ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(03):165-176.

Experimental Study of the Performance of the Solar Still with Sliding Absorber Plate and Equipped with a Wave Maker

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Sobhani M.[1],
Ajam H.[1*]

How to cite this article
Sobhani M, Ajam H, Experimental Study of the Performance of the Solar Still with Sliding Absorber Plate and Equipped with a Wave Maker. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(03):165-176.*

ABSTRACT

The limitations of water supply in different countries have led researchers to propose the use of solar still as one of the solutions to the problem of water limitations. In this research, single-slope solar still have been used. Among the innovations of this research, it can be mentioned the improvement of the construction and maintenance of the solar still box by using PVC materials with a sliding absorber plate, as well as the use of wave makers to improve the performance of solar still. the wavemaker by creating surface and deep turbulences and increasing heat transfer, in addition to improving the performance of the solar stills, also prevents the accumulation of materials that are caused by stagnant water and reduce the heat transfer coefficient from the absorber plate. The results of the use of the wave maker showed that with the increase in the number of wave makers, the daily production and efficiency of the improved solar still also increased and reached 4324 ml/m2 per day and 42.6% respectively, which is about 40.2% and 9.7% more than conventional one. The results of the economic study of the improved solar stills also showed that the cost of producing of each liter of fresh water in improved still equipped with wave makers was 0.013 $, which was about 13% less than conventional one.

Keywords Solar Still, Single Slope, Sliding Absorber Plate, Wave Maker

CITATION LINKS

1- Improving the performance of solar ... 2- Mathematical and experimental investigation on ... 3- Improving the productivity of solar still ... 4- Performance evaluation of single slope solar ... 5- Experimental investigation and economic assessment ... 6- Improving the basin type solar still performances ... 7- Rotating discs solar still: New mechanism ... 8- Theoretical and experimental investigation on ... 9- Water production from a solar desalination system ... 10- A portable solar still's productivity boost combining ... 11- Measurements and analysis of effective parameters on ... 12- New concept for improving solar still performance ... 13- Advanced solar-distillation systems: basic principles ... 14- Effects of porous layer and blade installation in a single slope solar still... 15- Performance enhancement of a tubular solar ...

[1] Mechanical Engineering Department, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Department, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran

h.ajam@um.ac.ir

Article History
Received: January 8, 2024
Accepted: June 19, 2024
ePublished: July 8, 2024

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با صفحه جاذب متحرک و مجهز به موج‌ساز

مسعود سبحانی[1]، حسین عجم[1]*
[1] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده
محدودیت‌های تأمین آب در کشورهای مختلف موجب گردیده است تا محققان استفاده از آب‌شیرین‌کن‌ها را به‌عنوان یکی از راهکارهای حل معضل محدودیت‌های آبی پیشنهاد دهند. در این پژوهش از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای تک‌شیب استفاده شده است. از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بهبود ساخت و تعمیر و نگهداری محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از موادی از جنس پی.وی.سی با صفحه جاذب متحرک و همچنین استفاده از موج‌ساز جهت بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی اشاره نمود. موج‌ساز نیز با ایجاد تلاطم‌های سطحی و عمقی و افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی، علاوه بر بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی از تجمع موادی که در اثر راکد بودن آب به وجود می‌آیند و موجب کاهش ضریب انتقال حرارت از صفحه جاذب می‌شوند نیز جلوگیری می‌نماید. نتایج استفاده از موج‌ساز نشان داد که با افزایش تعداد موج‌ساز میزان تولید و راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن بهبودیافته نیز افزایش‌یافته و به ترتیب به ٤٣٢٤ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز و ٤٢/٦ درصد رسیده است که حدود ٤٠/٢ و ٩/٧ درصد بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است. نتایج بررسی اقتصادی طرح آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته نیز نشان داد که هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بهبودیافته مجهز به موج‌ساز ۰/۰۱۳ دلار بر لیتر بر مترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد کم‌تر از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است.

کلیدواژه‌ها: آب‌شیرین‌کن، خورشیدی، تک‌شیب، صفحه جاذب متحرک، موج‌ساز

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰
*نویسنده مسئول: h.ajam@um.ac.ir

۱- مقدمه
آب کالایی حیاتی است که بعد از هوا از نیازهای اساسی انسان و موجودات زنده به شمار می‌آید. روش تقطیر خورشیدی نیز یک روش ساده است که چندین سده مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از آب‌شیرین‌کن‌هایی که از روش حوضچه‌های خورشیدی به طور مستقیم جهت تولید آب شیرین بهره می‌برند، استفاده گردیده است.

در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال علاوه بر انرژی تابشی خورشید از تجهیزات الکتریکی و یا مکانیکی نیز به‌عنوان منبع انرژی خارجی جهت بهبود عملکرد و افزایش تقطیر بهره برده می‌شود. استفاده از موتور وایبره (لرزاننده) در پژوهش سال ۲۰۱۰ الدلیل [1] گزارش‌شده است. در این پژوهش از یک موتور وایبره که به بدنه متصل شده و همچنین سیم‌های مارپیچ مسی در صفحه جاذب استفاده شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از سیم‌های مارپیچ مسی ۳۵ درصد تولید آب‌شیرین‌کن را افزایش داده این در حالی است که استفاده از موتور وایبره موجب افزایش ۱۳۲ درصد تولید آب‌شیرین‌کن گردیده است. میزان تولید دستگاه آن‌ها در این حالت‌ها به ترتیب ۳/۸ لیتر بر مترمربع و ۵/۸ لیتر بر مترمربع در روز بوده است. راندمان دستگاه آن‌ها نیز در این حالت‌ها به ترتیب ۳۵ درصد و ۶۰ درصد بوده است. راجاسنیواسان و همکاران [2] در سال ۲۰۱۷ به استفاده از موتورهای برهم‌زننده آب در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مجهز به زغال و ماده تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این روش می‌تواند میزان تولید را درصد۳۰ افزایش داده و به ۵/۲ کیلوگرم بر مترمربع در روز برساند. امارا و همکاران [3] در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر استفاده از فن در کف صفحه جاذب آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از فن در کف صفحه جاذب با عمق آب ۳ سانتی‌متر و دور فن ۳۰ دور بر دقیقه موجب افزایش ۱۷ درصد تولید آب‌شیرین‌کن گردیده و می‌تواند میزان تولید را به ۲/۵ لیتر بر مترمربع در روز برساند. راندمان دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۳۹ درصد بوده است. دومکا و میشرا [4] در سال ۲۰۲۰ به اثر استفاده از یک عدد مه‌ساز در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها در مطالعه آزمایشگاهی خود دریافتند که در عمق آب ۵ سانتی‌متر استفاده از مه‌ساز می‌تواند میزان تولید را حدود ۳۳ درصد افزایش داده و به حدود ۲/۳ کیلوگرم بر مترمربع در روز برساند. السعید و عبدالعزیز [5] در سال ۲۰۲۰ در پژوهش خود به بررسی اثر استفاده از مه‌ساز پرداختند. آن‌ها دریافتند که در عمق آب ۴ سانتی‌متر، استفاده از ۲ عدد مه‌ساز می‌تواند میزان تولید دستگاه را حدود ۲۳ درصد افزایش داده و به ۴/۴ لیتر برمترمربع در روز برساند. راندمان دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۴۱ درصد بوده است. حداد و همکاران [6] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک صفحه پارچه‌ای چرخان ایستاده به بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند تولید آب‌شیرین‌کن را حدود ۵۱ درصد افزایش داده و به ۷/۱ کیلوگرم بر مترمربع در روز برساند. هزینه تولید دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۰/۰۱ دلار به‌ازای یک لیتر بوده است. اسا و همکاران [7] در سال ۲۰۲۰ به بررسی استفاده از دیسک‌های چرخان در بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از دیسک‌های چرخان زبر و مجهز به پارچه در سرعت ۰/۰۵ دور بر دقیقه می‌تواند میزان تولید را ۱۲۴ درصد افزایش داده و به حدود ۳/۲ لیتر بر مترمربع در روز برساند. بیش‌ترین راندمان دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۵۴ درصد بوده است. جبرانه و همکاران [8] در سال ۲۰۲۲ از یک فن در داخل آب شیرین کن و

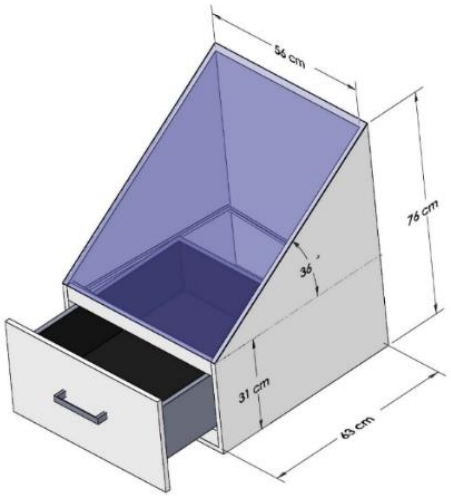
همچنین پارچه خیس استفاده نمودند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از این روش می تواند میزان تولید را ۳۲ درصد افزایش داده و به ۴/۰۳ لیتر بر مترمربع در روز برساند. هزینه تولید دستگاه آن ها ۰/۲۵ یورو به ازای هر لیتر بوده است. اسا و همکاران [9] در سال ۲۰۲۳ از یک رطوبت ساز چرخشی برای بهبود عملکرد آب شیرین کن های خورشیدی استفاده نمودند. نتایج آن ها نشان داد که بیش ترین میزان تولید آب شیرین، در دور ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و قطر منفذهای ۱ میلی متر، حدود ۱۷ کیلوگرم در روز بوده است. راندمان دستگاه آن ها در این حالت حدود ۷۰ درصد و هزینه نیز ۰/۰۰۷۴۶ دلار بر لیتر بوده است. ربی شکر و دقیق [10] در سال ۲۰۲۳ با استفاده از همزن مغناطیسی و خنک کننده ترموالکتریک به بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی دوشیب پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از این روش ها می تواند میزان تولید را حدود ۱۴۳ درصد نسبت به آب شیرین کن خورشیدی ساده افزایش داده و میزان تولید و راندمان دستگاه را در بیش ترین حالت به ترتیب به ۱۵۵۰ میلی لیترمربع در روز و ۲۸ درصد برساند. هزینه دستگاه آن ها نیز ۰/۰۸۱ دلار به ازای هر لیتر بر مترمربع تولید آب شیرین بوده است.

با توجه به‌مرور پژوهش‌های گذشته مشخص می‌گردد که تاکنون روش‌های گوناگونی جهت بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ارائه گردیده است. در این پژوهش برای اولین‌بار از موج‌سازی استفاده می‌گردد که با گردش آب درون حوضچه می‌تواند موج ایجاد کند. بدون حرکت مؤثر آب، نقاطی در صفحه جاذب وجود خواهد داشت که با سکون آب، ناخالصی‌ها و مواد زاید در آنجا راکد و ته‌نشین می‌شوند که نتیجه آن کاهش ضریب انتقال حرارت سطح جاذب و عدم رسیدن نور کافی به صفحه جاذب خواهد بود. به همین منظور می‌توان با استفاده از موج‌ساز و ایجاد تلاطم‌های سطحی و عمقی، علاوه بر بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی از تجمع موادی که در اثر راکد بودن آب به وجود می‌آیند نیز جلوگیری نمود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- دستگاه آزمایش

در این پژوهش، دو آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای با پوشش شیشه‌ای تک‌شیب و با صفحه جاذب متحرک با ابعاد یکسان مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شده است. از جمله مزیت‌های ساختاری آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساخته شده، می‌توان به جنس محفظه این آب‌شیرین‌کن‌ها و همچنین صفحه جاذب متحرک آن‌ها اشاره نمود. محفظه آب‌شیرین‌کن‌های ساخته شده از جنس پی.وی.سی می‌باشد. همچنین در این پژوهش از صفحه جاذب متحرک در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده می‌گردد.



شکل ۱) طرح‌واره کلی آب‌شیرین‌کن خورشیدی با صفحه جاذب متحرک

جدول ۱) تجهیزات اندازه‌گیری موردنیاز جهت انجام آزمایش

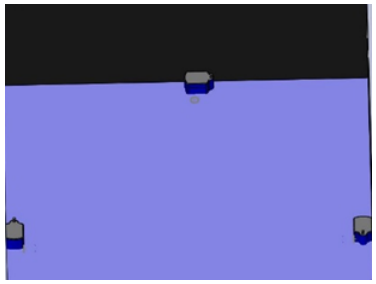
وسیله اندازه‌گیری	دقت	کاربرد
سنسور دما (K–type)	۰/۱ °C	اندازه‌گیری دما
تابش‌سنج–TES 1333	۱۰ W/m²	اندازه‌گیری تابش خورشید
سنجش حجم	۱ ml	اندازه‌گیری حجم آب تولید شده
سختی‌سنج	۱ Ppm	سنجش سختی آب تولید شده
PH متر	۰/۰۱ PH	اندازه‌گیری PH آب تولید شده
ترازو	۰/۱ gr	اندازه‌گیری وزن

این امر به‌عنوان راهکاری جهت حل معضل خارج کردن رسوبات باقی‌مانده و همچنین امکان ایجاد تغییرات جدید و تعویض بهتر و راحت‌تر صفحات جاذب پیشنهاد می‌گردد. پوشش در نظر گرفته شده برروی محفظه نیز از جنس شیشه با ضخامت ۴ میلی‌متر می‌باشد. زاویه قرارگیری شیشه نیز با توجه به عرض جغرافیایی محل آزمایش (مشهد) ۳۶ درجه می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از نشت بخار از آب‌شیرین‌کن‌ها، از نوارهای درزگیر استفاده می‌گردد. جهت تامین آب‌شور دستگاه نیز از دو منبع جداگانه استفاده می‌گردد. در جدول ۱ نیز ابزارهای اندازه گیری پژوهش حاضر ارائه گردیده است.

۲-۱-۱- آب‌شیرین‌کن بهبودیافته

در این پژوهش از پمپ کوچک مولد جریان با توان ۳ وات برای تولید موج و حرکت آب استفاده می‌شود. تولید موج مستلزم نیرویی است که با توجه به آن امواجی در آب تولید گردد. در این روش، موج‌ها با استفاده از چرخش یک محور دوار که در داخل

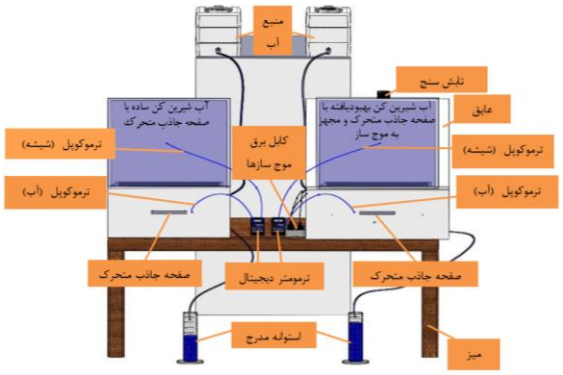
پمپ وجود دارد، ایجاد می‌گردند. با استفاده از روش فوق، امکان ایجاد موج در داخل حوضچه آب‌شیرین‌کن وجود خواهد داشت. در این پژوهش اثر افزایش تعداد موج‌ساز و عمق آب مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدون حرکت مؤثر آب، نقاطی در صفحه جاذب وجود خواهد داشت که با سکون آب، ناخالصی‌ها و مواد زاید در آنجا راکد و ته‌نشین می‌شوند به دلیل حذف این عیب در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، نیاز است تا آب در داخل حوضچه به حرکت و گردش درآید. به همین منظور می‌توان با استفاده از موج ساز و ایجاد تلاطم‌های سطحی با برهم زدن لایه مرزی سطح آب و هوا و ایجاد تلاطم های عمقی با استفاده از جابه‌جایی اجباری، علاوه بر بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی از تجمع موادی که در اثر راکد بودن آب به وجود می‌آیند نیز جلوگیری نمود. وجود موج در سطح آب از طرفی موجب القای آشفتگی در فاز بخار گردیده و از طرف دیگر موجب افزایش سطح تبخیر نیز می گردد. در این پژوهش موج‌ها توسط پمپ‌های آب مولد جریان که در داخل حوضچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی قرار داده شده‌اند، ایجاد می‌شوند. دبی پمپ ها ثابت و برابر 5lit/min و با ابعاد ٤*٤*٤ سانتی متر، فرکانس ۵۰ هرتز و وزن ۳۰۰ گرم بوده است. موج‌ساز می‌تواند با ایجاد امواج سطحی و عمقی و موجب افزایش میزان تبخیر از سطح آب نیز گردد. در شکل ۲ الف شماتیک محل قرارگیری موج سازها و در شکل ۲ ب نمونه موج‌های ایجاد شده توسط موج‌ساز نشان داده شده است. شکل های ۳ و ۴ طرح‌واره کلی و دستگاه های آزمایش مجهز به موج ساز را نشان می‌دهد.



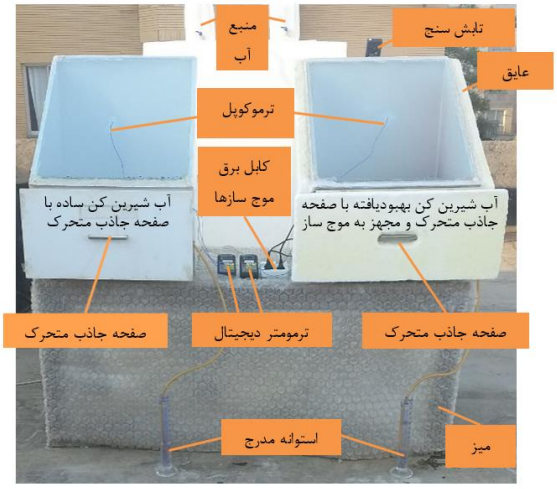
الف

ب

شکل ۲) الف: شماتیک محل قرارگیری موج ساز ب: نمونه‌ای از موج‌های ایجاد شده توسط موج‌ساز



شکل ۳) شماتیک دستگاه های آزمایش



شکل ۴) نمای واقعی دستگاه های آزمایش

۲-۲- روابط حاکم

اثر استفاده از موج ساز بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نظر انتقال حرارتی و ترمودینامیکی به شرح زیر است.

۱- اثر سطوح مواج بر روی میزان تبخیر طبیعی در بالای سطح آب که در نتیجه عملکرد پمپ‌های مولد جریان بر روی پروفیل سطح آب‌شور بوده و باعث موجدار شدن سطح آب و القای آشفتگی در فاز بخار می‌گردد.

۲- اثر جابه‌جایی اجباری ایجاد شده در آب‌شور حوضچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی که ناشی از عملکرد پمپ‌های مولد جریان موجود در آب‌شور است.

فرایند تبخیر آب در هوا شامل پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال جرم است که در طیف وسیعی از صنعت و طبیعت به کار می‌رود که به طور خلاصه به شرح زیر هستند:

۱- تبخیر طبیعی یا آزاد که به‌صورت طبیعی در اثر اختلاف چگالی و دمای هوای مرطوب بالای سطح آب ایجاد می‌شود که پدیده تبخیر در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی عموماً از این نوع هستند.

۲- تبخیر اجباری که در اثر پدیده جریان جابه‌جایی اجباری توسط فن‌های موجود در هوای مرطوب ایجاد می‌شوند.

در همه این موارد سطح آب دارای شکل ساده و صاف بوده که تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص بررسی پدیده تبخیر از این سطوح در حالت‌های مختلف جریان انجام‌گرفته است. این در حالی است که پدیده تبخیر در سطوح مواج نیز در صنایع بسیاری نظیر صنایع غذایی و سیستم‌های تبخیری نظیر آب‌شیرین‌کن‌ها کاربرد دارد. وجود موج در سطح آب از طرفی موجب القای آشفتگی در فاز بخار گردیده و از طرف دیگر موجب افزایش سطح تبخیر نیز می‌گردد [11]. در این پژوهش جهت تولید موج از پمپ‌های مولد جریان استفاده شده است که با افزایش تعداد آن‌ها می‌توان امواج را در حوضچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی افزایش داد.

۲-۲-۱- اثر سطوح مواج بر روی میزان تبخیر طبیعی در بالای سطح آب

با توجه اینکه در این پژوهش از هیچ عامل جابه‌جایی اجباری در هوای مرطوب استفاده نشده است، بنابراین پدیده جابه‌جایی غالب در هوای مرطوب در این پژوهش از نوع جابه‌جایی طبیعی و در نتیجه تبخیر نیز از نوع تبخیر آزاد یا طبیعی برای سطوح مواج است؛ بنابراین با تحلیل ویژگی‌های موج‌های ایجاد شده درون دستگاه مشخص می‌شود که برای حل این مسئله به روابط تعادلی و مدل‌های ترمودینامیکی شامل موازنه انرژی برای پوشش شیشه‌ای، موازنه انرژی برای آب با وجود موج ساز و موازنه انرژی برای صفحه جاذب با وجود موج ساز نیاز می‌باشد.

(الف) موازنه انرژی برای پوشش شیشه‌ای

معادله انرژی برای پوشش شیشه‌ای با صرف‌نظرکردن از ظرفیت گرمایی و یکسان درنظرگرفتن دمای داخلی و خارجی شیشه به‌صورت معادله (۱) می‌باشد.

$$\alpha_g I + \left[\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ewm}\right] = \dot{q}_{cg} + \dot{q}_{rg} \qquad (۱)$$

انرژی جذب شده از سطح آب به شیشه شامل انتقال حرارت تابشی، جابه‌جایی و تبخیر از سطوح موجدار آب به شیشه می‌باشد که از روابط (۲) و (۳) و (٤) به دست می‌آیند. K_{ws} ضریب تصحیح سطح می‌باشد که نسبت سطح موجدار به سطح صاف می‌باشد.

$$\dot{q}_{rw} = K_{ws} h_{rw}\left(T_w - T_g\right) \qquad (۲)$$

$$\dot{q}_{cw} = K_{ws} h_{cw}\left(T_w - T_g\right) \qquad (۳)$$

$$\dot{q}_{ewm} = K_{ws} h_{ewm}\left(T_w - T_g\right) \qquad (۴)$$

انرژی وارد شده به محیط نیز شامل انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح خارجی شیشه و انتقال حرارت تابشی که از طریق شیشه به محیط انتقال می‌یابد، مطابق روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند:

$$\dot{q}_{cg} = h_g\left(T_g - T_a\right) \qquad (۵)$$

$$\dot{q}_{rg} = \varepsilon_g \sigma\left({T_g}^4 - {T_{sky}}^4\right) \qquad (۶)$$

(ب) موازنه انرژی برای آب با وجود موج‌ساز

موازنه انرژی برای آب با درنظرگرفتن ظرفیت گرمایی آب به‌صورت معادله (۷) است.

$$\dot{q}_{hwm} = \left[\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ewm}\right] + (MC)_w \frac{dT_w}{dt} \qquad (۷)$$

انتقال انرژی از موج ساز برابر توان حرارتی موج‌ساز است که ۱۰ وات بر مترمربع است.

انتقال حرارت جابه‌جایی از صفحه جاذب به آب مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$\dot{q}_{wm} = h_{wm}(T_b - T_w) \qquad (۸)$$

(ج) موازنه انرژی برای صفحه جاذب با وجود موج ساز

با صرف‌نظرکردن از ظرفیت گرمایی و اتلاف حرارتی از صفحه جاذب، می‌توان معادله انرژی را برای صفحه جاذب به‌صورت رابطه (۹) در نظر گرفت:

$$\acute{\alpha}_b I = \dot{q}_{wm} \qquad (۹)$$

۲-۲-۲- اثر جابه‌جایی اجباری ایجاد شده در آب

حرکت جابه‌جایی اجباری ایجاد شده در آب‌شور که ناشی از پمپ‌های مولد موج است را می‌توان بر اساس رابطه زیر مدل نمود [۱۲].

$$NU_{wm} = 4.69 Re^{0.27} Pr^{0.21} Gr^{0.07} \left(\frac{D_h}{L_w}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۰)$$

Re، Pr و Gr به ترتیب عدد رینولدز و پرانتل و گراشهف می‌باشند.

K_{ws} را می‌توان به‌صورت نسبت سطح موجدار به سطح صفحه جاذب تعریف نمود.

L_W عمق آب تعریف می‌شود.

D_h قطر لوله خروجی پمپ مولد جریان

U_{wm} سرعت خروج آب از پمپ مولد جریان که باتوجه‌به دبی آن قابل‌محاسبه است.

ΔT_{wm} اختلاف دما در حالت موجدار است.

Nu_{wm} انتقال حرارت جابه‌جایی در حالت موجدار می‌باشد.

در نهایت نرخ انتقال حرارت تبخیر q_{ewm} در زمان استفاده از موج‌ساز به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$q_{ewm} = \frac{K_{ws} NU_{wm} K_b}{L_w} \Delta T_{wm} \qquad (۱۱)$$

انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در حالت بدون موج (Nu_p) نیز بین صفحه جاذب گرم افقی روبه‌بالا و آب را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد [12].

$$NU_p = 0.14(Pr \times Gr)^{1/3} \qquad (۱۲)$$

بنابراین، نرخ انتقال حرارت تبخیر در حالت بدون موج (q_{ep}) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$q_{ep} = \frac{K_p N U_p K_b}{L_w} \Delta T_p \quad (۱۳)$$

K_p را می‌توان به‌صورت نسبت سطح بدون موج به سطح صفحه جاذب تعریف نمود.

K_b ضریب هدایت حرارتی صفحه جاذب می‌باشد.

ΔT_{wm} اختلاف دما در حالت بدون موج است.

۲-۲-۳- پارامترهای عملکردی آب‌شیرین‌کن خورشیدی

بازده حرارتی یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌صورت نسبت انرژی گرمایی مصرف شده برای به‌دست‌آوردن میزان مشخصی از آب تقطیر شده به کل انرژی دریافت شده در یک بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود [13]. با توجه به اینکه در این پژوهش از پمپ هوا و همچنین موج‌ساز به‌عنوان روش‌های بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده شده است، توان موردنیاز پمپ هوا و موج‌ساز نیز در کل انرژی دریافت شده در نظر گرفته شده است. در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی فعال بازده حرارتی لحظه ای دستگاه مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} h_{fg}}{A_b I + W_C} \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق $\dot{m}$ برابر نرخ تولید آب تقطیرشده برحسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب در دمای متوسط محیط و برحسب کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد. A_b مساحت کف حوضچه آب‌شور برحسب مترمربع و I مقدار تابش خورشید رسیده به دستگاه و برحسب وات بر مترمربع می‌باشد. W_C توان مصرفی پمپ هوا و موج‌ساز می‌باشد.

بازده روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی نیز از حاصل‌ضرب مجموع آب تقطیر شده ساعتی در طول روز در گرمای نهان تبخیر با تقسیم‌شدن بر تابش خورشید متوسط روزانه به‌علاوه توان مصرف شده از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\eta_d = \frac{\sum \dot{m} h_{fg}}{\sum (A_b I + W_C)} \quad (۱۵)$$

۲-۲-۴- بررسی روابط اقتصادی آب‌شیرین‌کن خورشیدی

شاخص مناسبی که در زمینه بررسی سودمندی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در نظر گرفته می‌شود هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین (Cost Per Liter) می‌باشد؛ بنابراین به‌منظور بررسی اقتصادی هر یک از آزمایش‌های انجام شده، از رابطه زیر استفاده می‌گردد [13].

$$CPL = \frac{AC}{M_y} \quad (۱۶)$$

که در آن M_y میزان تولید سالانه بوده و AC هزینه سالانه بوده که به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$AC = FAC + AMC - ASV \quad (۱۷)$$

FAC هزینه ثابت سالانه دستگاه بوده که متغیرهای آن شامل سرمایه‌گذاری اولیه (p)، میزان بهره (i) و طول عمر سامانه (n) می‌باشند. در صورت درنظرگرفتن وامی که برای سرمایه‌گذاری بر روی ساخت آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداخت شود، (i) میزان بهره آن ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. طول عمر آب‌شیرین‌کن خورشیدی طراحی شده ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. هزینه ثابت سالانه دستگاه به‌صورت رابطه زیر تعریف شده که در آن عبارت داخل پرانتز بیانگر دوره بازیابی سرمایه می‌باشد.

$$FAC = P\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right) \quad (۱۸)$$

AMC هزینه راه‌اندازی و نگهداری سالانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی است که باتوجه‌به استفاده از محفظه پی.وی.سی، هزینه تعمیرات و نگهداری محفظه که شامل رنگ‌زدن محفظه برای جلوگیری از زنگ‌زدگی، خوردگی و غیره بوده است حذف می‌شود؛ بنابراین باتوجه‌به این موارد، هزینه تعمیرات و نگهداری دوره‌ای آب‌شیرین‌کن ۱۰ درصد هزینه سالانه دستگاه در نظر گرفته شده است. AMC به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$AMC = 0.1(FAC) \quad (۱۹)$$

ASV ارزش بازیابی سالانه دستگاه آب‌شیرین‌کن شامل سرمایه‌ای است که پس از پایان عمر سودمند دستگاه می‌توان با فروش قسمت‌هایی از دستگاه آن را به دست آورد. این ارزش بازیابی را می‌توان با تعمیر و نگهداری بهتر دستگاه از جمله رنگ‌آمیزی مناسب صفحه جاذب به‌منظور جلوگیری از خوردگی آن، افزایش داد. ضریب بازیابی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی (S) باتوجه‌به موارد فوق ۲۰ درصد هزینه فعلی در نظر گرفته می‌شود. ASV به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ASV = S\left(\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right) \quad (۲۰)$$

۲-۲-۵- بررسی عدم قطعیت

عدم قطعیت ناشی از خطاهای آزمایش بوده و محدوده مقادیری را نشان می‌دهد که نتایج اندازه‌گیری آزمایش‌ها می‌توانند داشته باشند. فرایندهای اندازه‌گیری که به‌صورت کمی گزارش می‌شوند، خطای اندازه‌گیری دارند، این خطای اندازه‌گیری تفاوت مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی آزمایش را نشان می‌دهد که از منابع مختلفی ناشی می‌شوند. عوامل ایجاد خطاهای اندازه‌گیری متفاوت بوده و اندازه آن‌ها نیز متغیر می‌باشد. خطاهای ابزار اندازه‌گیری از جمله دماسنج‌ها، ترازو و استوانه مدرج، اندازه‌گیری زمان، تابش، خطای آزمایشگر و تأثیر تغییر شرایط محیطی بر روی کارکرد تجهیزات آزمایش از جمله عوامل احتمالی خطاها به شمار می‌آیند. خطاهای اندازه‌گیری را می‌توان با استفاده از ابزارهای دقیق به حداقل رساند. در مراجع مربوط به آزمایش آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، عدم قطعیت‌ها از نوع B تعیین و

در نظر گرفته می‌شوند که در این حالت عدم قطعیت استاندارد از رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد [14].

$$U_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (۲۱)$$

که در آن a دقت وسیله اندازه‌گیری و U عدم قطعیت استاندارد است. عدم قطعیت ابزارهای اندازه‌گیری در جدول ۲ ارائه گردیده است.

۳- نتایج و بحث

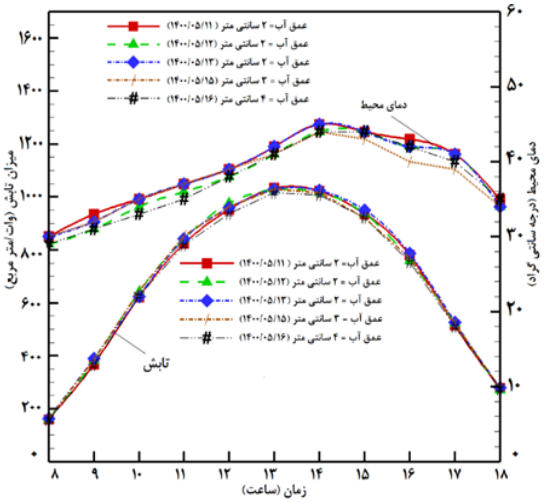
در در این قسمت به بررسی اثر استفاده از موج‌ساز در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تک‌شیب در عمق‌های مختلف پرداخته شده است. موج‌ها توسط پمپ‌های آب مولد جریان که در داخل حوضچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی قرار داده شده‌اند، ایجاد می‌شوند. دبی پمپ‌ها ثابت و برابر ۵ لیتر بر دقیقه بوده است. آزمایش‌های مربوط به دو آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته در شرایط مشابه و به‌صورت هم‌زمان در طی ۵ روز در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶ انجام گردیده که نتایج آن در ادامه ارائه گردیده است.

تغییرات ساعتی مربوط به دمای محیط و شدت تابش خورشید در روزهای مورد آزمایش در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود شرایط محیطی هر ۵ آزمایش موردنظر تقریبا یکسان بوده و تغییرات ناچیزی داشته و مشابه یکدیگر است.

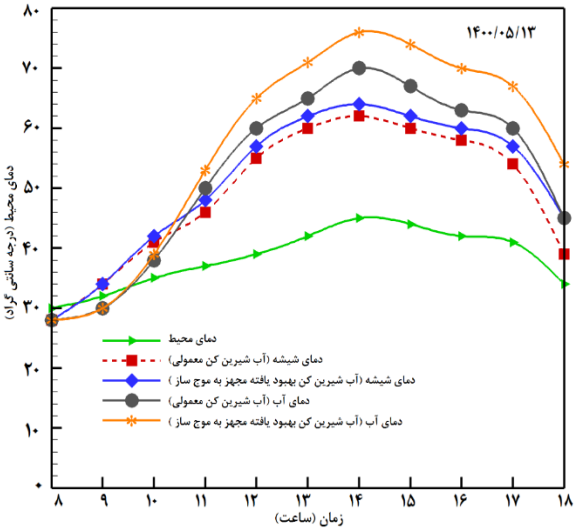
در شکل ۶ تغییرات ساعتی مربوط به دمای پوشش شیشه‌ای و آب‌شور برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ ارائه گردیده است. در این آزمایش از ۳ عدد موج‌ساز با عمق آب‌شور ۲ سانتی‌متر استفاده گردیده است.

جدول ۲) عدم قطعیت لوازم اندازه‌گیری

وسیله اندازه‌گیری	دقت	محدوده اندازه‌گیری	عدم قطعیت استاندارد
سنسور دما (K-type)	۰/۱ °C	+ ۲۵۰°C -۴۰°C	۰/۰۶ °C
تابش‌سنج TES-1333	۱۰W/m²	۰-۲۰۰۰W/m²	۶ W/m²
سنجش حجم	۱ml	۰-۲۵۰ ml	۰/۶ ml
سختی‌سنج	۱Ppm	۰-۱۰۰۰۰ ppm	۰/۶ppm
PH متر	۰/۰۱ PH	۰-۱۴ PH	۰/۰۰۶PH
ترازو	۰/۱gr	۰-۵۰۰ gr	۰/۰۶ gr



شکل ۵) تغییرات ساعتی مربوط به دمای محیط و شدت تابش خورشید در روزهای آزمایش



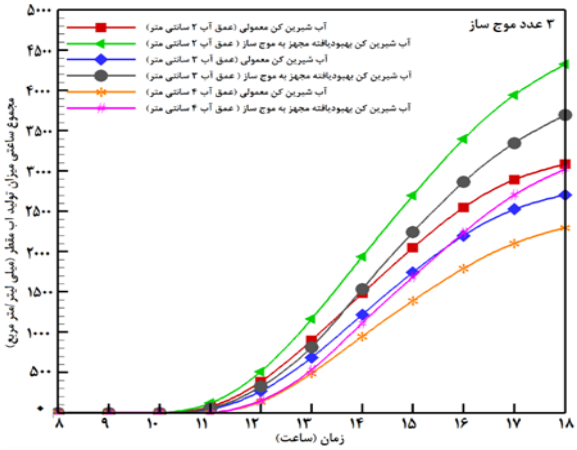
شکل ۶) تغییرات ساعتی مربوط به دمای پوشش شیشه‌ای و آب‌شور برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دمای آب‌شور در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در ساعت‌های ۸ الی ۱۸ بین ۱ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای آب‌شور موجود در دستگاه ساده بوده است که این امر تأثیر مثبت استفاده از موج‌ساز را در آب‌شیرین‌کن بهبود یافته نشان می‌دهد.

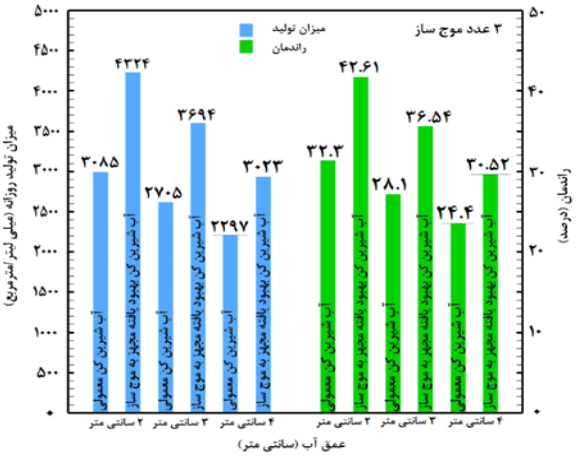
نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشینه دمای آب‌شور در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته حدود ۷۶ درجه سانتی‌گراد بوده که بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن ساده می‌باشد؛ بنابراین دمای آب‌شور آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در این حالت بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن ساده بوده است. همچنین، با افزایش دمای محیط اختلاف دما بین پوشش شیشه‌ای و آب‌شور نیز افزایش می‌یابد. همچنین، در این شکل مشاهده می‌شود که محدوده تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای و آب‌شور در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته بیش‌تر از تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای و آب‌شور

برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است. علت این امر آن است که ازیک‌طرف عایق‌بندی آب‌شیرین‌کن بهبودیافته موجب بالارفتن دمای پوشش شیشه‌ای و همچنین آب‌شور گردیده و از طرف دیگر تبادل حرارت بیش‌تر صفحه جاذب با آب‌شور به علت وجود موج‌ساز توانسته است موجب افزایش بیش‌تر دمای آب‌شور نسبت به آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده گردد. بنابراین موج‌ساز به دلیل افزایش دمای آب‌شور و همچنین افزایش سطح تبخیر از طریق ایجاد موج توانسته است میزان تبخیر از سطح آب‌شور را افزایش داده و در نتیجه موجب بیش‌تر شدن اختلاف دمای پوشش شیشه‌ای و آب‌شور در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته نسبت به آب‌شیرین‌کن ساده گردد. مطابق شکل ۷ این امر در نهایت منجر به بیش‌تر شدن میزان تولید آب‌شیرین‌کن بهبودیافته نسبت به آب‌شیرین‌کن ساده گردیده است.

در شکل ۷ اثر عمق آب‌شور بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب مقطر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها از ۳ عدد موج‌ساز در عمق‌های آب‌شور ۳،۲ و ٤ سانتی‌متر استفاده گردیده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عمق آب‌شور، میزان تولید هر دو آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته کاهش می‌یابد که علت این امر نیاز به زمان و انرژی بیش‌تر جهت تبخیر آب‌شور با افزایش حجم آب‌شور می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که میزان تولید آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در عمق‌های ۳،۲ و ٤ سانتی‌متر به ترتیب ٤۳۲٤، ۳٦۹٤ و ۳۰۲۳ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است درحالی‌که این میزان برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر و به ترتیب ۳۰۸۵، ۲۷۰۵ و ۲۲۹۷ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هرچند با افزایش عمق آب‌شور، میزان تولید آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته نیز کاهش می‌یابد اما همچنان استفاده از موج‌ساز در عمق‌های ۳،۲ و ٤ سانتی‌متر موجب افزایش میزان تولید آب‌شیرین‌کن نسبت به آب‌شیرین‌کن ساده شده است. همچنین با افزایش عمق آب‌شور، تأثیر مثبت موج‌ساز اندکی کاهش‌یافته است. علت این امر می‌تواند آن باشد که با افزایش عمق آب‌شور و افزایش حجم آب، موج‌های تولید شده توسط موج‌سازها کم‌تر می‌شوند؛ بنابراین این امر، میزان تلاطم‌های سطحی را کاهش می‌دهد که درنهایت می‌تواند منجر به کاهش تأثیر موج‌سازها با افزایش عمق آب‌شور گردد. یکی از راهکارهای مناسب جهت افزایش موج های تولید شده در عمق‌های بالاتر، افزایش دبی موج‌سازها می‌باشد.



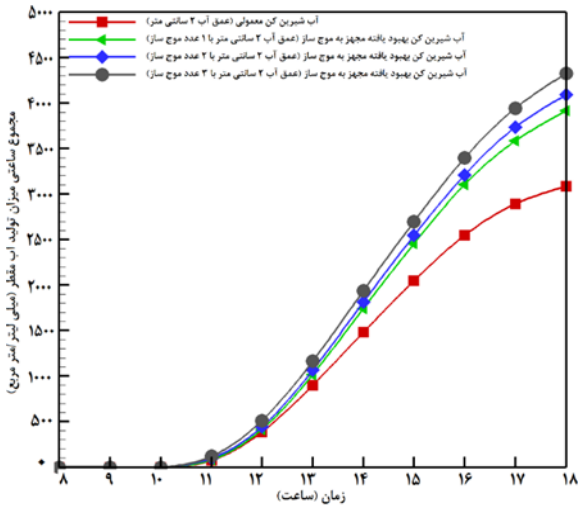
شکل ۷) بررسی اثر عمق آب‌شور بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب مقطر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶



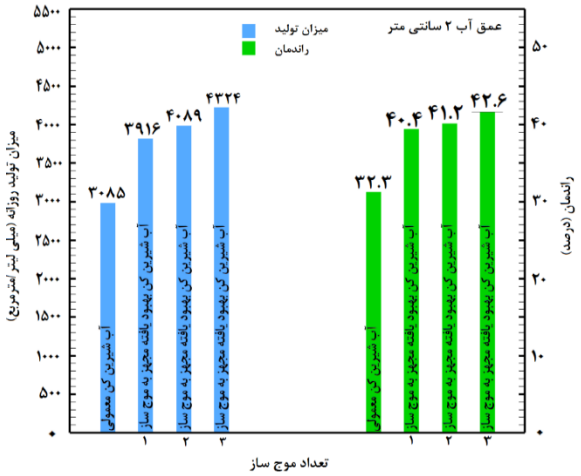
شکل ۸) مقایسه میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته در عمق‌های مختلف آب‌شور در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

در شکل ۸ نیز میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته با ۳ عدد موج‌ساز در عمق‌های مختلف در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶ با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان تولید و راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در همه عمق‌های آب‌شور بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن ساده بوده است. میزان تولید آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در عمق‌های ۳،۲ و ٤ سانتی‌متر به ترتیب ٤۳۲٤، ۳٦۹٤ و ۳۰۲۳ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است و میزان راندمان روزانه نیز در این حالت به ترتیب ٤۲/٦ درصد، ۳٦/۵ درصد و ۳۰/۵ درصد بوده است.

در شکل ۹ به بررسی اثر تعداد موج‌ساز و موج‌های ایجاد شده بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ پرداخته شده است. در این آزمایش‌ها از ۱، ۲ و۳ عدد موج‌ساز در عمق ۲ سانتی‌متر استفاده گردیده است.



شکل ۹) بررسی اثر تعداد موج ساز بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب مقطر آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳



شکل ۱۰) مقایسه میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته با تعداد موج سازهای مختلف در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد موج‌ساز به علت افزایش میزان موج‌ها و افزایش تلاطم در آب و درنتیجه افزایش تبخیر، میزان تولید آب‌شیرین‌کن نیز افزایش می‌یابد. افزایش تعداد موج‌سازها باعث افزایش میزان تلاطم درآب می‌شود و منجر به ایجاد آشفتگی در محیط آب‌شور می‌گردد. تلاطم آب‌شور، سرعت انتقال جرم آب‌شور را بهبود می‌بخشد و در نتیجه ذرات آب بیش‌تری تبخیر می‌شوند. همان‌طور که این شکل نیز نشان می‌دهد، میزان تولید آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته با ۱، ۲ و۳ عدد موج‌ساز به ترتیب ۳۹۱۶، ۴۰۸۹ و ۴۳۲۴ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است که به ترتیب به میزان ۲۶/۹ درصد، ۳۲/۵ درصد و ۴۰/۲ درصد بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است.

در شکل ۱۰ نیز میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته در ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ با یکدیگر مقایسه شده است. در این آزمایش‌ها از ۱، ۲ و ۳ عدد موج‌ساز در عمق ۲ سانتی‌متر استفاده گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد موج‌ساز میزان تولید و راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن بهبودیافته افزایش می‌یابد. راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت به ترتیب ۴۰/۴ درصد و ۴۱/۲ درصد و ۴۲/۶ درصد بوده است. این درحالی است که این مقادیر برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده به‌گونه‌ای که میزان تولید و راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده در این حالت ۳۰۸۵ میلی‌لیتر بر مترمربع و ۳۲/۳ درصد بوده است.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز اشاره شد این رفتار ناشی از آن است که موج‌سازها با ایجاد حرکت و آشفتگی در آب‌شور می‌توانند موج‌های سطحی و عمقی را تولید کنند و سطح تبخیر و ضریب انتقال حرارت و جرم را افزایش دهند. علاوه بر این، افزایش تعداد موج‌سازها نیز می‌تواند ضریب انتقال حرارت و جرم را بیش‌تر افزایش دهد و منجر به افزایش بیش‌تر میزان تولید و راندمان گردد.

۳-۱- مقایسه نتایج آب‌شیرین‌کن های خورشیدی

در این قسمت مقایسه‌ای بین نتایج آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته ارائه گردیده است.

با فرض درنظرگرفتن ۲۶۰ روز آفتابی برای شهر مشهد، در آب شیرین کن خورشیدی مجهز به سه عدد موج ساز در عمق آب ۲ سانتی متر میزان تولید حدود ۴/۳ لیتر بر متر مربع در روز بوده است که حدود ۴۰ درصد از آب شیرین کن ساده بیش تر بوده است. هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت برابر ۰/۰۱۳ دلار برلیتر برمترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده است. بنابراین همان طور که مشاهده می‌شود علاوه بر با افزایش حدود ۴۰ درصدی تولید آب‌شیرین‌کن بهبود یافته حدود ۱۳ درصد نیز میزان هزینه تولید هر لیتر آب شیرین کاهش داشته است.

در جدول ۳ میزان تولید، راندمان و هزینه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته با سایر پژوهش های مشابه مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، میزان تولید، راندمان و هزینه طرح آب‌شیرین‌کن خورشیدی ارائه شده در پژوهش حاضر در شرایط مشابه از بسیاری از پژوهش‌های پیشین مناسب‌تر بوده است.

جدول ۳) میزان تولید، راندمان و هزینه دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده و بهبودیافته با سایر پژوهش های مشابه

پژوهش	روش بهبود	عمق آب (cm)	میزان تولید ($lit/m^2/day$)	راندمان (%)	CPL ($/L/m^2$)
پژوهش حاضر	معمولی	۲-۴	۳/۷-۲/۵	۲۷-۳۹	۰/۰۱۸-۰/۰۱۳
پژوهش حاضر	بهبودیافته	۲-۴	۴/۳-۳/۰	۳۰-۴۲	۰/۰۱۸-۰/۰۱۳
امارا و همکاران [3]	فن در آب صفحه جاذب	۱-۵	۲/۵-۲/۱	۳۵-۳۹	-
السعید و همکاران [15]	صفحه شبکه‌بندی شده مرتعش	۲/۵	۴/۲-۳/۲	۳۸-۵۰	۰/۰۴-۰/۰۱۳
السعید و عبدالعزیز [5]	مه‌ساز	۶-۳/۵	۴/۴-۳/۵	۲۸-۵۵	۰/۰۱۹-۰/۰۱
الدلیل [1]	سیم‌های مارپیچ مسی و موتور ویبره (لرزاننده)	۶	۵/۸-۱/۴	۳۵-۶۰	-
اسا و همکاران [9]	دیسک‌های چرخان	۱	۳/۲-۲	۳۴-۵۴	-

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه مطابق بررسی‌های انجام‌شده تاکنون، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای انجام گردیده است. این امر نشان‌دهنده اهمیت، کاربرد و دقت نظر ویژه پژوهشگران به این موضوع در سال‌های اخیر می‌باشد. در این پژوهش سعی گردیده است تا با نوآوری و استفاده از مواد و تجهیزات جدید به بهبود بهره‌وری آب‌شیرین‌کن‌ها خورشیدی حوضچه‌ای پرداخته شود.

در این پژوهش به طراحی، ساخت، بررسی آزمایشگاهی و تحلیل عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تک‌شیب با صفحه جاذب متحرک و مجهز به موج‌ساز پرداخته شده است. در ادامه نتایج بدست آمده ارائه گردیده است.

- با افزایش تعداد موج‌ساز به علت افزایش میزان موج‌ها و افزایش تلاطم در آب و درنتیجه افزایش تبخیر، میزان تولید آب‌شیرین‌کن نیز افزایش می‌یابد. افزایش تعداد موج‌سازها باعث افزایش میزان تلاطم در آب می‌شود و منجر به ایجاد آشفتگی در محیط آب‌شور می‌گردد. تلاطم آب‌شور، سرعت انتقال جرم آب‌شور را بهبود می‌بخشد و در نتیجه ذرات آب بیش‌تری تبخیر می‌شوند. میزان تولید آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته با ۱، ۲ و ۳ عدد موج‌ساز به ترتیب ۳۹۱۶، ۴۰۸۹ و ۴۳۲۴ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است که به ترتیب به میزان ۲۶/۹ درصد، ۳۲/۵ درصد و ۴۰/۲ درصد بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است. راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت به ترتیب ۴۰/۴ درصد و ۴۱/۲ درصد و ۴۲/۶ درصد بوده است. این در حالی است که این مقادیر برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده به‌گونه‌ای که میزان تولید و راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده در این حالت ۳۰۸۵ میلی‌لیتر بر مترمربع و ۳۲/۳ درصد بوده است.
- میزان تولید و راندمان روزانه آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در همه عمق‌های آب‌شور بیش‌تر از آب‌شیرین‌کن ساده بوده است. میزان تولید آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در عمق‌های ۳،۲ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴ و ۳۰۲۳ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است و میزان راندمان روزانه نیز در این حالت به ترتیب ۴۲/۶ درصد، ۳۶/۵ درصد و ۳۰/۵ درصد بوده است.
- با افزایش عمق آب‌شور، میزان تولید هر دو آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته کاهش می‌یابد. میزان تولید آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در عمق‌های ۳،۲ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴ و ۳۰۲۳ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است درحالی‌که این میزان برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر و به ترتیب ۳۰۸۵، ۲۷۰۵ و ۲۲۹۷ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است.
- با افزایش عمق آب‌شور، تأثیر مثبت موج‌ساز اندکی کاهش‌یافته است. یکی از راهکارهای مناسب جهت

افزایش موج‌های تولید شده در عمق‌های بالاتر، افزایش دبی موج‌سازها می‌باشد.

- در آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به سه عدد موج‌ساز در عمق آب ۲ سانتی متر میزان تولید حدود ۴/۳ لیتر بر متر مربع در روز بوده است که حدود ۴۰ درصد از آب شیرین کن ساده بیش تر بوده است. هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت برابر ۰/۰۱۳ دلار برلیتر برمترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد از آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده است. بنابراین همان طور که مشاهده می‌شود علاوه بر با افزایش حدود ۴۰ درصدی تولید آب‌شیرین‌کن بهبود یافته، حدود ۱۳ درصد نیز میزان هزینه تولید هر لیتر آب شیرین کاهش داشته است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر، هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مسعود سبحانی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/ نگارنده بحث/ تحلیل‌گر (۵۰٪)؛ حسین عجم (نویسنده دوم)، روش شناس/ پژوهشگر اصلی / تحلیل گر (۵۰ درصد)

منابع مالی: نویسندگان مقاله، مراتب تشکر خود را از دانشگاه فردوسی مشهد بابت حمایت‌ها و پشتیبانی مالی از این پژوهش با شماره ۵۵۸۳۸ اعلام می نمایند.

فهرست علائم

علایم لاتین

a	دقت وسیله اندازه‌گیری
A	سطح (m^2)
AC	هزینه سالانه ($)
AMC	هزینه راه‌اندازی و نگهداری سالانه ($)
ASV	ارزش بازیابی سالانه ($)
CPL	هزینه تولید هر لیتر آب شیرین ($/L)
D_{AB}	ضریب پخش بخار ($m^2 s^{-1}$)
d_w	عمق آب (cm)
FAC	هزینه ثابت سالانه ($)
g	جاذبه (m/s^2)
gr	گرم
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
h_{fg}	آنتالپی تبخیر آب (J/kg)
H	ارتفاع (m)
i	نرخ بهره (%)
I_x	شدت تابش خورشید (W/m^2)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W/(m·K)$)
L	گرمای نهان بخار آب(J/kg)
m	دبی جرمی (kg/s)
$\dot{m}$	میزان تولید آب شیرین (kg/hr)
M	جرم (kg)
M_y	میزان تولید سالانه (L/m^2)
n	عمر دستگاه
Nu	عدد ناسلت
p	سرمایه‌گذاری اولیه ($)
PH	میزان اسیدی یا بازی بودن
$\dot{q}$	انتقال حرارت (W)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
t	زمان (s)
U	عدم قطعیت استاندارد
W	توان (W)

علایم یونانی

α	ضریب جذب
η	راندمان حرارتی (%)
ε	ضریب صدور
σ	ثابت استفان – بولتزمن

زیرنویس‌ها

b	صفحه جاذب
cg	جابه‌جایی از سطح شیشه
cw	جابه‌جایی از سطح آب
ewm	تبخیر از سطح آب
eff	مؤثر
g	شیشه
l	فاز مایع
rg	تابش از سطح شیشه
rw	تابش از سطح آب
w	آب

منابع

1- Eldalil KM. Improving the performance of solar still using vibratory harmonic effect. Desalination. 2010 Feb 1;251(1-3):3-11.

2- Rajaseenivasan T, Prakash R, Vijayakumar K, Srithar K. Mathematical and experimental investigation on the influence of basin height variation and stirring of water by solar PV panels in solar still. Desalination. 2017 Aug 1;415:67-75.

3- Omara ZM, Abdullah AS, Dakrory T. Improving the productivity of solar still by using water fan and wind turbine. Solar Energy. 2017 May 1;147:181-8.
4- Dumka P, Mishra DR. Performance evaluation of single slope solar still augmented with the ultrasonic fogger. Energy. 2020 Jan 1;190:116398.
5- El-Said EM, Abdelaziz GB. Experimental investigation and economic assessment of a solar still performance using high-frequency ultrasound waves atomizer. Journal of Cleaner Production. 2020 May 20;256:120609.
6- Haddad Z, Chaker A, Rahmani A. Improving the basin type solar still performances using a vertical rotating wick. Desalination. 2017 Sep 15;418:71-8.
7- Essa FA, Abdullah AS, Omara ZM. Rotating discs solar still: New mechanism of desalination. Journal of Cleaner Production. 2020 Dec 1;275:123200.
8- Jobrane M, Kopmeier A, Kahn A, Cauchie HM, Kharroubi A, Penny C. Theoretical and experimental investigation on a novel design of wick type solar still for sustainable freshwater production. Applied Thermal Engineering. 2022 Jan 5;200:117648.
9- Easa AS, Mohamed SM, Barakat WS, Habba MI, Kandel MG, Khalaf-Allah RA. Water production from a solar desalination system utilizing a high-speed rotary humidifier. Applied Thermal Engineering. 2023 Apr 1;224:120150.
10- Rabishokr K, Daghigh R. A portable solar still's productivity boost combining a magnetic stirrer and thermoelectric. Desalination. 2023 Mar 1;549:116340.
11- Jodat A, Moghiman M, Rahbar Nader, Measurements and analysis of effective parameters on evaporation process of different convection regimes, PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, November 16th, 2011.
12- Eldalil KM. New concept for improving solar still performance by using vibratory harmonic effect theoretical analysis, part-2. InThirteenth International Water Technology Conference, IWTC 2009 (Vol. 13).
13- Tiwari GN, Sahota L. Advanced solar-distillation systems: basic principles, thermal modeling, and its application. Springer; 2017 Jul 29.
14- Rashidi S, Abolfazli Esfahani, J, Effects of porous layer and blade installation in a single slope solar still-Experimental and numerical investigations, PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, July 2017.
15- El-Said EM, Elshamy SM, Kabeel AE. Performance enhancement of a tubular solar still by utilizing wire mesh packing under harmonic motion. Desalination. 2020 Jan 15;474:114165.