



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.

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

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 ...

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی با صفحه جاذب متحرک و مجهز به موج ساز

مسعود سبحانی^۱، حسین عجم^{۱*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

محدودیت‌های تأمین آب در کشورهای مختلف موجب گردیده است تا محققان استفاده از آب شیرین‌کن‌ها را به عنوان یکی از راهکارهای حل معضل محدودیت‌های آبی پیشنهاد دهند. در این پژوهش از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای تک‌شیب استفاده شده است. از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بهبود ساخت و تعمیر و نگهداری محفظه آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از موادی از جنس پی.وی.سی با صفحه جاذب متحرک و همچنین استفاده از موج‌ساز جهت بهبود عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی اشاره نمود. موج‌ساز نیز با ایجاد تلاطم‌های سطحی و عمقی و افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی، علاوه بر بهبود عملکرد آب شیرین‌کن 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 آب شیرین‌کن بهبود یافته نیز افزایش یافته و به ترتیب به ۴۳۲۴ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز و ۴۲/۶ درصد رسیده است که حدود ۴۰/۲ و ۹/۷ درصد بیشتر از آب شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است. نتایج بررسی اقتصادی طرح آب شیرین‌کن خورشیدی بهبود یافته نیز نشان داد که هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بهبود یافته مجهز به موج‌ساز ۰/۱۳ دلار بر لیتر بر مترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد کمتر از آب شیرین‌کن خورشیدی ساده بوده است.

کلیدواژه‌ها: آب شیرین‌کن، خورشیدی، تک‌شیب، صفحه جاذب متحرک، موج‌ساز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

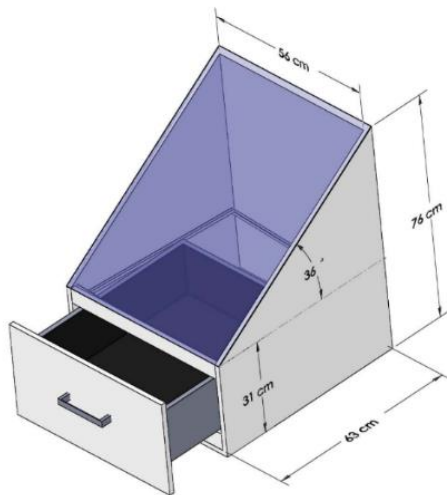
* نویسنده مسئول: h.ajam@um.ac.ir

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 آب شیرین‌کن‌هایی که از روش حوضچه‌های خورشیدی به طور مستقیم جهت تولید آب شیرین بهره می‌برند، استفاده گردیده است.

در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال علاوه بر انرژی تابشی خورشید از تجهیزات الکتریکی و یا مکانیکی نیز به عنوان منبع انرژی خارجی جهت بهبود عملکرد و افزایش تقطیر بهره برده می‌شود. استفاده از موتور ویبره (لرزاننده) در پژوهش سال ۲۰۱۰ دلیل^[۱] گزارش شده است. در این پژوهش از یک موتور ویبره

که به بدنه متصل شده و همچنین سیم‌های ماریچ مسی در صفحه جاذب استفاده شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از سیم‌های ماریچ مسی ۳۵ درصد تولید آب شیرین‌کن را افزایش داده این در حالی است که استفاده از موتور ویبره موجب افزایش ۱۳۲ درصد تولید آب شیرین‌کن 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^[۲] در سال ۲۰۱۷ به استفاده از موتورهای برهم‌زننده آب در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی مجهز به زغال و ماده تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این روش می‌تواند میزان تولید را ۳۰ درصد افزایش داده و به ۵/۲ کیلوگرم بر مترمربع در روز برساند. امارا و همکاران^[۳] در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر استفاده از فن در کف صفحه جاذب آب شیرین‌کن 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 آب شیرین‌کن 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 میشر^[۴] در سال ۲۰۲۰ به اثر استفاده از یک عدد مه‌ساز در آب شیرین‌کن‌های 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^[۵] 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 بر مترمربع در روز برساند. راندمان دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۴۱ درصد بوده است. حداد و همکاران^[۶] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک صفحه پارچه‌ای چرخان ایستاده به بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند تولید آب شیرین‌کن را حدود ۵۱ درصد افزایش داده و به ۷/۱ کیلوگرم بر مترمربع در روز برساند. هزینه تولید دستگاه آن‌ها در این حالت حدود ۰/۱ دلار به ازای یک لیتر بوده است. اسا و همکاران^[۷] در سال ۲۰۲۰ به بررسی استفاده از دیسک‌های چرخان در بهبود عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از دیسک‌های چرخان زیر 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^[۸] در سال ۲۰۲۲ از یک فن در داخل آب شیرین‌کن و



شکل ۱) طرحواره کلی آب شیرین کن خورشیدی با صفحه جاذب متحرک

جدول ۱) تجهیزات اندازه گیری مورد نیاز جهت انجام آزمایش

وسیله اندازه گیری	دقت	کاربرد
سنسور دما (-K) (type)	۰/۱ °C	اندازه گیری دما
تابش سنج- TES-1333	۱۰ W/m ²	اندازه گیری تابش خورشید
سنجش حجم	۱ ml	اندازه گیری حجم آب تولید شده
سختی سنج	۱ Ppm	سنجش سختی آب تولید شده
PH متر	۰/۱ PH	اندازه گیری PH آب تولید شده
ترازو	۰/۱ gr	اندازه گیری وزن

این امر به عنوان راهکاری جهت حل معضل خارج کردن رسوبات باقی مانده و همچنین امکان ایجاد تغییرات جدید و تعویض بهتر و راحت تر صفحات جاذب پیشنهاد می گردد. پوشش در نظر گرفته شده بر روی محفظه نیز از جنس شیشه با ضخامت ۴ میلی متر می باشد. زاویه قرارگیری شیشه نیز با توجه به عرض جغرافیایی محل آزمایش (مشهد) ۳۶ درجه می باشد. به منظور جلوگیری از نشأت بخار از آب شیرین کن ها، از نوارهای درزگیر استفاده می گردد. جهت تامین آب شور دستگاه نیز از دو منبع جداگانه استفاده می گردد. در جدول ۱ نیز ابزارهای اندازه گیری پژوهش حاضر ارائه گردیده است.

۲-۱-۱- آب شیرین کن بهبود یافته

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

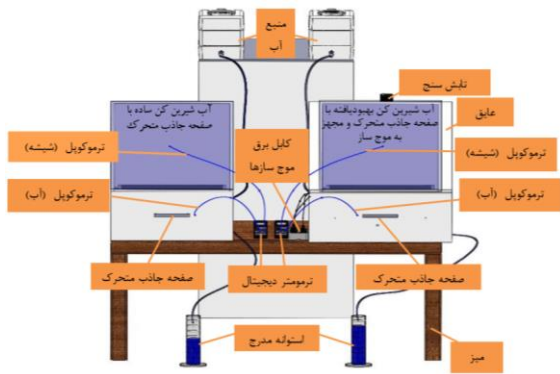
همچنین پارچه خیس استفاده نمودند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از این روش می تواند میزان تولید را ۳۲ درصد افزایش داده و به ۴/۰۳ لیتر بر مترمربع در روز برساند. هزینه تولید دستگاه آن ها ۰/۲۵ یورو به ازای هر لیتر بوده است. اسا و همکاران [9] در سال ۲۰۲۳ از یک رطوبت ساز چرخشی برای بهبود عملکرد آب شیرین 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. آن ها 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 به مرور پژوهش های گذشته مشخص می گردد که تاکنون روش های گوناگونی جهت بهبود عملکرد آب شیرین کن های خورشیدی ارائه گردیده است. در این پژوهش برای اولین بار از موج سازی استفاده می گردد که با گردش آب درون حوضچه می تواند موج ایجاد کند. بدون حرکت مؤثر آب، نقاطی در صفحه جاذب وجود خواهد داشت که با سکون آب، ناخالصی ها و مواد زاید در آنجا راکد و ته نشین می شوند که نتیجه آن کاهش ضریب انتقال حرارت سطح جاذب و عدم رسیدن نور کافی به صفحه جاذب خواهد بود. به همین منظور می توان با استفاده از موج ساز و ایجاد تلاطم های سطحی و عمقی، علاوه بر بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی از تجمع موادی که در اثر راکد بودن آب به وجود می آیند نیز جلوگیری نمود.

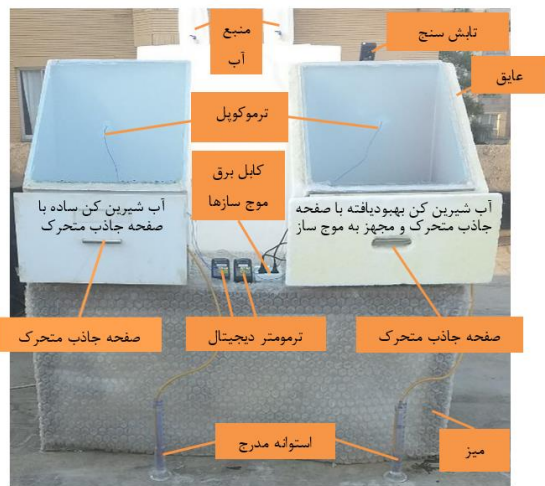
۲- مواد و روش ها

۲-۱- دستگاه آزمایش

در این پژوهش، دو آب شیرین کن خورشیدی حوضچه ای با پوشش شیشه ای تک شیب و با صفحه جاذب متحرک با ابعاد یکسان مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شده است. از جمله مزیت های ساختاری آب شیرین کن های خورشیدی ساخته شده، می توان به جنس محفظه این آب شیرین کن ها و همچنین صفحه جاذب متحرک آن ها اشاره نمود. محفظه آب شیرین کن های ساخته شده از جنس پی.وی.سی می باشد. همچنین در این پژوهش از صفحه جاذب متحرک در آب شیرین کن های خورشیدی استفاده می گردد.



شکل ۳) شماتیک دستگاه های آزمایش



شکل ۴) نمای واقعی دستگاه های آزمایش

پمپ وجود دارد، ایجاد می‌گردند. با استفاده از روش فوق، امکان ایجاد موج در داخل حوضچه آب شیرین‌کن 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 آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، نیاز است تا آب در داخل حوضچه به حرکت و گردش درآید. به همین منظور می‌توان با استفاده از موج‌ساز و ایجاد تلاطم‌های سطحی با برهم زدن لایه مرزی سطح آب و هوا و ایجاد تلاطم‌های عمقی با استفاده از جابه‌جایی اجباری، علاوه بر بهبود عملکرد آب شیرین‌کن 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 می‌گردد. در این پژوهش موج‌ها توسط پمپ‌های آب مولد جریان که در داخل حوضچه آب شیرین‌کن خورشیدی قرار داده شده‌اند، ایجاد می‌شوند. دبی پمپ‌ها ثابت و برابر 5 lit/min و با ابعاد ۴*۴*۴ 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 موج‌سازها و در شکل ۲ ب نمونه موج‌های ایجاد شده توسط موج‌ساز نشان داده شده است. شکل های ۳ و ۴ طرح‌واره کلی و دستگاه‌های آزمایش مجهز به موج‌ساز را نشان می‌دهد.



الف



ب

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

۲-۲- روابط حاکم

اثر استفاده از موج‌ساز بر عملکرد آب شیرین‌کن 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 آب شور بوده و باعث موجدار شدن سطح آب و القای آشفتگی در فاز بخار می‌گردد.

۲- اثر جابه‌جایی اجباری ایجاد شده در آب شور حوضچه آب شیرین‌کن خورشیدی که ناشی از عملکرد پمپ‌های مولد جریان موجود در آب شور 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 به صورت طبیعی در اثر اختلاف چگالی و دمای هوای مرطوب بالای سطح آب ایجاد می‌شود که پدیده تبخیر در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی عموماً از این نوع هستند.

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

$$\dot{q}_{cg} = h_g(T_g - T_a) \quad (5)$$

$$\dot{q}_{rg} = \varepsilon_g \sigma (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (6)$$

(ب) موازنه انرژی برای آب با وجود موج ساز موازنه انرژی برای آب با در نظر گرفتن ظرفیت گرمایی آب به صورت معادله (۷) است.

$$\dot{q}_{hwm} = [\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ewm}] + (MC)_w \frac{dT_w}{dt} \quad (7)$$

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

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

$$\dot{q}_{wm} = h_{wm}(T_b - T_w) \quad (8)$$

(ج) موازنه انرژی برای صفحه جاذب با وجود موج ساز با صرف نظر کردن از ظرفیت گرمایی و اتلاف حرارتی از صفحه جاذب، می‌توان معادله انرژی را برای صفحه جاذب به صورت رابطه (۹) در نظر گرفت:

$$\alpha_b I = \dot{q}_{wm} \quad (9)$$

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

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

$$Nu_{wm} = 4.69 Re^{0.27} Pr^{0.21} Gr^{0.07} \left(\frac{D_h}{L_w}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

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

K_{ws} را می‌توان به صورت 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 باتوجه به دبی آن قابل محاسبه 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 موج ساز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$q_{ewm} = \frac{K_{ws} Nu_{wm} K_b}{L_w} \Delta T_{wm} \quad (11)$$

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].

$$Nu_p = 0.14(Pr \times Gr)^{1/3} \quad (12)$$

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 انجام گرفته است. این در حالی است که پدیده تبخیر در سطوح موج نیز در صنایع بسیاری نظیر صنایع غذایی و سیستم‌های تبخیری نظیر آب شیرین‌کن‌ها 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 آب شیرین‌کن خورشیدی افزایش داد.

۲-۲-۱- اثر سطوح موج 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 موج 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 صرف نظر کردن از ظرفیت گرمایی و یکسان در نظر گرفتن دمای داخلی و خارجی شیشه به صورت معادله (۱) می‌باشد.

$$\alpha_g I + [\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ewm}] = \dot{q}_{cg} + \dot{q}_{rg} \quad (1)$$

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 (۴) به دست می‌آیند. K_{ws} ضریب تصحیح سطح می‌باشد که نسبت سطح موجدار به سطح صاف می‌باشد.

$$\dot{q}_{rw} = K_{ws} h_{rw}(T_w - T_g) \quad (2)$$

$$\dot{q}_{cw} = K_{ws} h_{cw}(T_w - T_g) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{ewm} = K_{ws} h_{ewm}(T_w - T_g) \quad (4)$$

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:

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

$$q_{ep} = \frac{K_p N U_p K_b}{L_w} \Delta T_p \quad (13)$$

K_p را می‌توان به صورت 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 به صورت نسبت انرژی گرمایی مصرف شده برای به دست آوردن 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 به عنوان روش‌های بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده شده است، توان مورد نیاز 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:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} h_{fg}}{A_b I + W_c} \quad (14)$$

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

بازده روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی نیز از حاصل ضرب مجموع آب تقطیر شده ساعتی در طول روز در گرمای نهان تبخیر با تقسیم شدن بر تابش خورشید متوسط روزانه به علاوه توان مصرف شده از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\eta_d = \frac{\sum \dot{m} h_{fg}}{\sum (A_b I + W_c)} \quad (15)$$

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 به منظور بررسی اقتصادی هر یک از آزمایش‌های انجام شده، از رابطه زیر استفاده می‌گردد [13].

$$CPL = \frac{AC}{M_y} \quad (16)$$

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

$$AC = FAC + AMC - ASV \quad (17)$$

FAC هزینه ثابت سالانه دستگاه بوده که متغیرهای آن شامل سرمایه‌گذاری اولیه (P)، میزان بهره (i) و طول عمر سامانه (n) می‌باشند. در صورت در نظر گرفتن 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 به صورت رابطه زیر تعریف شده که در آن عبارت داخل پرانتز بیانگر دوره بازیابی سرمایه می‌باشد.

$$FAC = P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (18)$$

AMC هزینه راه‌اندازی و نگهداری سالانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی است که باتوجه به 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 باتوجه به این موارد، هزینه تعمیرات و نگهداری دوره‌ای آب‌شیرین‌کن ۱۰ درصد هزینه سالانه دستگاه در نظر گرفته شده است. AMC به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

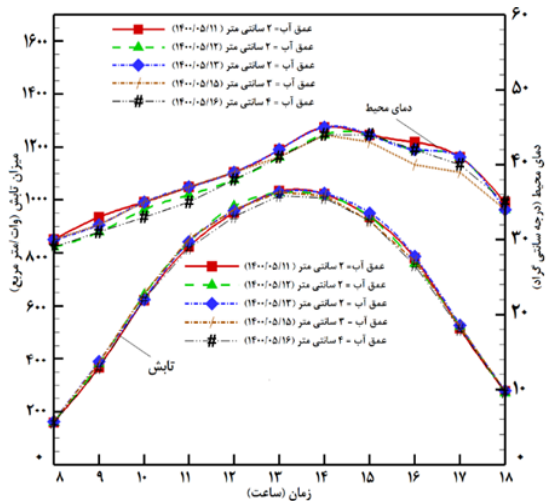
$$AMC = 0.1(FAC) \quad (19)$$

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 به منظور جلوگیری از خوردگی آن، افزایش داد. ضریب بازیابی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی (S) باتوجه به موارد فوق ۲۰ درصد هزینه فعلی در نظر گرفته می‌شود. ASV به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

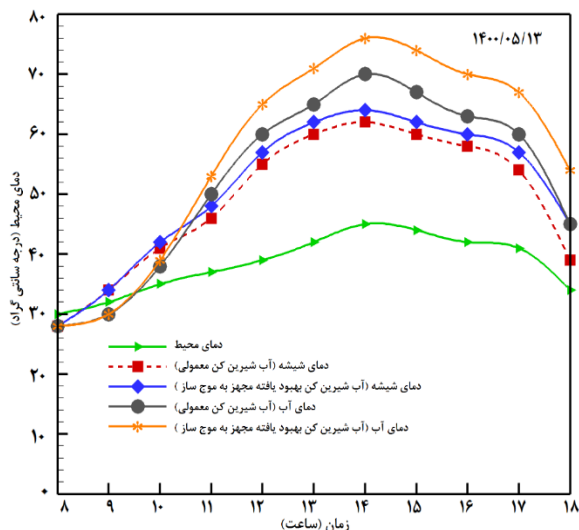
$$ASV = S \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (20)$$

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 به صورت 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



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 آب شور برای آب شیرین کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

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

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

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

$$U_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

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

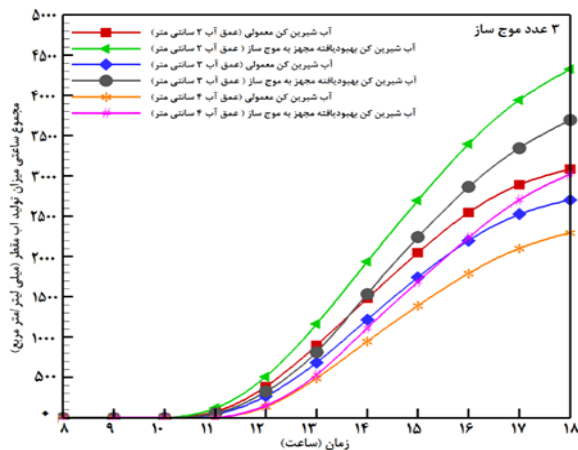
در این قسمت به بررسی اثر استفاده از موج‌ساز در آب شیرین کن‌های خورشیدی تک‌شیب در عمق‌های مختلف پرداخته شده است. موج‌ها توسط پمپ‌های آب مولد جریان که در داخل حوضچه آب شیرین کن خورشیدی قرار داده شده‌اند، ایجاد می‌شوند. دبی پمپ‌ها ثابت و برابر ۵ لیتر بر دقیقه بوده است. آزمایش‌های مربوط به دو آب شیرین کن خورشیدی ساده و بهبود یافته در شرایط مشابه و به صورت 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 مورد نظر تقریباً یکسان بوده و تغییرات ناچیزی داشته و مشابه یکدیگر است.

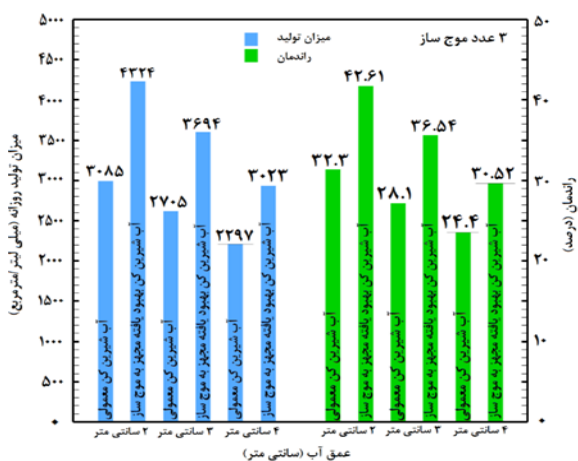
در شکل ۶ تغییرات ساعتی مربوط به دمای پوشش شیشه‌ای و آب شور برای آب شیرین کن‌های خورشیدی ساده و بهبود یافته در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ ارائه گردیده است. در این آزمایش از ۳ عدد موج‌ساز با عمق آب شور ۲ سانتی‌متر استفاده گردیده است.

جدول ۲) عدم قطعیت لوازم اندازه‌گیری

وسيله اندازه‌گیری	دقت	محدوده اندازه‌گیری	عدم قطعیت استاندارد
سنسور دما (K-type)	۰/۱ °C	+ ۲۵۰ °C - ۴۰ °C	۰/۰۶ °C
تابش سنج TES-1333	۱۰ W/m ²	۰-۲۰۰۰ W/m ²	۶ W/m ²
سنجش حجم	۱ ml	۰-۲۵۰ ml	۰/۶ ml
سختی سنج	۱ Ppm	۰-۱۰۰۰۰ ppm	۰/۶ ppm
PH متر	۰/۰۱ PH	۰-۱۴ PH	۰/۰۰۶ PH
ترازو	۰/۱ gr	۰-۵۰۰ gr	۰/۰۶ gr



شکل ۷) بررسی اثر عمق آب شور بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب مقطر آب شیرین کن‌های 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 آب شیرین کن خورشیدی ساده و بهبودیافته در عمق‌های مختلف آب شور در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

در شکل ۸ نیز میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب شیرین کن 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 آب شیرین کن بهبودیافته در همه عمق‌های آب شور بیشتر از آب شیرین کن ساده بوده است. میزان تولید آب شیرین کن بهبودیافته در عمق‌های ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴، ۴۲۶۱ و ۳۰۸۵، ۲۷۰۵، ۲۲۹۷ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است و ۳۶/۵ درصد، ۳۰/۵ درصد و ۲۴/۴ درصد، ۴۲/۲۳ درصد و ۲۸/۱ درصد راندمان روزانه تولید آب شیرین کن ساده و بهبودیافته در عمق‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر است.

در شکل ۹ به بررسی اثر تعداد موج‌ساز و موج‌های ایجاد شده بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب شیرین کن‌های خورشیدی در تاریخ‌های ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۲ و ۱۴۰۰/۰۵/۱۳ پرداخته شده است. در این آزمایش‌ها از ۲ و ۳ عدد موج‌ساز در عمق ۲ سانتی‌متر استفاده گردیده است.

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

در شکل ۷ اثر عمق آب شور بر روی مجموع ساعتی میزان تولید آب مقطر آب شیرین کن‌های 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 آب شور ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر استفاده گردیده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عمق آب شور، میزان تولید هر دو آب شیرین کن‌های خورشیدی ساده و بهبودیافته کاهش می‌یابد که علت این امر نیاز به زمان و انرژی بیشتر جهت تبخیر آب شور با افزایش حجم آب شور می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته در عمق‌های ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴ و ۳۰۵۲ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است در حالی که این میزان برای آب شیرین کن خورشیدی ساده کم‌تر و به ترتیب ۳۰۸۵، ۲۷۰۵، ۲۲۹۷ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هرچند با افزایش عمق آب شور، میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته نیز کاهش می‌یابد اما همچنان استفاده از موج‌ساز در عمق‌های ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر موجب افزایش میزان تولید آب شیرین کن نسبت به آب شیرین کن ساده شده است. همچنین با افزایش عمق آب شور، تأثیر مثبت موج‌ساز اندکی کاهش یافته است. علت این امر می‌تواند آن باشد که با افزایش عمق آب شور و افزایش حجم آب، موج‌های تولید شده توسط موج‌سازها کم‌تر می‌شوند؛ بنابراین این امر، میزان تلاطم‌های سطحی را کاهش می‌دهد که در نهایت می‌تواند منجر به کاهش تأثیر موج‌سازها با افزایش عمق آب شور گردد. یکی از راهکارهای مناسب جهت افزایش موج‌های تولید شده در عمق‌های بالاتر، افزایش دبی موج‌سازها می‌باشد.

در شکل ۱۰ نیز میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب شیرین کن 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 ۲، ۱ 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 آب شیرین کن بهبودیافته افزایش می‌یابد. راندمان روزانه آب شیرین کن 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 آب شیرین کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده به‌گونه‌ای که میزان تولید و راندمان آب شیرین کن 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 آب شور 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.

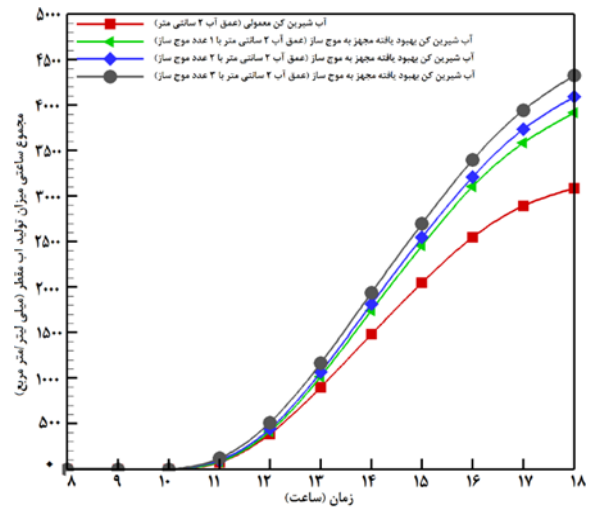
۳-۱- مقایسه نتایج آب شیرین کن های خورشیدی

در این قسمت مقایسه‌ای بین نتایج آب شیرین کن خورشیدی ساده و بهبودیافته ارائه گردیده است.

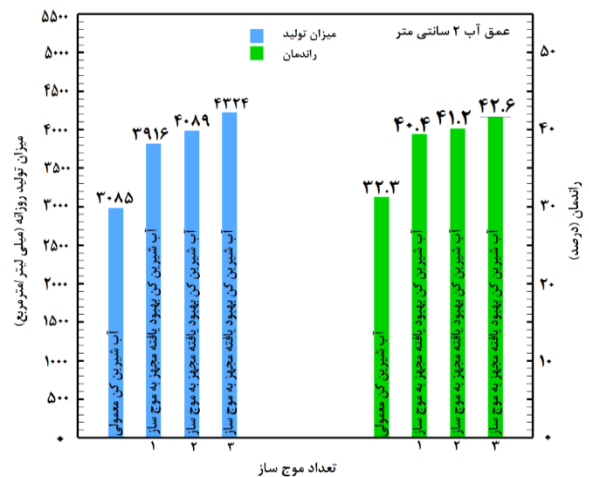
با فرض در نظر گرفتن ۲۶۰ روز آفتابی برای شهر مشهد، در آب شیرین کن خورشیدی مجهز به سه عدد موج‌ساز در عمق آب ۲ سانتی‌متر میزان تولید حدود ۴/۳ لیتر بر متر مربع در روز بوده است که حدود ۴۰ درصد از آب شیرین کن ساده بیش‌تر بوده است. هزینه سرانه تولید هر لیتر آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت برابر ۰/۱۳ دلار بر لیتر بر مترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد از آب شیرین کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده است. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر با افزایش حدود ۴۰ درصدی تولید آب شیرین کن 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 آب شیرین کن خورشیدی ساده و بهبودیافته با سایر پژوهش‌های مشابه مقایسه شده‌اند.

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



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



شکل ۱۰) مقایسه میزان تولید و راندمان روزانه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته با تعداد موج‌سازهای 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 در نتیجه افزایش تبخیر، میزان تولید آب شیرین کن نیز افزایش می‌یابد. افزایش تعداد موج‌سازها باعث افزایش میزان تلاطم در آب می‌شود و منجر به ایجاد آشفتگی در محیط آب شور می‌گردد. تلاطم آب شور، سرعت انتقال جرم آب شور را بهبود می‌بخشد و در نتیجه ذرات آب بیش‌تری تبخیر می‌شوند. همان‌طور که این شکل نیز نشان می‌دهد، میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته با ۱، ۲ و ۳ عدد موج‌ساز به ترتیب ۳۹۱۶، ۴۰۸۹، ۴۳۲۴ میلی‌لیتر بر متر مربع بوده است که به ترتیب به میزان ۲۶/۹ درصد، ۳۲/۵ درصد و ۴۰/۲ درصد بیش‌تر از آب شیرین کن خورشیدی ساده بوده است.

جدول ۳) میزان تولید، راندمان و هزینه دستگاه آب شیرین کن 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	-
السعيد و همکاران [15]	صفحه شبکه بندی شده مرتعش	۲/۵	۴/۲-۳/۲	۳۸-۵۰	۰/۰۰۴-۰/۰۱۳
السعيد و عبدالعزيز [5]	مه ساز	۶-۳/۵	۴/۴-۳/۵	۲۸-۵۵	۰/۰۱۹-۰/۰۱
الدليل [1]	سیم های مارپیچ مسی و موتور ویبره (لرزاننده)	۶	۵/۸-۱/۴	۳۵-۶۰	-
اسا و همکاران [9]	دیسک های چرخان	۱	۳/۲-۲	۳۴-۵۴	-

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه مطابق بررسی های انجام شده تاکنون، پژوهش های متعددی در زمینه بهبود عملکرد آب شیرین کن های خورشیدی حوضچه ای انجام گردیده است. این امر نشان دهنده اهمیت، کاربرد و دقت نظر ویژه پژوهشگران به این موضوع در سال های اخیر می باشد. در این پژوهش سعی گردیده است تا با نوآوری و استفاده از مواد و تجهیزات جدید به بهبود بهره وری آب شیرین کن ها خورشیدی حوضچه ای پرداخته شود.

در این پژوهش به طراحی، ساخت، بررسی آزمایشگاهی و تحلیل عملکرد آب شیرین کن های خورشیدی تک شیب با صفحه جاذب متحرک و مجهز به موج ساز پرداخته شده است. در ادامه نتایج بدست آمده ارائه گردیده است.

- با افزایش تعداد موج ساز به علت افزایش میزان موج ها و افزایش تلاطم در آب و در نتیجه افزایش تبخیر، میزان تولید آب شیرین کن نیز افزایش می یابد. افزایش تعداد موج سازها باعث افزایش میزان تلاطم در آب می شود و منجر به ایجاد آشفتگی در محیط آب شور می گردد. تلاطم آب شور، سرعت انتقال جرم آب شور را بهبود می بخشد و در نتیجه ذرات آب بیش تری تبخیر می شوند. میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته با ۱، ۲ و ۳ عدد موج ساز به ترتیب ۳۹۱۶، ۴۰۸۹ و ۴۳۲۴ میلی لیتر بر مترمربع بوده است که به ترتیب به میزان ۲۶/۹ درصد، ۳۲/۵ درصد و ۴۰/۲ درصد بیش تر از آب شیرین کن

خورشیدی ساده بوده است. راندمان روزانه آب شیرین کن 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 آب شیرین کن خورشیدی ساده کم تر بوده به گونه ای که میزان تولید و راندمان آب شیرین کن خورشیدی ساده در این حالت ۳۰۸۵ میلی لیتر بر مترمربع و ۳۲/۳ درصد بوده است.

• میزان تولید و راندمان روزانه آب شیرین کن بهبودیافته در همه عمق های آب شور بیش تر از آب شیرین کن ساده بوده است. میزان تولید آب شیرین کن بهبودیافته در عمق های ۳،۲ و ۴ سانتی متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴ و ۳۰۲۳ میلی لیتر 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 آب شور، میزان تولید هر دو آب شیرین کن های خورشیدی ساده و بهبودیافته کاهش می یابد. میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته در عمق های ۳،۲ و ۴ سانتی متر به ترتیب ۴۳۲۴، ۳۶۹۴ و ۳۰۲۳ میلی لیتر بر مترمربع بوده است درحالی که این میزان برای آب شیرین کن خورشیدی ساده کم تر و به ترتیب ۳۰۸۵، ۲۷۰۵ و ۲۲۹۷ میلی لیتر بر مترمربع بوده است.

• با افزایش عمق آب شور، تأثیر مثبت موج ساز اندکی کاهش یافته است. یکی از راهکارهای مناسب جهت

H	ارتفاع (m)
i	نرخ بهره (%)
I_x	شدت تابش خورشید (W/m^2)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W/(m \cdot K)$)
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

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

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

- در آب شیرین کن 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 آب شیرین کن خورشیدی بهبودیافته در این حالت برابر ۰/۰۱۳ دلار بر لیتر بر مترمربع بوده است که حدود ۱۳ درصد از آب شیرین کن خورشیدی ساده کم‌تر بوده است. بنابراین همان طور که مشاهده می‌شود علاوه بر با افزایش حدود ۴۰ درصدی تولید آب شیرین کن بهبود یافته، حدود ۱۳ درصد نیز میزان هزینه تولید هر لیتر آب شیرین کاهش داشته است.

تأییدیه 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 منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

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

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)
g_r	گرم
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
h_{fg}	آنتالپی تبخیر آب (J/kg)

- 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. In Thirteenth 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.