

طراحی آب شیرین کن خورشیدی شیب دار بنددار برای تصفیه آبگیرهای

فصلی (هوتک) جهت تامین آب شرب بهداشتی

حمید مقدم^{۱*}، محسن صمیمی^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

پیام نگار: h.moghadam@eng.usb.ac.ir

چکیده

دسترسی به آب سالم و پاک همچنان یک چالش بزرگ جهانی است، به طوری که بخش قابل توجهی از جوامع بشری از منابع آب سالم و بهداشتی کافی برخوردار نیستند. هدف از این تحقیق بررسی استفاده از شیرین سازی خورشیدی به عنوان روشی پایدار و مقرون به صرفه برای تصفیه آب غیر سالم در دسترس در مناطق دور افتاده و کم جمعیت با هدف تامین آب شرب بهداشتی است. این در حالی است که با توجه به نبود منابع پایدار انرژی و دورافتادگی چنین مناطقی، سبب شده که متأسفانه این منابع آبی بسیار آلوده و ناسالم در برخی موارد بدون هیچگونه عملیات تصفیه‌ای برای مصارف شرب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از آب شیرین کن خورشیدی شیب دار بنددار برای تصفیه آب غیر بهداشتی در سه زاویه نصب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه استفاده شد. همچنین، کارآمدی شیرین سازی خورشیدی در کاهش یا حذف کامل بار میکروبی، به عنوان موضوعی که تا کنون بسیار کمتر به آن پرداخته شده است، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیزهای انجام شده نشان داده که آب شیرین

تولید شده عاری از هرگونه بار میکروبی بوده و بنابراین از نظر بهداشتی برای شرب کاملاً سالم است. همچنین بیشترین میزان تولید در زاویه ۲۰ درجه و برابر با ۲۷۵۰ میلی لیتر بر متر مربع در روز بوده است.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار، زاویه نصب، بار میکروبی، هوتک

۱- مقدمه

امروزه دسترسی به آب شیرین و سالم به یکی از چالش‌های اساسی در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه نواحی روستایی و دورافتاده، تبدیل شده است [۱]. با افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب شیرین طبیعی، بحران کم‌آبی در حال تشدید است و تصفیه آب و پساب به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۲]. در بسیاری از این مناطق، ساکنان مجبور به استفاده از منابع آبی نامناسب مانند چاه‌های شور، آب‌های سطحی آلوده یا حتی آب‌های لب‌شور هستند [۳]. استان سیستان و بلوچستان در ایران نیز از جمله مناطقی است که با مشکل کمبود آب شیرین مواجه است. در بخش‌های جنوبی این استان، با توجه به بارش‌های رگباری موسمی هر ساله، از دیرباز سیلاب‌ها به سمت حوضچه‌های طبیعی یا ساخته شده به دست انسان، به نام «هوتک» هدایت شده و در آنجا جمع‌آوری می‌شود تا در سایر روزهای سال از آن استفاده شود [۴]. با توجه به دور افتاده بودن بسیاری از روستاها در این منطقه، آب موجود در هوتک‌ها تنها منبع آبی در دسترس برای برطرف کردن نیازهای مختلف به خصوص تامین آب شرب است [۵]. این در حالی است که کیفیت آب جمع‌آوری شده بسیار پایین بوده و علاوه بر شوری، غلظت بالای املاح معدنی و وجود فلزات سنگین، این آب‌ها اغلب آلوده به باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌ها هستند [۶، ۷]. پراکندگی جمعیت، محرومیت و دور افتاده بودن روستاها در این مناطق، سبب شده که با وجود کیفیت بسیار پایین آب موجود در هوتک‌ها، در برخی موارد بدون انجام هیچگونه فرآیند تصفیه‌ای از این منابع آبی برای آشامیدن و سایر مصارف خانگی استفاده شود. در نتیجه بیماری‌های کلیوی و گوارشی میان ساکنین این مناطق بسیار شایع است. هرچند برای مقابله با این مشکل، روش‌های مختلف شیرین‌سازی آب از جمله روش‌های حرارتی (مانند تقطیر چندمرحله‌ای)، غشایی (مانند اسمز معکوس) و الکتروشیمیایی توسعه یافته‌اند [۸، ۹]. در این میان فرآیندهای غشایی با توجه به مصرف پایین انرژی در تامین نیاز صنایع، بخش کشاورزی، بخش خانگی و تصفیه پساب به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. با این وجود بسیاری از این فناوری‌ها به دلیل نیاز به انرژی زیاد و پایدار، هزینه‌های بالای راه‌اندازی و نگهداری، و ضرورت وجود اپراتورهای متخصص، برای مناطق روستایی و دورافتاده عملی نیستند. برای مثال تاکنون با تامین مالی توسط خیرین، دستگاه‌های اسمز معکوس برای تصفیه آب چندین هوتک نصب شده‌اند، اما بنا به دلایل ذکر شده این تجهیزات پس از مدت زمان کوتاه چند ماهه دچار مشکلات فنی شده و از کار افتاده‌اند. با مرور مطالعات مختلف و گسترده انجام شده در این حوزه به نظر می‌رسد، سیستم‌های شیرین‌سازی خورشیدی در چنین مناطقی یک راه‌حل پایدار و مقرون به صرفه برای شیرین‌سازی منابع آبی موجود می‌باشد [۱۱]. این تجهیزات ارزان قیمت با توجه به شبیه سازی چرخه آب

در طبیعت، در یک محیط بسته و نداشت قطعات مکانیکی در صورت استفاده از مواد با کیفیت و مقاوم در مقابل خوردگی دارای طول عمر بالا (بیشتر از ۱۰ سال) هستند.

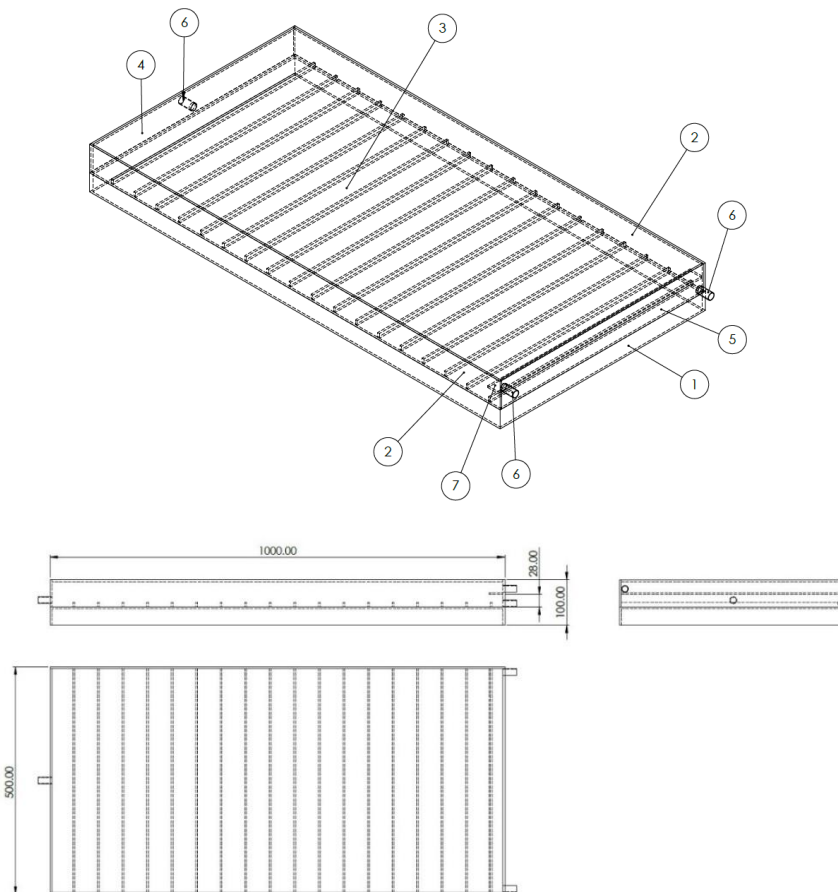
شیرین‌سازی خورشیدی به روش‌هایی گفته می‌شود که با استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید، آب شور یا لب‌شور را به آب شیرین تبدیل می‌کنند [۱۲]. این سیستم‌ها عموماً به دو دسته اصلی فعال (با استفاده از پمپ و اجزای مکانیکی) و غیرفعال (بدون نیاز به قطعات متحرک) تقسیم می‌شوند [۱۳]. سیستم‌های غیرفعال، مانند تقطیر خورشیدی ساده حوضچه‌ای، به‌ویژه برای مناطق دورافتاده مناسب هستند زیرا نیاز به تعمیر و نگهداری کمی داشته و طول عمر بالایی دارند. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این روش‌ها، حجم کم تولید آب شیرین است که عمدتاً تنها برای مصارف شرب قابل استفاده است [۱۴]. با این وجود، پایداری این سیستم‌ها، وابسته نبودن به سوخت‌های فسیلی و سازگاری با محیط زیست، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای مناطق محروم و دور افتاده تبدیل کرده است. همچنین مطالعات گسترده‌ای با هدف افزایش میزان تولید آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام گرفته است [۱۵-۱۷]. در میان روش‌های غیرفعال خورشیدی، آب شیرین‌کن‌های شیب‌دار به دلیل سادگی ساخت، هزینه کم و بازدهی نسبتاً مناسب در مقایسه با نوع حوضچه‌ای، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۸]. در این میان نیز راهکارهای مختلفی برای افزایش کارایی این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها پیشنهاد شده است. برای مثال، امیری تاثیر استفاده از چگالنده داخلی بر افزایش عملکرد این نوع از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی مورد بررسی قرار داده و نشان داد که بازده دستگاه بهبود یافته، در شرایط مختلف علمیاتی بین ۱۶ تا ۲۰ درصد افزایش یافته است [۱۹]. پاکیزه و همکاران نیز از آینه‌های متمرکز کننده نور برای افزایش میزان تولید استفاده کردند [۲۰]. با این وجود، تغییرات پیشنهادی که با هدف افزایش کارایی ارائه شده‌اند، در اغلب موارد یا سبب پیچیدگی فنی (در مرحله ساخت یا بهره‌برداری) شده و یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. علاوه بر این، در بسیاری از موارد، مواد مورد استفاده برای ساخت دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی در شرایط محیطی بهره‌برداری (مجاورت با آب شور خورنده و رطوبت و دمای بالا) از دوام مناسب برخوردار نمی‌باشند. بنابراین هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی عملکرد یک آب شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار برای شیرین‌سازی آب هوتک در مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان است. با توجه به کیفیت نامناسب آب این حوضچه‌ها، این مطالعه به دنبال ارائه راه‌حلی پایدار، کم‌هزینه و قابل اجرا برای تأمین آب شرب سالم در این مناطق است. بررسی کارآمدی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی در کاهش یا حذف کامل بار میکروبی از دیگر اهداف این پژوهش است، موضوعی که تا کنون بسیار کمتر به آن پرداخته شده است. در این پژوهش همچنین اثر شیب دستگاه بر عملکرد آن (میزان آب شیرین تولید شده) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

آب شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار مورد استفاده در این تحقیق، از یک صفحه شیشه‌ای که از پشت سیاه شده به عنوان صفحه جاذب به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر و پوششی شیشه‌ای که به موازات صفحه جاذب و در فاصله ۵ سانتی‌متر بالاتر از آن قرار دارد، تشکیل شده است. فاصله ۵ سانتی‌متری میان صفحه

جاذب و پوشش شیشه‌ای، با استفاده از شیشه‌هایی با ابعاد ۱۰۰ در ۵ سانتی‌متر و ۵۰ در ۵ سانتی‌متر به یک مکعب مستطیل تبدیل شده و برای جلوگیری از نشتی آب شور و آب شیرین تولید شده و همچنین جلوگیری از خروج بخار آب، با استفاده از چسب سیلیکون به خوبی درز بندی شده است. مجموعه شکل گرفته به عنوان آب شیرین کن خورشیدی در هر آزمایش تحت زاویه‌ای مشخص نسبت به افق نصب می‌شد. همانند پدیده گلخانه‌ای، نحوه عملکرد دستگاه اینگونه است که انرژی تابشی خورشید به دلیل طول موج کم از پوشش شیشه‌ای شفاف دستگاه عبور کرده و بر روی صفحه جاذب، جذب و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت، صفحه جاذب از زیر عایقکاری شده است. از آنجا که صفحه جاذب نیز دارای تابش حرارتی است ولی با طول موج بسیار بلندتر نسبت به تابش خورشیدی، پوشش شیشه‌ای دستگاه در مقابل این نوع تابش به صورت یک جسم کدر عمل کرده و بنابراین تابش صفحه جاذب از دستگاه خارج نشده و پدیده گلخانه‌ای سبب انباشت انرژی حرارتی درون دستگاه می‌شود [۲۱]. انرژی حرارتی انباشته شده با انتقال از صفحه جاذب به آب شور جریان یافته بر روی آن، سبب تبخیر آب شور خواهد شد. شایان ذکر است که در فرآیند تبخیر آب شور، تنها آب از فاز مایع به فاز بخار تبدیل شده و املاح محلول در آب شور باقی خواهند ماند. بخار آب خالص تولید شده با حرکت به سمت بالا و تماس با سطح داخلی پوشش شیشه‌ای دستگاه، بخشی از انرژی حرارتی خود را از طریق پوشش شیشه‌ای به محیط از دست داده و مجدداً به مایع تبدیل می‌شود. قطرات آب خالص تولید شده بر روی سطح داخلی پوشش شیشه‌ای به دلیل شیب دستگاه به سمت پایین و کانال جمع آوری آب شیرین حرکت کرده و در نهایت درون مخزن آب شیرین تولید شده جمع آوری می‌شوند. شماتیک طراحی دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار و جزئیات آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. تصویری از دستگاه مورد استفاده نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که پارامترهای مختلفی بر عملکرد دستگاه (میزان تولید آب شیرین) تاثیر گذار است. با این حال دبی آب شور جریان یافته بر روی صفحه جاذب و همچنین شیب دستگاه، از جمله موثرترین عوامل بر عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی شیب‌دار هستند [۲۲-۲۴]. نتایج مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که کاهش دبی آب شور ورودی به دستگاه، سبب افزایش میزان تولید آب شیرین خواهد شد [۲۵]. البته این کاهش دبی سبب کانالیزه شدن جریان بر روی سطح جاذب و خشک ماندن بخش‌هایی از آن خواهد شد. برای مقابله با این مشکل راهکارهای متعددی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به استفاده از فیتیله و همچنین تبدیل سطح جاذب به حالت پلکانی اشاره کرد [۲۶-۲۸]. در تحقیق حاضر از یک سری بند شیشه‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر و فاصله ۵ سانتی‌متر با هدف نگه‌داشتن مقدار مشخصی از آب در دستگاه استفاده شده است. بکارگیری این بندها بر روی صفحه جاذب سبب می‌شود تا جریان آب شور درون دستگاه بصورت ناپیوسته و در حداقل ممکن باشد. بندها به صفحه جاذب با استفاده از چسب سیلیکون متصل و آب بندی شده‌اند.



شکل ۱. شماتیک طراحی یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی شیبدار برای تصفیه آب مورد استفاده در این مطالعه.

Fig. 1. Schematic design of a inclined solar still system for water purification used in this study.

جدول ۱. جزئیات موقعیت‌های مشخص شده در طراحی آب شیرین کن خورشیدی شیبدار.

Table 1. Details of the specified positions in the design of the inclined solar still.

No.	Name of piece	Number of pieces
1	Bottom glass	1
2	Side glass	2
3	Top glass (glass cover)	1
4	Up glass	1
5	Down glass (absorbing plate)	1
6	Pipe	3
7	Water transfer	1



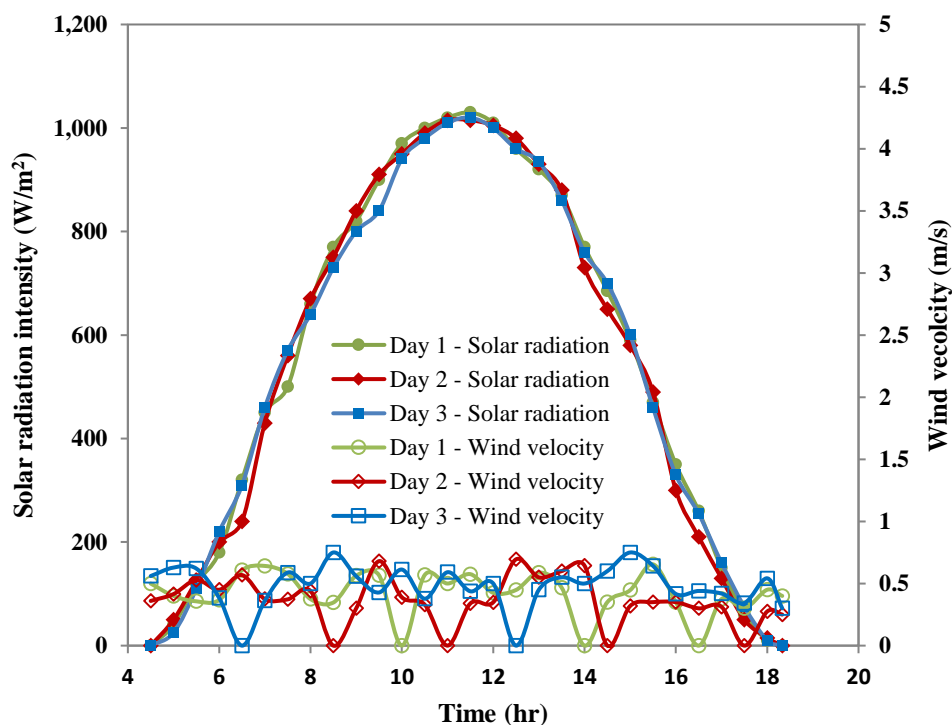
شکل ۲. تصویر دستگاه استفاده شده در این تحقیق.

Fig. 2. Image of the device used in this study.

روند اجرای هر آزمایش به این صورت بود که در ابتدای روز و پیش از طلوع آفتاب، ابتدا آب هوتک باقی مانده از روز قبل درون دستگاه، تخلیه شده و دستگاه با تنظیم ارتفاع پایه عقب در یک زاویه مشخص قرار گرفت. سپس آب هوتک با دبی کم و بصورت ثقلی وارد دستگاه شد. با ورود آب هوتک به دستگاه و به اولین بند، آب هوتک در پشت بند جمع شد و پس از سر ریز شدن به بند بعدی رسید. جریان آب هوتک تا جایی ادامه پیدا می‌کند که آب تا پشت آخرین بند دستگاه به طور کامل قرار گیرد. پس از پر شدن آخرین بند، جریان آب هوتک ورودی به دستگاه قطع شد. در صورت سر ریز شدن آب از آخرین بند، کانالی بعد از آخرین بند قرار داشت که در آن یک خروجی برای تخلیه آب هوتک اضافی درون دستگاه تعبیه شده بود. با پایان این مرحله، پشت تمامی بندهای دستگاه از آب هوتک پر شده و دستگاه آماده کار بود. با طلوع خورشید و تابش آن بر روی دستگاه، مطابق توضیحات داده شده، دستگاه شروع به کار کرده و در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب شیرین تولید شده اندازه‌گیری و ثبت شد. با توجه به انجام آزمایش‌ها در پژوهشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه سیستان و بلوچستان، داده‌های جوی مورد نیاز از جمله شدت تابش خورشید، دمای هوا و سرعت باد، برای روزهای آزمایش از ایستگاه هواشناسی زاهدان اخذ شد. علاوه بر این حجم کلی آب شیرین تولید شده در هر روز به عنوان عملکرد دستگاه ثبت شد. در نهایت هدایت الکتریکی آن به عنوان شاخصی از غلظت املاح موجود و همچنین بار میکروبی آب شیرین تولید شده نیز تعیین شد.

۳- نتایج

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در سه روز متوالی و آفتابی ۵ تا ۷ خرداد ۱۴۰۳ با شرایط جوی تقریباً ثابت در شهر زاهدان با عرض جغرافیایی ۲۹/۲۸ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۶۰/۵۳ درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۷۰ متر از سطح دریا انجام شد. شکل ۳ تغییرات شدت تابش خورشیدی بر سطح افقی و سرعت باد را از ابتدا (طلوع خورشید) تا انتهای روز (غروب خورشید) در روزهای انجام آزمایش، نشان می‌دهد.

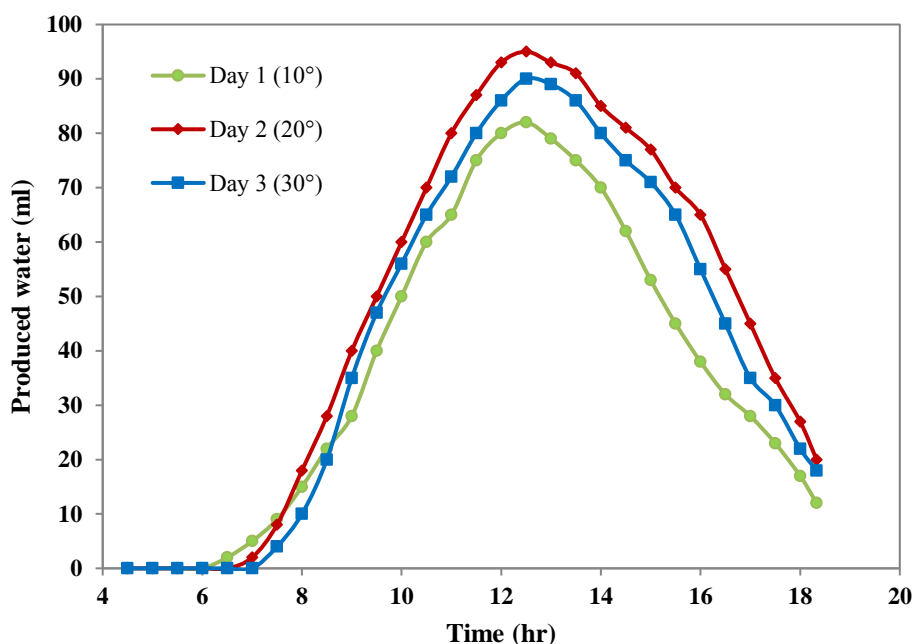


شکل ۳. تغییرات شدت تابش خورشید و سرعت باد در طول روزهای انجام آزمایش (۵ تا ۷ خرداد).

Fig. 3. Changes in solar radiation intensity and wind speed during the days of the experiment (May 25th to 27th).

۳-۱- تاثیر زاویه بر میزان تولید آب شیرین

برای بررسی تاثیر شیب دستگاه بر عملکرد آن، آب شیرین کن خورشیدی شیبدار ساخته شده در سه روز متوالی، تحت سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه نصب شد. تغییرات میزان آب شیرین تولید شده تحت این سه زاویه در طول روز در شکل ۴ نشان داده شده است. حجم کل آب شیرین تولید شده تحت زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه به ترتیب برابر با ۱۰۶۷، ۱۳۷۵ و ۱۲۳۶ میلی لیتر بود.



شکل ۴. تاثیر زاویه نصب دستگاه بر حجم آب تولید شده در طول روز.

Fig. 4. The effect of the device's installation angle on the volume of water produced during the day.

۲-۳- کیفیت آب شیرین تولید شده

در این تحقیق آب یکی از هوتک‌های منطقه بلوچستان استان سیستان و بلوچستان به عنوان آب ورودی به دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی استفاده شد. آنالیز آب هوتک ورودی به دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی و آب خروجی از آن در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۵ تصویری از هوتک‌های این منطقه به عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل ۵. نمونه‌ای از هوتک‌های استان سیستان و بلوچستان.

Fig. 5. An example of Hootaks in Sistan and Baluchestan province.

جدول ۲. آنالیز آب ورودی (آب هوتک) و آب خروجی از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار.

Table 2. Analysis of incoming water (Hootak water) and outgoing water from a inclined solar still.

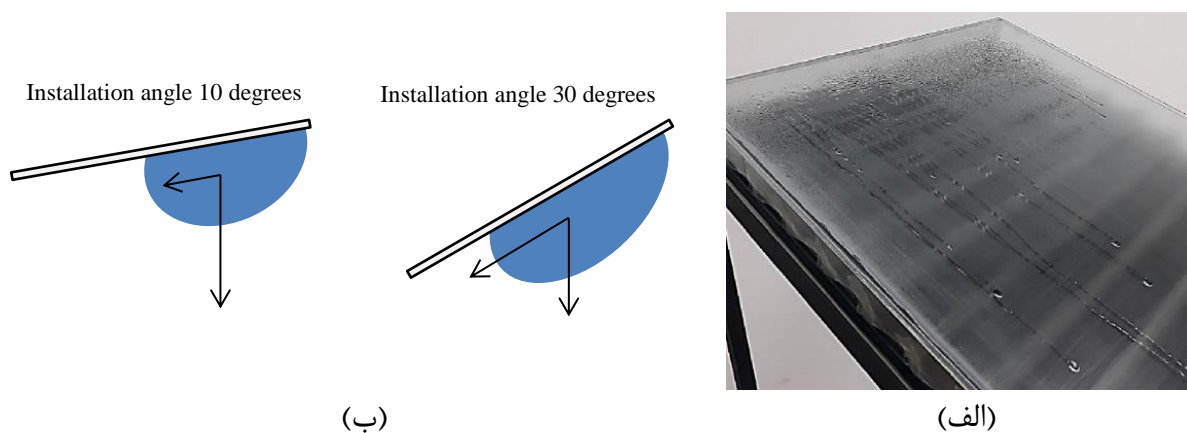
Outgoing water from solar still	Incoming water (Hootak water)	Unit of measurement	Title
7.1	8	-	pH
6	780	μs/cm	EC
4	843	ppm	TDS
0.05	380	NTU	Turbidity
0	153	ppm	SO ₄ ²⁻
0	32	ppm	NO ₃ ¹⁻
Algae, bacteria and other microorganisms			
0	444200	N/L	Diatome
0	378100	N/L	Chlorophyceae
0	38700	N/L	Cyanophyceae
0	34000	N/L	Dinophyta
0	210	N/L	Rotifera

۴- بحث

همانطور که بیان شد، هدف از انجام این مطالعه ارائه راه‌حلی پایدار، کم‌هزینه و قابل اجرا برای تأمین آب شرب سالم در مناطق روستایی و دور افتاده جنوب استان سیستان و بلوچستان از آب هوتک به عنوان یکی از محدود منابع آبی در دسترس در اینچنین مناطقی می‌باشد. عدم دسترسی به منابع پایدار انرژی، نبود نیروی فنی و متخصص بومی و نیاز به تعمیر و نگهداری و راهبری تخصصی روش‌های متداول تصفیه آب، از جمله اسمز معکوس، سبب شده است تا اغلب پروژه‌های متمرکز اجرا شده برای تأمین آب شرب سالم و بهداشتی در این مناطق با شکست روبرو شود. در حال حاضر تنها روش تأمین آب شرب سالم و بهداشتی در برخی از مناطق جنوبی استان سیستان و بلوچستان، آبرسانی به روش سقایی است. گستردگی بیش از حد استان، پراکندگی جمعیت و نبود جاده‌های مواصلاتی مناسب، سبب تحمیل هزینه‌های بسیار زیاد برای فراهم نمودن آب شرب در این مناطق شده و در نتیجه آبرسانی در فواصل زمانی طولانی انجام می‌شود. به همین دلیل مردم بومی این مناطق در برخی موارد به ناچار مجبور به استفاده از آب ناسالم موجود در هوتک‌ها هستند. آب شیرین‌کنهای خورشیدی برای تولید آب شیرین تنها نیاز به انرژی تابشی خورشید دارند. این تجهیزات برای

تصفیه آب و تولید آب شیرین نیازمند هیچگونه دستگاه مکانیکی یا فیلتری نبوده و بنابراین علاوه بر عدم نیاز به تعویض قطعات مصرفی دوره‌ای، نیازمند تعمیر و نگهداری تخصصی هم نخواهند بود. این خصوصیات سبب شده است تا روش نمک زدایی خورشیدی به عنوان روشی پایدار برای تامین آب شرب در مناطق کم جمعیت روستایی دور افتاده شناخته شود. نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که روش تقطیر خورشیدی، علاوه بر نمک زدایی قادر به از بین بردن بار میکروبی موجود در آب ورودی به دستگاه نیز می‌باشد. به نظر می‌رسد دمای بالای دستگاه به دلیل پدیده گلخانه‌ای که بعضاً به بیش از ۶۵ درجه سانتی‌گراد هم می‌رسد از جمله عوامل از بین برنده بار میکروبی می‌باشد. علاوه بر این، تابش مستقیم پرتوهای ماوراء بنفش خورشید، که بخش قابل توجهی از تابش خورشیدی بخصوص در عرض‌های جغرافیایی پایین را تشکیل می‌دهد، به عنوان یک عامل گندزدا بر آب موجود درون دستگاه را می‌توان به عنوان دیگر دلیل نبود بار میکروبی در آب شیرین تولید شده با استفاده از این روش دانست.

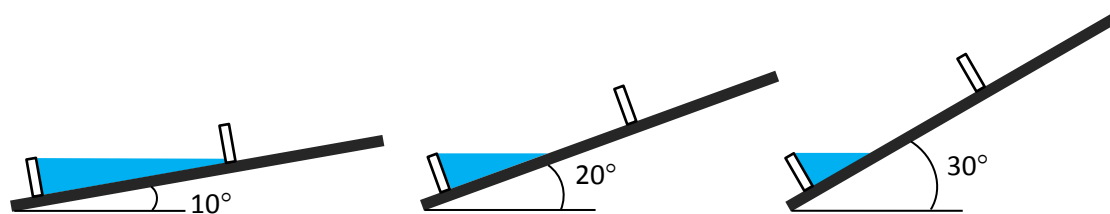
علاوه بر کارایی دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی در کاهش بار میکروبی و تولید آب شیرین سالم و بهداشتی، تاثیر زاویه نصب دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بر میزان آب شیرین تولید شده به عنوان پارامتر عملکرد دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان می‌دهد، کمترین مقدار تولید آب شیرین مربوط به نصب دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی تحت زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق است. با افزایش زاویه نصب به ۲۰ درجه میزان آب شیرین تولید شده حدود ۲۹٪ افزایش می‌یابد. با این حال، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، افزایش بیشتر زاویه نصب به ۳۰ درجه سبب کاهش میزان تولید آب شیرین شده است. برای بررسی علل نتایج به دست آمده در این بخش، در ابتدا باید به این نکته توجه داشت که زاویه تابش خورشید در روزهای آزمایش و بخصوص در ساعات نزدیک ظهر تقریباً عمودی است. به عبارت دیگر هرچه دستگاه نسبت به سطح افق با زاویه کمتری نصب شده باشد، انرژی خورشیدی بیشتری را دریافت می‌کند. این در حالی است که دستگاه با زاویه نصب ۱۰ درجه کمترین میزان تولید را دارد. در این خصوص باید گفت، هرچند در روزهای آزمایش انرژی خورشیدی بیشتری به دستگاه با زاویه نصب ۱۰ درجه وارد می‌شود، اما زاویه پوشش شیشه‌ای نیز بر میزان میعان و نرخ تولید آب شیرین تاثیرگذار است. به عبارت دیگر هر چه زاویه دستگاه و به طبع آن زاویه پوشش شیشه‌ای دستگاه، که میعان بر روی سطح داخلی آن رخ می‌دهد، بیشتر باشد، قطرات مایع ایجاد شده به سهولت بیشتری به واسطه بزرگ‌تر بودن مولفه نیروی وزن در راستای دستگاه، بر روی پوشش شیشه‌ای لغزیده و به سمت پایین دستگاه و کانال جمع‌آوری آب شیرین حرکت می‌کنند. شایان ذکر است، با حرکت قطرات به سمت پایین، قطرات بیشتری در مسیر حرکت، به هم می‌پیوندند و با حرکت آنها به سمت پایین، سطح داخلی پوشش شیشه‌ای از وجود قطرات آب زدوده می‌شود. بخار موجود در فضای داخلی دستگاه در این کانال‌های عاری از قطرات با نرخ بیشتری به مایع تبدیل می‌شود. این موضوع در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. بنابراین هرچه شیب دستگاه بیشتر باشد، نرخ میعان و تولید آب شیرین نیز افزایش خواهد یافت. در نقطه مقابل در شیب‌های کم دستگاه (۱۰ درجه) به واسطه کوچکی نیروی وزن قطرات در راستای دستگاه، حرکت قطرات دشوارتر شروع می‌شود و امکان سقوط قطرات آب مایع به دستگاه بسیار بیشتر است. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است.



شکل ۶. حرکت قطرات مایع بر روی پوشش شیشه‌ای دستگاه به سمت پایین و ایجاد کانال‌های نسبتاً خشک به عنوان مکان‌هایی با سهولت میعان بیشتر (الف)، نیروهای اعمال شده بر قطرات تشکیل شده بر سطح داخلی پوشش شیشه‌ای در دو زاویه متفاوت ۱۰ و ۳۰ درجه (ب).

Fig. 6. Liquid droplets move downward on the glass cover of the device, creating relatively dry channels as places where condensation is more likely to occur (a), forces applied to droplets formed on the inner surface of the glass cover at two different angles of 10 and 30 degrees (b).

علاوه بر تاثیر معکوس زاویه نصب دستگاه آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار بر میزان انرژی خورشیدی دریافت شده و تاثیر مستقیم آن بر نرخ میعان بخار آب موجود در دستگاه، این پارامتر بر حجم آب موجود در دستگاه نیز تاثیر گذار است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، حجم آب اولیه (آب هوتک) موجود در دستگاه در زوایای کم بیشتر و با افزایش زاویه نصب، حجم آب اولیه درون دستگاه کمتر خواهد بود. حجم آب هوتک درون دستگاه در زوایای نصب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه به ترتیب و به طور تقریبی برابر با ۵۱۰۰، ۲۴۷۰ و ۱۵۶۰ میلی لیتر است.



شکل ۷. تاثیر زاویه نصب آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار بر حجم آب اولیه (آب هوتک) موجود در دستگاه.

Fig. 7. The effect of the installation angle of a inclined solar still on the initial volume of water (Hootak water) available in the device.

نتیجه مطالعات گذشته نشان می‌دهد که افزایش حجم آب هوتک درون دستگاه، سبب کاهش میزان تولید آب شیرین خواهد شد. همچنین میزان تولید آب شیرین در روش تقطیر خورشیدی وابسته به دو فرآیند تبخیر آب هوتک و میعان بخار آب است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که زاویه نصب به طور مستقیم از طریق افزایش نرخ میعان و کاهش حجم آب هوتک درون دستگاه، بر افزایش میزان تولید آب شیرین تاثیر گذار است. در مقابل زاویه نصب به طور معکوس از طریق کاهش انرژی خورشیدی دریافت شده بر میزان تولید آب شیرین تاثیر گذار است. این تاثیر دوگانه افزایشی و کاهش‌ی سبب روند مشاهده شده در شکل ۴ شده است.

در زاویه نصب ۱۰ درجه، هرچند انرژی ورودی بیشترین مقدار را دارد، اما وجود حجم آب بالا درون دستگاه سبب می‌شود بخش قابل توجهی از انرژی ورودی صرف افزایش دمای آب شده و نرخ تبخیر کاهش یابد. همچنین حرکت دشوارتر قطرات مایع ایجاد شده و سقوط برخی از قطرات آب شیرین قبل از رسیدن به کانال جمع آوری آب شیرین سبب می‌شود که دستگاه در این حالت کمترین میزان تولید را داشته باشد. با افزایش زاویه نصب از ۱۰ درجه به ۲۰ درجه، هرچند از میزان انرژی دریافت شده کاسته می‌شود، اما سهولت حرکت قطرات و کاهش حجم آب درون دستگاه در مقایسه به زاویه نصب ۱۰ درجه سبب افزایش میزان تولید شده است. در نهایت، افزایش بیشتر زاویه نصب از ۲۰ درجه به ۳۰ درجه، هرچند سبب سهولت بیشتر حرکت قطرات ایجاد شده و کاهش حجم آب هوتک درون دستگاه است، اما کاهش قابل توجه انرژی خورشیدی ورودی سبب کاهش نرخ تبخیر و در نهایت کاهش میزان آب تولید شده در مقایسه با زاویه نصب ۲۰ درجه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

شیرین‌سازی خورشیدی روشی پایدار و مقرون به صرفه برای تصفیه آب در مناطق دور افتاده روستایی است. در تحقیق حاضر، کارایی این روش برای تصفیه آب هوتک به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آب در دسترس در برخی از روستاهای نواحی جنوبی استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آنالیز آب هوتک‌ها، بخصوص آنالیزهای میکروبی، نشان می‌دهد که کیفیت این منابع آبی به هیچ عنوان برای آشامیدن مناسب نیست. با این حال استفاده از تقطیر خورشیدی به دلیل افزایش دمای آب موجود درون دستگاه و همچنین تابش مستقیم ماوراء بنفش به عنوان بخش مهمی از تابش خورشیدی بر دستگاه، سبب از بین بردن بار میکروبی در آب شیرین تولید شده خواهد شد. در این تحقیق، از دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار استفاده شد که در مقایسه با نوع حوضچه‌ای دارای میزان تولید بیشتری است. همچنین تاثیر زاویه نصب دستگاه بر میزان آب شیرین بررسی شد. این زاویه به طور مستقیم با کاهش میزان آب تصفیه نشده درون دستگاه و افزایش میزان میعان بخار آب، سبب افزایش تولید و به طور معکوس با کاهش انرژی خورشیدی دریافت شده سبب کاهش تولید می‌شود. نتایج به دست آمده نشان داد که از میان زوایای نصب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، بیشترین میزان تولید آب شیرین در زاویه ۲۰ درجه و به میزان ۱۳۷۵ میلی لیتر بوده است. بنابراین از آنجا که آنالیزهای انجام شده نشان می‌دهد کیفیت آب شیرین تولید شده مناسب بوده و عاری از بار میکروبی است، از آن می‌توان برای شرب استفاده نمود. همچنین از آنجا که آب شیرین‌کن خورشیدی نیازمند پمپ، فیلتر و سایر قطعات مکانیکی نیست، به تعمیر و نگهداری تخصصی نیاز نداشته و

برای عملکرد تنها نیاز به انرژی خورشیدی دارد، بنابراین روشی پایدار و مقرون به صرفه برای تصفیه آب هوتک در مناطق جنوبی استان سیستان و بلوچستان است.

مراجع

- [1] Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 158, 106936.
- [2] Samimi, M., Nouri, J. (2025). Optimized removal of trivalent arsenic from aquatic environments using *Prosopis juliflora* seed biomass. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(2), 391-402.
- [3] Rakib, M., Sasaki, J., Matsuda, H., Fukunaga, M. (2019). Severe salinity contamination in drinking water and associated human health hazards increase migration risk in the southwestern coastal part of Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 240, 238-248.
- [4] Saligheh, M., Barimani, F., (2007). Effects of Climatic Systems of Seasonal in Balouchestan's Agriculture, *Geography and Development*, 5(9), 26-38, In Persian.
- [5] Esmailnejad, M., (2022). Assessing the Environmental Hazards of the Coasts of the Oman Sea: An Assessment Based on a Participatory Approach, *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 3(3), 1-17, In Persian.
- [6] Meera, V., Ahammed, M.M. (2006). Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 55(4), 257-268.
- [7] Almdny, A.H., AboZkar, A.A., Hakim, S. (2009) Assessment the quality and quantity of harvested rainfall from different catchments systems study case: North West of Libya. Dalam Thirteenth International Water Technology Conference.
- [8] Al-Obaidi, M., Kara-Zaitri, C., Mujtaba, I.M. (2020). Wastewater treatment by reverse osmosis process. ed., CRC Press.
- [9] Zheng, T., Wang, J., Wang, Q., Meng, H., Wang, L. (2017). Research trends in electrochemical technology for water and wastewater treatment. *Applied Water Science*, 7,13-30.
- [10] Davoudi Darzi, S., Hashmi Nasr, F., Sadeghi, F., Khalili-Garakani, A. (2022). Application of Membrane Processes in Supply and Development of Sustainable Water and Energy in Country. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(121), 33-54, In Persian.
- [11] Ahmadi, A., Sarrafzadeh, M., Razavi, S., Abbasjoobi, M. (2022). Investigation of Techno-Economical Replacement of Solar Distillation Systems with Household Water Purifiers. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(119), 7-21, In Persian.
- [12] Moghadam, H., Samimi, M. (2022). Effect of condenser geometrical feature on evacuated tube collector basin solar still performance: Productivity optimization using a Box-Behnken design model. *Desalination*, 542, 116092.
- [13] Ghazi, Z.M., Rizvi, S.W.F., Shahid, W.M., Abdulhameed, A.M., Saleem, H., Zaidi, S.J. (2022). An overview of water desalination systems integrated with renewable energy sources. *Desalination*, 542, 116063.
- [14] Samimi, M., Moghadam, H. (2024). Modified evacuated tube collector basin solar still for optimal desalination of reverse osmosis concentrate. *Energy*, 289, 129983.
- [15] Almomani, F., Abdelsalam, E., Kafiah, F., Alshloul, A., Azzam, A., Al-Hyari, L., Qandil, H. (2024). Enhancing the electricity and desalinated water production from solar chimney power plants through integration with nuclear power plants: A case study in Jordan. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 316-324.

- [16] Gajbhiye, T.S., Waghmare, S.N., Sirsat, P.M., Borkar, P., Awatade, S.M. (2024). Role of nanomaterials on solar desalination systems: a review. *Materials Today: Proceedings*, 100, 37-44.
- [17] Guo, H., Yan, P., Sun, X., Song, J., Zhu, F., Guan, X., Xu, X. (2024). Ion-engineered solar desalination: enhancing salt resistance and activated water yield. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149918.
- [18] Samimi, M., Moghadam, H. (2024). Investigation of structural parameters for inclined weir-type solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 113969.
- [19] Amiri, H. (2022). Design, fabrication, and experimental analysis of improved stepped solar still. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 52(3), 237-246, In Persian.
- [20] Pakizeh, M., Javi-Moghadam, S. Namvar-Mahboub, M. (2013). Design and construction of a solar evaporator with light concentrating mirrors. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 11(65), 87-97, In Persian.
- [21] Abdallah, S., Abu-Khader, M.M., Badran, O. (2009). Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills. *Desalination*, 242(1-3), 128-137.
- [22] Tabrizi, F.F., Dashtban, M., Moghaddam, H., Razzaghi, K. (2010). Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still. *Desalination*, 260(1-3), 239-247.
- [23] Kabeel, A., Sathyamurthy, R., Mageshbabu, D., Madhu, B., Anand, P., Balakrishnan, P. (2020). Effect of mass flow rate on fresh water improvement from inclined PV panel basin solar still. *Materials Today: Proceedings*, 32, 374-378.
- [24] Sathyamurthy, R., Harris Samuel, D.G., Nagarajan, P.K. (2016). Theoretical analysis of inclined solar still with baffle plates for improving the fresh water yield. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 93-107.
- [25] Saleh, B., Essa, F.A., Omara, Z.M., Ahmed, M.H., El-Sebaey, M.S., Stephen, M.T., Shanmugan, S. (2023). Using direct solar energy conversion in distillation via evacuated solar tube with and without nanomaterials. *Processes*, 11(6), 1734 .
- [26] Khare, N., Rai, A., Sachan, V. (2015). Experimental study on a stepped basin solar still. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 6(7), 24-29.
- [27] Sharshir, S.W., Eltawil, M.A., Algazzar, A.M., Sathyamurthy, R., Kandeal, A. (2020). Performance enhancement of stepped double slope solar still by using nanoparticles and linen wicks: energy, exergy and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115278.
- [28] Ahmed, M.M., Alshammari, F., Alqsair, U.F., Alhadri, M., Abdullah, A., Elashmawy, M. (2022). Experimental study on the effect of the black wick on tubular solar still performance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102333.

Design of an inclined weir-type solar still for purifying seasonal water reservoirs (Hootak) to provide healthy drinking water

Hamid Moghadam^{1*}, Mohsen Samimi²

1- Department of Chemical engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

Abstract

Access to safe and clean water remains a major global challenge, with a significant portion of the world's population lacking sufficient sources of safe and sanitary water. This study aims to investigate the use of solar desalination as a sustainable and cost-effective method for treating available unsafe water in remote and sparsely populated area for providing safe drinking water. However, due to the lack of sustainable energy sources and the remoteness of such areas, these highly polluted and unhealthy water sources are unfortunately used for drinking purposes without any purification process. In this study, an inclined basin-type solar desalination system with three installation angles (10°, 20°, and 30°) was employed to purify unhealthy water. Furthermore, the efficiency of solar desalination in reducing or eliminating microbial contamination, a largely underexplored aspect, was specifically examined. The results of the analyses showed that the produced freshwater was completely free of microbial contamination and therefore safe for drinking. The highest yield was observed at a 20° angle, with a production rate of 2750 mL/m²/day.

Keywords: *Inclined Solar Still, installation angle, microbial load, Hootak*

* - Corresponding Author Email Address: h.moghadam@eng.usb.ac.ir