



بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل به‌عنوان ماده نوری-گرمایی

محمدحسین شربتیان^۱، سامان رشیدی^{۲*} و مجتبی میرحسینی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده انرژی، پردیس علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، ایران

^۲ استادیار، دانشکده انرژی، پردیس علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده فناوری‌های پیشرفته، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

چکیده

در این مقاله، به بررسی میزان تولید آب شیرین در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل در فصل پاییز و بهار پرداخته می‌شود. در این دستگاه استفاده از شیر یک‌طرفه قابلیت به این دستگاه داده است که می‌تواند آب دریاچه یا استخر را به صورت کنترل شده به درون تشتک آن وارد کند. با قرار دادن دو نوع ذخیره ساز گرمایی در بستر تشتک، راندمان دستگاه و میزان تولید آب شیرین نسبت به دستگاه ساده افزایش پیدا می‌کنند. تمامی آزمایش‌ها در سمنان در کشور ایران انجام شد. دما، بهره وری و راندمان اکسرژی این آب شیرین‌کن بدون استفاده از سنگ متخلخل و اصلاح شده با سنگ متخلخل با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، تجزیه و تحلیل هزینه اقتصادی دستگاه انجام شد. نتایج نشان داد که میزان تولید روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ متخلخل در فصل‌های پاییز و بهار به ترتیب ۱۱۳ و ۲۱۹ سانتی‌متر مکعب و میزان تولید روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور ساده در فصل‌های پاییز و بهار به ترتیب ۸۲ و ۱۸۹ سانتی‌متر مکعب است. هزینه‌های تولید هر لیتر آب شیرین برای دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل و بدون استفاده از آن برای فصل پاییز به ترتیب ۰/۰۸۴۷ و ۰/۱۰۴ دلار به ازای هر متر مربع از مساحت آب‌شیرین‌کن و در فصل بهار این هزینه برای دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل ۰/۰۴۳ دلار به ازای هر متر مربع از مساحت آب‌شیرین‌کن است.

کلمات کلیدی: آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور؛ ماده نوری-گرمایی؛ سنگ متخلخل؛ تجزیه و تحلیل اقتصادی.

Study on performance of floating solar still using pumice stone as photothermal material

Mohammad Hossein Sharbatian¹, Saman Rashidi^{2,*}, Mojtaba Mirhosseini³

¹ MSc student, Department of Energy, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

² Assist. Prof., Department of Energy, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

³ Assist. Prof., School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this article, the rate of freshwater production in the floating solar still using pumice stone is investigated. In this device, the use of a one-way valve has given this device the ability to direct lake or pool water into its basin in a controlled manner. By placing a type of photothermal material (pumice stone) in the basin of the solar still, the efficiency of the device and the amount of fresh water production increase compared to the simple device. All experiments were performed in Semnan in Iran. The temperature, productivity, and exergy efficiency of this water softener without the use of limestone and modified with limestone were compared. Finally, a cost analysis was performed to check the economic status of the device. The results showed that the daily production rate of the floating solar still modified with pumice stone in autumn and spring was 113 and 219 cm³, respectively, and for the conventional floating solar still was 82 and 189 cm³, respectively. The costs of producing each liter of fresh water for a floating solar still modified with pumice stone and the conventional floating solar still for the autumn were 0.0847 and 0.104 \$/m², respectively, and in the spring, this cost for the floating solar still modified with pumice stone is 0.043 \$/m².

Keywords: Floating solar still; Thermal storage; Pumice stone; Performance; Cost analysis.

۱- مقدمه

۷۱ درصد از سطح کره زمین را آب پوشانده است. این در حالی است که بحران آب به یکی از مهمترین مشکلات در سراسر جهان تبدیل شده است که این بدلیل شور بودن منابع آبی در دریاها و کمبود منابع آب شیرین است. از کل منابع آب موجود، تنها سه درصد آن شیرین است. متناسبه مقدار زیادی از همین منابع آب شیرین از دسترس بشر خارج است و به صورت یخ در قطبها وجود دارد و یا در بستر زیر زمین ذخیره شده است [۱]. رشد جمعیت، تغییرات آب و هوایی جهانی و شهرنشینی از دلایل اصلی کمبود آب شرب هستند. علاوه بر این، تنها ۰/۱۴ درصد از آب موجود در زمین می‌تواند برای مصارف مصرفی انسان استفاده شود. این موضوع باعث شده تا اهمیت تولید آب شیرین با روش‌های نمک‌زدایی و همچنین فناوری‌های مشابه آشکار شود [۲]. بشر از دیرباز به فکر شیرین‌سازی آب با استفاده از روش‌های گوناگون بوده و آب مصرفی خود را از این طریق تولید می‌کرده است. سامانه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از انرژی رایگان خورشید، دارای طراحی ساده، هزینه کم، اشغال فضای نسبتاً کم، بدون تولید آلودگی-های زیستی و همچنین صدا در زمان تولید آب شیرین هستند. روش‌های شیرین‌سازی آب الهام گرفته از مکانیزم باران است. دریاها و اقیانوس‌ها تابش خورشید را دریافت نموده و آب آن‌ها بخار می‌گردد. بخار آب بالای سطح جو به علت سرد بودن و وجود باد چگالیده شده و به صورت قطرات باران به سمت زمین سرازیر شده و جریانی از آب شیرین را به وجود می‌آورد [۳]. روشی که در این مقاله برای بهره‌وری بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد، آب شیرین‌کن خورشیدی شناور با سنگ متخلخل به عنوان محیط ذخیره‌ساز حرارت است. در این جا یک مروری بر پژوهش‌های پیشین در این زمینه انجام می‌شود. مدنی و زکی [۴] از ذرات دوده جهت جذب بیشتر تابش خورشید در آب-شیرین‌کن خورشیدی استفاده نمودند. آب درون حوضچه دستگاه با لایه دو سانتی‌متری از دوده پوشانده شده بود. دلیل استفاده از دوده حذف عایق کاری گرمایی از آب شیرین-کن و کاهش هزینه‌های دستگاه بود. دوده مورد نیاز به صورت رایگان از احتراق سوخت‌های فسیلی از نیروگاه‌ها تامین می‌شد. نتایج نشان داد که هزینه‌های عایق گرمایی با استفاده از دوده به‌طور قابل توجهی کاهش یافت، ولی این به‌همراه کاهش ۱۳ تا ۱۷ درصدی بازده بود. کابیل [۲] از الیاف پارچه‌ای در سطح

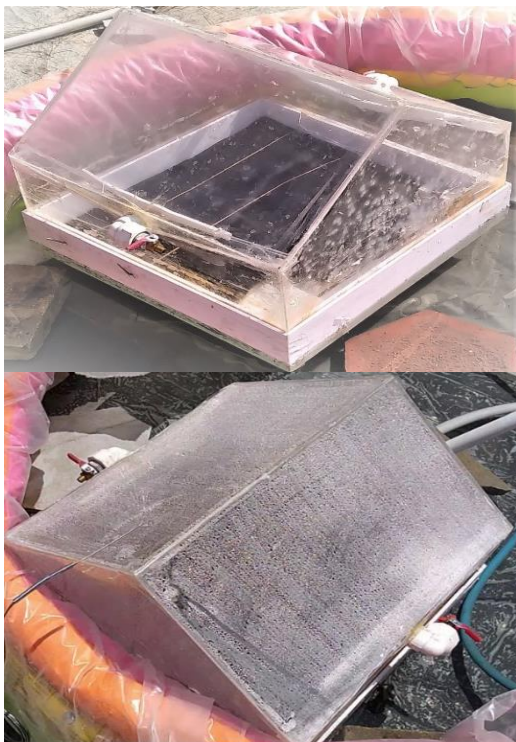
مقعر شکل مخزن ورودی استفاده نمود که این باعث افزایش مقدار تبخیر شد. در این طرح، از سطح هرمی در قسمت بالایی به‌عنوان سامانه چگالنده دستگاه استفاده شد و آب تولیدی به‌طور زیادی افزایش پیدا کرد. قرار دادن الیاف پارچه‌ای نیز باعث بهبود میزان جذب تابش خورشید و مقدار تولید بخار شد که همه این‌ها به‌دلیل اثرات موئینگی الیاف پارچه‌ای بود. نافی و همکارانش [۵] از قطعات لاستیک و شن درون آب شیرین‌کن خورشیدی برای افزایش تولید آب استفاده نمودند. نتایج نشان داد که میزان تولید دستگاه با استفاده از لاستیک ضخیم‌تر و ذرات ماسه درشت‌تر بهبود می‌یابد. ابوحیجله و ربابا [۶] از اسفنج درون تشتک آب شور یک آب شیرین‌کن خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که میزان تولید آب شیرین توسط دستگاه با استفاده از اسفنج بهبود ۱۸ تا ۲۷۳ درصدی دارد. این بهبود به عوامل زیادی مانند اندازه اسفنج، درصد حجم اسفنج، عمق آب، شوری آب و غیره بستگی دارد. عبدالله و همکارانش [۷] از مواد جاذب گوناگون، شامل اسفنج‌های فلزی شفاف با پوشش و بدون پوشش و سنگ‌های آتشفشانی سیاه و سفید، برای بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تولید آب شیرین به‌ترتیب ۲۸، ۴۳ و ۶۰ درصد با استفاده از اسفنج‌های فلزی با پوشش و بدون پوشش و سنگ‌های سیاه بهبود می‌یابد. سیرواستاواو آگروال [۸] عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی همراه جاذب‌های گرمایی متخلخل با اینرسی گرمایی کم به‌صورت شناور درون مخزن آب شور را بررسی کردند. پارچه کفنی سیاه به-عنوان جاذب متخلخل استفاده شد. با عنایت به اینرسی گرمایی کم جاذب متخلخل، دمای کاری آب شیرین‌کن افزایش پیدا کرد که این باعث بهبود عملکرد دستگاه شد.

سیرواستاواو آگروال [۹] پرّه‌های متخلخل از جنس پنبه سیاه رنگ را درون تشتک آب شیرین‌کن خورشیدی قرار دادند. بخشی از پرّه‌ها تا بالای سطح آب تشتک بالا آمده بودند. مالایاپان و الوملی [۱۰] مواد متخلخل شامل تکه‌های سنگریزه، تکه‌های گرانیت سیاه و گرانیت سیاه به صورت تخته سنگ را داخل آب شیرین‌کن خورشیدی قرار دادند. سلامی و همکارانش [۱۱]، عملکرد دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی را با استفاده از لایه‌های اسفنج به‌عنوان ماده متخلخل ارزان و فراوان بهبود بخشیدند. نتایج نشان داد که با این کار عملکرد

بودند. بهره‌وری دستگاه با ماده تغییر فاز دهنده با تولید ۴۴۶۰ میلی‌لیتر در متر مربع در روز ۲۶ درصد افزایش یافت. نعیم و عبدالکاو [۱۶] یک ماده تغییر فاز دهنده را در یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای بهبود خروجی آن مستقر کردند. ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده امولسیون روغن پارافین، آب و موم پارافین با افزودن تراش‌های آلومینیومی بود که به‌طور قابل توجهی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی را افزایش داد. بهره‌وری در طول روز در یک آزمایش ۶ ساعته و راندمان به ترتیب ۴/۵۳۶ لیتر در متر مربع و ۲۶/۲ درصد بود. پانچال [۱۷] پتانسیل استفاده از مواد ذخیره ساز انرژی گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی را بررسی کرد. مورگاول و همکارانش [۱۸]، پتانسیل استفاده از مواد ذخیره ساز انرژی گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شیب‌دار دوطرفه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سنگ کوارتزیت در مقایسه با سایر مواد بهره‌وری بالاتری ارائه می‌دهد. کبیل و همکارانش [۱۹] پوشیده شده با پارچه جوت ماسه را به عنوان ماده نوری-گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده کردند. نتایج نشان داد که به دلیل اثر موئینگی، آب در ماده جوت جذب می‌شود که این باعث افزایش تبخیر می‌شود؛ همچنین عملکرد دستگاه با استفاده از ذخیره‌سازی گرمای محسوس ۵۶/۱۴ درصد نسبت به دستگاه خورشیدی معمولی بهبود یافت. عبدالرحیم و لاشین [۲۰] از لایه‌ای از توپ‌های شیشه‌ای در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای افزایش کارایی استفاده کردند. قطر توپ‌های شیشه‌ای ۱۳/۵ میلی‌متر بود. راندمان دستگاه با استفاده از توپ‌های شیشه‌ای به عنوان ماده نوری-گرمایی در محدوده ۵ تا ۷/۵ درصد برای ماه‌های می تا جولای افزایش یافت. السبایی و همکارانش [۲۱] یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره گرما ماسه را به صورت ریاضی مدل‌سازی کردند. تجزیه و تحلیل عددی با توجه به شرایط اقلیمی جده، عربستان سعودی انجام شد. عملکرد روزانه دستگاه با ۱۰ کیلوگرم شن ۲۳/۸ درصد بیشتر بود. نافع و همکارانش [۲۲] از شن و لاستیک با اندازه‌های مختلف به عنوان مواد نوری-گرمایی در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک شیب استفاده کردند. سه قطعه از مواد لاستیکی سیاه رنگ با ضخامت‌های مختلف استفاده شد. مشاهده شد که ماده لاستیکی سیاه رنگ با ضخامت ۱/۰ سانتی‌متر با حجم آب نمک ۶۰ لیتر در متر مربع بهره‌وری را

آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبود یافته و زمان تقطیر طولانی‌تر می‌شود. عدم حضور تابش خورشیدی در کل شبانه روز یکی از ضعف‌های مهم در استفاده از سامانه‌های خورشیدی می‌باشد. به همین دلیل، ادامه‌ی کار سامانه‌های خورشیدی در زمان‌های عدم حضور خورشید متوقف شده و همین امر باعث کاهش راندمان آن‌ها می‌گردد. به‌منظور برطرف کردن این مشکل لازم است تا گرمای مورد نیاز این وسایل را در مواقع عدم حضور تابش خورشید (هنگام غروب و یا شب) تامین نمود. انرژی خورشیدی به‌طور مستقیم قابل ذخیره نمی‌باشد و باید اول آن را به شکل‌های دیگر انرژی مانند الکتریکی، شیمیایی یا گرمایی ذخیره کرد. به کار بردن روش‌های ذخیره‌ی انرژی به شکل گرما یک راهکار مناسب است؛ در نتیجه با ترکیب نمودن مناسب روش‌های ذخیره حرارت با سامانه‌های خورشیدی می‌توان بازده این وسایل را افزایش داد. ذخیره کردن انرژی گرمایی به‌دلیل ایجاد روش‌های آسان ذخیره‌سازی و کاربرد-های فراوان، بسیار مورد اقبال قرار گرفته است. در سال‌های اخیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یکی از فن‌آوری‌های ذخیره بالای انرژی و توانایی ذخیره انرژی طی یک فرایند تغییر فاز در دمای تقریباً ثابت (ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان) بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. تقریباً ۱۱ درصد از تابش خورشیدی برخوردی به دلیل انعکاس برگشتی هدر می‌رود. این تابش‌ها می‌توانند توسط مواد ذخیره انرژی جذب شوند تا بهره‌وری را افزایش دهند. علاوه بر این، انرژی ذخیره شده توسط این مواد در ساعات شب آزاد می‌شود [۱۳]؛ بنابراین، بهره‌وری یک دستگاه خورشیدی با استفاده از مواد ذخیره‌کننده انرژی بهبود می‌یابد. مواد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به‌عنوان ذخیره‌سازی گرمای نهان، ذخیره‌سازی گرمای محسوس و ذخیره‌سازی گرمایی شیمیایی طبقه بندی می‌شوند [۱۴]. ذخیره گرمای نهان می‌تواند یک روش مفید برای ذخیره انرژی گرمایی باشد که در آن از مواد تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود. این مواد قادر به ذوب و جامد شدن در هنگام شارژ و دشارژ هستند. آرونکومار و همکارانش [۱۵] تأثیر ماده تغییر فاز دهنده را بر بازده سیستم تقطیر خورشیدی تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها از موم پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در شش توپ مسی به قطر ۲۸ میلی‌متر استفاده کردند. توپ‌های مسی سیاه رنگ شده و با چوب پنبه لاستیکی مهر و موم شده

اتلاف گرمایی به بهترین حالت ممکن گرم و عمل تبخیر درون این دستگاه صورت پذیرد. این آزمایش در دو بازه زمانی فصول پاییز و بهار صورت گرفته است. در فصل بهار مقایسه‌ای بین نتایج سنگ متخلخل (سنگ پا) و سنگ ریزه انجام شده است. در این آزمایش از تعداد ۲۷ سنگ متخلخل مشکی به وزن ۱/۴ کیلوگرم و سنگ ریزه به وزن ۱/۴ کیلوگرم در بستر حوضچه استفاده شده است. برای ذخیره سازی گرما و افزایش جذب تابش خورشید و سطح تبخیر درون حوضچه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دماهای مختلف در طول آزمایش از ترموکوپل‌های مدل نوع K و برای ثبت دما از دیتالاگر مدل GM1312 استفاده شده است؛ همچنین برای تعیین میزان شدت تابش خورشید از پیرانومتر مدل TES1333 استفاده شده است. نمای کلی از دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.



۲۰ درصد افزایش می‌دهد. شن سیاه نیز در سه اندازه مختلف (۷-۱۲ میلی‌متر، ۱۲-۲۰ میلی‌متر و ۲۰-۳۰ میلی‌متر) با جرم مساوی ۱۰ کیلوگرم استفاده شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از شن با اندازه ۲۰-۳۰ میلی‌متر با ۲۰ لیتر در متر مربع حجم آب نمک، عملکرد دستگاه را ۱۹٪ افزایش می‌دهد. شانموگام و همکارانش [۲۳]، یک دستگاه آبشیرین کن خورشیدی را با مواد مختلف مانند سنگ، سنگریزه و ضایعات آهن آزمایش کردند. مشاهده شد که سنگ‌های کلسیمی به دلیل گرمایی ویژه بالا (910 J/kg-K) به عنوان بهترین ماده نوری-گرمایی در آب شیرین کن خورشیدی عمل می‌کنند. خروجی دستگاه با سنگ‌های کلسیمی ۳۶ درصد افزایش یافت. در این مقاله، میزان تولید آب شیرین در یک دستگاه آب-شیرین کن خورشیدی شناور به صورت تجربی بررسی می‌شود؛ همچنین به منظور عملکرد بهتر دستگاه از سنگ متخلخل به عنوان ماده نوری-گرمایی استفاده می‌شود. مروری بر منابع گذشته نشان می‌دهد که تا کنون مطالعه‌ای در زمینه استفاده از سنگ متخلخل به عنوان ماده نوری-گرمایی در آب شیرین کن خورشیدی شناور انجام نشده است.

۲- آزمایش

۲-۱- راه اندازی آبشیرین کن خورشیدی شناور دو

طرفه

دستگاه آبشیرین کن خورشیدی شناور با استفاده از ورق پلکسی گلاس به ضخامت ۴ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر ساخته شده است. ورق پلکسی گلاس دو طرف شیب‌دار با ضخامت ۴ میلی‌متر بر روی بدنه پلکسی گلاس با ضخامت ۳ میلی‌متر قرار می‌گیرد. زاویه و شیب قرارگیری سقف شیب‌دار با توجه به مختصات جغرافیایی منطقه مورد آزمایش ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. حوضچه با اضلاع ۰/۵ متر × ۰/۵ متر ساخته شده است. این حوضچه با ابعاد ذکر شده از جنس پلاستیک فشرده (پی‌وی‌سی) به دلیل سبک بودن و ضد آب بودن برای شناورسازی سازه استفاده شده است. ارتفاع این حوضچه ۶ سانتی‌متر است که درکف این سازه یک شیر یک طرفه سه چهارم اینچ قرار گرفته تا میزان ورود و ذخیره شدن آب از سطح دریاچه توسط شناور متصل به شیر یک طرفه کنترل گردد. با این مکانیزم می‌توان میزان آب درون حوضچه را تنظیم و ثابت کرد تا آب انرژی گرفته شده از خورشید را با کمترین

۲-۲- روش آزمایش

تمامی آزمایشات در شهر سمنان که در مختصات جغرافیایی $N 53.230$ و $E 35.330$ ایران واقع شده و در ماه پاییز در روزهای $1401/09/06$ و $1401/09/07$ و در ماه بهار در روزهای $1402/02/10$ و $1402/02/11$ و $1402/02/12$ انجام شده است. دستگاه در داخل استخر کوچک به سمت جنوب برای انجام آزمایش قرار گرفت. به منظور پی بردن به تاثیر استفاده از جاذب سنگ متخلخل در عملکرد دستگاه، آزمایش یک روز بر روی دستگاه ساده و یک روز برای دستگاه که در مخزن آب شور آن سنگ‌های متخلخل قرار داده شدند، انجام شد. در این آزمایش شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای ناحیه چگالش، دمای ناحیه تبخیر و میزان تولید آب شیرین توسط دستگاه به صورت ساعتی و طی فرایند آزمایشی اندازه‌گیری شدند.

۳- تعریف پارامتر عددی

۳-۱- ملاحظات نظری

۳-۱-۱- بازده آب شیرین کن خورشیدی

راندمان آب شیرین کن خورشیدی به عنوان نسبت انرژی مصرف شده برای تولید آب شیرین به میزان کل نرخ تابش خورشیدی به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$\text{Efficiency} = \frac{\dot{m}_{ev} L}{I(t) A_b} \quad (1)$$

در این رابطه، \dot{m}_{ev} ، L ، $I(t)$ و A_b به ترتیب نرخ تولید آب مقطر، گرمای نهان آب، تابش خورشیدی و مساحت جاذب دستگاه است.

۳-۱-۲- بررسی اکسرژی

در حالت کلی جهت محاسبه راندمان اکسرژی در دستگاه‌های آب شیرین کن خورشیدی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\eta_{EX} = \frac{\text{Exergy of output}}{\text{Exergy of input}} \quad (2)$$

اکسرژی خروجی دستگاه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Ex_{output} = \frac{\dot{m} h_{fg}}{3600} \times \left[1 - \frac{T_a}{T_w} \right] \quad (3)$$



شکل ۱- نمای کلی از آب شیرین کن خورشیدی شناور و ماده ذخیره کننده انرژی (سنگ ریزه) استفاده شده در آن

هزینه سالانه یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی، FAC، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷،۲۸]:

$$FAC = P(CRF) \quad (۶)$$

CRF و P فاکتور بازایی سرمایه و هزینه سرمایه هستند. CRF به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷،۲۸]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۷)$$

i و n به ترتیب نرخ بهره بانک‌های وام دهنده و طول عمر دستگاه است. نرخ بهره بانک‌های وام دهنده برابر با ۲۰٪ برای ایران (محل آزمایش) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. علاوه، عمر دستگاه آب شیرین کن ده سال در نظر گرفته می‌شود. ASV نیز مقدار ارزش اسقاط سالانه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۵،۲۶]:

$$ASV = (SSF)S \quad (۸)$$

S و SSF به ترتیب ارزش اسقاطی دستگاه و عامل وجوه استهلاکی دستگاه آب شیرین کن است. S به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷،۲۸]:

$$S = 0.2P \quad (۹)$$

SSF به شکل زیر تعیین می‌شود [۲۷،۲۸]:

$$SSF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (۱۰)$$

$$SSF = \frac{i}{(1+i)^n - 1}$$

هزینه نگهداری سالانه به وسیله AMC به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷،۲۸]:

$$AMC = 0.15(FAC) \quad (۱۱)$$

بر این اساس، هزینه کل سالانه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۹]:

$$AC = FAC + AMC - ASV \quad (۱۲)$$

T_w و T_a به ترتیب دماهای محیط و آب بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند. اکسرژی کل ورودی دستگاه‌های آب-شیرین کن خورشیدی غیر فعال شامل انرژی خورشیدی دریافتی (که این انرژی کل، تابش خورشیدی دریافتی در سطح مخزن آب شور دستگاه را شامل می‌شود) است. با توجه به این نکته، اکسرژی ورودی دستگاه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Ex_{input} = A_b \times I \times \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left[\frac{T_a}{T_s} \right] + \frac{1}{3} \left[\frac{T_a}{T_s} \right]^4 \right\} \quad (۴)$$

T_s دمای خورشید، T_a دمای محیط بر حسب درجه سانتی‌گراد، I تابش خورشید ($\frac{W}{m^2}$)، و A سطح دریافت کننده تابش خورشید (m^2) می‌باشند. دمای خورشید ۶۰۰۰ کلوین در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱-۳- تحلیل عدم قطعیت

در این آزمایش از عدم قطعیت نوع B استفاده شده است. برای این نوع عدم قطعیت، عدم قطعیت استاندارد توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۲۷،۲۸]:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (۵)$$

a و u به ترتیب دقت ابزار و عدم قطعیت استاندارد هستند. عدم قطعیت‌های موجود در دستگاه‌های اندازه‌گیری در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، پیرانومتر دارای دقت ۱ وات بر متر مربع است و برای سنجش میزان تابش خورشید در محدوده ۰ - ۲۰۰۰ وات بر متر مربع به کار می‌رود. دقت مقادیر دما تعیین شده توسط ترموکوپل ۰/۱ درجه سانتی‌گراد برای درجه حرارت در محدوده ۱۰۰ - ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. در نهایت، حجم آب با دقت ۰،۱ میلی‌لیتر برای حجم‌ها در محدوده ۰ - ۱۰۰ میلی‌لیتر اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۱-۴- آنالیز اقتصادی

بررسی اقتصادی واحد نمک زدایی آب توسط کومار و تیواری [۲۵] و کابیل و همکارانش [۲۶] ارائه شده است.

جدول ۱- دقت، محدوده و عدم قطعیت استاندارد اندازه‌گیری وسایل اندازه‌گیری

وسيله اندازه‌گیری	دقت	محدوده	عدم قطعیت استاندارد
PH متر	±0.1 PH	-14	±0.06 PH
تابش سنج مدل TES 1333	1 W/m ²	0-2000	±0.6 W/m ²
ترموکوپل نوع K	±0.6 °C	-1300-100 °C	±0.6 °C
سنجش حجم	±100 ml	0/1 m	±0.6 ml

جدول ۲- نتایج مربوط به بررسی هزینه برای استفاده از سنگ متخلخل درون آب‌شیرین کن خورشیدی در فصل پاییز

نوع دستگاه	n	i (interest rate)	CRF	P (capital cost \$)	S	FAC	SSF	ASV	AMC	AC	M (l/m ² .year)	CPL (\$/l/m ²)
اصلاح شده	10	0.2	0.24	52/22	10/44	12/53	0.04	0/41	1/87	13/99	164/98	0/0847
معمولی	10	0.2	0.24	46/66	9/33	11/19	0.04	0/37	1/67	12/5	119/72	0/104

جدول ۳- نتایج مربوط به بررسی هزینه برای استفاده از سنگ متخلخل و استفاده از سنگ‌ریزه درون آب‌شیرین کن خورشیدی در فصل بهار

نوع دستگاه	n	i (interest rate)	CRF	P (capital cost \$)	S	FAC	SSF	ASV	AMC	AC	M (L/m ² .year)	CPL (\$/L/m ²)
سنگ-متخلخل	10	0.2	0.24	52/22	10/44	12/53	0.04	0/41	1/87	13/99	319,74	0/043
سنگ-ریزه	10	0.2	0.24	52/22	10/44	12/53	0.04	0/41	1/87	13/99	340,18	0/041

نتایج مربوط به آنالیز اقتصادی فصل پاییز در جدول ۲ و در فصل بهار در جدول ۳ ارائه شده است. از این جدول مشاهده می‌شود که هزینه‌های هر لیتر آب شیرین تولیدی برای دستگاه آب‌شیرین کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل و بدون استفاده از آن به ترتیب برابر ۰/۰۸۴۷ و ۰/۱۰۴ است. در فصل بهار، این هزینه برای دستگاه آب‌شیرین کن خورشیدی شناور با استفاده از سنگ متخلخل و سنگ‌ریزه به ترتیب برابر ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۱ دلار است.

بنابراین آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده با تولید بیشتر هزینه‌های اضافی خود را جبران می‌کند.

در نهایت، هزینه هر لیتر تولید آب شیرین، CPL، به صورت زیر دست می‌آید [۲۷،۲۸]:

$$CPL = \frac{AC}{M} \quad (13)$$

که در آن M میانگین تولید سالانه است. در فصل بهار با توجه به دو برابر شدن میزان تولید آب، هزینه‌های هر لیتر آب شیرین تولیدی برای دستگاه آب‌شیرین کن خورشیدی شناور تقریباً نصف می‌شوند. همان‌طور که در این

جداول مشخص شده است، مجموع هزینه‌های سالانه برای آب‌شیرین کن‌های خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ متخلخل و بدون آن به ترتیب برابر ۱۳/۹۹ و ۱۲/۵۰ دلار است؛

۴- نتایج

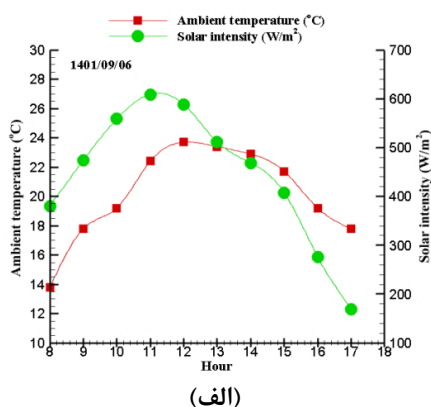
۴-۱- نتایج سنگ متخلخل (فصل پاییز)

شکل ۲ دمای ساعتی محیط و شدت تابش خورشیدی ساعتی را به ترتیب برای روزهای ۱۴۰۱/۰۹/۰۶ و ۱۴۰۱/۰۹/۰۷ نشان می‌دهد. در شکل الف شدت تابش در ساعت ۱۱ به حداکثر رسیده و بعد از این ساعت شروع به افت می‌کند و دمای محیط در ساعت ۱۲ با اختلاف بسیار جزئی با ساعت ۱۳ به حداکثر خود رسیده و سپس دما افت می‌کند. در شکل ب که روز ۱۴۰۱/۰۹/۰۷ را نشان می‌دهد، شدت تابش در ساعت ۱۱ به حداکثر رسیده و بعد از این ساعت شروع به افت می‌کند و دمای محیط در ساعت ۱۲ به حداکثر رسیده و سپس دما افت می‌کند. این فاصله زمانی بین حداکثر شدت تابش خورشیدی و حداکثر دمای محیط قابل توجه است. ظرفیت گرمایی هوای محیط و عوامل دیگری مانند چگالی هوا، رطوبت، کیفیت و غیره بر این فاصله زمانی تاثیرگذار است. اختلاف بارز بین دمای ساعتی محیط و شدت تابش خورشیدی ساعتی به دلیل داده‌های به دست آمده سرعت وزش باد است که در این دو روز تفاوت چشم‌گیری داشته است.

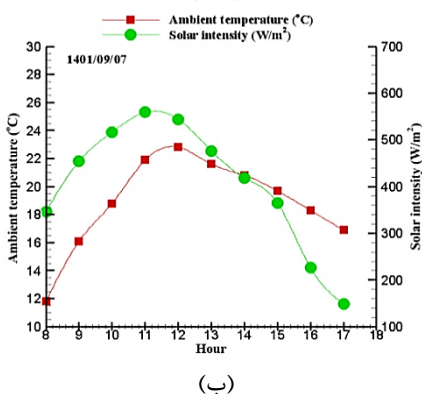
دمای‌های ساعتی سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب درون تشتک برای هر دو آب‌شیرین کن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، حداکثر دمای‌های سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب برای آب‌شیرین کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و معمولی در حدود ساعت ۱۲ به دست می‌آید. با توجه به نمودار، به دلیل کم بودن شدت تابش خورشید در ساعت اولیه، اختلاف دمایی بین سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب مشاهده نمی‌شود. با گذشت زمان و افزایش شدت تابش خورشید، دمای آب نسبت به دمای سطح شیشه‌ای شیب‌دار افزایش می‌یابد که این اختلاف دما جهت تولید آب شیرین استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که همرفت طبیعی در آب‌شیرین کن خورشیدی توسط نیروی شناوری ایجاد شده به دلیل اختلاف دما بین سطح آب و سطح شیشه‌ای شیب‌دار ایجاد می‌شود. هر چه این اختلاف دما بیشتر باشد، در نتیجه نیروی شناوری قوی‌تری شکل می‌گیرد.

افزایش نیروی شناوری به افزایش انتقال حرارت و جرم بین سطح آب و سطح شیشه‌ای شیب‌دار کمک می‌کند و این منجر به بهره‌وری و تولید آب بیشتر دستگاه می‌شود. از شکل ۳ مشاهده می‌شود که دستگاه آب‌شیرین کن خورشیدی شناور

اصلاح شده با سنگ متخلخل از ساعت ۱۴ تا ساعت ۱۷ اختلاف دمای بیشتری نسبت به آب‌شیرین کن خورشیدی معمولی ایجاد می‌کند. دلیل این امر هم جذب تابش خورشیدی بیشتر به دلیل ماهیت منخلخل سنگ متخلخل و همچنین پتانسیل آن در ذخیره سازی حرارت خورشیدی است. توجه گردد که علت اختلاف بین دماهای ساعتی محیط و شدت تابش خورشیدی ساعتی به دلیل داده‌های به دست آمده برای سرعت وزش باد است که در این دو روز تفاوت داشته است.



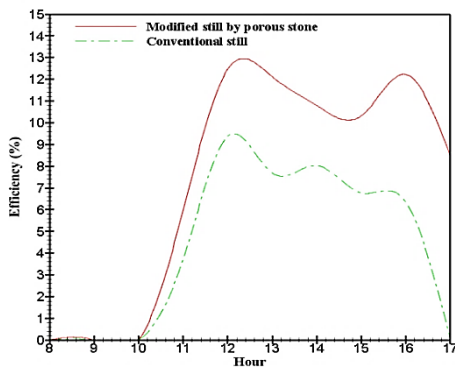
(الف)



(ب)

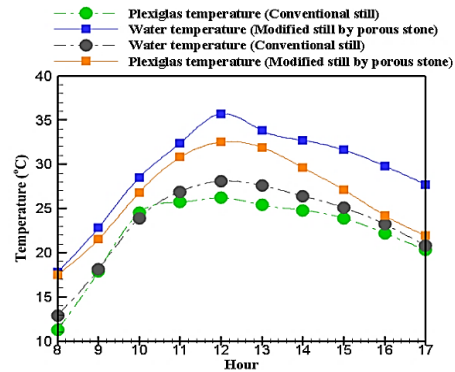
شکل ۲- دمای ساعتی محیط و شدت تابش خورشیدی ساعتی برای روزهای ۱۴۰۱/۰۹/۰۶ و ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

شکل ۵ راندمان ساعتی را برای آب شیرین کن‌های خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ متخلخل و معمولی را نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که با قرار دادن سنگ متخلخل در آب شیرین کن، راندمان افزایش می‌یابد. در آب شیرین کن معمولی بدون سنگ متخلخل، در ساعت ۱۲ راندمان آب شیرین کن خورشیدی به حداکثر رسیده و به علت افت دمای آب با توجه به کاهش شدت تابش و کاهش دمای محیط از ساعت ۱۲ تا ۱۷ افت سریع کارایی ملاحظه می‌شود؛ اما برای آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، در ساعت ۱۲ بازده آب شیرین به حداکثر خود رسیده و بعد از آن کاهش می‌یابد؛ اما در ساعت ۱۶ به دلیل گرم بودن آب با توجه به وجود سنگ متخلخل در بستر آب شور، راندمان افزایش پیدا کرده است. بعد از این ساعت، این روند افزایشی به دلیل افت تابش خورشید رخ نداده است.



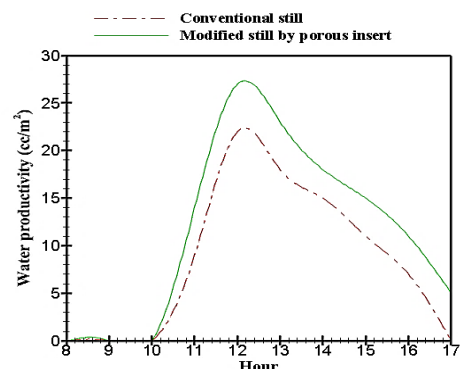
شکل ۵- راندمان ساعتی آب شیرین کن‌های خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و معمولی

شکل ۶ دمای ساعتی محیط، شدت تابش خورشید، و بهره‌وری آب شیرین کن‌های خورشیدی معمولی و اصلاح شده را برای روزهای ۱۴۰۱/۰۹/۰۶ (شکل-الف) و ۱۴۰۱/۰۹/۰۷ (شکل-ب) نشان می‌دهد. از شکل مشاهده می‌شود که حداکثر شدت تابش خورشید در ساعت ۱۱ به دست می‌آید و حداکثر دمای محیط در حدود ساعت ۱۲ رخ می‌دهد. همچنین حداکثر بهره‌وری آب شیرین کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و معمولی در ساعت ۱۲ رخ می‌دهد. به دلیل دمای بالای محیط، بهره‌وری هر دو دستگاه بعد از ساعت ۱۲ به دلیل کاهش شدت تابش خورشید کاهش می‌یابد. به طور کلی و با توجه به نمودار،



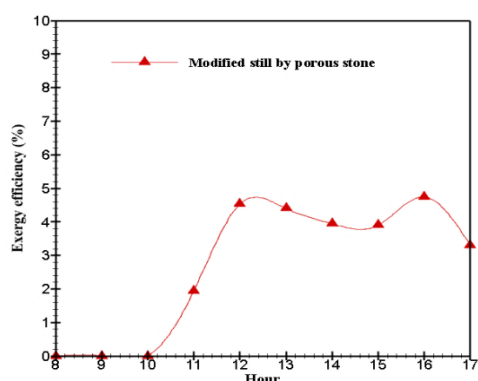
شکل ۳- نمودار دماهای ساعتی سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب درون تشتک برای آب شیرین کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و معمولی

شکل ۴ نرخ بهره‌وری ساعتی را برای آب شیرین کن خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ متخلخل و معمولی نشان می‌دهد. از شکل واضح است که بهره‌وری ساعتی با قرار دادن سنگ متخلخل در آب شیرین کن خورشیدی شناور و ایجاد اختلاف دمای بیشتر بین سطح شیشه شیب‌دار و تابش بیشتر جذب شده توسط سنگ متخلخل افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل، بیشترین بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی شناور در ساعت ۱۲ اتفاق می‌افتد و بعد از این ساعت بهره‌وری به علت کاهش شدت تابش خورشید کاهش می‌یابد؛ همچنین اختلاف بین بهره‌وری‌های ساعتی دو آب شیرین کن در ساعات انتهایی آزمایش بیشتر می‌شود. دلیل این امر هم پتانسیل سنگ متخلخل در ذخیره‌سازی گرمای خورشیدی و آزادسازی آن در ساعاتی است که شدت تابش خورشید کم است.



شکل ۴- آب تولیدی ساعتی برای آب شیرین کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و معمولی

افزایشی داشته و این روند تا ساعت ۱۲ ادامه دارد و بعد از آن به دلیل کاهش شدت تابش خورشید و کاهش اختلاف دما، نیروی شناوری کاهش پیدا می‌کند و اکسرژی روند کاهشی پیدا می‌کند. در ساعت ۱۶، به دلیل کاهش شدید شدت تابش خورشید و این‌که هنوز آب شیرین توسط دستگاه تولید می‌شود، راندمان اکسرژی روند افزایش می‌یابد و بعد از این ساعت، مجدداً راندمان اکسرژی روند کاهشی دارد.

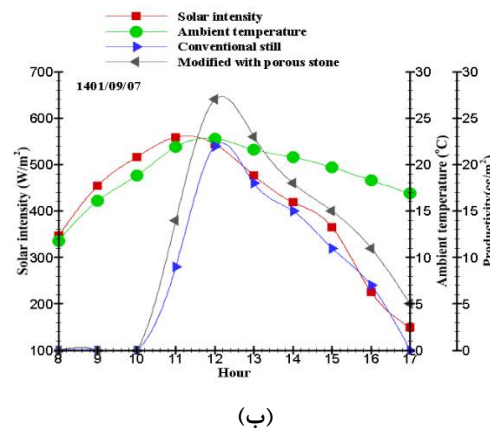
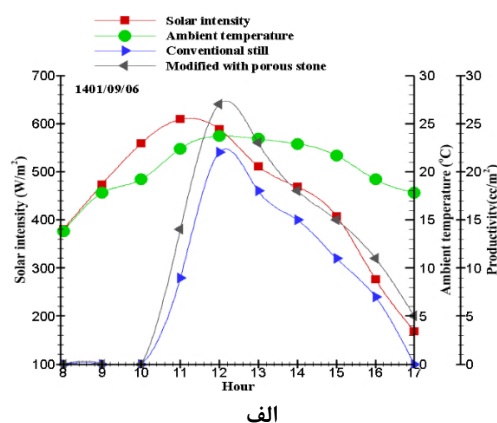


شکل ۷- راندمان ساعتی اکسرژی آبشیرین کن اصلاح شده با بستر سنگ جاذب متخلخل برای روز ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

۴-۲- نتایج سنگ متخلخل و سنگ ریزه (فصل بهار)

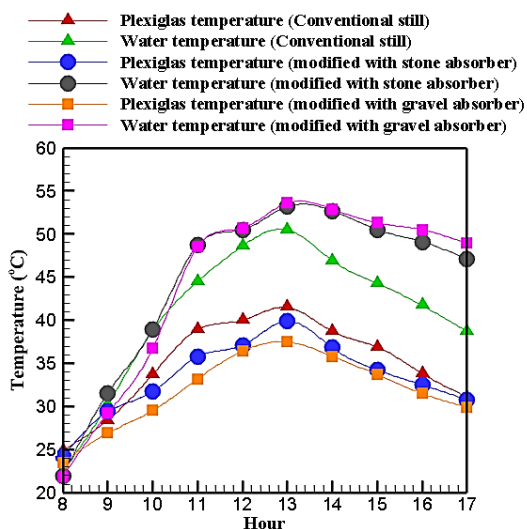
شکل ۸ شدت تابش خورشیدی ساعتی را برای آزمایش آب-شیرین کن‌های خورشیدی معمولی، اصلاح شده با استفاده از سنگ پا و اصلاح شده با استفاده از سنگ ریزه به ترتیب برای روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۰، ۱۴۰۲/۰۲/۱۱، و ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ نشان می‌دهد. از شکل مشاهده می‌گردد که بیشترین شدت تابش خورشید در ساعت ۱۲ اتفاق می‌افتد. از ساعت ۱۲ به بعد شدت تابش شروع به افت می‌کند. شدت تابش برای روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۰ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ تقریباً برابر است و در روز ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ شدت تابش بیشتری مشاهده می‌شود.

در آبشیرین کن خورشیدی اصلاح شده با جاذب سنگ متخلخل از ساعت ۱۱ به دلیل اختلاف دمای ایجاد شده بین سطح شیشه و سطح آب و افزایش شدت تابش، تولید آب-شیرین کن آغاز شده است و بهره‌وری نسبت به آبشیرین کن خورشیدی شناور معمولی افزایش می‌یابد. بهره‌وری روزانه آب-شیرین کن خورشیدی شناور اصلاح شده با جاذب متخلخل ۱۱۳ سانتی‌متر مکعب و آبشیرین کن خورشیدی شناور بدون جاذب متخلخل ۸۲ سانتی‌متر مکعب در فرایند آزمایش ثبت گردیده است؛ بنابراین، بهره‌وری حدوداً ۷۲/۵ درصد با استفاده از بستر سنگ متخلخل در آبشیرین کن افزایش می‌یابد.



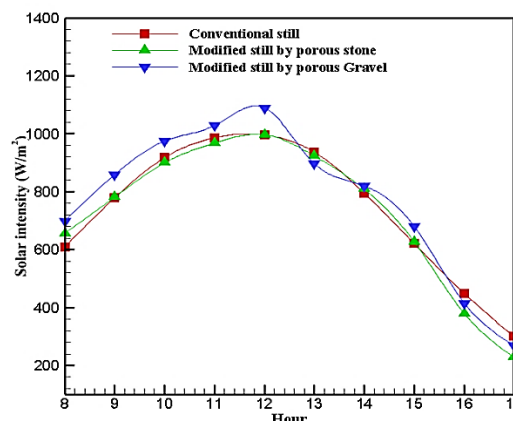
شکل ۶- نمودار تغییرات ساعتی دمای محیط، شدت تابش خورشیدی و بهره‌وری دستگاه‌های آبشیرین کن خورشیدی در روزهای ۱۴۰۱/۰۹/۰۶ و ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

شکل ۷ راندمان ساعتی اکسرژی آبشیرین کن اصلاح شده با سنگ متخلخل برای روز ۱۴۰۱/۰۹/۰۷ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، اکسرژی از ساعت ۱۰ به بعد روند



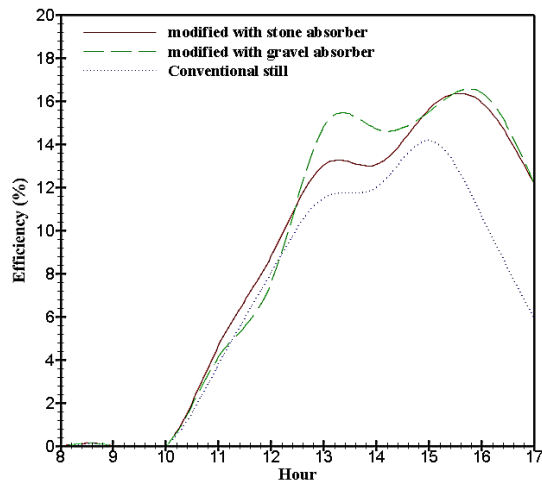
شکل ۹ - نمودار دماهای ساعتی سطح شیشه‌های شیب‌دار و آب درون تشتک برای آب شیرین‌کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، سنگ‌ریزه و معمولی

شکل ۱۰ نرخ بهره‌وری ساعتی را برای آب شیرین‌کن‌های خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ متخلخل و سنگ‌ریزه و معمولی نشان می‌دهد. از شکل واضح است که بهره‌وری ساعتی با قرار دادن سنگ متخلخل در آب شیرین‌کن خورشیدی شناور به دلایل ایجاد اختلاف دمای بیشتر بین سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب شور و تابش بیشتر جذب شده توسط سنگ متخلخل افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل، بیشترین بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی شناور در ساعت ۱۳ اتفاق می‌افتد و بعد از این ساعت بهره‌وری به علت کاهش شدت تابش خورشید کاهش می‌یابد. بهره‌وری دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ‌ریزه اختلاف بسیار کمی با بهره‌وری دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با استفاده از بستر سنگ متخلخل دارد و این اختلاف ناشی از دمای پایین‌تر سطح شیشه‌ای شیب‌دار در روز آزمایش به دلیل وجود عوامل محیطی از جمله باد می‌باشد. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده، حداکثر سرعت باد در روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ به ترتیب برابر ۳۱/۱۱ و ۲۴/۱۵ کیلومتر بر ساعت و حداکثر دمای محیط نیز به ترتیب برابر ۳۰/۸ و ۳۱/۴ سانتی‌گراد ثبت شده است. این بیان‌گر دمای کمتر و سرعت وزش باد بیشتر برای آزمایش سنگ‌ریزه بوده و باعث کاهش دمای سطح شیشه می‌شود. این کاهش دما، اختلاف دمای



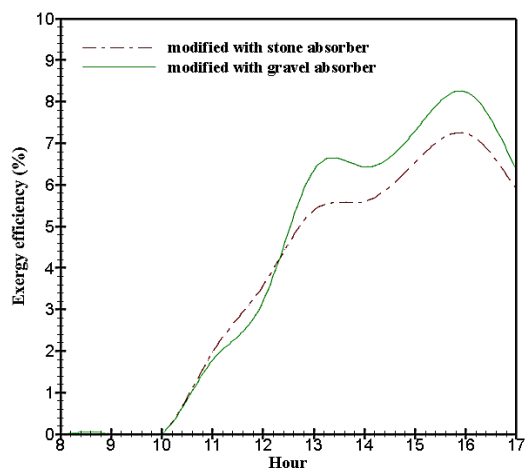
شکل ۸- شدت تابش خورشیدی ساعتی برای آزمایش آب شیرین‌کن‌های خورشیدی معمولی، اصلاح شده با استفاده از سنگ پا و اصلاح شده با استفاده از سنگ‌ریزه به ترتیب برای روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۰، ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

دمای ساعتی سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب درون تشتک آب شیرین‌کن‌های خورشیدی معمولی، اصلاح شده با استفاده از سنگ پا و اصلاح شده با استفاده از سنگ‌ریزه در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، حداکثر دمای‌های سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب برای آب شیرین‌کن‌های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و سنگ‌ریزه و معمولی در حدود ساعت ۱۳ به دست می‌آید. با توجه به نمودار، به دلیل کم بودن شدت تابش خورشید در ساعت اولیه، اختلاف دمایی بین سطح شیشه‌ای شیب‌دار و آب مشاهده نمی‌شود. با گذشت زمان و افزایش شدت تابش خورشید، دمای آب نسبت به دمای سطح شیشه‌ای شیب‌دار افزایش می‌یابد که این اختلاف دما جهت تولید آب شیرین استفاده می‌شود. با توجه به داده‌های به دست آمده، به دلیل استفاده از سنگ در بستر حوضچه، دمای آب بعد از کاهش شدت تابش و دمای محیط همچنان بالا است و با گذشت زمان دمای آب به صورت تدریجی کاهش پیدا می‌کند و این باعث می‌شود که اختلاف دمای سطح شیشه و دمای آب بیشتری نسبت به آب شیرین‌کن معمولی ایجاد شود. از ساعت ۱۳ تا ساعت ۱۷ این اختلاف حداکثری است که این امر سبب افزایش بهره‌وری آب شیرین‌کن خواهد شد.



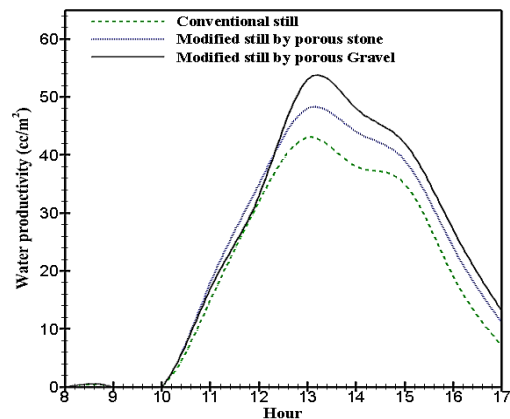
شکل ۱۱- راندمان ساعتی آب شیرین کن های خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، سنگ ریزه و معمولی

شکل ۱۲ راندمان ساعتی اکسرژی آب شیرین کن های خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و سنگ ریزه را برای روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ نشان می دهد. با توجه به شکل، راندمان اکسرژی از ساعت ۱۰ به بعد روند افزایشی داشته و این روند تا ساعت ۱۶ ادامه دارد و بعد از آن به دلیل کاهش شدت تابش خورشید و کاهش اختلاف دما، نیروی شناوری کاهش پیدا کرده و اکسرژی روند کاهشی پیدا می کند.



شکل ۱۲- راندمان ساعتی اکسرژی آب شیرین کن های خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و سنگ ریزه برای روزهای ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ و ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

بیشتری بین سطح شیشه و دمای آب ایجاد می کند و این اختلاف سبب بهره‌وری بیشتر برای دستگاه اصلاح شده با سنگ ریزه می شود.



شکل ۱۰- آب تولیدی ساعتی برای آب شیرین کن- های اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، سنگ ریزه و معمولی

شکل ۱۱ راندمان ساعتی را برای آب شیرین کن های خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، سنگ ریزه و معمولی نشان می دهد. از این شکل مشاهده می شود که با قرار دادن سنگ متخلخل در آب شیرین کن، راندمان افزایش می یابد. در آب شیرین کن معمولی بدون سنگ متخلخل، در ساعت ۱۵ راندمان آب شیرین کن خورشیدی به حداکثر رسیده و به علت افت دمای آب با توجه به کاهش شدت تابش و کاهش دمای محیط از ساعت ۱۳ تا ۱۷ افت سریع راندمان ملاحظه می شود؛ اما برای آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل، در ساعت ۱۶ بازده آب شیرین به حداکثر خود رسیده و بعد از آن به صورت تدریجی کاهش می یابد. برای راندمان آب شیرین کن خورشیدی شناور اصلاح شده با سنگ ریزه روندی مشابه با راندمان آب شیرین کن خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل مشاهده می شود.

به جرم کم آب وارد شده در گذر زمان، تغییر دمای ناگهانی ناشی از تجدید آب ورودی اتفاق نمی‌افتد.

• بهره‌وری روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل در فصل‌های پاییز و بهار به ترتیب ۱۱۳ و ۲۱۹ سانتی‌متر مکعب و آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور معمولی در فصل‌های پاییز و بهار به ترتیب ۸۲ و ۱۸۹ سانتی‌متر مکعب در فرایند آزمایش ثبت شد؛ بنابراین، بهره‌وری در فصل پاییز و بهار به ترتیب حدوداً ۳۷/۸۰ و ۱۵/۹۰ درصد با استفاده از بستر سنگ متخلخل در آب‌شیرین‌کن افزایش می‌یابد.

• بهره‌وری روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ‌ریزه ۲۳۳ سانتی‌متر مکعب در فرایند آزمایش ثبت شد؛ بنابراین، بهره‌وری با استفاده از بستر سنگ‌ریزه در فصل بهار حدوداً ۲۳/۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Jahanshahi E, Hosseinkhani A, Moahmmadi SMH (2017) Manufacturing and simulation of a solar humidification dehumidification desalination system. *Modares Mechanical Engineering* 16(12): 239-248.
- [2] Pirkandi J, Sajedi R, Zakeri M (2022) Modeling of solar desalination equipped with phase change materials by air humidification and dehumidification technique. *J. Solid Fluid Mech.* 12: 159-174.
- [3] Qiblawey HM, Banat F (2008) Solar thermal desalination technologies. *Desalination* 220(1-3): 633-644.
- [4] Madani AA, Zaki GM (1995) Yield of solar stills with porous basins. *Applied Energy* 52: 273-281.
- [5] Nafey AS, Abdelkader M, Abdelmotalip A, Mabrouk AA (2001) Solar still productivity enhancement. *Energy Conversion and Management* 42: 1401-1408.
- [6] Abu-Hijleh BA, Rababa'h HM (2003) Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin. *Energy Conversion and Management* 44: 1411-1418.
- [7] Abdallah S, Abu-Khader MM, Badran O (2009) Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills. *Desalination* 242: 128-137.
- [8] Srivastava PK, Agrawal SK (2013) Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers. *Desalination* 311: 198-205.

در جدول ۴ نتایج آنالیز آب ورودی و خروجی در این آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج آنالیز آب ورودی و خروجی

کدورت (NTU)	TH(mg/l)	EC(μ s/cm)	PH
۱/۹۵	۴۸۰	۲۶۱۰	۶/۸
۱/۴۶	۸۵	۱۶۸	۶/۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل به صورت تجربی بررسی شد. در نهایت، تجزیه و تحلیل اقتصادی برای دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور شد. نتایج اصلی این تحقیق در اینجا خلاصه می‌شوند:

- آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور با استفاده از بستر سنگ متخلخل به دلیل ذخیره انرژی گرمای خورشیدی، قادر است در زمان کاهش محسوس دما و در نبود خورشید، دمای آب را برای بهره‌وری بیشتر متعادل نگاه دارد و از کاهش سریع دمای آب جلوگیری کند.
- بهره‌وری ساعتی با قرار دادن بستر سنگ متخلخل در آب-شیرین‌کن افزایش می‌یابد.
- راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل نسبت به آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور بدون آن در طول زمان افزایش می‌یابد. راندمان متوسط روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از سنگ متخلخل نسبت به بدون استفاده از آن در فصل پاییز حدود ۷۱ درصد افزایش می‌یابد. در فصل بهار، افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شناور اصلاح شده با بستر سنگ متخلخل و سنگ-ریزه نسبت به آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور معمولی به ترتیب ۲۵ و ۲۸ درصد است.
- ویژگی که این نوع آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور را نسبت به آب‌شیرین‌کن خورشیدی شناور پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند، به کارگیری شیر یک‌طرفه و شناور است که آب در داخل آب‌شیرین‌کن را از آب دریاچه جدا کرده و با توجه به تنظیم شناور، آب از دریاچه به‌طور بسیار آهسته و پیوسته در مواقع نیاز وارد بستر آب‌شیرین‌کن شده و در این حالت با توجه

- [19] Kabeel AE, El-Agouz SA, Sathyamurthy R, Arunkumar T (2018) Augmenting the productivity of solar still using jute cloth knitted with sand heat energy storage. *Desalination* 443: 122–129
- [20] Abdel-Rehim ZS, Lasheen A (2005) Improving the performance of solar desalination systems. *Renew. Energy* 30: 1955–1971.
- [21] El-Sebaei AA, Yaghmour SJ, Al-Hazmi FS, Faidah AS, Al-Marzouki FM, Al-Ghamdi AA (2009) Active single basin solar still with a sensible storage medium. *Desalination* 249: 699-706.
- [22] Nafey AS, Abdelkader M, Abdelmotalip A, Mabrouk AA (2001) Solar still productivity enhancement. *Energy Convers. Manag.* 42: 1401–1408.
- [23] Shanmugan S, Janarthanan B, Chandrasekaran J (2012) Performance of single-slope single-basin solar still with sensible heat storage materials. *Desalin. Water Treat* 41: 195–203.
- [24] Kabeel AE (2009) Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. *Energy* 34: 1504–1509.
- [25] Kumar S, Tiwari GN (2009) Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still. *Applied Energy* 86: 1995-2004.
- [26] Kabeel AE, Hamed AM, El-Agouz SA (2010) Cost analysis of different solar still configurations. *Energy* 35: 2901-2908.
- [27] Rahbar N, Esfahani JA (2012) Estimation of convective heat transfer coefficient in a single-slope solar still: a numerical study. *Desalination Water Treat* 50: 387–96.
- [28] Rahbar N, Esfahani JA (2012) Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module. *Desalination* 284: 55–61.
- [29] Phadatare MK, Verma SK (2007) Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. *Desalination* 217:267–75.
- [9] Srivastava PK, Agrawal SK (2013) Winter and summer performance of single sloped basin type solar still integrated with extended porous fins. *Desalination* 319: 73-78.
- [10] Malaiyappan P, Elumalai N (2014) Solar still integrated with porous material. *J. Chem. Pharmaceutical Sci., JCHPS* 4: 215-217.
- [11] Sellami MH, Belkis T, Aliouar ML, Meddour SD, Bouguettaia H, Loudiyi K (2017) Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge. *Groundwater for Sustainable Development* 5: 111-117.
- [12] Maccarini A, Hultmark G, Bergsøe NC, Afshari A (2018) Free cooling potential of a PCM-based heat exchanger coupled with anovel HVAC system for simultaneous heating and cooling of buildings. *Sustainable Cities and Society* 42: 384–395
- [13] Kalidasa Murugavel K, Chockalingam KKSK, Srithar K (2008) Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. *Desalination* 220: 677–686.
- [14] Guney MS, Tepe Y (2017) Classification and assessment of energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev* 75: 1187–1197.
- [15] Arunkumar T, Denkenberger D, Ahsan A, Jayaprakash R (2013) The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material. *Desalination* 314: 189–192.
- [16] Naim MM, Abd El Kawi MA (2003) Non-conventional solar stills Part 1. Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium. *Desalination* 153: 55–64.
- [17] panchal HN (2016) Use of thermal energy storage materials for enhancement in distillate output of solar still: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev* 61: 86–96.
- [18] Kalidasa Murugavel K, Sivakumar S, Riaz Ahamed J, Chockalingam KKSK, Srithar K (2010) Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. *Appl. Energy* 87: 514–523.