Evaluation of the energy efficiency of a solar parabolic collector equipped with phase change materials inside the receiver tube of a solar desalination

Jhina Seifi Laleh[1], Hadi Samimi Akhijahani[2*], Payman Salami[3]

1- Graduate student of Renewable energies, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
3- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
*h.samimi@uok.ac.ir

Introduction

With increasing the world's population, the need to supply water resources is increasing, as well. However, fresh water resources are out of reach due to climate changes, and production of drinkable water from seas and oceans has always been the focus of researchers. Iran with considerable levels of solar radiation and the access to open water from the north and south is a suitable country to produce fresh water. Using solar water desalination systems is a proper and economical solution to produce drinking water from salt water sources. The purpose of this research is to increase the performance of the solar water desalination system by using the latent heat storage system and the solar tracking system. Water as working fluid and parabolic collector as a source of thermal energy were used experimentally to produce fresh water.

Materials and Methods

The solar water desalination system was designed and built on a laboratory scale in the University of Kurdistan and the desired experiments were performed on it. The flowing fluid (water) inside the spiral tube in the tank is entered into the absorber tube of the parabolic collector by means of a pump. As mentioned, inside the receiver tube, there is a spiral copper tube with a pitch of 7 cm, which contains paraffin. The parabolic mirror, reflects the sunlight on the receiver tube and causes the water (as working fluid) to heat up. The cooling process is done using a specific source placed in the upper part of the distillation tank. In this case, the steam droplets in the tank hit the bottom surface of this cooling tank (which is in the form of an inverted funnel) and condensation takes place. This research was carried out during four separate tests on 4 consecutive days of 24th, 25th, 26th, and 27th of August, 2022 for three volume flow rates of fluid 1.9, 3.1 and 4.2 l/min and without phase change materials in Renewable Energy Laboratory, university of Kurdistan, Sanandaj. The experiments were conducted under similar conditions and started at 10:00 and ended at 14:00. It should be noted that in the case without phase changing materials, the volume flow rate of the fluid was considered to be 4.2 l/min. In this case, the pump was transferring the fluid at its maximum flow rate. Variations of outlet temperature, thermal efficiency, desalination efficiency and produced water was investigated at different conditions.

Results and Discussion

The results showed that by reducing the pitch of the spiral tube, the amount of heat obtained increases due to the increase in the Nusselt number. At the beginning of data collection, a significant part of the energy entered into the receiver tube is used to heat the phase change material and the spiral tube inside the receiver and this reduces the initial air temperature. The highest salt water temperature occurs for the fluid flow rate with a flow rate of 4.2 $l.min^{-1}$ and the lowest temperature occurs for a flow rate of 1.9 $l.min^{-1}$. With a flow rate of 4.2 $l.min^{-1}$, the heat absorbed by the absorbent tube is quickly transferred to the salt water chamber by the fluid. The input energy to the tank changes from 1.53 to 2.83, 1.14 to 2.18, and 0.73 to 1.48 MJ for fluid flow rates of 4.2, 3.1, and 1.9 $l.min^{-1}$. For the system without phase change materials with a flow rate of 4.2 $l.min^{-1}$, the thermal efficiency is lower than the cases with phase change materials (5.02 and 3.51 %). Moreover, using solar tracking mechanism, the thermal efficiency of the collector increased about 9.86% related to the system with photocell sensor. According to the values for water quality it can be stated that obtained sample water can be used for drinking by reducing the dissolved solids.

Conclusion

In this research, the process of thermal changes in the solar water desalination system using PCM has been investigated. The obtained results illustrated that using PCM improved the thermal efficiency of the collector. Moreover, the quality of obtained water from the present system was in acceptable range to drink. Using a solar panel tracking system improve the efficiency of the solar collector.

Keywords: Drinking water, Thermal efficiency, Solar collector, Solar tracker, Water quality

ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده درون لوله دریافت کننده در یک آب شیرین‌کن خورشیدی

ژینا سیفی لاله، دانش آموخته کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
هادی صمیمی اخیجهانی، استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
پیمان سلامی، استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
h.samimi@uok.ac.ir

چکیده

استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی یک راهکار مناسب، با صرفه اقتصادی برای تولید آب شرب از منابع آب شور است. هدف از انجام این تحقیق افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از سامانه ذخیره‌ساز گرمای نهان انرژی خورشیدی و سامانه ردیاب پنلی است. با توجه به اینکه به دلیل نوسانات شدت تابش خورشیدی هدر رفت حرارتی از جمع کننده خورشیدی افزایش می‌یابد، استفاده از مواد تغییرفازدهنده راه حل مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی در ساعات اوج و آزاد نمودن در زمان کاهش و یا نبود شدت تابش خورشیدی است. به این منظور ماده تغییر فاز دهنده به صورت لوله‌ی مارپیچ ۶ میلی‌متری با گام ۷ سانتی‌متر درون لوله کانونی قرار گرفت. جهت ارزیابی عملکرد حرارتی سه دبی جریان برای سیال کاری ۱/۹، ۳/۱ و۴/۲ لیتر بر دقیقه (با مواد تغییر فاز دهنده) و حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده در چهار روز متوالی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده بیشترین راندمان حرارتی را در دبی۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه بوده است. نتایج نشان داد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان ۳/۰۵ درصد می‌گردد. آب شیرین تولیدی در مدت زمان ۴ ساعت، ۰/۷۲۲ لیتر بر متربع مربع در چهار ساعت بود و به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش سختی موجود در آب شرب شده بود.

کلمات کلیدی: آب شرب، بهره‌وری حرارتی، جمع‌کننده خورشیدی، ردیاب خورشیدی، کیفیت آب.

نمادها و نشانه‌ها

A_c	سطح کلکتور	m^2	$\dot{Q}_{cove}$	نرخ انرژی انتقال یافته در اثر همرفت	$J.s^{-1}$
c_p	ظرفیت گرمای ویژه	$kJ.kg^{-1}.{}^oC^{-1}$	$\dot{Q}_u$	نرخ انرژی حرارتی دریافتی	$J.s^{-1}$
D	قطر لوله	m	Pr	عدد پرانتل	-
E_{elc}	انرژی الکتریکی	J	Re	عدد رینولدز	-
F_R	پارامتر اتلاف حرارت	-	T_i	دمای ورودی	^oC
h_c	ضریب انتقال حرارت همرفت	$W.m^{-2}.{}^oC^{-1}$	T_O	دمای خروجی	^oC
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر آب	$kJ.kg^{-1}$	t_c	ضخامت دیواره	m
I_o	شدت تابش خورشیدی	$W.m^{-2}$	U_L	ضریب اتلاف حرارت کلی	$W.m^{-2}.{}^oC^{-1}$
k_w	ضریب انتقال حرارت	$Kg.s^{-1}$	V	حجم سیال	m^3
$m_{w,ev}$	جرم آب تبخیری	kg	α	ضریب جذب	-
$\dot{m}$	جرم سیال کاری	-	η	بازده گرمایی جمع کننده	-
Nu	عدد ناسلت	J	η_{des}	بازده تبخیر آب	-
Q_w	انرژی مورد نیازبرای تبخیر	J	μ	ویسکوزیته سیال	$m^2.s^{-1}$
Q_m	مجموع انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب	$J.s^{-1}$	ρ	دانسیته جرمی	$Kg.m^3$
$\dot{Q}_f$	گرمای انتقالی از جمع کننده به سیال	$J.s^{-1}$	τ	ضریب انتشار	-
$\dot{Q}_{cond}$	نرخ انرژی انتقال یافته هدایتی	$J.s^{-1}$			

مقدمه

یکی از نوشیدنی‌های که مصرف روزانه آن، برای ادامه حیات و سلامتی انسان و همچنین تمام موجودات زنده از اهمیت زیادی برخوردار می-باشد، آب است. افزایش جمعیت و صنعتی شدن و همچنین تقاضا برای کاربردهای مختلفی نظیر کشاورزی و خانگی، منجر به تولید آب‌شیرین زیاد شده است. مصرف آب یکی از معیارهای اصلی ارزیابی تمدن انسان‌ها است (Panchal *et al*., 2019). برای تولید آب‌شیرین در کره زمین، می‌توان به طور مستقیم از دریاچه‌ها، رودخانه و یخچال‌های طبیعی بهره گرفت. اگر چه آب زیرزمینی به مقدار اندک در دسترس قرار گرفته است، اما همین مقدار اندک نیز بایستی پیش از استفاده تصفیه شود. از طرف دیگر دریاها و اقیانوس‌ها حاوی آب‌شور بوده و از این جهت آب آنان قابل استفاده برای مصارف خانگی و به دلیل خورنده بودن قابل استفاده برای مصارف صنعتی نیست. افزایش گرمایش جهانی و شوری منابع آب طبیعی قابل آشامیدن، جامعه را به سمت کشف روش‌های هوشمندانه برای استفاده مناسب از منابع آب سوق می‌دهد. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که استفاده از آن با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و تقاضای جهانی برای کاستن آلودگی‌های زیست محیطی افزایش یافته است.

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه‌ی تأمین آن برای مصارف مختلف در صنعت و کشاورزی است. با توجه به تداوم افزایش نرخ جمعیت، افزایش مصرف آب، اتمام سوخت‌های فسیلی و هم‌چنین افزایش مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان ppm ۸ در سال و به وجود آمدن پدیده گرمایش جهانی) که برای تولید آب شیرین صرف می‌شود، تحقیقات اخیر را به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در دهه‌های اخیر انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از موضوعات جذاب در بین محققان حوزه انرژی برای استفاده در زمینه‌های مختلف محسوب می‌شود. از نظر در دسترس بودن و فراوانی پایدار، انرژی خورشیدی با ارزش‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر است (Abu-Arabi *et al*., 2018).

با توجه به استانداردهای بین‌المللی برای مناطقی که میانگین انرژی تابشی خورشید، در روز بالاتر از ۳/۵ کیلو وات ساعت می‌باشد، استفاده از سامانه‌های مختلف برای مهار انرژی خورشیدی از جمله جمع کننده خورشیدی برای مصارفی نظیر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی صرفه اقتصادی خواهد داشت (Kalogirou *et al*., 2005). ایران با میانگین انرژی تابشی ۴/۵ کیلو وات ساعت در روز و ۳۲۰۰ ساعت بر سال (Edalati *et al*., 2015) یکی از مستعدترین مناطق برای بهره‌وری از تابش خورشیدی مانند آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. با توجه به اینکه میزان شدت تابش خورشید در طول ساعات روز متغیر بوده و لازم است از انرژی خورشیدی که به جمع کننده می‌رسد، استفاده حداکثری نمود، استفاده از سامانه‌هایی نظیر ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و مواد تغییرفازدهنده می‌تواند منجر به افزایش بازده حرارتی سامانه گردد. با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساعات اوج تابش، عمل ذخیره‌سازی به صورت گرمای نهان انجام شده و در مواقعی‌که تابش خورشیدی افت پیدا می‌کند و یا وجود ندارد، انرژی ذخیره شده در سیال و مواد تغییرفازدهنده آزاد شده و مورد استفاده قرار گیرد. در ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان، جذب یا آزادسازی حرارت در دمای تغییر فاز مواد صورت می‌پذیرد. ذخیره‌ی گرمای نهان عبارتست از جذب و آزاد کردن حرارت هنگامی که یک ماده‌ی ذخیره کننده از یک فاز به فاز دیگر در دمای تقریبا ثابت تغییر حالت می‌دهد. در ذخیره‌سازی به صورت گرمای نهان، از مواد تغییر فازدهنده استفاده می‌شود. با بررسی‌های انجام گرفته، ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان، کارآمدترین روش ذخیره‌ی انرژی گرمایی است (Pielichowska and Pielichowski, 2014). در پژوهشی تاثیر مقدار ذوب شدن و ضخامت مواد تغییر فاز دهنده[1] (PCM) بر روی پراکندگی دمایی در مواد تغییرفازدهنده بررسی شد. نتایج نشان داد زمان ذوب شدن به صورت خطی با مقدار PCM تغییر کرده و با کاهش ضخامت PCM عملکرد سامانه افزایش می‌یابد (Rostamizadeh *et al*.,2012). از مواد تغییر فاز دهنده در جمع کننده‌های خورشیدی نیز استفاده شده و از طریق آن برای خشک کردن محصول و یا آب شیرین‌کن استفاده می‌شود. در جمع کننده‌ها PCM به صورت لایه‌ای، ورقه‌ای، استوانه‌ای یا کروی استفاده می‌گردد، که در هر کدام گرمای نهان باعث می‌شود مجموع انرژی‌گیری بهبود یابد. یک کار شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم افزار فلوئنت در کشور تونس بر روی جمع‌کننده سهموی انجام شد که طی آن جهت افزایش بهره‌وری در هنگام شب برای ذخیره‌سازی حرارتی، PCM در جمع‌کننده قرار داده شد. در این سامانه مخزن آب با استفاده از لایه‌ایی از PCM پوشش داده شد (Chaabane *et al*., 2014). در کشور چین پژوهشی انجام شد، که در آن

[1] Phase change materials

به مطالعه مخازن ذخیره حرارتی خورشیدی مجهز به جمع‌کننده سهموی که مجهز به کره‌های حاوی PCM پرداخته شده بود. در این مطالعه از سه نوع PCM مختلف استفاده شد. ظروف کروی از پلی‌کربنات ساخته شده و مواد PCM استفاده شده در درون کره‌ها دارای سه نقطه ذوب متفاوت بودند. با استفاده از این تجهیزات، بهره‌وری سامانه به طور قابل توجهی افزایش یافت (Yang *et al*., 2014). در پژوهشی که بر روی آب‌شیرین‌کن مجهز به جمع‌کننده خورشیدی و PCM انجام شد، نتایج نشان داد به دلیل مقدار زیاد PCM موجود در سامانه، درجه حرارت آب شور برای مدت زمان طولانی افزایش می‌یابد. این عامل بر روی بهره‌وری سامانه اثرگذار بوده و آب گرم درون سامانه در هنگام نبود خورشید (بعد از غروب خورشید) می‌تواند برای اهداف گرمایشی بخصوص در محل‌های سرد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ضریب انتقال حرارت به صورت کلی از ۱۰/۴ به ۲/۶ $W/m^2.K$ افت پیدا کرده و عملکرد سامانه بهبود پیدا کرد (Abu-Arabi *et al*., 2018).

همان‌گونه که اشاره شد، یکی دیگر از کاربردهای جمع کننده‌های سهموی در آب شیرین‌کن‌ها می‌باشد. در این سامانه‌ها نیز از PCM استفاده گردیده است تا بتوان راندمان حرارتی و به تبع آن آب تولیدی را افزایش داد. به عبارت دیگر به دلیل تعادل بین گرماگیری و گرمادهی سامانه کارایی بهبود یافت. علاوه بر آن سطح اشغال شده و مصرف انرژی زیاد (Duong *et al*., 2015) و بالا بودن دوره بازگشت سرمایه از نظر اقتصادی از ایرادات آب شیرین‌کن های خورشیدی است (Reif and Alhalabi, 2015). نتایج پژوهشی که در آب شیرین‌کن از PCM استفاده شده بود، نشان داد که این مواد سبب افزایش بهره‌وری تجمعی و افزایش ساعات کار سامانه می‌گردد. میزان بهره‌وری تجمعی در انتهای روز ۶/۳ لیتر و بیشترین مقدار بهره‌وری در ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ مشاهده گردید (Rehman *et al*., 2018). علاوه بر آن در برخی موارد به مواد تغییر فاز دهنده نانو ذراتی اضافه می‌گردد که باعث می‌گردد فرآیند ذخیره‌سازی بهبود یابد. در مطالعه‌ای دیگر، تغییرات بازده حرارتی در یک جمع‌کننده سهموی همراه با لوله تخلیه شده حاوی نانو PCM و باله‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر افزودن نانوذرات مس به موم پارافین بر عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت در طی فرآیند ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent شبیه‌سازی شده و داده‌های خروجی به صورت کانتورهای حرارتی ترسیم شدند. ویژگی‌های تغییر فاز جامد– مایع پارافین در سامانه و بهینه‌سازی پارامترهای باله (ضخامت باله و فاصله باله‌ها) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن باله‌ها تأثیر زیادی بر انتقال حرارت و تغییر فاز پارافین در سامانه داشت. همچنین اشاره شد که PCM با نازک‌تر شدن ضخامت باله‌ها سریع‌تر ذوب می‌شود. افزودن ۱ درصد مس به PCM، غلظت جرمی بهینه‌ای است که در آن دمای خروجی سیال-کاری به میزان ۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد (Elarem *et al*., 2021).

همان‌طور که اشاره شد در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی برای گرفتن انرژی حرارتی از خورشید از جمع‌کننده‌های مختلفی استفاده می‌گردد. یکی از رایج‌ترین جمع‌کننده‌ها، نوع سهموی می‌باشد. این جمع‌کننده‌ها به دلیل طراحی آسان، بازده نسبتا مناسب، قیمت مناسب و سطح اشغال کمتر، بیشتر مورد توجه بوده و محققان سعی در بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها دارند (Motevali, 2013). تا کنون فناوری‌های زیادی برای بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از انواع نانوسیال‌ها، تعقیب کننده‌های خورشیدی دقیق، لوله تحت خلا به عنوان دریافت کننده و منعکس کننده ثانویه اشاره نمود. یکی از منابع اتلاف انرژی در جمع‌کننده‌های سهموی شکل مربوط به لوله دریافت کننده است. مقداری از انرژی خورشیدی که به خط کانونی جمع‌کننده منعکس می‌شود، به علت خصوصیات ناسازگار سیال‌کاری، از لوله گیرنده تلف شده و از دسترس خارج می‌شود. استفاده از سیال مناسب با ماده تغییرفازدهنده مناسب یک روش کارآمد برای رفع مشکل ذکر شده است. یکی دیگر از عواملی که می‌تواند باعث بهبود کارایی سامانه آب شیرین کن خورشیدی گردد، استفاده از سامانه تعقیب کننده دقیق و منطبق بر حداکثر تابش خورشیدی است. در پژوهشی تاثیر سامانه تعقیب‌کننده بر روی جمع‌کننده سهموی به صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد میزان انرژی دریافت شده از خورشید به میزان ۴۶/۴۶٪ با استفاده از سامانه ردیاب خورشیدی دو محوره افزایش می‌یابد (Bakos, 2006). در مطالعه‌ای اثر شکل جمع‌کننده بر بازده حرارتی آن به‌ویژه برای آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند، که جمع‌کننده‌های سهموی به دلیل قالب نه‌چندان پیچیده، بالا بودن بازده و همچنین مقرون به‌صرفه بودن نسبت به جمع‌کننده‌های دیگر بسیار موثر و مفید هستند (Abdessemed *et al*., 2018).

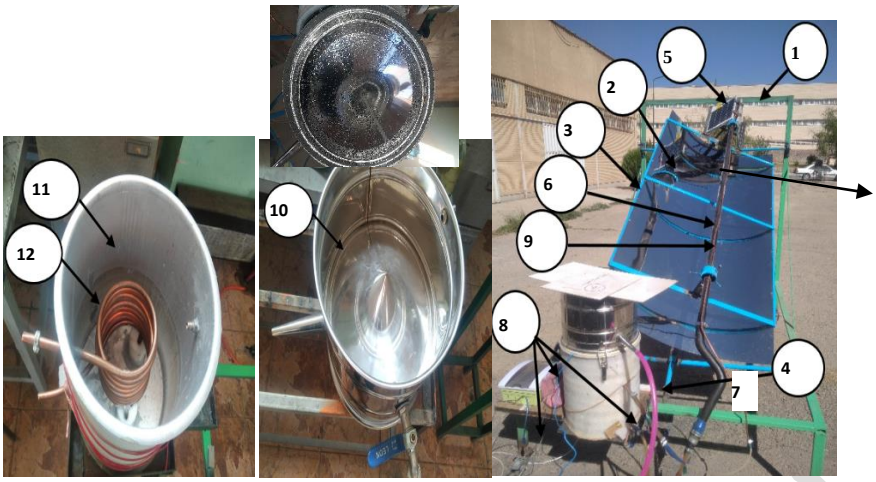
علاوه بر آن پژوهش‌هایی نیز در زمینه تاثیر استفاده از سیال‌کاری مختلف بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی سهموی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که انرژی حرارتی ورودی به سامانه برای نانوسیال، روغن، گلیسرین و آب به عنوان سیال کاری در سامانه به ترتیب حدود MJ ۱۷/۳۶، MJ ۱۸/۴۶، MJ ۱۷/۷۶ و MJ ۱۶/۸۰ بود. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی به روشCFD نشان داد که روشCFD میتواند عملکرد سامانه را با سیالات‌کاری مختلف با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Alimohammadi *et al*.,2020). استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی (مخزن، سیال و مواد تغییرفازدهنده) با افزایش تابش خورشیدی در روزهای آزمایش، اثر دیگری است که می‌تواند میزان ذخیره انرژی افزایش دهد. برخی از مواد (مایع یا سیال+ جامد) مانند روغن هیدرولیک، ceo_2 / آب، Al_2O_3 / نانو سیال روغن مصنوعی، Cu، Al_2O_3/روغن ، TiO_2 و Fe_3O_4–آب به عنوان سیال-های کاری می‌باشند که در جمع‌کننده‌های خورشیدی استفاده می‌شوند و از بین موارد ذکر شده سیالی که افزایش عملکرد جمع‌کننده می‌شود، آب است. در یک آزمایش که جهت مقایسه عملکرد سامانه با استفاده از سیال‌کاری بررسی شد، نتایج به دست آمده از آنالیز راندمان با استفاده از روش CFD نشان دهنده آن بودکه بکارگیری آب به عنوان سیال‌کاری، تلفات کمتری در دماهای بالای دارد (Kumar *et al*., 2016).

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های آب‌شیرین‌کن مشکلاتی از قبیل اقتصادی نبودن سامانه، پیچیدگی‌های بیش‌از حد، عدم دسترسی به منابع انرژی، بازده کم، بزرگ بودن سامانه و اشغال فضای زیاد می‌باشند. این موارد باعث می‌گردد، تمایل به استفاده از سامانه‌های خورشیدی کاهش یابد. در تحقیق حاضر برای افزایش کارایی سامانه از یک لوله مارپیچ حاوی مواد تغییر فاز دهنده درون لوله دریافت کننده استفاده شد. به عبارت دیگر حالت مارپیچ و مواد تغییرفازدهنده به طور همزمان باعث متعادل نمودن گرماگیری و گرمادهی در لوله شده و راندمان را تا حد قابل بهبود دهد. به دلیل حذف ناهماهنگی‌های جذب و آزادسازی و حفظ تعادل حرارتی سامانه عملکرد سامانه بهبود پیدا می‌کند. علاوه بر آن برای دنبال کردن تشعشعات خورشیدی به طور دقیق از یک سامانه تعقیب کننده خورشیدی که شامل سلول‌های خورشیدی کوچک هستند استفاده می-گردد. در این حالت نیز به دلیل استفاده بهینه از تشعشع خورشیدی بازده حرارتی سامانه بهبود خواهد یافت. با توجه به تحقیقات پیشین چنین مطالعه‌ای با لحاظ نمودن سامانه آب شیرین‌کن قبلا انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

شرح دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه کردستان طراحی و ساخته شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن انجام گرفت. اجزای دستگاه عبارتند از: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC جهت ایجاد جریان آب در لوله گیرنده، ۵- تعقیب‌کننده خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سردساز، ۱۱- مخزن سیال، ۱۲- لوله مارپیچ درون مخزن می‌باشد. منعکس‌کننده سهموی خطی دارای یک ورقه استیل با دهانه سهموی می‌باشد که در طول جمع‌کننده امتداد یافته است و از یک محافظ آهنی به عنوان قابی برای منعکس‌کننده در نظر گرفته شد. سامانه مورد نظر از یک جمع‌کننده سهموی با پایه‌های فلزی و موتور محرک و سامانه ردیاب خورشیدی ساخته شده است. اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. اجزای اصلی سامانه آب شیرین‌کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش شامل ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC، ۵- ردیاب خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سرد کننده، ۱۱- مخزن سیال، ۱۲- لوله مارپیچ درون مخزن

Fig. 1. The main components of the solar water desalination system used in the research including 1- Device base, 2- Linear parabolic reflector, 3- Steel frame, 4- DC pump, 5- Solar tracker, 6- Absorber tube, 7- Fluid transfer tubes, 8- Sensors , 9- Copper tube containing PCM, 10- Cooling unit, 11- Fluid tank, 12- Spiral pipe inside the tank

دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

اجزای مختلف سامانه آب‌شیرین‌کن همراه با متعلقات و جزئیات آن شامل نوع، جنس، اندازه و ویژگی هر جزء در جدول۱ لیست شده است. ابتدا اجزای اصلی تشکیل دهنده سامانه آب شیرین‌کن و سپس زیر مجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود. کار اصلی جمع‌کننده، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انتقال آن به سیال عامل است که مهم‌ترین بخش هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. از ورق استیل براق ضدزنگ صیقل، به عنوان بازتاباننده (آینه) جمع‌کننده سهموی استفاده شد. قابل ذکر است که جمع‌کننده سهموی یک آینه سهموی شکل است که در کانون آن یک لوله جاذب قرار دارد. نور خورشید با استفاده از آینه بر روی لوله دریافت کننده متمرکز شده و به سیال عامل انتقال می‌یابد.

جدول ۱. جزئیات جمع‌کننده سهموی و سامانه آب شیرین‌کن

Table 1. Components details of the solar collector and desalination system

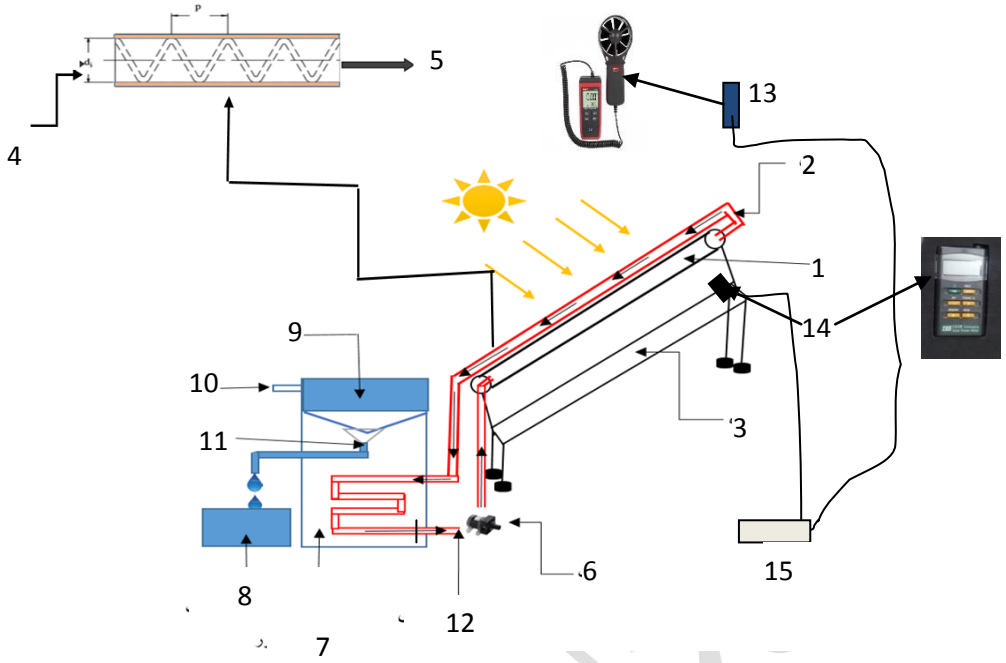
سیستم اصلی **Base system**	توصیفات اجزا **Description of element**	جزئیات زیر مجموعه اجزا **Details of sub element**
Solar collector	Parabolic trough collector	Reflector: Stainless steel (Area: 1500×900 mm^2, thickness: 1mm) with the reflection coefficient of 0.91, absorption coefficient of 0.1 and concentration factor of 25. Inclination angle was 45^o in north-south.
	Receiving element	A 30 mm copper tube, 1mm thickness
Desalination system	Tank	An Aluminium tank, with diameter of 300mm and height of 500 mm, covered by 40 mm thick of glasswool (for insulation)
	Spiral PCM tube	A copper tube with 1 mm thickness, 6 turn and 10 mm pitch, located at the middle of the tank by 100mm distance from the bottom.
	Working fluid	Nanofluid (Water + Al_2O_3, 3.75%)
	Fluid pump	DC 12 volt, Max. 10 Ampere, 5.9 lit/min, Model (NM, 32-60-180)
	Distillation system	A 0.5 mm thickness steel, with a conical water collector and capacity of 10 liter.
Tracking mechanism	Elecetromotor	A DC electromotor, 12 V, 40 rpm, Model: JSX69-370, China.
	Gear box	A 1:80 Gearbox, Model: 2363-75-China
	Detectors	Two 10 Watt PV, Monocrystal, RT010-M, Restar solar Co, Made by PRC
	Controling circuit	An arduino, 36Lenovo Z500-laptop
	PV Panel	10W, YL 10C-18b, Module efficency: 17.4%, Current at P_{max}: 0.56A

در این مطالعه هدف ذخیره کردن انرژی بوده و در عین حال سعی بر آن است که دمای درون مخزن ذخیره کننده بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد. در نتیجه از آب به عنوان سیال ذخیره کننده و انتقال دهنده انرژی در سامانه استفاده شد. لوله جاذب جمع‌کننده‌ه سهموی برای جذب حداکثری و انتشار حداقل انرژی خورشیدی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. در درون لوله جاذب، لوله مسی با گام ۷ سانتی‌متر حاوی PCM قرار داده شد. ظرفیت مخزن آب شور که برای عمل تقطیر استفاده شد، ۷ لیتر بود. برای توزیع مناسب گرما درون مخزن تقطیر و امکان تقطیر حداکثری از سنگریزه‌ها استفاده گردید. در این حالت با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب ($J.g^{-1}.^{o}C^{-1}$ ۴/۱۹۲) که مقدار آن از ظرفیت گرمایی ویژه سنگریزه ($J.g^{-1}.^{o}C^{-1}$ ۰/۷۸۲) بیشتر است، امکان گرمایش سامانه در مدت زمان کم به دلیل افزایش مساحت درگیر با سیال افزایش پیدا می‌کند (Nasri *et al.*, 2019). در مرکز مخزن یک لوله فنری تعبیه شده است و برای ورود و خروج این لوله فنری مارپیچی، دو دریچه بر روی بدنه مخزن قرار گرفته است. برای جلوگیری از تلفات حرارتی، اطراف مخزن با عایق به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس فوم پوشش داده شد. در ورودی جمع‌کننده یک پمپ سیال ۱۲ ولت دی سی قرار گرفته است. برای تهیه آب شور، با توجه به اینکه درصد نمک آب شور دریا ۱۵ گرم در هزار است، به میزان ۱۵ گرم نمک بلورین (نمک دریا) در یک لیتر آب شرب معمولی حل گردیده و به مقدار مورد نیاز در سامانه قرار داده شد.

توضیح روند کارکرد سامانه

مهم‌ترین قسمت یک سامانه حرارتی خورشیدی، جمع‌کننده آن می‌باشد و در جمع‌کننده سهموی لوله دریافت کننده (۱) نقش مهمی در بازده حرارتی جمع‌کننده دارد. استفاده از بخش ذخیره کننده‌ی انرژی باعث می‌گردد که انرژی حرارتی در ساعات اوج تابش در آن ذخیره شده و در هنگام کاهش تابش خورشیدی آزاد گردد. هندسه سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. سیال جریان یافته (۴) در درون لوله مارپیچ داخل مخزن به وسیله پمپ به داخل لوله‌ی جاذب جمع‌کننده سهموی وارد می‌شود. همان‌طور که اشاره شد درون لوله جاذب یا لوله دریافت کننده، یک لوله مسی مارپیچ با گام ۷ سانتی‌متر قرار دارد، که حاوی پارافین است. با تابش نور خورشید، آینه سهموی (۳) تابش خورشید را روی لوله دریافت کننده منعکس کرده و باعث گرم شدن آب درون لوله جاذب می‌گردد. بخشی از این انرژی حرارتی توسط لوله PCM که در درون لوله جاذب قرار گرفته، جذب شده و بخش دیگر باعث گرم شدن سیال‌کاری جریان یافته از لوله جاذب می‌گردد. آب‌گرم شده به وسیله پمپ (۶) از طریق مجاری جریان سیال (۲) به درون لوله مارپیچ داخل مخزن (۷) می‌رود و سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود و سپس آب از طریق خروجی لوله مارپیچ به درون لوله جاذب جریان پیدا می‌کند. در واقع مسیر جریان سیال‌کاری (آب) یک فرآیند بسته است که سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود.

فرآیند سردسازی با استفاده از یک منبع (۹) که در قسمت فوقانی مخزن تقطیر (۷) قرار گرفته انجام می‌شود. در این حالت قطرات بخار درون مخزن به سطح زیرین مخزن سردساز (که به صورت یک قیف معکوس است) برخورد کرده و عمل میعان صورت می‌گیرد. قطرات ایجاد شده در واحد سردساز با توجه به هندسه شیبدار، به سمت نوک قیف (۱۱) حرکت نموده و از لوله خروجی به شیشه آب (۸) انتقال داده می‌شود. آب گرم خارج شده (۱۰) از قسمت سرد ساز می‌تواند به عنوان ورودی مخزن که پیش‌گرمایش در آن انجام شده مورد استفاده در سامانه قرار گیرد. فرآیند شیرین-سازی آب شور در سامانه آنقدر ادامه می‌یابد تا بتوان به میزان آب شیرین تولیدی قابل توجه درون سامانه دست پیدا کرد. قابل ذکر است به دلیل استفاده از PCM در سامانه خورشیدی در هنگام نبود تابش خورشید نیز می‌توان از سامانه استفاده کرد و همین امر سبب افزایش بازده سامانه می-گردد. شماتیک اجزای اشاره شده به همراه بادسنج(۱۳) و پیرانومتر (۱۴) و ثبت کننده داده (۱۶) در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. شماتیک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با جزئیات شامل: ۱- لوله جاذب، ۲- خروجی سیال، ۳- منعکس کننده، ۴-ورودی سیال کاری، ۵- خروجی سیال کاری، ۶- پمپ، ۷- مخزن آب شور، ۸- آب شیرین، ۹- واحد سردساز ، ۱۰- ورودی آب سرد، ۱۱- جریان بخار، ۱۲- ورودی سیال کاری به پمپ، ۱۳- بادسنج، ۱۴- پیرانومتر، ۱۵- دیتالاگر

Fig. 2. Schematic of solar desalination with details including: 1- Absorber tube, 2- Fluid outlet, 3- Reflector, 4- Working fluid inlet, 5- Working fluid outlet, 6- Pump, 7- Salt water tank, 8- Outlet drinkable water, 9- Chiller unit, 10-Cold water inlet, 11-Steam flow, 12-Working fluid inlet to the pump, 13-Anemometer, 14-pyranometer, 15-Datalogger

ماده تغییرفازدهنده و نحوه قرارگیری آن درون لوله مارپیچ

تغییرفازدهنده‌ی بکارگرفته در این آزمایش پارافین وکس ساخت شرکت ایران پارافین به مقدار ۱۷۱ گرم می‌باشد. مواد تغییرفازدهنده، که تغییر فاز آنها حالت جامد به مایع است، بیشترین استفاده را در مقایسه با دیگر PCM ها دارند. زیرا در یک بازه کوتاه زمانی، مقدار انرژی حرارتی زیادی ذخیره می‌کند. در این تحقیق نیز به دلیل خواص منحصر به فرد نظیر عدم فساد، نقطه ذوب پایین، ضریب انتقال حرارت، ظرفیت گرمای ویژه بالا و در دسترس بودن از پارافین استفاده گردید. پارافین RT50 درون لوله مسی با قطر ۶ میلی‌متر و با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر با گام ۷۰ میلی‌متر در طول ۲۰۰۰ میلی‌متر ریخته شده و سپس داخل دریافت کننده مرکزی قرار گرفت. خواص ترمو-فیزیکی پارافین در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خواص پارافین واکس مورد استفاده به عنوان PCM داخل جمع کننده

Table 2. Properties of paraffin wax used as PCM inside the collector

ویژگی property	دمای حالت مایع Liquid temperature (K)	چگالی Density ($kg.m^{-3}$)	ضریب انبساط حجمی volumetric expansion Coefficient($1.K^{-1}$)	گرمای نهان Latant heat ($kJ.kg^{-1}$)	هدایت حرارتی Thermal conductivity ($W.m^{-1}K^{-1}$)	گرمای ویژه Specific heat ($kJ.kg^{-1}K^{-1}$)	دمای حالت جامد Solid temperature(K)
مقدار Value	325	783	0.000561	166	0.2	2.1	317.3

سامانه تعقیب کننده تابش خورشیدی پنلی

استفاده از سامانه تعقیب کننده خورشیدی مناسب، یکی از روش‌های مهم در افزایش راندمان دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. این سامانه دارای دو عدد پنل خورشیدی مدل RT010M است که با زاویه ۴۵ درجه در قسمت بالای لوله جاذب جمع‌کننده سهموی قرار گرفته است. با تغییر زاویه تابش خورشید در طول ساعات روز، سامانه تعقیب‌کننده خورشید جمع‌کننده را ملزم به تغییر زاویه به موازات خورشید می‌کند. در طول روز، زاویه تابش خورشید باید بر سطح جمع‌کننده عمود قرار گیرد تا بیشترین راندمان سامانه به دست آید. در سامانه تعقیب‌کننده، جریان عبوری از پنل خورشیدی به برد آردوینو-36Lenovo Z500 انتقال و سپس به موتور محرک جمع‌کننده فرمان داده و به ازای هر بارکه پنل‌ها تابش خورشید را

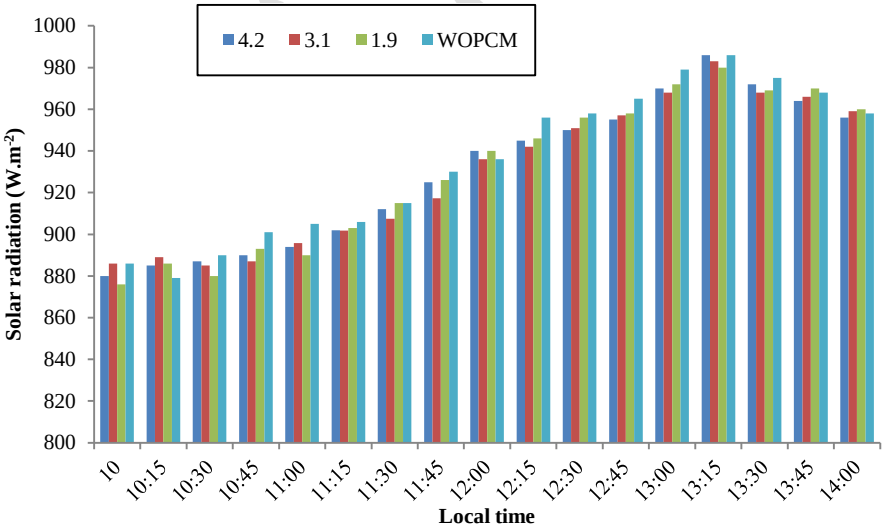
حس می‌کند و اختلاف بین دو خروجی پنل به وجود می‌آید، الکتروموتور قرار داده شده بر روی محور جمع‌کننده سهموی فعال شده و جمع‌کننده را در جهت تابش خورشید تغییر مکان می‌دهد. با استفاده از یک الکتروموتور جریان مستقیم ۱۲ ولت گیربکس‌دار محور جمع‌کننده به کار می‌افتد.

حس‌گرها و ابزارهای اندازه‌گیری

به منظور ثبت دما در نقاط مختلف سامانه از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شد. یکی از ترموکوپل‌ها در داخل مخزن آب شور و دیگری بر روی مبدل مارپیچ قرار داده شد. هم چنین دو حس‌گر دما در خروجی و ورودی جمع‌کننده و یک حس‌گر برای ثبت دمای محیط، در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوای محیط از بادسنج (UNI-T-363, China) با دقت ۰/۱ $m.s^{-1}$ استفاده شد. برای سنجش رطوبت محیط از رطوبت-سنج (HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۱٪ استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از پیرانومتر دیجیتالی (TES 1333R, CMP6, Taiwan) با دقت ۱ $W.m^{-2}$ استفاده شد. در طی چهار روز آزمایش، آب خروجی از آزمایش در صبح روز بعد به وسیله ترازوی دیجیتال AND مدل FX-3000GD به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن می‌شد.

داده‌های محیطی

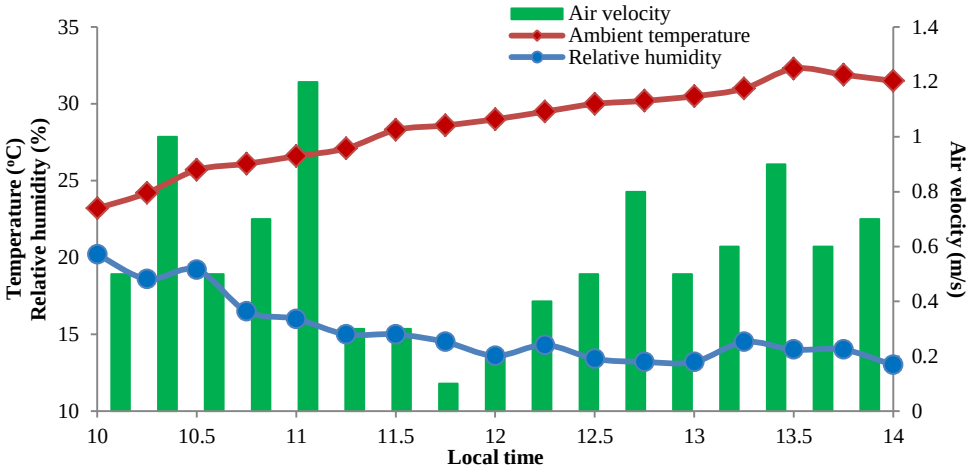
تغییرات شدت تابش خورشید به سطح جمع‌کننده در روزهای آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. متوسط تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۱۰:۰۰ افزایش یافته و در حدود ساعت ۱۳:۰۰ تا ۱۳:۳۰ به حداکثر میزان خود (۹۸۰ وات بر متر مربع) می‌رسد. پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد. با توجه به تغییرات نمودار شدت تابش خورشیدی مشخص می‌شود که زمان مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی باید زمانی در نظر گرفته شود که شدت تابش خورشید بیشینه است. این حالت می‌تواند از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که در روزهای آزمایش شرایط محیطی مناسب و آسمان صاف بود.



شکل ٤. تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول روزهای آزمایش در مقابل زمان به وقت محلی

Fig. 4. Changes in solar radiation intensity during the test days versus time to local time

میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی در طول روزهای آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی در جو زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده‌های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا رخ می‌دهد و باعث افزایش دمای هوا می‌شود. با افزایش میزان گرد و خاک و آلاینده‌های محیطی این افزایش دما بیشتر خواهد بود (Rehman and Mohandes, 2008). اما با افزایش شدت تابش خورشیدی، در اثر تبخیر مولکول‌های آب (بین مولکول‌های هوا) رطوبت نسبی (RH) به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (Rehman and Mohandes, 2008). همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، دمای هوای محیطی از ۲۳/۳ به ۳۲/۳ درجه سلسیوس و RH از ۲۰/۲ درصد تا ۱۳ درصد تغییر می‌کند. علاوه بر آن میزان تغییرات سرعت باد محیط بین ۰/۱ تا ۱/۲ متر بر ثانیه متغیر است و این تغییرات در طول روزهای آزمایش محسوس نبوده است.



شکل ۵. روند تغییرات دما، رطوبت و سرعت هوای محیط در طول ساعات داده‌گیری

Fig. 5. Changes in temperature, humidity and ambient air velocity during the hours of data collection

محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع کننده با سامانه ذخیره‌ساز انرژی

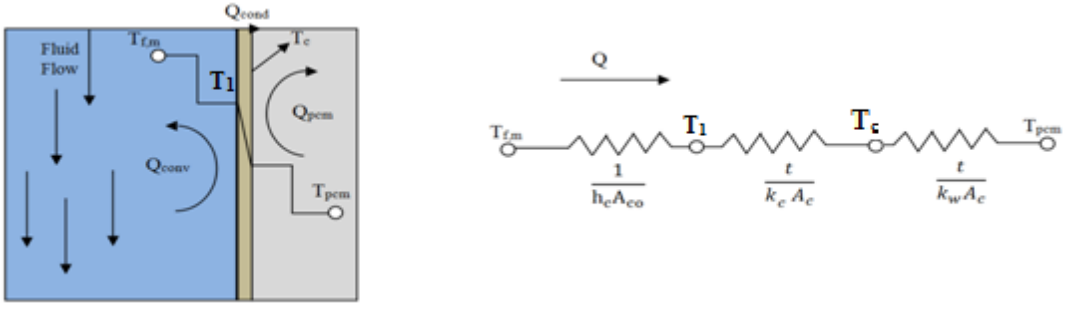
بخش عمده انرژی خورشیدی دریافتی از جمع‌کننده، تلف شده و انرژی باقیمانده به صورت انرژی گرمایی مفید می‌تواند با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شود:($(\tau\alpha)$ فاکتور جذب انرژی خورشیدی است)

$$\dot{Q}_u = A_c F_R \left([I_o(\tau\alpha)] - U_L (T_i - T_o)\right) \quad (۲)$$

بازده گرمایی جمع کننده مطابق با ASHRAE standard 2003 با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید (Eltawil *et al.*, 2018):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_C I_o} = \frac{\dot{m} c_p (T_{oi} - T)}{A_C I_o} \quad (۳)$$

سیستم ذخیره سازی شامل لوله مسی است که داخل لوله دریافت کننده قرار گرفته و با موم پارافین پر شده است. در جریان ذخیره‌سازی انرژی (شارژ)، زمانی که شدت تابش در سطح بالایی قرار دارد، سیال گرم شده و پارافین به حالت جامد در داخل لوله مارپیچ از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی که شدت تابش خورشیدی در سطح پائینی است، دمای سیال داخل جمع‌کننده کمتر از دمای محیط است. بنابراین تغییر فاز بالعکس شده و پارافین انرژی گرمایی را به سیال جریان یافته در در داخل لوله جمع‌کننده و محفظه تقطیر کننده منتقل می‌نماید. انرژی جذب شده توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله‌های مسی به عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع کننده سهموی، شامل سیال، دیواره و PCM که به عنوان سیستم ذخیره سازی به کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی جمع‌کننده می باشد. شکل ۳ انرژی گرمایی جذب شده، که از سیال به دیواره مسی، از طریق همرفت منتقل شده و سپس از دیواره به پارافین هدایت شده است، را نشان می‌دهد (Esakkimuthu *et al.*, 2013). در این حالت دمای پارافین (PCM) افزایش یافته و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳. مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به عنوان ماده PCM

Fig 3. Heat transfer circuit for fluid, copper tube and paraffin as PCM material

میزان انرژی گرمایی منتقل شده از جمع‌کننده به سیال، می‌تواند با در نظر گرفتن دمای ورودی ($T_{f.in}$) و خروجی ($T_{f.out}$) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شود (Serale *et al.*, 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (۴)$$

شار گرمایی همرفتی از سیال با دمای بالاتر به پوشش دیواره PCM (Q_{conv}) به میانگین دمای سیال ($T_{f,m}$) و دمای پوشش ($T_{c,m}$) بستگی دارد:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m}) \quad (۵)$$

که در آن h_c به کمک رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$h_c = \frac{k}{d} Nu \quad (۶)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پرانتل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در جمع‌کننده لازم و ضروری هستند. Nu عدد ناسلت می‌باشد که مقدار آن برای این تحقیق با استفاده از رابطه ۷ قابل محاسبه است.

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \quad (۷)$$

در رابطه ۷، Re و Pr به ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل هستند. این اعداد با استفاده از رابطه ۸ و ۹ بیان می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (۸)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (۹)$$

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است (Koca *et al.*, 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (۱۰)$$

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره‌سازی و تخلیه رخ می‌دهد، انرژی مبادله‌پذیر کل با روابط ارائه شده در منبع (Goyal *et al.*, 1998) تعریف می‌شود.

بازده انرژی

نسبت انرژی مصرف شده برای تقطیر آب درون مخزن به کل انرژی مصرف شده سامانه آب‌شیرین‌کن در طول مسیر فرآیند شیرین‌سازی را نسبت انرژی مصرفی می‌گویند. انرژی مصرفی برای تبخیر آب از رابطه ۱۱ قابل محاسبه است (Morad *et al.*, 2018).

$$Q_w = h_{fg} \cdot m_{w,ev} \ , \ h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T - 273.16) \quad (۱۱)$$

که در آن $m_{w,ev}$ آب تبخیری (kg) و h_{fg} گرمای نهان تبخیر در هنگام تصفیه شدن ($kJ.kg^{-1}$) آب دمای نمک زدایی بر حسب کلوین می‌باشد.

بر این اساس بازده انرژی جمع‌کننده طبق استاندارد ASHRAE 2003 از رابطه ۱۲ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\eta' = \frac{Q_w}{A_c I_o} \quad (۱۲)$$

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن و تبخیر آب و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به گرمکن، برای تعیین بازدهی تبخیر آب، رابطه ۱۳ لحاظ می‌گردد (Mousa and Abu Arabi, 2012).

$$\eta_{des} = \frac{Q_w}{Q_f + E_{elc}} \quad (۱۳)$$

عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) محاسبه می‌گردد. SCE به صورت انرژی لازم برای تبخیر کردن یک کیلوگرم از آب تعریف می‌شود که به صورت رابطه ۱۴ مشخص می‌شود.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (۱۴)$$

تاریخ و محل انجام آزمایش

این پژوهش طی چهار آزمایش مجزا در ۴ روز متوالی ۲و ۳ و۴ و۵ شهریور ماه، سال ۱۴۰۱ برای سه دبی حجمی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه و حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده در آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه کردستان در شهر سنندج انجام شد. آزمایشات در شرایط مشابه

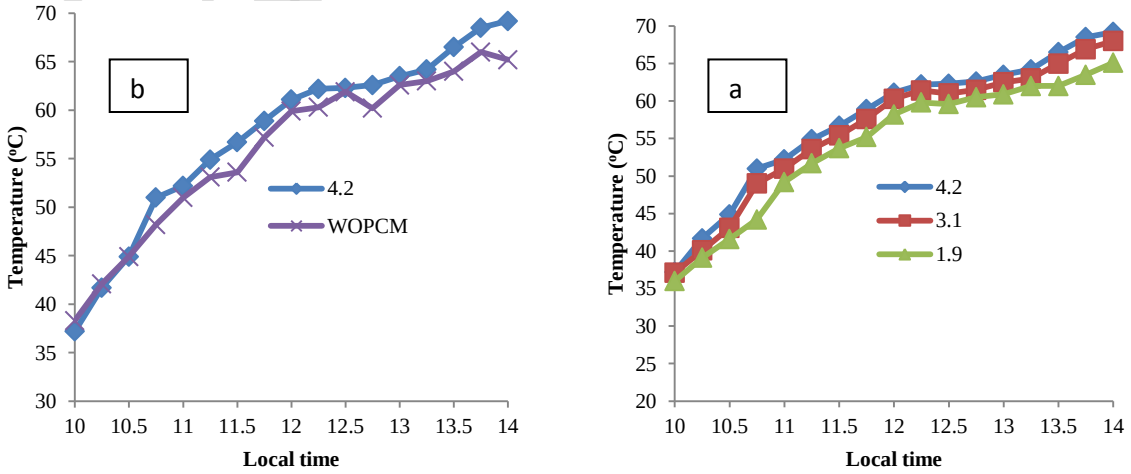
و از ساعت ۱۰:۰۰ آغاز و در ساعت ۱۴:۰۰ پایان یافته‌اند. لازم به ذکر است که در حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده دبی حجمی سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در این حالت پمپ در حداکثر دبی خود انتقال سیال را انجام می‌داد.

نتایج و بحث:

تغییرات حرارت در سامانه

در شکل ۶ (الف) دمای سیال در مخزن تقطیر با سه حالت از جریان سیال در داخل سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی نشان داده شده است. برای همه شرایط، مواد تغییرفاز در درون لوله جاذب حرارت قرار دارد. با توجه به شکل مشخص است که برای انواع جریان سیال، دمای سیال با تغییر شدت تابش تغییر می‌کند و نرخ گرمایش با افزایش و کاهش تابش به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با توجه به متغیر بودن سرعت جریان سیال در سامانه، میزان افزایش و کاهش دمای سیال متفاوت بوده است. در این تحقیق همان طور که اشاره شد از آب به عنوان سیال‌کاری (به دلیل ظرفیت گرمای بیشتر) استفاده گردید. لازم به ذکر است، سامانه حداقل به مدت یک ساعت قبل از شروع آزمایش و داده‌گیری در مقابل شرایط محیطی قرار داده می‌شد. در ساعات شروع داده‌برداری قسمتی از انرژی وارد شده به لوله دریافت کننده صرف گرم کردن مواد تغییرفازدهنده و لوله مارپیچ درون دریافت کننده شده و دمای ابتدایی سامانه را کاهش می‌دهد. بیشترین دمای آب شور برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه اتفاق می‌افتد. با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه، گرمای جذب شده توسط لوله جاذب سریعا به وسیله سیال به محفظه آب شور انتقال می‌یابد. بنابراین از افت حرارت در سامانه جلوگیری نموده و دمای آب شور افزایش می‌یابد. این در حالی است که با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه به دلیل سرعت کم، سیال کاری به کندی در سامانه جریان یافته و گرمای ورودی به میزان محدودی به آب شور انتقال داده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دبی جریان سیال گرمای بیشتری از جمع کننده خارج می‌شود (Godarzi *et al.*, 2014).

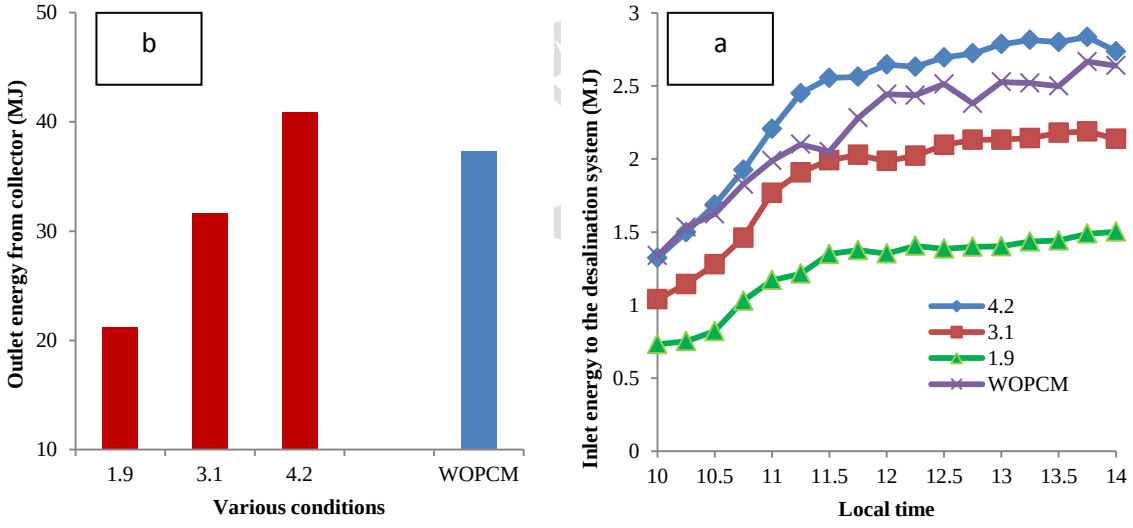
علاوه بر آن در شکل ۶ (ب) تغییرات دمای آب شور برای حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده در سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه نمایش داده شده است. با توجه نمودارها، مشخص است که در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده، دمای آب شور دارای نوسانات زیادی نسبت به حالت با مواد تغییر فاز دهنده است. در این حالت نوسانات حرارتی به وجود آمده از تابش خورشیدی به وسیله لوله مارپیچ حاوی مواد تغییر فاز دهنده جذب و یا آزاد شده بنابراین حرارت تولیدی متعادل می‌شود. علاوه بر آن دمای آب شور برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده کمتر از حالت با مواد تغییر فاز دهنده است. در این حالت به دلیل احتمال تماس بیشتر سیال‌کاری با سطح درونی لوله دریافت‌کننده عدد ناسلت افزایش یافته و به تبع آن جذب حرارت بهبود می‌یابد. تحقیقات در مورد ویژگی‌های حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی نتایج مشابه را گزارش کرده‌اند (Zhao *et al.*, 2009, Li *et al.*, 2016, Muñoz *et al.*, 2017, Jean *et al.*, 2015).



شکل ٦. الف) تغییرات دمای آب داخل محفظه تقطیر الف) برای شرایط مختلف از جریان سیال، ب) برای دوحالت با تغییرفازدهنده و بدون تغییرفازدهنده با جریان سیال ٤/٢ لیتر بر دقیقه

Fig. 6. a) Changes of water temperature inside the distillation chamber a) for different conditions of fluid flow, b) for two conditions with phase changer and without phase changer with fluid flow of 4.2 l/min

در شکل ۷ (الف) انرژی گرمایی وارد شده به مخزن از طریق جمع‌کننده سهموی برای سه نوع جریان سیال و برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده نشان داده شده است. برای هر سه دبی ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه لوله مارپیچ حاوی پارافین، درون لوله دریافت کننده انرژی خورشیدی قرار دارد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که روند تغییرات میزان انرژی حرارتی ورودی مانند دمای آب شور در سامانه متغیر بوده و با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد. میزان انرژی حرارتی از ساعات ابتدایی داده‌برداری افزایش یافته و پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی از ساعت ۱۳:۳۰ روند کاهشی به خود می‌گیرد. میزان دریافت انرژی حرارتی در حالی که دبی سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد، به صورت افزایشی می‌باشد. به این دلیل که با افزایش سرعت جریان سیال، انرژی حرارتی دریافت شده به وسیله لوله، از چرخه خارج شده و مستقیما وارد محفظه می‌گردد. در دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه، دمای سطح بیرونی لوله جاذب بیشتر از حالت‌هایی است که دبی سیال بیشتر است. در دبی‌های بالاتر دمای سطح بیرونی لوله با جریان بیشتر سیال‌کاری در درون لوله جاذب، کاهش یافته و حتی‌الامکان به آب شور درون محفظه انتقال می‌یابد. انرژی ورودی به مخزن برای دبی‌های ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه از ۱/۵۳ تا ۲/۸۳، ۱/۱۴ تا ۲/۱۸ و ۰/۷۳ تا ۱/۴۸ مگاژول تغییر می‌کند. علاوه بر آن در شکل ۷ (الف) تغییرات انرژی حرارتی ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در حالتی که لوله دریافت‌کننده بدون مواد تغییرفازدهنده است، نشان داده شده است. در این نمودار نیز مشخص است که در ساعات ابتدایی بخشی از انرژی حرارتی تولیدی صرف افزایش دمای مواد تغییر فاز دهنده می‌شود (تقریبا ۰/۰۳۸ مگاژول) اما پس از آن روند افزایشی به خود می‌گیرد. همچنین با توجه به نمودار، نوسانات انرژی حرارتی برای حالتی که سامانه بدون مواد تغییرفازدهنده کار می‌کند به دلیل عدم انرژی‌گیری و آزادسازی مداوم سامانه، بیشتر است (Alimohammadi *et al*., 2020, Muñoz *et al*., 2017, Jean *et al*., 2015). همچنین در شکل ۷ (ب) مجموع انرژی حرارتی خروجی از جمع‌کننده در شرایط مختلف از سامانه نشان داده شده است. میزان گرمای جذب شده توسط سامانه با افزایش دبی جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه از ۲۱/۲۶ تا ۴۰/۸۷ مگاژول افزایش می‌یابد. انرژی حرارتی برای سامانه با مواد تغییرفازدهنده بیشتر از حالت بدون مواد تغییرفازدهنده با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه است. انرژی حرارتی ورودی در این حالت ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.

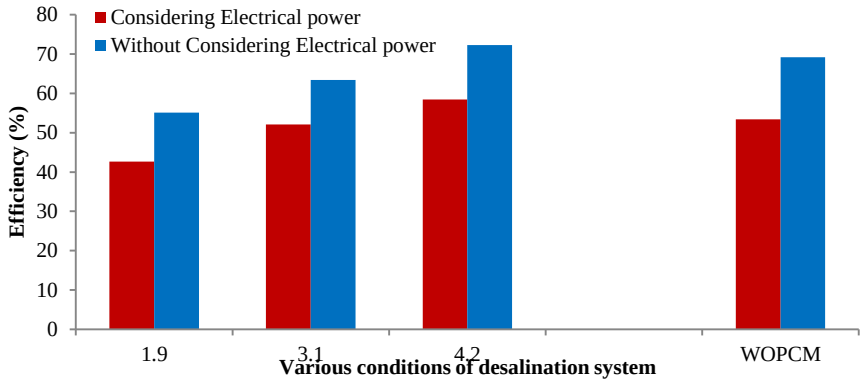


شکل ۷. الف) تغییرات انرژی حرارتی ورودی و ب) انرژی کل ورودی به محفظه آب شیرین‌کن خورشیدی برای دبی‌های مختلف از سیال کاری و حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده نسبت به زمان

Fig. 7. a) Variations of input thermal energy, b) total input energy to the solar water softener chamber for different flow rates of the working fluid and the state without phase-changing materials in relation to time.

یکی از عوامل مهمی که عملکرد مناسب یک سامانه خورشیدی را تعیین می‌کند، بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی است. تغییرات بازده و بهره‌وری انرژی گرمایی جمع‌کننده خورشیدی لوله سهموی، با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی که برای به جریان درآوردن سیال استفاده می‌گردد، در شکل ۸ نشان داده شده است. بازده حرارتی در هر دو حالت با افزایش جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه افزایش یافته و از ۴۲/۶۳

درصد به ۵۸/۴۲ درصد رسید. این مقادیر برای هر دبی سیال با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه کمتر است. در حالتی که دبی جریان سیال بیشینه است، توان الکتریکی بیشتری مورد مصرف قرار می‌گیرد، بنابراین بازده حرارتی نیز افت پیدا می‌کند. برای سامانه‌ای که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نشده است با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، بازده حرارتی در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی کمتر است (۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد). با توجه به اینکه در این تحقیق انرژی الکتریکی برای پمپ و الکتروموتور مصرف می‌گردد، در صورتی که انرژی حرارتی تولیدی در مقایسه با انرژی الکتریکی مصرفی کمتر باشد، بازده سامانه به شدت کاهش می‌یابد. به این دلیل بازده سامانه در همه حالت‌ها کمتر از شرایطی است که انرژی الکتریکی در نظر گرفته نشده است. در تحقیقات مشابه استفاده از نانو سیال باعث بهبود کارایی جمع‌کننده سهموی گردید (Khosravi *et al*., 2019; Alimohammadi *et al*., 2020). سایر محققان که از سامانه‌های خورشیدی برای تأمین انرژی گرمایی در آب-شیرین‌کن‌ها استفاده نموده‌اند، نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Lim *et al*., 2016, Cheng and Zhan, 2016).

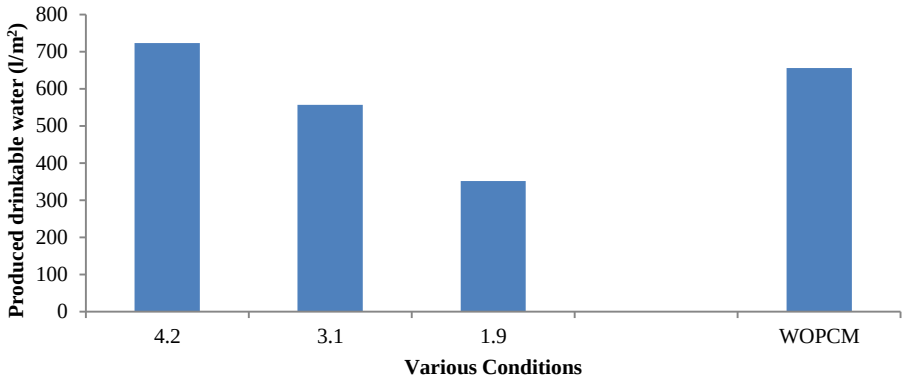


شکل ۸. تغییرات بازده جمع کننده خورشیدی با شرایط مختلف

Fig. 8. Solar collector efficiency changes with different conditions

میزان آب شیرین تولیدی

در شکل ۹ میزان آب تولیدی برای هر آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است جمع‌آوری آب از زمان شروع آزمایش و تا صبح روز بعد (قبل از شروع آزمایش بعدی) صورت می‌پذیرفت. با توجه به اینکه راندمان حرارتی برای دبی جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه بیشتر از دبی‌های دیگر بوده است، بنابراین میزان دریافت آب شیرین در این حالت نیز بیشترین میزان خواهد بود. آب تولیدی برای دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر متر مربع در چهار ساعت می‌باشد. مقدار آب تولیدی سامانه از ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ و به مدت ۴ ساعت می‌باشد. در صورتی که بتوان سامانه را از ساعت ۷:۰۰ (طلوع آفتاب) تا ساعت ۲۰:۰۰ (غروب آفتاب) بکار انداخت (حداقل به مدت ۱۰ ساعت)، میزان آب شیرین خروجی از سامانه نیز افزایش خواهد داشت. لازم به یادآوری است که برای حفظ مواد معدنی مفید، سعی گردید آب در دماهای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس بخار شود. همچنین در شکل ۹ میزان آب خروجی از سامانه هنگامی که لوله بدون مواد تغییرفازدهنده و دبی جریان سیال کاری ۴/۲ لیتر بر دقیقه است، نشان داده شده است. آب خروجی ۶۵۶ لیتر بر متر مربع است که با توجه به عدم وجود لوله مارپیچ با پارافین درون لوله جاذب گرما و کاهش عدد ناسلت، کمتر از حالت با مواد تغییر فاز دهنده است. این حالت باعث می‌شد که ضریب انتقال حرارت همرفت درون لوله دریافت کننده تابش خورشیدی کاهش یافته و انرژی از اطراف لوله تلف شود. بنابراین دمای سیال کاهش یافته و سرعت تبخیر کمتر شود.

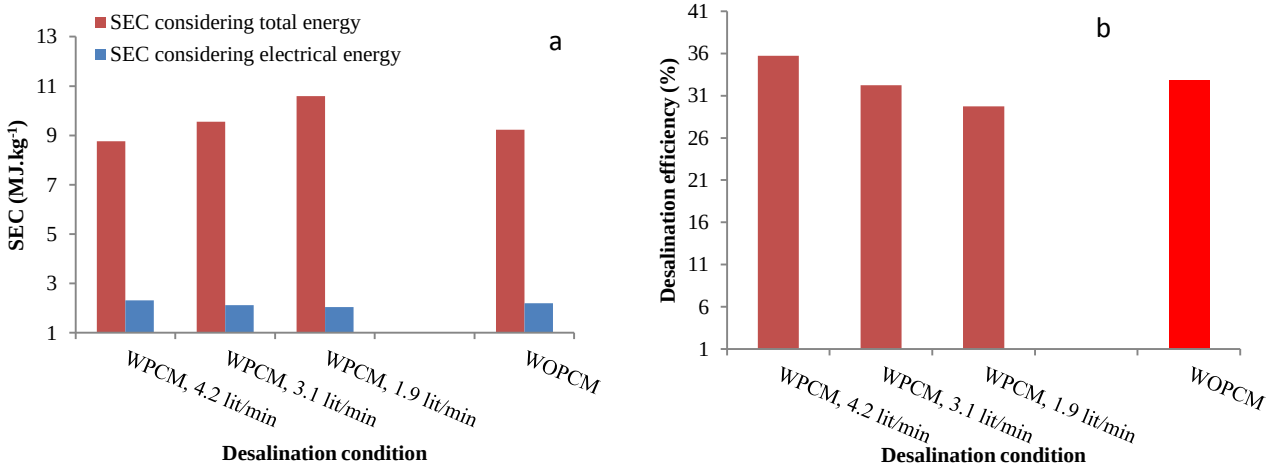


شکل ۹. میزان آب تولیدی در شرایط مختلف از سامانه آب شیرین‌کن خورشیدی

Fig. 9. Theamount of produced water at different conditions of the solar desalination system

بازده آب شیرین‌کن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که مصرف انرژی ویژه SEC و راندمان کلی دو پارامتر معروف برای این منظور هستند. با توجه به شکل ۱۰- الف، واضح است که SEC برای سیستم بدون PCM بیشتر از سایر موارد است و در حالت با ماده تغییر فازدهنده مقدار آن کاهش می‌یابد. به این معنی که با وجود PCM، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز برای تبخیر ۱ کیلوگرم آب، کاهش محسوسی می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت جریان سیال از ۱/۹ به ۴/۲ لیتر بر دقیقه در سامانه، SEC کاهش می‌یابد. اما در این حین میزان مصرف انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۱۰-الف تغییرات SEC را برای سامانه بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی جمع آوری شده توسط جمع‌کننده (به عنوان انرژی رایگان) برای بررسی تأثیر سایر منابع انرژی بر تبخیر شدن آب را نشان می‌دهد. در این حالت، برای شرایط مختلف تولید آب شیرین، مقادیر آن از ۲/۰۴ تا ۲/۳۵ مگاژول بر کیلوگرم تغییر می‌یابد. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده ۲/۲۰ مگاژول بر کیلوگرم حاصل شد. علاوه بر این، راندمان کلی سامانه تبخیر کننده با و بدون PCM در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. مطابق شکل، مشخص است که با افزایش سرعت جریان سیال، بازده تبخیر نمودن آب شور به دلیل کاهش زمان و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. در این حالت مصرف انرژی الکتریکی به وسیله پمپ (برای جریان سیال در سامانه تبخیر کننده و جمع‌کننده خورشیدی) و انرژی حرارتی ورودی کاهش می یابد. بیشترین بازده به میزان ۳۵/۷۲٪ و کمترین آن ۲۹/۷۰٪ به ترتیب برای دبی ۱/۹ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به دست آمد. بازده تبخیر نمودن آب شور توسط سامانه با استفاده از ماده تغییر فازدهنده به دلیل بیشتر بودن مجموع انرژی حرارتی ورودی به سامانه آب شیرین‌کن خورشیدی حداقل به میزان ۸/۱ درصد بهبود پیدا کرد. وجود ماده تغییر فاز دهنده باعث می‌شد، انرژی خروجی از جمع کننده خورشیدی به میزان ۹/۴۱ درصد افزایش یابد.



شکل ۱۰. الف). مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی خشک کردن خورشیدی سنجد در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییر فازدهنده

Fig 10. a). SEC values (considering electrical energy and total energy), b) overall solar drying efficiency of oleaster at different air flow conditions and phase change material distances

ارزیابی کیفی آب مقطر به دست آمده

برای ارزیابی کیفی آب مقطر حاصل از سامانه آب شیرین کن خورشیدی سهموی، نمونه به آزمایشگاه تخصصی آب و پساب آزمایشگاه مرکزی دانشگاه کردستان انتقال داده شد. نمونه‌های خارج شده از سامانه برای عدم اثرگذاری مواد بر روی کیفیت آب در درون ظرف شیشه‌ای تمیز در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند (شکل ۱۱).

شکل ۱۱. نمونه آب خروجی از سامانه آب‌شیرین کن خورشیدی برای کیفیت سنجی

Fig. 11. Sample of the water output from the solar water desalination system for quality measurement

در جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از ارزیابی نمونه در آزمایشگاه، نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مربوط به پارامترها می‌توان دریافت که میزان سختی و کل مواد جامد محلول در آب نمونه نسبت به آب شرب شهری به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌اند. علاوه بر آن میزان اسیدیته که یکی از مشخصات آب شرب می‌باشد از ۸/۸ به ۶/۹ رسیده است. از طرف دیگر استفاده از سامانه باعث کاهش عناصر مفید نیز گردیده است. این عناصر شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم هستند. میزان منیزیم مجاز برای آب شرب استاندارد بین ۱۰ تا ۲۵ میلی گرم بر لیتر است. آب تقطیر شده منیزیم کمتری نسبت به حد استاندارد دارد. مقادیر کلسیم با در نظر گرفتن سختی کل نیز بایستی کمتر ۲۰ میلی گرم بر لیتر باشد (Alwan *et al*., 2021). برای پتاسیم و سدیم مقادیر مجاز به ترتیب بین ۵ تا ۱۰ و ۱ تا ۳ میلی گرم بر لیتر می‌باشد (Yang *et al*., 2003; Khan *et al*., 2023). علاوه بر آن آب مقطر حاصل شده باعث حذف عنصر آهن به عنوان یک عنصر مضر در آب شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول ۳ می‌توان دریافت که آب نمونه با کاهش مواد جامد محلول و سختی می‌تواند برای مصرف به صورت شرب مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳. مقادیر مربوط به عناصر تشکیل دهنده برای آب حاصل از سامانه و آب شرب

Table 3. Values of constituent elements for sample water and drinking water

Element	مقدار کیفی یا کمی (میلی گرم بر لیتر) Quantity or Quality (mg/lit)		عناصر
	آب شرب خام Tap water	آب نمونه Sample water	
Calcium	17	6	کلسیم
Nitrates	1.7	0.3	نیترات
Iron	1.2	0	آهن
Total Hardness	550	10.17	سختی کل
Potassium	1.4	1.1	پتاسیم
Mangnesium	12	2.5	منیزیم
Sodium	3.6	0.1	سدیم
PH	8.8	6.9	اسیدیته
Salt	0.1	0	نمک

Total dissolved solids	465	76	کل مواد جامد محلول

کارایی استفاده از سامانه تعقیب کننده پنلی

همان طور که اشاره شد یکی از نوآوری‌های قابل توجهی که در این سامانه قرار داده شد، استفاده از سامانه تعقیب کننده پنلی بود. در این سامانه از دو پنل خورشیدی ۱۰ وات و یک مدار آردوینو استفاده گردید. در سامانه پیشین از حس‌گرهای فتوسل برای برآورده نمودن تعقیب خورشیدی استفاده شده بود. سامانه مذکور به دلیل عدم حساسیت قابل توجه و عدم واکنش پذیری در مقابل تغییرات اندک تابش خورشیدی در روزهای ابری راندمان حرارتی پایینی داشت. در شرایط مشابه متوسط راندمان حرارتی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ساعت ۱۴:۰۰ در سرعت جریان سیال، برای سامانه اولیه (با فتوسل) ۴۸/۵۶ درصد به دست آمده بود، این در حالی است که برای سامانه حاضر این راندمان ۵۸/۴۲ درصد حاصل شد. کوچک ترین انحراف از خط کانونی جمع کننده سهموی باعث افت حرارتی سامانه می‌گردد. بنابراین می‌توان دریافت استفاده از پنل‌های خورشیدی باعث بهبود کارایی حرارتی سامانه آب شیرین‌کن خورشیدی شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روند تغییرات حرارتی درون سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از PCM در سه دبی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه با لوله مارپیچ به گام ۷ سانتی‌متر پرداخته شده است. برای بهبود کارایی سیستم از سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی پنلی استفاده شد. نتایج زیر از این پژوهش به دست آمد:

- قرارگیری ماده تغییرفازدهنده در داخل لوله، باعث شد بازده حرارتی و کارایی سامانه نسبت به حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده بهبود یابد.
- دمای آب شور داخل لوله در حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاه نمی‌شود، بیشتر بود. یشترین دمای آب شور در حالت استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه می‌باشد.
- بیشترین انرژی حرارتی ورودی برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه با مقدار ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.
- بازده حرارتی سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، در حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده به ترتیب ۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد به دست آمد.
- مقدار تولیدی آب شیرین با دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر متر مربع در چهار ساعت به دست آمد.
- آب استحصال شده از سامانه دارای سختی کمتری نسبت به آب شرب معمولی بود. هر چند مواد آلی موجود در آن کاهش یافته بود.
- استفاده از سامانه تعقیب کننده پنلی باعث شد بازده حرارتی سامانه به میزان ۹/۸۶ درصد بهبود یابد.

منابع

Abdessemed, A., Bougriou, Ch., Guerraiche, D. &Abachi, R. (2018). Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renewable Energy*, 132, 1134-1140. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.074.

Abu-Arabi, M., Al-harahsheh, M., Mousa, H., & Alzghoul, Z. (2018). Theoretical investigation of solar desalination with solar still having phase change material and connected to a solar collector. *Desalination*, 448, 60-68. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.020

Alimohammadi Z., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2020). Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods. *Solar Energy*, 201, 157-177. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.079

Alwan, N.T., Shcheklein, S.E., & Ali, O.M. (2021). Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101216. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101216

Bakos, G.C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31, 2411-2421.https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008

Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2014). Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM). *Energy Conversion and Management*, 78, 897-903. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.089

Cheng, P., & Zhan, X. (2016). Stability of organic solar cells: challenges and strategies. *Chemical Society Reviews*, 45, 25442582. https://doi.org/10.1039/C5CS00593

Duong, H.C., Cooper, P., Nelemans, B., Cath, T.Y., Nghiem, L.D. (2015). Optimising thermal efficiency of direct contact membrane distillation by brine recycling for small-scale seawater desalination, *Desalination*, 374, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009

Edalati, S., Ameri, M., & Iranmanesh, M. (2015). Comparative performance investigation of mono-and poly-crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates. *Applied Energy*, 160, 255-265. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.064

Elarem , R., Alqahtani, T., Mellouli , S., Aich , W., Ben Khedher, N., Kolsi , L., & Jemni, A. (2021). Numerical study of an evacuated tube solar collector incorporating a nano-pcm as a latent heat storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 1000859. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100859

Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., & Alghannam, A.O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, 116, 594-605. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.007

Esakkimuthu, S., Hassabou, A.H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, 88, 144-153. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.006

Goudarzi, K., E. Shojaeizadeh, & Nejati, F. (2014). An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H_2O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 73, 1236-1243. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.067

Goyal, R.K., Tiwari, G.N., & Garg, H.P. (1998). Effect of thermal storage on the performance of an air collector: a periodic analysis. *Energy Conversion Management*, 39, 193–202. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9

Jean, J., Brown, P.R., Jaffe, R.L., Buonassisi, T., & Bulovic, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, 8, 1200–1219. https://doi.org/10.1039/C4EE04073B

Kalogirou, S. A. (2005). Use of artificial intelligence for the optimal design of solar systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 22, 90-103. https:// 10.1504/IJCAT.2005.006940

Khosravi, A., Malekan, M., & Assad, M.E.h. (2019). Numerical analysis of magnetic field effects on the heat transfer enhancement in ferrofluids for a parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, 134, 54-63. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.015

Khan Z.U., Moronshing, M., Shestakova, M., Al-Othman, A., Sillanpaa, M., Zhan, Z., Song, B., & Lei, Y. (2023). Electro-deionization (EDI) technology for enhanced water treatment and desalination: A review. *Desalination*, 548, 116254. https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116254

Koca, A., Oztopb, H.F., Koyunc, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33, 567–574. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012

Kumar, B. S., Vijayan, V., & Baskar, N. (2016). Burr dimension analysis on varic material for conventionally and CNC drilled holes. *Mechanical Engineering*, 20, 347-354.

Li, P., Li, J., Pei, G., Munir, A., & Ji, J. (2016). A cascade organic Rankine cycle power generation system using hybrid solar energy and liquefied natural gas. *Solar Energy*, 127, 136–146. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.029

Lim, E.L., Yap, C.C., Teridi, M.A.M., Teh, C.H., Mohd Yusoff, A.R., & Jumali, M.H.H. (2016). A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells. *Organic Electronics*, 36, 12–28. https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.029

Morad, M., El-Maghawry, H.A., & Wasfy, K.I. (2017). A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. *Solar Energy*, 146, 20-29. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002

Motevali, A. (2013). Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.], TarbiatModares University, Tehran, Iran.

Mousa, H., & Abu Arabi, M. (2012). Desalination and hot water Production using solar still enhanced dy external solar collector. *Desalination Water Treat*, 51, 1296-1301. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699237

Muñoz, M., Rovira, A., Sánchez, C., & Montes, M.J. (2017). Off-design analysis of a hybrid Rankine-brayton cycle used as the power block of a solar thermal power plant. *Energy*, 134, 369–381. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.014

Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., & Benatiallah, D. (2019). Improvement of glass solar still performance using locally available materials in the southern region of Algeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100213. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100213

Panchal, H., Patel, K., Elkelawy, M., & Bastawissi, H.A.E. (2019). A use of various phase change materials on the performance of solar still: a review. *International Jornal of Ambient Energy*, 125, 1-6. https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1594376

Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Material Science*, 65, 67-123. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

Rehman, H.M., Shakir, S., Razaq, A., Saqib, H., & Tahir, S. (2018). Decentralized and cost-effective solar water purification system for remote communities. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 154. https:// doi 10.1088/1755-1315/154/1/012004

Rehman, S.h., & Mohandes, M. (2008). Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy Policy*, 36, 571-576. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.09.033

Reif, J,H., & Alhalabi, W. (2015). Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential. Renewable *and Sustainable Energy Reviews*, 48, 152-165. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009

Rostamizadeh, M., Khanlarkhani, M., & Sadrameli, S.M. (2012). Sadrameli, Simulation of energy storage system with phase change material (PCM). *Energy and Buildings*, 49, 419-422. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.037

Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. *Solar Energy*,134, 429-444. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.030

Yang, L., Zhang, X., & Xu, G. (2014). Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points. *Renewable Energy*, 64, 26-33. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045

Zhao, M., Liu, Z., & Zhang, Q. (2009). Feasibility analysis of constructing parabolic trough solar thermal power plant in inner Mongolia of China. In: Proc. *Asia – Pacific power and energy engineering conference*, 1 - 4. https:// doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918378