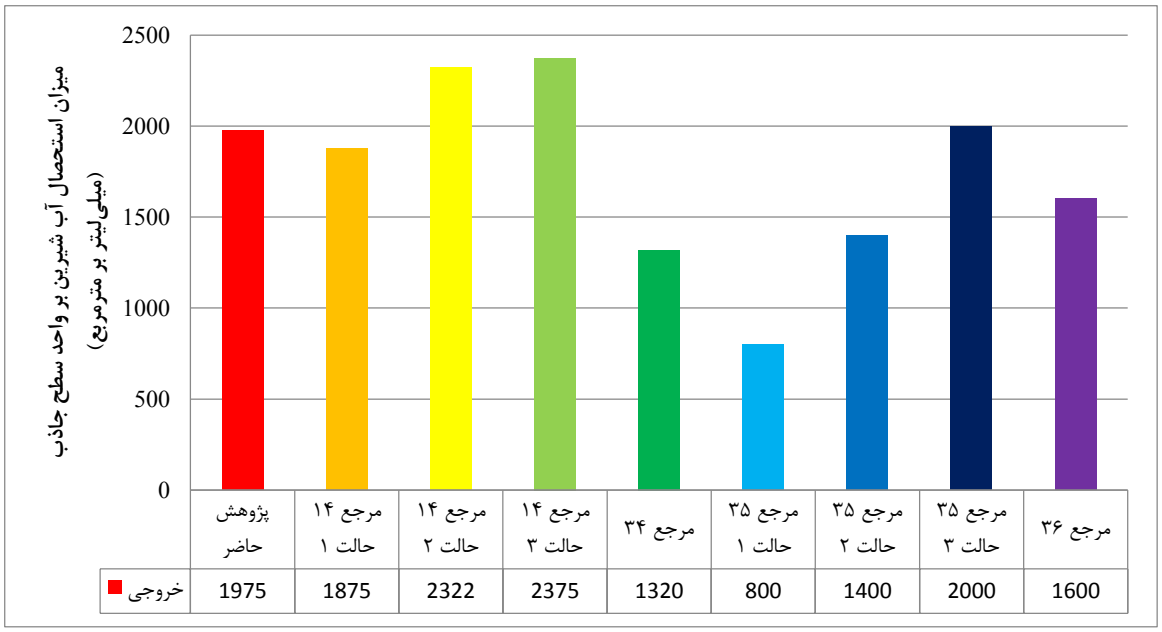
جدول ۷. مدل خلاصه شده

Table 7. Abbreviated model

انحراف معیار	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده
۱۷۵/۸۰۳	٪ ۹۹/۰۲	٪ ۹۸/۵۳	٪ ۹۷/۸۱

۱۰۰ درصد بیان می‌کند که مدل رگرسیون تمامی تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌نماید. از لحاظ تئوری اگر ضریب تعیین برابر با ۱۰۰ درصد باشد، تمامی مقادیر مشاهده شده با مقادیر برازش شده یکسان خواهد بود و همهٔ نقاط داده‌ها بر روی خط برازش شده قرار خواهند گرفت. باتوجه به جدول ۷، مقدار ضریب تعیین ۹۹/۰۲ درصد می‌باشد که این مقدار به دلیل نزدیک بودن به عدد ۱۰۰ درصد قابل‌قبول است [۳۷].

تفاوت مهم میان ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده این است که ضریب تعیین فرض می‌کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند. بنابراین درصد نشان‌داده‌شده توسط ضریب تعیین، با فرض تأثیر همهٔ متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد، درصورتی‌که درصد نشان‌داده‌شده توسط ضریب تعیین تعدیل شده، تنها حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل بر وابسته است و نه همهٔ متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین حتی با وجود مقدار بالا قابل مشخص نیست، درصورتی‌که می‌توان به مقدار برآورد شده ضریب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد. بااین‌وجود به دلیل آنکه مقدار ضریب تعیین تعدیل شده نیز مقداری نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌باشد و اختلاف کمی با ضریب تعیین دارد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیون به‌دست‌آمده از لحاظ فرضیات



شکل ۶. مقایسهٔ بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب

Fig. 6. Comparison of the maximum production of fresh water per unit area of absorbent surface

آماری، قابل‌قبول است [۳۷].

ضریب تعیین پیش‌بینی شده، نشان می‌دهد یک مدل رگرسیونی به چه میزان می‌تواند پاسخ‌ها را برای مشاهدات جدید پیش‌بینی کند و باتوجه به اختلاف آن با ضریب تعیین در خصوص مناسب بودن مدل رگرسیون می‌توان نظر داد [۳۷].

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که اختلاف سه ضریب مذکور، کمتر از ۲ درصد بوده که اختلاف کمی است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که معادلهٔ رگرسیون (۲)، مدل مناسبی است.

باتوجه به آزمون‌های آماری گفته شده و بررسی آن‌ها به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که معادلهٔ (۲) مدل مناسبی برای نتایج خروجی آزمایش‌ها است.

۵- مقایسهٔ میزان استحصال آب شیرین

در پژوهش انجام شده، بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب، در طول روز از ساعت ۱۰ الی ۱۶ برابر ۱۹۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است. پانچال و همکاران [۱۸] که اثر استفاده از پره‌ها را در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی نموده‌اند، میزان استحصال آب را از ساعت ۹ الی ۱۸ به ترتیب در سه حالت معمولی، پره عمودی و پره مایل، به ترتیب ۱۸۷۵، ۲۳۲۲ و ۲۳۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع به دست آورده‌اند. در پژوهشی که علاءالدین و همکاران به بررسی تأثیر مواد ذخیره‌ساز گرما و فتیله‌ها پرداخته‌اند، میزان تولید آب شیرین آن‌ها از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ عصر در بهترین حالت برابر ۱۳۲۰ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است [۳۸]. همچنین الهراشه و همکاران [۳۹] میزان استحصال آب از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ در شرایط مختلف آزمایش را به ترتیب حدود ۸۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌لیتر بر مترمربع به دست آورده‌اند. کابیل و همکاران [۴۰] برای دبی ورودی ۱۶۸ میلی‌لیتر بر دقیقه، از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ عصر، میزان استحصال آب ۱۶۰۰ میلی‌لیتر بر مترمربع را به دست آورده‌اند.

شکل ۶ بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب در پژوهش حاضر، نسبت به نتایج موجود در برخی پژوهش‌های گذشته که شرایط نزدیک‌تری به پژوهش حاضر را داشته‌اند، را نشان می‌دهد. تفاوت موجود در نتایج این مقاله با سایر کارهای انجام شده، به مواردی از قبیل شرایط آزمایش، ساعات انجام آزمایش، مدت‌زمان انجام آزمایش، مکان انجام آزمایش و غیره برمی‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش صورت‌گرفته یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی ساخته و با انجام آزمایش‌هایی تأثیر متقابل پنج متغیر دبی ورودی آب شور، زاویهٔ دستگاه، رنگ صفحهٔ جاذب، تعداد و فاصلهٔ نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، نوآوری

صورت‌گرفته در این پژوهش استفاده از نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده بوده است.

باتوجه به نتایج آزمایش بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح، زمانی به‌دست‌آمده که دبی ورودی آب شور ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویهٔ دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحهٔ جاذب مشکی، تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف ۲ عدد و فاصلهٔ ردیف‌ها ۸ میلی‌متر بوده است. در این حالت حجم خروجی به‌دست‌آمده ۱۹۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است. همچنین کمترین میزان استحصال آب بر واحد سطح به میزان ۱۰۳۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در حالتی به‌دست‌آمده که دبی ورودی آب شور ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویهٔ دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحهٔ جاذب نقره‌ای، تعداد نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف ۱ عدد و فاصلهٔ ردیف‌ها ۱۲ میلی‌متر بوده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل سیگنال به نویز و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهند که متغیرهای زاویهٔ دستگاه و رنگ صفحهٔ جاذب بیشترین تأثیر را بر میزان آب شیرین تولیدی داشته‌اند. همچنین این نتیجه دریافت شده که آب شور با دبی ورودی ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویهٔ دستگاهِ ۳۵ درجه، رنگ صفحهٔ جاذب مشکی، تعداد ۲ عدد نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده در هر ردیف، فاصلهٔ ردیف‌های نخ هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده از یکدیگر برابر با ۸ سانتی‌متر، بهترین سطح برای متغیرها بوده‌اند.

در ادامهٔ این پژوهش می‌توان با استفاده از روش‌های آماری دیگر به بررسی تأثیر هر متغیر پرداخت. یکی از روش‌های آماری مناسب برای تحلیل داده‌ها، آنالیز حساسیت[1] است. آنالیز حساسیت روشی برای شناسایی تأثیرگذاری عوامل ورودی بر عوامل خروجی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان دریافت هر یک از عوامل ورودی به چه میزان بر عامل خروجی تأثیرگذار خواهد بود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه اراک برای انجام آزمایش‌های میدانی سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین نویسندگان از سرکار خانم دکتر سمیه غفوری (استادیار گروه ریاضی دانشگاه اراک) جهت راهنمایی در تحلیل داده‌های این پژوهش کمال تقدیر و تشکر را دارند.

1 Sensitivity analysis

۷- فهرست علائم

نماد	متغیر
A	زاویهٔ دستگاه (درجه)
C	رنگ صفحهٔ جاذب
D	فاصلهٔ نخ‌های هدایت‌کنندهٔ آب تقطیرشده (سانتی‌متر)
N	تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده
Q	دبی ورودی آب شور (میلی‌لیتر بر دقیقه)
V	حجم آب خروجی تولیدشده (میلی‌لیتر)

منابع

[1] 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.

[2] S.S.A. Toosi, H.R. Goshayeshi, S.Z. Heris, Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser, Journal of Energy Storage, 40 (2021) 102681.

[3] H. Manchanda, M. Kumar, Thermo-techno-economical experimental evaluation of a stepped solar distillation system with energy loss utilization, Process Safety and Environmental Protection, 148 (2021) 473-481.

[4] H. Manchanda, M. Kumar, Performance evaluation of a locally designed stepped solar distillation-cum-active drying unit, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147(6) (2022) 4383-4395.

[5] V. Vijayakumar, N. Manu, M. Vasudevan, M. Kiran, C. Rejeesh, Phase change materials for improved performance and continuous output in stepped solar stills equipped with HDH, Materials Today: Proceedings, 47 (2021) 5064-5068.

[6] L.D. Jathar, S. Ganesan, S. Gorjian, An experimental and statistical investigation of concave-type stepped solar still with diverse climatic parameters, Cleaner Engineering and Technology, 4 (2021) 100137.

[7] F.A. Essa, Z. Omara, A. Abdullah, S. Shanmugan, H. Panchal, A.E. Kabeel, R. Sathyamurthy, M.M.

Athikesavan, A. Elsheikh, M. Abdelgaied, Augmenting the productivity of stepped distiller by corrugated and curved liners, CuO/paraffin wax, wick, and vapor suctioning, Environmental Science and Pollution Research, 28(40) (2021) 56955-56965.

[8] T. Mondol, M.A. Islam, Effect of step size and nanofluid on the performance of stepped solar still, in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2021, pp. 050018.

[9] V.K. Ramalingam, A. Karthick, M.P.V. Jeyalekshmi, A.M.M.A.J. Decruz, A.M. Manokar, R. Sathyamurthy, Enhancing the fresh water produced from inclined cover stepped absorber solar still using wick and energy storage materials, Environmental Science and Pollution Research, 28(14) (2021) 18146-18162.

[10] G.B. Balachandran, P.W. David, A.B. Alexander, M.M. Athikesavan, K.K.S. Kumar, V. Palanichamy, A.E. Kabeel, R. Sathyamurthy, F.P.G. Marquez, A relative study on energy and exergy analysis between conventional single slope and novel stepped absorbable plate solar stills, Environmental Science and Pollution Research, 28(41) (2021) 57602-57618.

[11] 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.

[12] 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 using metallic titanium particles for solar still application, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52 (2022) 102092.

[13] A.N. Shmroukh, S. Ookawara, Evaluation of transparent acrylic stepped solar still equipped with internal and external reflectors and copper fins, Thermal Science and Engineering Progress, 18 (2020) 100518.

[14] V. Nagaraju, G. Murali, A.K. Bewoor, R. Kumar, M. Sharifpur, M.E.H. Assad, M.M. Awad, Experimental study on performance of single slope solar still integrated with sand troughs, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50 (2022) 101884.

[15] K.E. Amori, Hydrogel materials as absorber for improving water evaporation with solar still, desalination and wastewater treatment, Materials Today: Proceedings, 60 (2022) 1548-1553.

[16] T. Sakthivel, T. Arjunan, L. Natrayan, P. Kumar, P.P. Patil, R. Manikandan, A. Muniappan, P. Paramasivam, Experimental investigation on the effectiveness of solar still and its effect on adsorption with various dyes, Adsorption Science & Technology, 2022 (2022).

[17] S.J.P. Gnanaraj, V. Velmurugan, An experimental investigation to optimize the production of single and stepped basin solar stills-a Taguchi approach, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, (2020) 1-24.

[18] H. Panchal, D. Mevada, K.K. Sadasivuni, F. Essa, S. Shanmugan, M. Khalid, Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins, Groundwater for Sustainable Development, 11 (2020) 100410.

[19] S.K. Nougriaya, M. Chopra, B. Gupta, P. Baredar, Stepped solar still: A review on designs analysis, Materials Today: Proceedings, 46 (2021) 5647-5660.

[20] 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(5) (2019) 3175-3182.

[21] 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.

[22] A.-E.E. Kabeel, H.A.E.D. Mohamad, S. Majeed, Comparative Experimental Study Between Conventional Stepped Solar Still and an Active Stepped Solar Still Incorporated with a Water Circulation System, Journal of Engineering Research, 3(June) (2019) 48-52.

[23] Z. Omara, A.E. Kabeel, M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors,

Desalination, 314 (2013) 67-72.

[24] A. Kabeel, A. Khalil, Z. Omara, M. Younes, Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, Desalination, 289 (2012) 12-20.

[25] A. Kabeel, Z. Omara, M. Younes, Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46 (2015) 178-188.

[26] A.J.N. Khalifa, A.M. Hamood, Experimental validation and enhancement of some solar still performance correlations, Desalination and water treatment, 4(1-3) (2009) 311-315.

[27] M. Assari, R. Mirzavand, H. Basirat Tabrizi, A. Jafar Gholi Beik, Effect of steps height and glass cover angle on heat transfer performance for solar distillation: Numerical study, International Journal of Engineering, 35(1) (2022) 237-247.

[28] P. Gleick, E. Chalecki, A. Wong, Measuring Water Well-Being: Water Indicators and Indices. In "The world's water, 2002-2003: the biennial report on freshwater resources" Ed. Gleick, in, PH Island Press. Washington, DC, 2002.

[29] A. Atarodi, H. Karami, A. Ardeshir, K. Hosseini, 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.

[30] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's quality engineering handbook, John Wiley & Sons, 2004.

[31] S. Theodoridis, K. Koutroumbas, Pattern recognition, Elsevier, 2006.

[32] H. Al-Hinai, M. Al-Nassri, B. Jubran, Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still, Desalination, 150(1) (2002) 75-83.

[33] A.S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A. Mabrouk, Parameters affecting solar still productivity, Energy conversion and management, 41(16) (2000) 1797-1809.

[34] A.J.N. Khalifa, On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes, Energy conversion and management, 52(1) (2011) 431-436.

[35] M.A.b.H.M. Yakup, A. Malik, Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, Renewable Energy, 24(2) (2001) 223-234.

[36] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John wiley & sons, 2017.

[37] M.R. Delozier, S. Orlich, Discovering influential cases in linear regression with MINITAB: Peeking into multidimensions with a MINITAB macro, Statistical Methodology, 2(2) (2005) 71-81.

[38] 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.

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

[40] A. Kabeel, R. Sathyamurthy, D. Mageshbabu, B. Madhu, P. Anand, P. Balakrishnan, Effect of mass flow rate on fresh water improvement from inclined PV panel basin solar still, Materials Today: Proceedings, 32 (2020) 374-378.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Khalili, M. Taheri, M. Salehi, Z. Sadat Eghdami, Experimental Study of the Effect of Distilled Water-Conducting Threads on the Performance of Stepped Solar Still, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 2103-2120.

DOI: 10.22060/mej.2022.21132.7382