



مطالعه آزمایشگاهی سیستم آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از PCM و متلاطم‌سازهای جریان

سید شرف‌الدین حسینی¹، موسی فرهادی^{2*}، کورش صدیقی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

*mfarhadi@nit.ac.ir، صندوق پستی 484

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 دی 1395

پذیرش: 22 فروردین 1396

ارائه در سایت: 10 خرداد 1396

کلید واژگان:

آب شیرین کن خورشیدی

PCM

انتقال حرارت

متلاطم‌ساز جریان

ذخیره‌ساز حرارت

چکیده

مناطق دارای پتانسیل بالای استفاده از انرژی پاک و نامحدود خورشیدی گزینه مناسبی برای به کارگیری سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی است. ایران دارای مناطق وسیع برخوردار از تابش مناسب خورشید است و دارای موقعیت مناسبی برای به کارگیری سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی با وجود منابع آب شور در شمال و جنوب کشور است. تحول و پیشرفت عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی در دستور کار محققین در سال‌های اخیر بوده است تا بتوانند بیشترین بهره را از توسعه این سیستم در شرایط بحران آب داشته باشند. در این تحقیق با استفاده از یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی به بررسی هم‌زمان اثر ذخیره‌سازی گرمای اضافی با استفاده از PCMها و به کارگیری متلاطم‌سازها در مسیر جریان یک مبدل مارپیچ و همچنین اعمال تغییرات در دبی آب شور، در دبی تولیدی آب شیرین در منطقه معتدل مرطوب پرداخته شده که بررسی هم‌زمان این شرایط نوآوری این تحقیق است. این آزمایشات در بازه زمانی یک سال انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که در ماه‌های سرد (آذر تا فروردین) استفاده از PCM تأثیری در کارایی سیستم ندارد، ولی تأثیر PCM بر افزایش زمان کار سیستم در ماه‌های گرم (اردیبهشت تا آبان) از تأثیر مخزن ذخیره آب گرم بیشتر است. نتایج افزایش میزان آبدهی سیستم در اثر استفاده از مخزن ذخیره‌سازی گرما تا 7% و استفاده از PCM تا 14% را نشان می‌دهد. استفاده از متلاطم‌سازها نیز توانسته با افزایش میزان انتقال حرارت تا 14% نسبت به حالت ساده، موجب افزایش میزان آبدهی سیستم شود. بیشترین میزان آب شیرین استحصالی نیز 2250 میلی لیتر در روز بوده است.

Experimental Study of Solar Distillation using PCM and Flow Turbulators

Seyed Sharafodin Hosseini¹, Mousa Farhadi^{1*}, Kurosh Sedighi¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Shariati Street, Babol, Mazandaran, Iran

*P.O.B. 484 Babol, Iran, mfarhadi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 January 2017
Accepted 11 April 2017
Available Online 31 May 2017

Keywords:
Solar distillation
PCM
Heat transfer
Flow turbulators
Heat storage

ABSTRACT

High potential regions for using clean and widespread solar energy are suitable choices to apply solar distillation systems. Iran has a large area with exposed solar radiation and also vast salty water sources in the south and north of country, hence and appropriate situation exists for the use of solar stills and solar distillation equipment. Researchers have focused on development and improvement of working solar distillation chambers in recent years to benefit from this modern technology in water crisis conditions. In this research, effect of storage of further heat and also using PCM were surveyed when flow turbulators were applied in the spiral heat exchanger and the salty water flow rates were simultaneously changing and it is this which is the novelty of this research. These experiments were carried out in Babol city, which is a wet region with a mild climate in the north of Iran. These tests also were done during a period of one year. The experiment results determined that during cold months (December to April) using PCM has no effect on efficiency of system. But in warm months (May to November) the effect of PCM is more than the effect of stored heated water. The results show that using heat storage and also applying PCM increase the distilled water gain of system up to 7% and 14% respectively. Furthermore, using turbulators can improve system's water gain by increasing the heat transfer up to 14%. Maximum distilled water gain was equal to 2250 milliliter/day.

1- مقدمه

ضروری است. از میان روش‌های مختلف تولید آب شیرین، سیستم‌های آب شیرین‌کن با روش‌های منتهی به تبخیر و چگالش آب رایج‌تر و پرکاربردتر است. کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب و پتانسیل بالای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، که می‌تواند جایگزین و یا مکمل انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی شود، از گزینه‌های مناسب برای استفاده از آب

بحران آب به معنای آن است که تنها بخش بسیار کمی از آبی که سطح زمین را فرا گرفته است را آب شیرین تشکیل می‌دهد. با توجه به افزایش روز افزون میزان تقاضای آب شرب و همچنین عدم توزیع یکنواخت منابع آب شیرین در جهان، علاوه بر کنترل مصرف آب، افزایش منابع آب شیرین و تولید آن نیز

Please cite this article using:

S. Sh. Hosseini, M. Farhadi, K. Sedighi, Experimental Study of Solar Distillation using PCM and Flow Turbulators, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 117-127, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

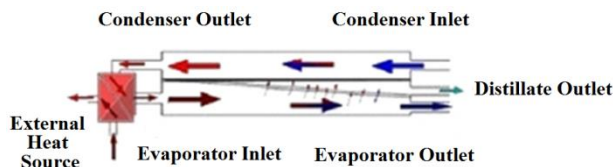


Fig. 2 Temperature changes in module's membrane [7]

شکل 2 تغییرات دما در مدول غشایی [7]

در کارکرد کلی یک آب شیرین کن عواملی چون مدت زمان کارکرد سیستم، شدت و مدت تشعشع، ساختار سیستم آب شیرین کن (فعال، غیرفعال، یک اثره، دو اثره، سه اثره و غیره)، نوع مبدل حرارتی، نوع سیستم تقطیر و دمای عملکردی سیستم [8] تغییرات دبی جرمی و نوع سیال حامل حرارت [9]، دما و دبی آب ورودی به سیستم [10]، تأثیر گذارند. تغییرات در مبدل حرارتی نیز می‌تواند در میزان انتقال حرارت مؤثر باشد. مبدل‌های بررسی شده در تحقیقات صورت گرفته از سه نوع عمده دولوله‌ای، پوسته و لوله و یا لوله‌های پرده‌دار بوده‌اند [12,11]. میزان افزایش انتقال حرارت با استفاده از مبدل از نوع مارپیچ ساده نیز در سایر تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات افزایش 1.16 تا 1.43 برابری ضریب انتقال حرارت با بالا رفتن دمای آب داخل لوله از 40 تا 50 درجه سانتی‌گراد را گزارش داده است. دلیل این افزایش را می‌توان به تأثیر افزایش اختلاف دمای سیال داخل لوله با سیال خارج از لوله روی شناوری سیال در بخش بیرونی که موجب تغییر در لایه مرزی و اختلاط بیشتر ناشی از جریان ثانویه و تسریع انتقال حرارت از سطوح مبدل می‌شود نسبت داد [14,13]. جمشیدی و همکاران در تحقیقات خود اثر پارامترهای هندسی و جریان سیال روی نرخ انتقال حرارت یک مبدل پوسته و لوله مارپیچ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش نرخ جریان سیال در بخش پوسته و افزایش قطر لوله مارپیچ می‌تواند موجب افزایش نرخ انتقال حرارت شود [15]. از طرف دیگر گزارشات تحقیقاتی نشان داده است که استفاده از متلاطم‌سازها² چون شکل‌های هندسی مختلف نوار تابیده³ (به اختصار TT نامیده می‌شود) و استفاده از فنر⁴ (به اختصار WiC نامیده می‌شود) می‌تواند روی تغییرات در نرخ انتقال حرارت و تغییرات جریان مؤثر باشد [17,16]. سایر تجهیزات تکمیلی نیز می‌تواند در بهبود بهره‌وری سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی مؤثر باشد. برای نمونه تحقیق هم‌اوند و همکاران یک سیستم جدید تبخیر با استفاده از انرژی خورشیدی و گرمای بازیافتی از پمپ خلاء که انرژی مورد نیاز خود را از یک صفحه فتولتائیک دریافت می‌کند را مورد بررسی قرار داده است [18].

ذخیره گرمای نهان یکی از روش‌های ذخیره انرژی حرارتی است که می‌تواند بر پایه ماده تغییر فازدهنده⁵ یا به اختصار PCM گرمای نهان را می‌توان از تغییرات حالات جامد-جامد، جامد-مایع و یا جامد-گاز به دست آورد. در تغییر حالت مایع-گاز برای ذخیره گاز حجم یا فشار زیادی مورد نیاز و گرمای نهان مایع-گاز نیز کمتر از تحول مایع-جامد است. تغییر حالت جامد-جامد نیز بسیار کند بوده و انرژی حرارتی زیادی منتقل نمی‌شود. برای نمونه تحقیقات نشان می‌دهد گرمای نهان PCM پارافین واکس 100 برابر بیش از ظرفیت گرمایی محسوس آن است [19]؛ بنابراین بیشتر مواد تغییر فازدهنده موادی هستند که انرژی را طی فرایند تغییر حالت

شیرین کن‌های خورشیدی است. مطابق تحقیقات موجود آب شیرین کن‌ها جهت بهینه‌سازی راندمان خروجی، توسعه، تغییر و پیشرفت زیادی داشته‌اند و محققین در بخش‌های مختلف آن تحولاتی ایجاد کرده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

در رایج‌ترین مدل آب شیرین کن‌های خورشیدی یا گردآور¹، آب در اثر گرم شدن به روش گلخانه‌ای در محفظه تبخیر شده و بخارات آن در سطح شیشه بالایی چگالش یافته و در جهت شیب سطح به پایین لغزیده و جمع‌آوری می‌شود [1] (شکل 1). محققین زیادی برای بهبود شرایط عملکرد سیستم بر محفظه گردآور تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند و توانسته‌اند با روش‌های گوناگون افزایشی 5% تا 70% در میزان تولید آب شیرین مشاهده کنند [3,2].

در تحقیق مراد و همکاران بازدهی یک سیستم تولید آب شیرین با استفاده از یک کلکتور خورشیدی و پمپ خلاء و افزودن بخش چگالش با یک سیستم مشابه بدون پمپ خلاء در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد غلظت آب شور تأثیر منفی بر بهره‌وری سیستم آب شیرین کن دارد. از طرفی پمپ خلاء با کاهش فشار و متعاقب آن کاهش دمای جوش تأثیر مثبتی بر عملکرد سیستم خواهد داشت [4]. در تحقیق دشموخ و تومبر از ماسه و روغن انتقال حرارت به عنوان ذخیره فعال محسوس در یک گردآور ساده با سطح شیب‌دار استفاده شده است و نتایج آن با شرایط بدون این ذخیره‌سازها مقایسه شد که نتایج نشان از بهبود بهره‌وری سیستم با استفاده از روغن انتقال حرارت و ماسه دارد. راندمان سیستم با کاهش رطوبت نسبی هوای محیط افزایش می‌یابد [5].

در تکمیل ساختار آب شیرین کن‌های خورشیدی این سیستم از حالت تولید مستقیم آب شیرین (سیستم تک حلقه‌ای) به تولید غیرمستقیم آب شیرین دو حلقه‌ای و چند حلقه‌ای توسعه پیدا کرد. سیستم‌های تک حلقه‌ای بازدهی بیشتری نسبت به سیستم‌های دو حلقه‌ای دارند، اما میزان تخریب و خوردگی در آن‌ها زیاد است که با توجه به گرانی تجهیزات خورشیدی استفاده از سیستم‌های تک حلقه‌ای برای استفاده طولانی مناسب نیست. محققین با در نظر گرفتن یک منبع ذخیره‌سازی گرمایی توانستند گرمای مازاد ذخیره شده در طول روز در این مخزن آب گرم را برای افزایش ساعت کارکرد سیستم پس از غروب خورشید مورد استفاده قرار دهند [6]. بخش تولیدکننده آب شیرین در این نوع سیستم‌ها یک مدول جداکننده مانند شکل 2 است که با عبور آب سرد شور از سمت بالا و آب شور گرم شده از سمت پایین عمل چگالش بین سیالی به طور غیرمستقیم صورت می‌گیرد [7].

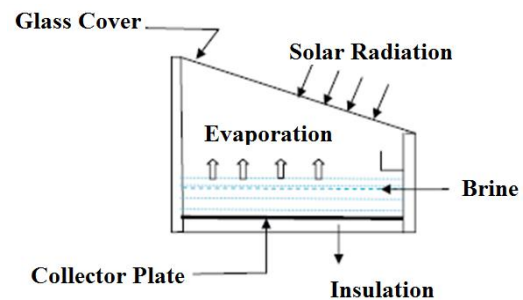


Fig. 1 Schematic of Simple Solar Still [1]

شکل 1 شماتیک یک آب شیرین کن ساده [1]

¹ Solar Still (SS)

² Tabulators

³ Twisted Tape

⁴ Wire Coil

⁵ Phase Change Materials

2- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش متشکل از دو سیکل جدا از هم بوده که در سیکل اول آب در گردآور خورشیدی گرم شده و با عبور از مبدل حرارتی گرمای خود را پس می‌دهد و دوباره به گردآور بازگشته تا گرم شود. در میانه مسیر مطابق با شکل 3 جهت ذخیره‌سازی گرمای مازاد، از یک مخزن ذخیره‌سازی گرما به صورت موازی با مبدل استفاده شده است. ساختار مخزن به صورت دو استوانه هم‌محور با قطرهای 90cm و 100cm است که در استوانه داخلی آب گرم و در استوانه بیرونی ماده PCM پارافین واکس با دمای ذوب حدود 50 درجه ذخیره می‌شود. شروع ذوب این ماده با گرفتن گرما از مخزن و رسیدن به نقطه ذوب بوده و این گرمای ذوب به عنوان ذخیره گرمایی حفظ می‌شود.

جهت انتقال حرارت بهتر در بخش PCM از 200 فین سوزنی (میخ جوش داده شده به صورت عمود بر سطح استوانه داخلی) استفاده شده است (شکل 4). به کار بردن فین‌های سوزنی به دلیل این‌که جریان سیالی در این محفظه وجود ندارد موجب افزایش افت فشار در این بخش نشده، بلکه میزان انتقال حرارت را با امکان ایجاد یک توزیع دمایی یکنواخت در سیستم افزایش خواهد داد. تحقیقات صورت گرفته توسط جوربران و همکاران [33] نشان می‌دهد ضریب تخلخل در آرایه‌های مثلثی و مربعی پره‌های سوزنی در اعداد رینولدز بسیار پایین (کمتر از 100) حدود 87% تا 92% بوده، که این نشان‌دهنده کارایی مناسب پره‌های سوزنی در انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی است. ورود و خروج PCM با شیرهای مجزا کنترل می‌شود.

با توجه به این‌که کار در شرایط آزمایشگاه نسبت به فعالیت در فضای باز مصون از بسیاری از محدودیت‌هاست، به جای انرژی خورشیدی دریافتی توسط گردآور از دو هیتر قابل برنامه‌ریزی با ظرفیت 2000W استفاده شده است (شکل 5). برنامه کارکرد هیتر براساس اطلاعات هواشناسی و نتایج آزمایش یک‌ساله یک گردآور در شرایط واقعی آماده شده است. این برنامه با اندازه‌گیری تغییرات دمای آب نمونه گردآور خورشیدی در مناسب‌ترین زاویه سطح دریافت تابش خورشید در طول روز و برای یک سال آماده شده است.

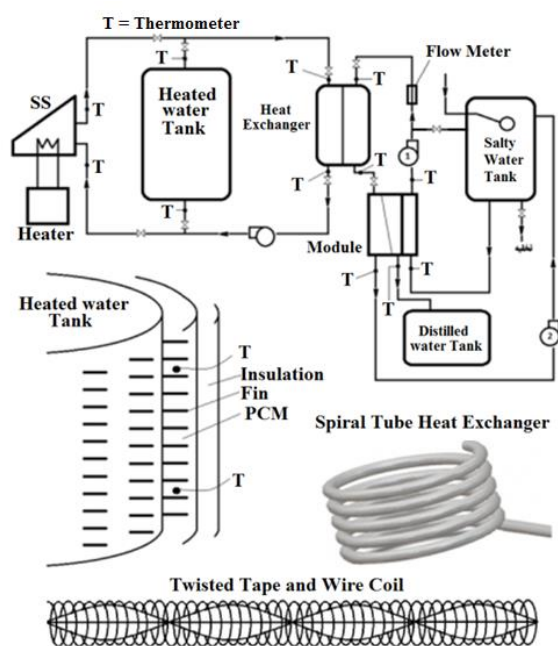


Fig. 3 Schematic of Experimental Setup

شکل 3 شماتیک دستگاه آزمایش

از جامد به مایع ذخیره می‌کنند. این مواد در واقع گرمای نهان را ذخیره می‌کنند و به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی گرمایی به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند [20]. در تحقیقات رستم‌زاده و همکاران تأثیر ضخامت PCM روی توزیع دمایی در PCM و مقدار ذوب شدن آن بررسی شد و نتایج نشان داد زمان ذوب به طور خطی با مقدار PCM تغییر می‌کند و ضخامت‌های کمتر PCM نیز عملکرد بهتری نشان داده‌اند [21].

PCMها در انواع مختلف چون استریک اسید [22] و انواع پارافین‌ها [24,23] به شکل‌های گوناگون چون محفظه محاط بر بخش گرمایش سیستم [19]، به عنوان ذخیره‌ساز گرمایی در یک مبدل پوسته و لوله [23]، به صورت گره‌های مملو از PCM درون محفظه گرمایش [25] حول مبدل حرارتی سه لوله‌ای فین‌دار [24]، محاط بر مخازن حلقوی [26]، درون کانال‌های هوا در سیستم تهویه مطبوع [9]، درون لایه‌های دیوار ساختمان [27] و غیره مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج تحقیقات بالا رفتن زمان کارکرد سیستم و افزایش تا 85% در راندمان سیستم را نشان می‌دهد [29,28]. تحلیل‌های انرژی انجام شده در مورد مخزن ذخیره گرمایی با استفاده از PCM نیز نشان می‌دهد که با افزایش 10 برابری سطح انتقال حرارت در بخش حاوی PCM انرژی خروجی از مخزن ذخیره‌ساز گرمایی 6 برابر شده است [30].

با توجه به تحقیقات انجام شده سه بخش اصلی تولید گرما در یک آب شیرین کن شامل محفظه گردآور یا کلکتور، منبع ذخیره گرما و مبدل حرارتی است. بررسی‌های انرژی انجام شده نشان می‌دهد بیشترین میزان اتلاف در شرایط مختلف عملکردی سیستم مربوط به کلکتور است. این نرخ از 56% در حالتی که تنها کلکتور خورشیدی منبع تولید حرارت باشد تا 86% در هنگامی که کلکتور و مخزن ذخیره‌ساز گرما منابع تولید حرارت باشند متغیر است. پس از آن نرخ اتلاف انرژی مبدل حرارتی با نوسان از 9% در حالت استفاده هم‌زمان از کلکتور و مخزن ذخیره‌ساز گرما به عنوان منبع گرمایی تا 23% در حالتی که تنها کلکتور خورشیدی منبع تولید حرارت باشد و 71% در حالتی که تنها مخزن ذخیره‌ساز حرارت منبع تولید گرما باشد دارای بیشترین تلفات انرژی است. در مخازن ذخیره گرما نیز در حالتی که تنها از کلکتور خورشیدی به عنوان منبع تولید حرارت استفاده شود، نرخ اتلاف انرژی از 11% و در هنگامی که کلکتور و مخزن ذخیره‌ساز گرما منابع تولید حرارت باشند حدود 0.5% است. در حالی که از مخزن ذخیره‌ساز گرمایی به عنوان تنها منبع تولید حرارت استفاده شود، اتلاف انرژی در مخزن حدود 4% است [31,32]. با توجه به این‌که اعمال تغییرات جهت کاهش تلفات ناشی از تغییر میزان تابش خورشید به دلیل وابستگی شدید به شرایط آب و هوایی و تغییرات فصول نمی‌تواند چشمگیر باشد، در این تحقیق تلاش شده است تغییرات در یکی از بخش‌های مؤثر قابل تغییر سیستم یعنی مخزن ذخیره‌ساز گرمایی در کنار تغییرات مبدل حرارتی مورد بررسی قرار گیرد و میزان تلفات موجود در قسمت‌های یادشده با استفاده از تکنیک‌های مختلف کاهش یابد. این تغییرات شامل استفاده از PCM حول مخزن ذخیره‌ساز گرما در کنار استفاده از روش‌های غیرفعال آشفته‌سازی جریان مانند استفاده از W_iC ، TT و استفاده هم‌زمان از W_iC و TT در مبدل حرارتی ماریچ است. به دلیل این‌که کاربرد این سیستم بیشتر در مناطقی است که یا دسترسی به آب شور مانند آب دریا نامحدود است و یا می‌توان یک گردش مداوم بین مخزن ذخیره آب شور و منشأ اصلی آب شور ایجاد نمود، از تغییرات غلظت شوری در مخزن می‌توان صرف نظر کرد.



Fig. 8 K type thermocouple for measuring temperature

شکل 8 ترموکوپل نوع k برای اندازه‌گیری دما

گرم مبدل افزایش می‌یابد. سپس به بخش پایینی مدول بازمی‌گردد. در این بخش بخارات آب شور شده به سطح میانی شیب‌دار مدول (سطحی که از بالا با آب سرد شور در تماس است) برخورد می‌کنند و چگالش یافته و از طریق ناودانی انتهای سطح شیب‌دار جمع‌آوری می‌شوند (شکل 9).

باقی آب شور به مخزن اصلی آب شور برگردانده می‌شود. جهت ایجاد دبی‌های مختلف برای آب شور از یک مسیر انحرافی پس از پمپ و پیش از مدول استفاده شده که چهار دبی 0.6lit/s، 0.75lit/s، 0.85lit/s، 1lit/s را ایجاد کرده است. میزان این تغییرات مطابق شکل 10 با استفاده از یک دبی‌سنج با دقت 0.03lit/s کنترل می‌شود.

همان‌طور که در شماتیک شکل 3 نشان داده شد، چرخش در این سیکل توسط دو پمپ مطابق شکل 11 یکی پیش از مبدل (پمپ 1) و دیگری پیش از مخزن ذخیره آب شور (پمپ 2) انجام می‌شود.

آب موجود در گردآور با شروع به کار هیتر طبق برنامه گرم شده و با استفاده از یک پمپ سیرکولاتور در سیکل اول (هم‌زمان در مخزن آب گرم و در مبدل حرارتی) به گردش درمی‌آید. به دلیل این‌که در مدول تولید آب

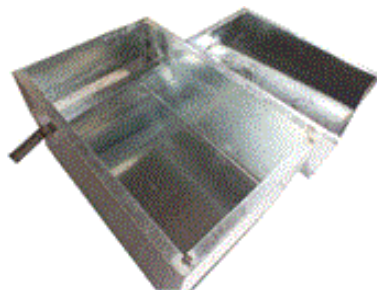


Fig. 9 Spout and drain inside of module

شکل 9 سطح شیب‌دار و ناودانی داخل مدول



Fig. 10 Flow meter

شکل 10 فلومتر



Fig. 11 salty water pump

شکل 11 پمپ آب شور



Fig. 4 Heated water storage tanks with installed fins

شکل 4 مخزن ذخیره آب گرم با فین‌های نصب‌شده



Fig. 5 Applied heaters for a basin solar still

شکل 5 هیتر به کاررفته برای گرم کردن آب گردآور

مبدل حرارتی نیز از لوله مسی به قطر نامی لوله 19mm به صورت مارپیچ با قطر حلقه مارپیچ 20cm و تعداد 10 حلقه تشکیل شده و درون یک پوسته استوانه‌ای به قطر 30cm و ارتفاع 40cm قرار گرفته است (شکل 6). درون مبدل مارپیچ از مغشوش‌کننده‌های جریان مانند TT و WiC استفاده شده است (شکل 7). فنر از مفتول با جنس فولاد نرم با قطر 1mm و قطر حلقه فنر 16mm بوده و در حالت کشیدگی گام آن 5mm است. جنس TT نیز از ورق نازک فلزی با ضخامت 0.3mm و گام پیچشی 25 mm بوده است. تغییرات دمایی توسط ترمومترهایی از نوع K با دقت 0.1 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌شوند (شکل 8).

سیکل دوم سیکل آب شور است. آب شور با محدوده TDS بین 7000 تا 8000 مورد استفاده قرار گرفته است. آب شور سرد از مخزن به سطح بالایی مدول پمپاژ و سپس وارد پوسته مبدل شده و دمای آن در تماس با لوله‌های



Fig. 6 Spiral heat exchanger

شکل 6 مبدل حرارتی مارپیچ



Fig. 7 The insertion of wire coil and twisted tape in the heat exchanger

شکل 7 نوار تابیده و فنر داخل لوله مبدل

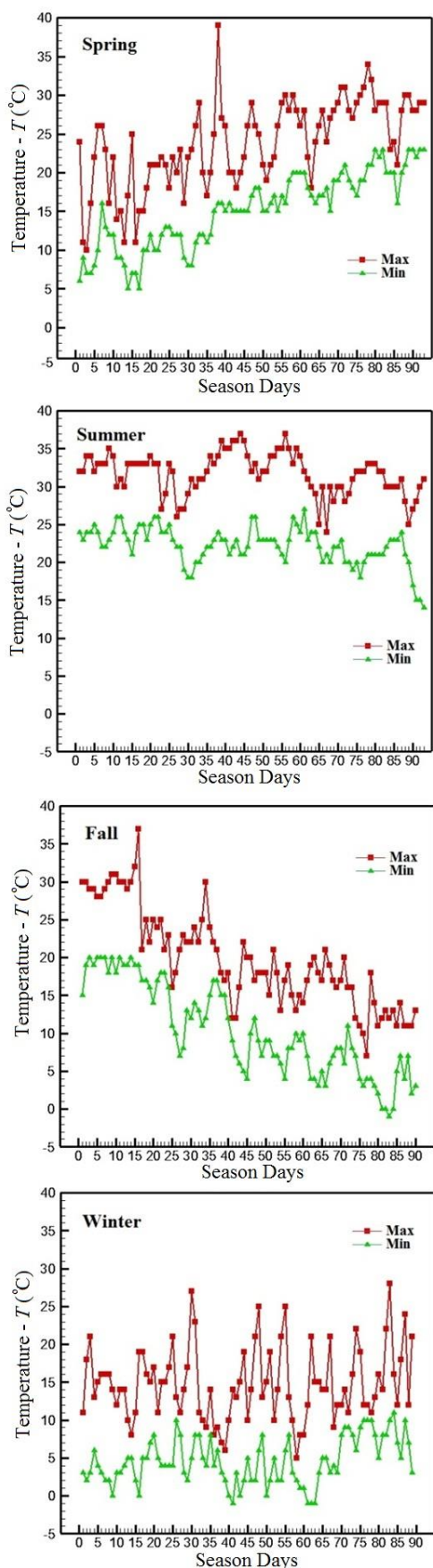


Fig. 13 Seasonal minimum and Maximum Temperature in Babol

شکل 13 تغییرات دمای کمینه و بیشینه فصلی در منطقه بابل

شیرین از غشا استفاده نمی‌شود محدودیت دمایی وجود نداشته و از همان ابتدا آب گرم‌شده در هر دو مسیر مبدل و مخزن ذخیره گرمای عایق شده به چرخش درمی‌آید. پس از آن که دمای آب در مخزن ذخیره آب گرم به حداکثر رسید، مسیر ورود و خروج از مخزن قطع می‌شود. این دما از طریق ترموکوپل کنترل می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده برای هیتر در زمان شب، هیتر و گردآور از مدار خارج و مخزن آب گرم به عنوان منبع گرما وارد سیکل می‌گردد و مبدل را گرم می‌کند. در هنگام عملکرد شبانه وقتی آب در اثر تبادل حرارت در مبدل دچار کاهش دما شد، PCM به عنوان منبع گرما گرمای نهان ذوب ذخیره‌شده را به آب داده و خود شروع به انجماد می‌کند. سطح خارجی محافظه عایق است. نکته قابل اهمیت این که بهترین راندمان PCM وقتی به‌دست خواهد آمد که مقدار PCM به کار رفته به اندازه‌ای باشد که همه آن در اثر گرمای اعمالی ذوب شود. کنترل این کار به عهده ترموکوپل‌هایی است که درون محافظه قرار داده می‌شود؛ بنابراین تعیین ضخامت محافظه به نوع PCM ارتباط خواهد یافت. در شکل 12 دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

در مرحله بعد با استفاده از نمودار تغییرات دمایی سالانه شهر بابل، منطقه معتدل و مرطوب مازندران، (شکل 13) اندازه‌گیری تغییرات دمایی گردآور تحت تابش خورشید در شش روز در هر ماه انجام شد که نتایج آن مطابق شکل 14 برای برنامه‌ریزی تغییرات دمایی هیتر مورد استفاده قرار گرفت. در این نمودار خطای میانگین‌گیری کمتر از 2% بوده است. نتایج این آزمایشات حداکثر افزایش دمای آب گردآور را 65 درجه سانتی‌گراد نشان داد. در پایین‌تر از 35 درجه سانتی‌گراد نیز هیچ‌گونه خروجی آب شیرین مشاهده نشد. از این‌رو حد پایین‌ترین دما در این آزمایش دمای 35 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در نتیجه در دو حالت استفاده از PCM و عدم استفاده از PCM، بازه دمایی 35 تا 65 درجه، دبی‌های 0.6 لیتر بر ثانیه تا 1 لیتر بر ثانیه در شرایط لوله ماریچ بدون مغشوش‌کننده، لوله ماریچ با WiC، لوله ماریچ با TT و لوله ماریچ با به کارگیری هم‌زمان TT و WiC مورد آزمایش قرار گرفت.

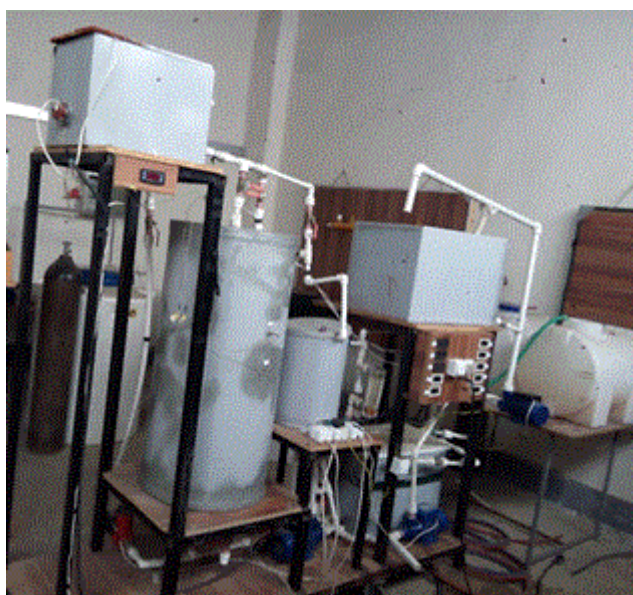


Fig. 12 Experimental Setup

شکل 12 دستگاه آزمایش

با توجه به هندسه دستگاه برای آزمایش به 80 لیتر ماده PCM احتیاج است که نوع گرانیول پارافین P116-Wax با مشخصات مطابق با جدول 1 مورد استفاده قرار گرفت. در شرایط انجام آزمایش (افزایش دما تا 65 درجه سانتی‌گراد) این ماده در 48 درجه شروع به ذوب کرد و پس از ذوب کامل مرحله انجماد از دمای 53 درجه آغاز و تا 51 درجه به اتمام رسید. میزان سطح تماس بدنه گرم 1.38 متر مربع و فین‌ها از نوع میخ فولادی به طول 4.5 سانتی‌متر و تعداد 200 عدد و ضخامت لایه پارافین 5 سانتی‌متر است. مقدار آب در مخزن ذخیره حرارت 113 لیتر است.

با توجه به مطالب یادشده متغیرهای آزمایشات تغییرات دبی جریان آب شور و تغییرات دمای گردآور در نظر گرفته شده است. فرضیات ثابت در این آزمایشات دبی آب بخش گرم، ساختار تجهیزات به غیر از شرایط داخلی لوله مبدل بوده‌اند. هدف آزمایش نیز بررسی تأثیر استفاده از PCM روی میزان آبدهی سیستم آب شیرین کن خورشیدی با تغییرات دبی آب سرد و استفاده از مغشوش‌کننده‌هاست. به دلیل این‌که کاربرد این سیستم بیشتر در مناطقی است که با میزان دسترسی به آب شور مانند آب دریا نامحدود است و یا می‌توان یک گردش مداوم بین مخزن ذخیره آب شور و منشاء اصلی آب شور ایجاد کرد، از تغییرات غلظت شوری در مخزن صرف نظر شده است.

3- بررسی نتایج

با توجه به این‌که شروع ذوب PCM در دمای 48 درجه بوده است، و با در نظر گرفتن تغییرات دمایی نمودار شکل 14، دمای محفظه گردآور از ماه‌های آذر تا فروردین از مقدار یادشده کمتر است؛ بنابراین استفاده از PCM تأثیری ندارد. اثر PCM در بازه ماهانه اردیبهشت تا آبان و در شرایط سایر ماه‌ها صرفاً تأثیر مخزن ذخیره آب گرم بررسی شده است. با توجه به محاسبه مقدار آب شیرین استحصال شده شکل‌های 15-18 به بررسی تأثیر تغییرات دمای گردآور، مخزن ذخیره‌کننده گرما و همچنین وجود PCM در شرایط متفاوت هندسی مبدل در گرم‌ترین روز هر ماه (در فصول گرم) در دبی آب شور ثابت پرداخته است.

در ماه‌های فصل سرما (آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین) دمای پایین کارکرد سیستم که متأثر از هوای بیرون است، مانع از اثر PCM روی عملکرد آب شیرین کن بوده است. گرچه تأثیر منبع ذخیره‌کننده گرما نیز محسوس نیست. نتایج بررسی‌ها در ماه‌های سرد در شکل‌های 19-22 نشان داده شده است.

آنچه نتایج نشان می‌دهد حاکی از آن است که در طول یک سال با گرم شدن هوا و به تبع آن افزایش دمای آب در گردآور اثر مکمل‌های جانبی مانند آب گرم ذخیره‌شده در مخزن آب گرم و PCM افزایش می‌یابد. مشاهدات

جدول 1 مشخصات پارافین واکس به کاررفته در آزمایش

واحد	مقدار	مشخصه
-	سفید شیری	رنگ
°C	51 تا 46.7	محدوده دمای ذوب
kJ/kg	209	گرمای ذوب
kJ/kg.K	2.89-2.51	گرمای ویژه مایع و جامد
W/mK	0.24	هدایت حرارتی مایع و جامد
kg/m ³	760	چگالی مایع
kg/m ³	818	چگالی جامد
kg/m.s	1.9	گرانروی مایع
g/mol	332	وزن مولکولی

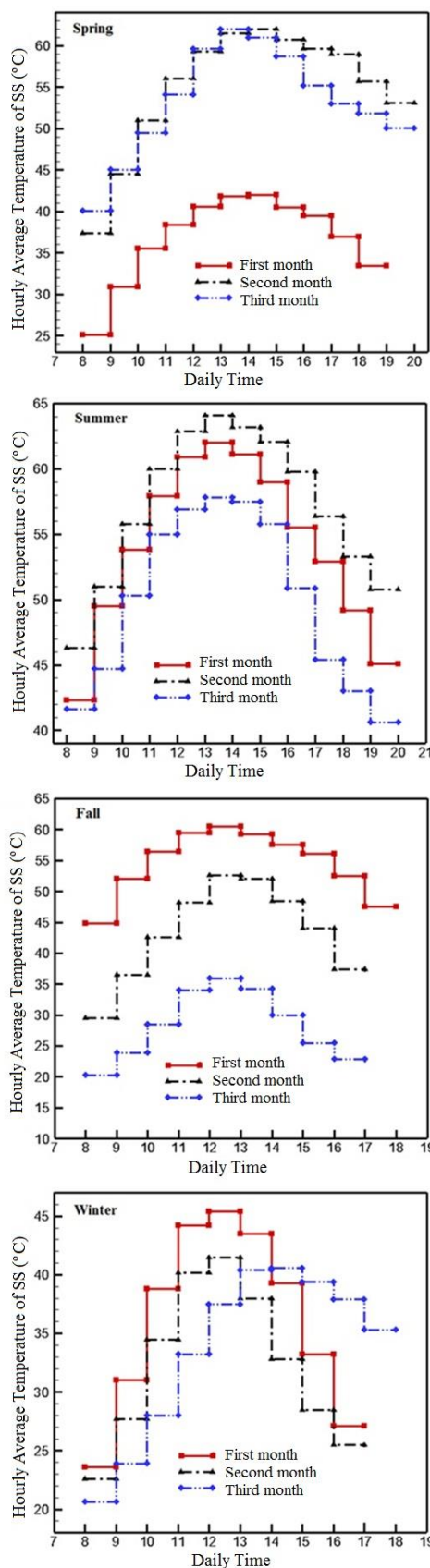


Fig. 14 Hourly Average Temperature of water in chamber in the hottest days of month in the best tilt angle

شکل 14 دمای میانگین ساعتی محفظه گردآور حاوی آب در طول گرم‌ترین روز ماه در بهترین زاویه سطح گردآور

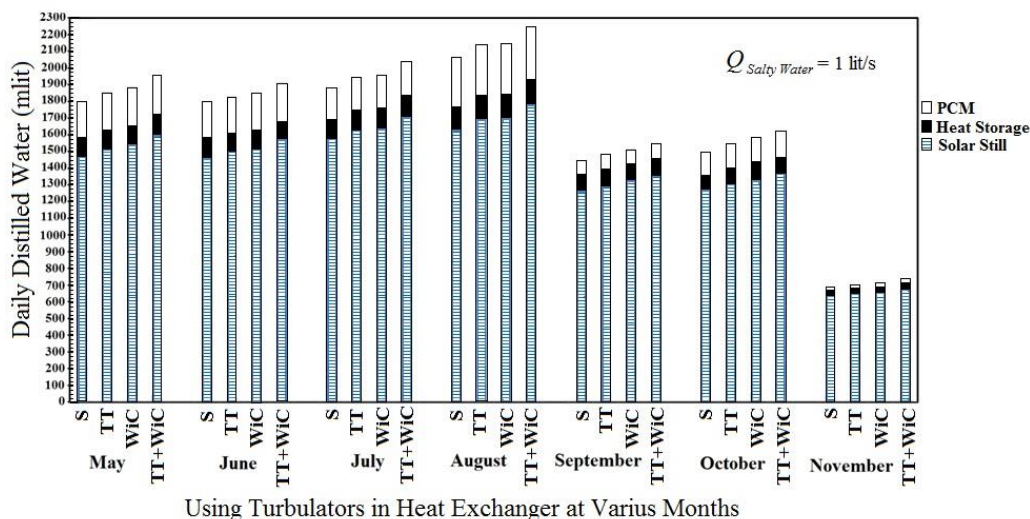


Fig. 15 Daily distilled water gain in using various turbulators and PCM at salty water flow rate 1lit/s

شکل 15 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 1 lit/s

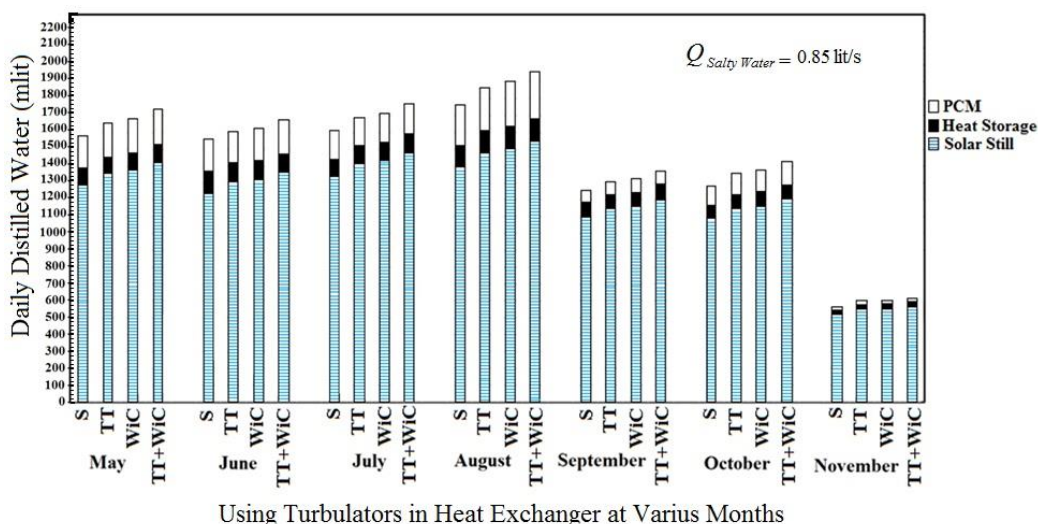


Fig. 16 Daily distilled water gain in using various turbulators and PCM at salty water flow rate 0.85lit/s

شکل 16 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.85 lit/s

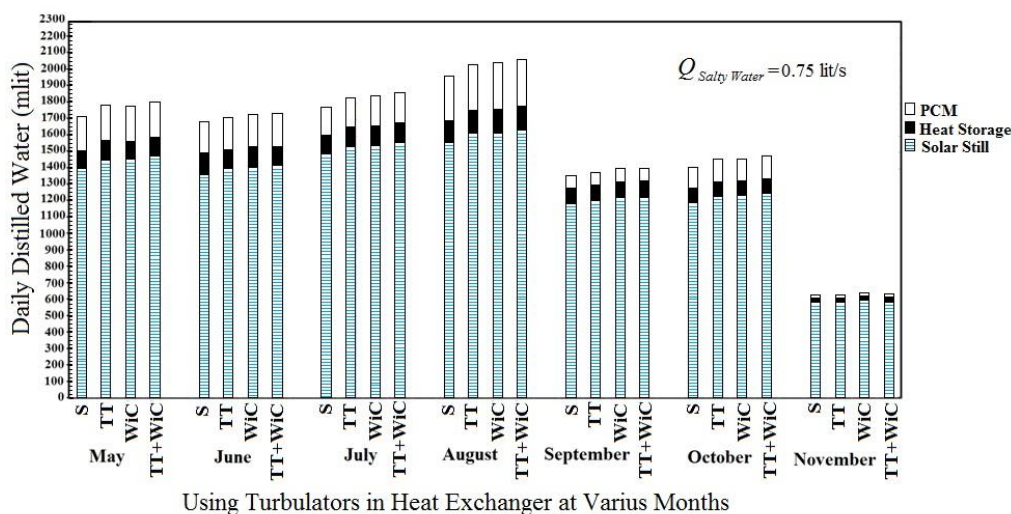


Fig. 17 Daily distilled water gain in using various turbulators and PCM at salty water flow rate 0.75lit/s

شکل 17 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.75 lit/s

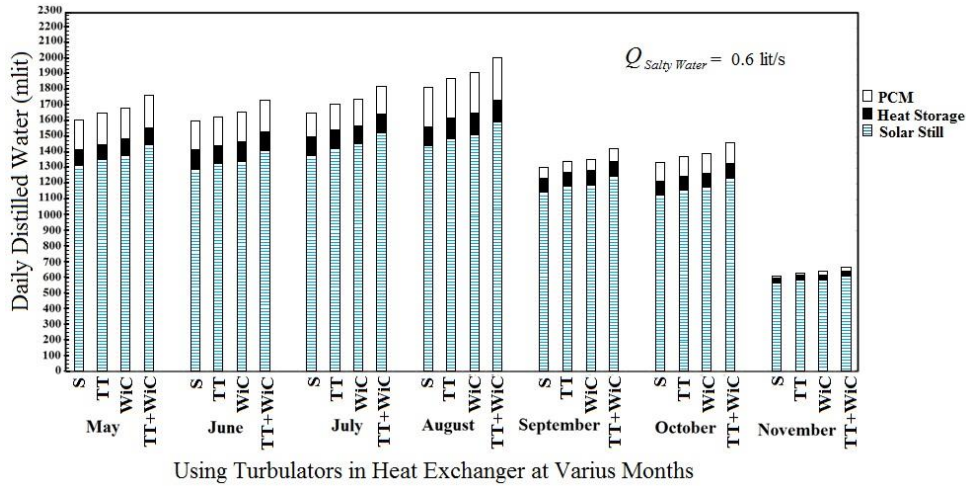


Fig. 18 Daily distilled water gain in using various turbulators and PCM at salty water flow rate 0.6lit/s

شکل 18 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.6 lit/s

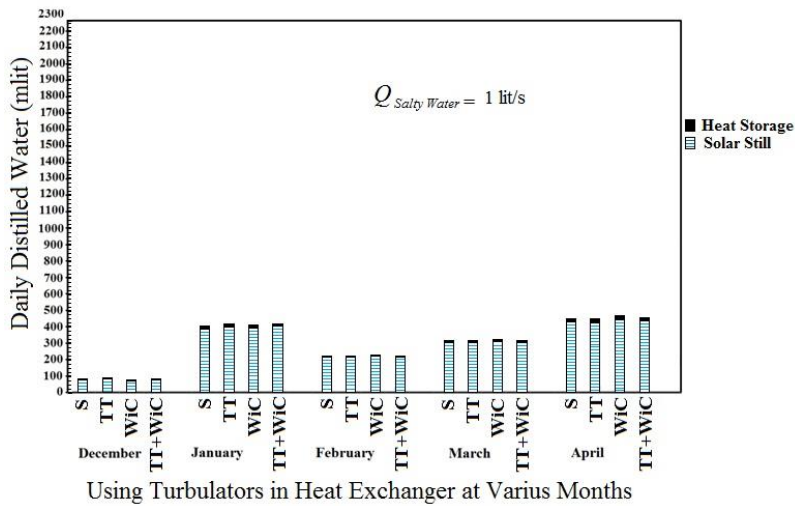


Fig. 19 Daily distilled water gain in using various turbulators at salty water flow rate 1lit/s (no PCM effect)

شکل 19 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 1 lit/s (بدون اثر از PCM)

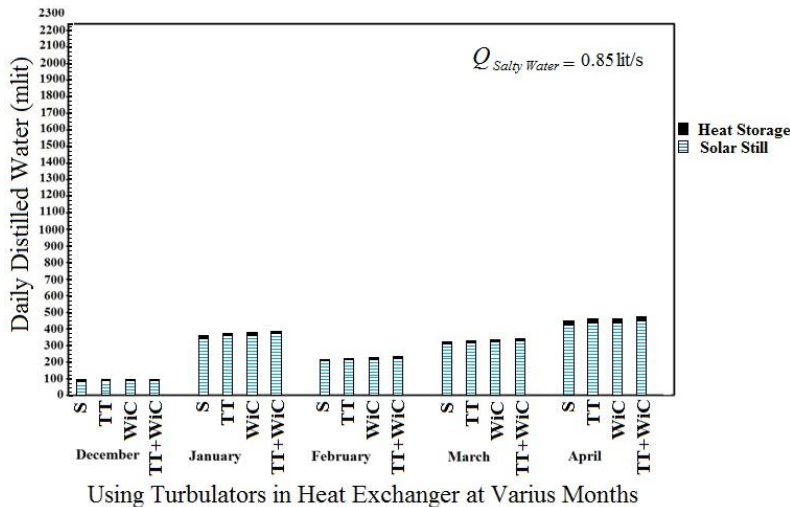


Fig. 20 Daily distilled water gain in using various turbulators at salty water flow rate 0.85lit/s (no PCM effect)

شکل 20 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.85 lit/s (بدون اثر از PCM)

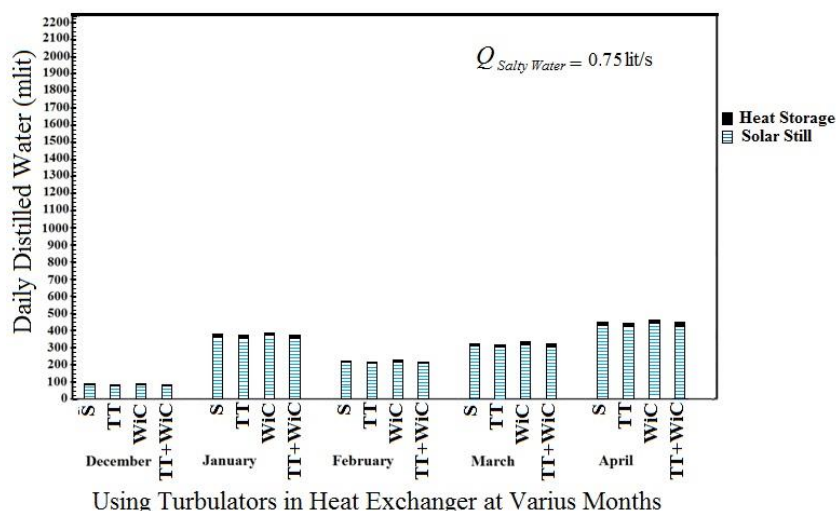


Fig. 21 Daily distilled water gain in using various turbulators at salty water flow rate 0.75lit/s (no PCM effect)

شکل 21 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.75 lit/s (بدون اثر از PCM)

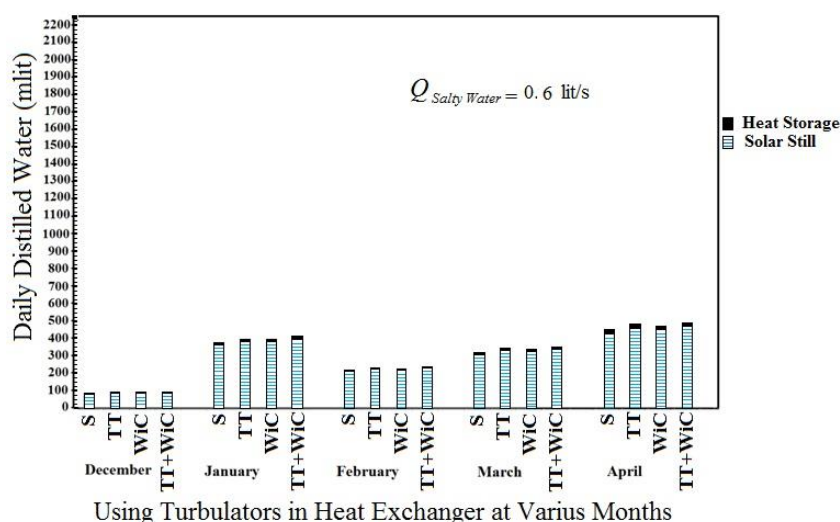


Fig. 22 Daily distilled water gain in using various turbulators at salty water flow rate 0.6lit/s (no PCM effect)

شکل 22 مقدار آب شیرین استحصال شده در گرم‌ترین روز ماه در شرایط مختلف استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در دبی آب شور 0.6 lit/s (بدون اثر از PCM)

ثابت بودن دمای مخزن ذخیره PCM جهت تغییر فاز اندازه‌گیری شده است. تأثیر مخزن ذخیره ساز آب گرم در فاصله ماه‌های اردیبهشت تا آبان بین 4% تا 7% کل آب شیرین استحصال شده است. بیشترین مقدار 151 میلی‌لیتر در روز در ماه مرداد و در حالت به کارگیری هم‌زمان TT و WIC در مبدل و دبی آب شور یک لیتر بر ثانیه و کمترین مقدار 23 میلی‌لیتر در روز در ماه آبان در مبدل مارپیچ ساده و دبی آب شور 0.85 لیتر بر ثانیه مشاهده شد. حداکثر میزان کل آب شیرین تولیدی دستگاه در ماه‌های گرم 2250 میلی‌لیتر در روز در مرداد ماه و کمترین مقدار 567 میلی‌لیتر در روز در ماه آبان به‌دست آمد.

با توجه به نتایج استفاده از متلاطم‌سازهای جریان موجب افزایش راندمان محصول نسبت به عدم استفاده از آن‌ها درون مبدل شده که در این میان استفاده هم‌زمان از TT و WIC بیشترین تأثیر را از خود نشان داده است.

نشان داد به‌طور کلی تأثیر استفاده از PCM نسبت به تأثیر مخزن ذخیره‌ساز گرمایی در فصول گرم مورد بررسی بیشتر بوده است. با کاهش دما و نزدیک شدن ماه‌های سرد به دلیل آن که مدت زمان کمتری دما در حد ذوب PCM باقی می‌ماند، کاملاً ذوب نشده و تأثیر آن به شدت کاهش می‌یابد.

کمترین اثر PCM در آبان با 3% تأثیر در میزان آبدهی و بیشترین اثر در مرداد با 14% تأثیر در میزان آبدهی مشاهده شد. طبق اندازه‌گیری انجام شده حداکثر زمانی که PCM توانست مدت زمان کارکرد سیستم را افزایش دهد، 63 دقیقه بوده است. بیشترین میزان تولید آب شیرین با تأثیر مستقیم PCM مقدار 315 میلی‌لیتر در روز مربوط به ماه مرداد و در حالت به کارگیری هم‌زمان TT و WIC در مبدل و دبی آب شور یک لیتر بر ثانیه بوده است. کمترین مقدار نیز با 16 میلی‌لیتر در روز مربوط به ماه آبان در مبدل مارپیچ ساده و دبی آب شور 0.85 لیتر بر ثانیه بود. این تأثیر در زمان

- [1] A. S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A. A. Mabrouk, Solar still productivity enhancement, *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, No. 11, pp. 1401-1408, 2001.
- [2] A. E. Kabeel, S. A. El-Agouz, Review of researches and developments on solar stills, *Desalination*, Vol. 276, No. 3, pp. 1-12, 2011.
- [3] V. Sivakumar, E. G. Sundaram, Improvement techniques of solar still efficiency: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 246-264, 2013.
- [4] M. M. Morad, H. A. M. El-Maghawry, K. I. Wasfy, A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity, *Solar Energy*, Vol. 146, pp. 20-29, 2017.
- [5] H. S. Deshmukh, S. B. Thombre, Solar distillation with single basin solar still uses sensible heat storage materials, *Desalination*, Vol. 410, pp. 91-98, 2017.
- [6] O. Mahian, A. Kianifar, S. A. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises, A review of the applications of nanofluids in solar energy, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 582-594, 2013.
- [7] R. Schwantes, A. Cipollina, F. Gross, J. Koschikowski, D. Pfeifle, M. Rolletschek, V. Subiela, Membrane distillation: Solar and waste heat driven demonstration plants for desalination, *Desalination*, Vol. 323, No. 2, pp. 93-106, 2013.
- [8] R. G. Raluy, R. Schwantes, V. J. Subiela, B. Penate, G. Melian, J. R. Betancort, Operational experience of a solar membrane distillation demonstration plant in Pozo Izquierdo-Gran Canaria Island (Spain), *Desalination*, Vol. 290, pp. 1-13, 2012.
- [9] A. H. Mosaffa, C. A. Infante Ferreira, F. Talati, M. A. Rosen, Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 67, pp. 1-7, 2013.
- [10] E. Jahanshahi Javaran, A. Hossein Khani, S. M. H. Mohammadi, Manufacturing and simulation of solar humidification-dehumidification desalination system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No.12, pp. 239-248, 2016. (in Persianth فارسی)
- [11] T. Arunkumar, D. Denkenberger, A. Ahsan, R. Jayaprakash, The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material, *Desalination*, Vol. 314, pp. 189-192, 2013.
- [12] M. Chaabane, H. Mhiri, P. Bournot, Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM), *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 897-903, 2013.
- [13] S. Khanjani, A. Tavakoli, D. Jalali Vahid, M. Nazari, Effect of cut twisted tape and Al_2O_3 nano β fluid on heat transfer of double tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 181-190, 2015. (In Persian فارسی)
- [14] P. Naphon, S. Wongwises, A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, No. 5, pp. 463-490, 2006.
- [15] N. Jamshidi, M. Farhadi, D. D. Ganji, K. Sedighi, Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, No. 2, pp. 644-652, 2013.
- [16] S. Eiamsa-ard, P. Seemawute, K. Wongcharee, Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 6, pp. 711-719, 2010.
- [17] S. Eiamsa-ard, P. Nivesransan, S. Chokphomphun, P. Promvong, Influence of combined non-uniform wire coil and twisted tape inserts on thermal performance characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 7, pp. 850-856, 2010.
- [18] I. Hamawand, L. Lewis, N. Ghaffour, J. Bundschuh, Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy, *Desalination*, Vol. 404, pp. 182-191, 2017.
- [19] E. K. Summers, M. A. Antar, J. H. Lienhard V, Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification-dehumidification desalination, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 11, pp. 3417-3429, 2012.
- [20] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, Vol. 59, pp. 82-103,

شکل‌های 19-22 نشان می‌دهد تأثیر مخزن ذخیره‌ساز آب گرم در ماه‌های سرد مورد بررسی بین 1.6% در ماه آذر تا 4.6% در ماه فروردین نسبت به کل آب شیرین استحصالی متغیر بوده است. بیشترین مقدار آب شیرین استحصالی سیستم در ماه‌های فصل سرد 495.5 میلی‌لیتر در روز در ماه فروردین و کمترین مقدار 73.5 میلی‌لیتر در روز در ماه آذر مشاهده شد. با توجه به نتایج گزارش شده در نمودار، استفاده از متلاطم‌سازهای جریان در این شرایط نیز موجب افزایش راندمان محصول نسبت به عدم استفاده از آنها درون مبدل شده است که در این میان غالباً استفاده هم‌زمان از TT و WiC بیشترین تأثیر را از خود نشان داده است.

4- جمع‌بندی

آزمایشات نشان می‌دهد از PCM می‌توان در طی ماه‌های اردیبهشت تا آبان استفاده کرد و در سایر ماه‌ها به دلیل سردی هوا کاربرد ندارد. از مجموع نتایج این تحقیق برمی‌آید که:

- میزان تولید آب شیرین با افزایش دمای محفظه گردآور افزایش می‌یابد.
- مقادیر تغییرات دمایی و آب شیرین استحصال شده در حالت‌های هندسی مبدل استفاده از TT و استفاده از WiC دارای مقادیر نزدیک به هم و نشان‌دهنده آن است که سیستم نسبت به بکاربردن منفرد TT یا WiC دارای حساسیت پایینی است.
- نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در حالت استفاده از TT، WiC، و استفاده هم‌زمان از TT و WiC نسبت به حالت ساده به ترتیب بین 2% تا 8%، 3% تا 12%، و 5% تا 14% نسبت به حالت مبدل ساده افزایش در میزان آبدی مشاهده می‌شود.
- با مقایسه هم‌زمان استفاده از متلاطم‌سازها و همچنین تغییرات دبی آب شور، بیشترین افزایش میزان آبدی با اندازه 10.75% مربوط به ماه مرداد ماه در دبی 0.85 لیتر بر ثانیه است.
- آزمایشات نشان می‌دهد از PCM می‌توان در طی ماه‌های اردیبهشت تا آبان استفاده کرد و در سایر ماه‌ها به دلیل سردی هوا کاربرد ندارد.
- نمودارها نشان داده‌اند که در ماه‌هایی که از PCM استفاده می‌شود، تأثیر آن نسبت به مخزن ذخیره آب گرم بیشتر است.
- محدوده تأثیر استفاده از مخزن ذخیره آب گرم در تولید آب شیرین در ماه‌های فصول گرم (اردیبهشت تا آبان) بین 4% تا 7% بوده است که بیشترین تأثیر در ماه مرداد و کمترین در ماه آبان مشاهده شد.
- محدوده تأثیر استفاده از PCM در تولید آب شیرین بین 3% تا 14% اندازه‌گیری شد که بیشترین تأثیر در ماه مرداد و کمترین در ماه آبان مشاهده شد.
- حداکثر مدت زمانی که PCM به زمان کارکرد سیستم اضافه نمود 63 دقیقه اندازه‌گیری شد.
- بیشترین آب شیرین استحصال شده از سیستم در مرداد ماه به اندازه 2250 میلی‌لیتر در روز به‌دست آمد.
- در ماه‌های فصل سرما (آذر تا فروردین) کمترین مقدار آب شیرین استحصالی سیستم 73.5 میلی‌لیتر در روز، در ماه آذر مشاهده شد.
- در ماه‌های سرد مورد بررسی (آذر تا فروردین) که استفاده از PCM کاربرد ندارد، تأثیر مخزن ذخیره‌ساز آب گرم بین 1.6% در ماه آذر تا 4.6% در ماه فروردین نسبت به کل آب شیرین استحصالی بوده است.

5- مراجع

- [27] S. Modifications, S. Lucas, V. M. Ferreira, J. L. B. de Aguiar, Latent heat storage in PCM containing mortars—Study of micro structural modifications, *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 724–731, 2013.
- [28] M. Dashtban, F. F. Tabrizi, Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage, *Desalination*, Vol. 279, No. 3, pp. 415–422, 2011.
- [29] M. Pomianowski, P. Heiselberg, Y. Zhang, Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 56–69, 2013.
- [30] H. Shabgard, T. L. Bergman, A. Faghri, Exergy analysis of latent heat thermal energy storage for solar power generation accounting for constraints imposed by -term operation and the solar day, *Energy*, Vol. 60, pp. 474–484, 2013.
- [31] F. A. Al-Sulaiman, I. Dincer, F. Hamdullahpur, Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 9, pp. 2228–2243, 2011.
- [32] C. Koroneos, M. Tsarouhis, Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment, *Cleaner Production*, Vol. 32, pp. 52–60, 2012.
- [33] B. A. Jurbran, M. A. Hamdani, R. M. Abdualh, Enhanced heat transfer, missing pin, and optimization for cylindrical pin fin arrays, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, No.3, pp. 576–583, 1993.
- 2013.
- [21] M. Rostamizadeh, M. Khanlarkhani, S. M. Sadrameli, Simulation of energy storage system with phase change material (PCM), *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 419–422, 2012.
- [22] A. A. El-Sebaei, A. A. Al-Ghamdi, F. S. Al-Hazmi, A. S. Faidah, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 8, pp. 1187–1195, 2009.
- [23] M. J. Hosseini, M. Rahimi, R. Bahrapoury, Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 128–136, 2013.
- [24] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, A. Th. Mohammad, Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins, *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 33–41, 2014.
- [25] L. Yang, X. Zhang, G. Xu, Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points, *Renewable Energy*, Vol. 64, pp. 26–33, 2014.
- [26] M. Longeon, A. Soupart, J. F. Fourmigué, A. Bruch, P. Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 175–184, 2013.