

Research Article
Vol. ?, No. ?, ?, p. ?-?**Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System**J. Seifi Laleh¹, H. Samimi Akhijahani^{2*}, P. Salami²

1- Graduate Student of Renewable Energies, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)Received: 17 December 2022
Revised: 28 January 2023
Accepted: 20 February 2023
Available Online: 25 February 2023**How to cite this article:**Seifi Laleh, J., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (?). Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System. *Journal of Agricultural Machinery*, ?(?), (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138>**Introduction**

With increasing the world's population, the demand for supply water resources is also increasing. Nevertheless, climate change has severely impacted the accessibility of fresh water resources. Consequently, researchers have been focusing on producing drinkable water from seas and oceans. Iran, with its significant levels of solar radiation and access to open water from the north and south, is an ideal country for fresh water production. Using solar water desalination systems is a reliable and cost-effective solution for producing drinking water from salt water sources. The purpose of this research is to enhance the performance of the solar water desalination system by using the latent heat storage system and a solar tracking system. In this experimental setup for fresh water production, water was used as the working fluid, while a parabolic collector functioned as the source of thermal energy.

Materials and Methods

The solar water desalination system was designed and built on a laboratory scale at the University of Kurdistan, and then the necessary experiments were carried out. The flowing fluid (water) inside the spiral tube in the tank is pumped into the absorber tube of the parabolic collector. Inside the receiver tube, there is a spiral copper tube with a 7 cm pitch, which contains paraffin. The parabolic mirror reflects the sunlight onto the receiver tube, causing the working fluid, water, to heat up. The cooling process is achieved using a specific source located in the upper section of the distillation tank. In this case, the steam droplets in the tank hit the bottom surface of this cooling tank, which has the shape of an inverted funnel, leading to condensation. The study was conducted over four consecutive days, from 10:00 to 14:00, under identical conditions from August 24th to August 27th, 2022. It took place at the Renewable Energy Laboratory, University of Kurdistan in Sanandaj, Iran, and was conducted for three different volume flow rates of fluid: 1.9, 3.1, and 4.2 l.min⁻¹ with phase change materials (PCM) and 4.2 l.min⁻¹ without phase change materials (WOPCM); the pump's maximum flow rate was 4.2 l.min⁻¹. Variations of outlet temperature, thermal efficiency, desalination efficiency, and produced water were investigated under different conditions.

Results and Discussion

The results reveal that by decreasing the pitch of the spiral tube, there is an increase in the amount of heat captured, due to the increase in the Nusselt number. At the beginning of data collection, a significant amount of the energy that enters the receiver tube is absorbed by both the phase change material and the spiral tube inside the receiver and as a result, the initial air temperature is lowered. The highest temperature of salt water occurs when the fluid is flowing at a rate of 4.2 l.min⁻¹, while the lowest temperature is observed at a flow rate of 1.9 l.min⁻¹. With a flow rate of 4.2 l.min⁻¹, the absorbent tube rapidly transfers the absorbed heat to the salt water

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).[doi https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138](https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138)

chamber through the fluid. The input energy to the tank has increased 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, respectively. At a flow rate of 4.2 l.min⁻¹, the thermal efficiency of the system without phase change materials (3.51%) is lower compared to the case with phase change materials (5.02%). Moreover, using a solar tracking mechanism increased the thermal efficiency of the collector by 9.86% compared to the system using a photocell sensor. Based on the water quality values, it can be stated that the level of dissolved solids in the water sample has been significantly decreased. This indicates that the water can be used for drinking.

Conclusion

In this research, the process of thermal changes in a solar water desalination system using PCM was investigated. The obtained results demonstrate that the use of PCM improved the thermal efficiency of the collector and the water obtained from the current system is safe for consumption. Furthermore, by implementing a solar panel tracking system, the efficiency of the solar collector is improved.

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

Symbols

A_c	سطح کلکتور Collector area	m ²	\dot{Q}_{cove}	نرخ انرژی انتقال یافته در اثر همرفت Convected heat flux	J.s ⁻¹
c_p	ظرفیت گرمای ویژه Specific heat capacity	kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	\dot{Q}_u	نرخ انرژی حرارتی دریافتی Received useful energy	J.s ⁻¹
D	قطر لوله Tube diameter	m	Pr	عدد پرانتل Prandtl number	-
E_{elec}	انرژی الکتریکی Electrical energy	J	Re	عدد رینولدز Reynolds number	-
F_R	پارامتر اتلاف حرارت Heat loss coefficient	-	T_i	دمای ورودی Inlet temperature	°C
h_c	ضریب انتقال حرارت همرفت Convective heat transfer coefficient	W.m ⁻² .°C ⁻¹	T_o	دمای خروجی Outlet temperature	°C
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر آب Latent heat of water evaporation	kJ.kg ⁻¹	t_c	ضخامت دیواره Wall thickness	m
I_o	شدت تابش خورشیدی Solar radiation	W.m ⁻²	U_L	ضریب اتلاف حرارت کلی Total heat loss coefficient	W.m ⁻² .°C ⁻¹
k_w	ضریب انتقال حرارت Conductive heat transfer coefficient	kg.s ⁻¹	V	حجم سیال Fluid volume	m ³
$m_{w,ev}$	جرم آب تبخیری Evaporated water mass	kg	α	ضریب جذب Absorption factor	-
\dot{m}	جرم سیال کاری Working fluid mass	-	η	بازده گرمایی جمع کننده Collector thermal efficiency	-
Nu	عدد ناسلت Nusselt number	J	η_{des}	بازده تبخیر آب Evaporation efficiency	-
Q_w	انرژی مورد نیاز برای تبخیر Required thermal energy for evaporation	J	μ	ویسکوزیته سیال Fluid viscosity	m ² .s ⁻¹
Q_m	مجموع انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب Total required energy for evaporation	J.s ⁻¹	ρ	دانسیته جرمی Mass density	kg.m ³
\dot{Q}_f	گرمای انتقالی از جمع کننده به سیال Transferred heat to working fluid	J.s ⁻¹	τ	ضریب انتشار Emission factor	-
\dot{Q}_{cond}	نرخ انرژی انتقال یافته هدایتی Conducted energy flux	J.s ⁻¹			

مقاله پژوهشی

جلد ۴، شماره ۴، ۹۴، ص ۹-۴

ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی

ژینا سیفی لاله^۱، هادی صمیمی اخیحجانی^{۲*}، پیمان سلامی^{۲b}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

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 ذخیره ساز گرمای نهان انرژی خورشیدی و سامانه ردیاب پنبلی است. با توجه به این‌که به دلیل نوسانات شدت تابش خورشیدی هدررفت حرارتی از جمع‌کننده خورشیدی افزایش می‌یابد، استفاده از مواد تغییرفازدهنده راه‌حل مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی در ساعات اوج و آزاد نمودن در زمان کاهش و یا نبود شدت تابش خورشیدی است. به این منظور ماده تغییرفازدهنده به صورت لوله‌ای ماریچ 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 و ۴/۲ لیتر بر دقیقه (با مواد تغییرفازدهنده) و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده 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 تغییرفازدهنده بیشترین راندمان حرارتی را در دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه بوده است. نتایج نشان داد استفاده از مواد تغییرفازدهنده باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان ۳/۰۵ درصد می‌گردد. آب‌شیرین‌تولیدی در مدت زمان ۴ ساعت، ۰/۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت بود و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث کاهش سختی موجود در آب شرب شده بود.

واژه‌های کلیدی: آب شرب، بهره‌وری حرارتی، جمع‌کننده خورشیدی، ردیاب خورشیدی، کیفیت آب

مقدمه

طرف دیگر دریاها و اقیانوس‌ها حاوی آب شور بوده و از این جهت آب آنان قابل استفاده برای مصارف خانگی و به دلیل خورنده‌بودن 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 زیست‌محیطی افزایش یافته است.

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه 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

یکی از نوشیدنی‌های که مصرف روزانه آن، برای ادامه حیات و سلامتی انسان و همچنین تمام موجودات زنده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، 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, Patel, Elkelawy, & Bastawissi, 2019). برای تولید آب‌شیرین در کره زمین، می‌توان به‌طور مستقیم از دریاچه‌ها، رودخانه و یخچال‌های طبیعی بهره گرفت. اگرچه آب زیرزمینی به مقدار اندک در دسترس قرار گرفته است، اما همین مقدار اندک نیز بایستی پیش از استفاده تصفیه شود. از

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(Email: h.samimi@uok.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

از طریق آن برای خشک کردن محصول و یا آب شیرین کن استفاده می‌شود. در جمع‌کننده‌ها PCM به صورت لایه‌ای، ورقه‌ای، استوانه‌ای با کروی استفاده می‌گردد، که در هر کدام گرمای نهان باعث می‌شود مجموع انرژی‌گیری بهبود یابد. یک کار شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار 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 لایه‌ای از PCM پوشش داده شد (Chaabane, Mhiri, & Bournot, 2014). در کشور چین پژوهشی انجام شد، که در آن 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 به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (Yang, Zhang, & Xu, 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 به‌خصوص در محل‌های سرد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ضریب انتقال حرارت به‌صورت کلی از $10/4$ به $2/6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ افت پیدا کرده و عملکرد سامانه بهبود پیدا کرد (Abu-Arabi et al., 2018).

همان‌گونه که اشاره شد، یکی دیگر از کاربردهای جمع‌کننده‌های سهموی در آب‌شیرین‌کن‌ها 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, Cooper, Nelemans, Cath, & Nghiem, 2015) و بالا بودن دوره بازگشت سرمایه از نظر اقتصادی از ایرادات آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است (Reif & Alhalabi, 2015). نتایج پژوهشی که در آب‌شیرین‌کن 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 $6/3$ لیتر و بیشترین مقدار بهره‌وری در ساعت $12:00$ تا $14:00$ مشاهده گردید (Rehman, Shakir, Razaq, Saqib, & Tahir, 2018). علاوه بر آن در برخی موارد به مواد تغییرفازدهنده نانو ذراتی اضافه می‌گردد که باعث می‌گردد فرآیند ذخیره‌سازی بهبود یابد.

مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان 8 ppm در سال و به‌وجود 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, Al-harahsheh, Mousa, & Alzghoul, 2018).

با توجه به استانداردهای بین‌المللی برای مناطقی که میانگین انرژی تابشی خورشید، در روز بالاتر از $3/5$ کیلووات ساعت می‌باشد، استفاده از سامانه‌های مختلف برای مهار انرژی خورشیدی از جمله جمع‌کننده خورشیدی برای مصارفی نظیر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی صرفه اقتصادی خواهد داشت (Kalogirou et al., 2005). ایران با میانگین انرژی تابشی $4/5$ کیلووات ساعت در روز و 3200 ساعت بر سال (Edalati, Ameri, & Iranmanesh, 2015) یکی از مستعدترین مناطق برای بهره‌وری از تابش خورشیدی مانند آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است. با توجه به این که میزان شدت تابش خورشید در طول ساعات روز متغیر بوده و لازم است از انرژی خورشیدی که به جمع‌کننده 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 به‌صورت گرمای نهان انجام شده و در مواقعی که تابش خورشیدی افت پیدا می‌کند و یا وجود ندارد، انرژی ذخیره‌شده 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 عبارت است از جذب و آزاد کردن حرارت هنگامی که یک ماده‌ی ذخیره‌کننده از یک فاز به فاز دیگر در دمای تقریباً ثابت تغییر حالت می‌دهد. در ذخیره‌سازی به‌صورت گرمای نهان، از مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌شود. با بررسی‌های انجام‌گرفته، ذخیره انرژی به‌صورت گرمای نهان، کارآمدترین روش ذخیره‌ی انرژی گرمایی است (Pielichowska & Pielichowski, 2014). در پژوهشی تأثیر مقدار ذوب شدن و ضخامت مواد تغییرفازدهنده (PCM) بر روی پراکندگی دمایی در مواد تغییرفازدهنده بررسی شد. نتایج نشان داد زمان ذوب شدن به‌صورت خطی با مقدار PCM تغییر کرده و با کاهش ضخامت PCM عملکرد سامانه افزایش می‌یابد (Rostamizadeh, Khanlarkhani, & Sadrameli, 2012). از مواد تغییرفازدهنده در جمع‌کننده‌های خورشیدی نیز استفاده شده و

مطالعه‌ای دیگر، تغییرات بازده حرارتی در یک جمع‌کننده سهموی همراه با لوله تخلیه‌شده 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 ذخیره سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار Ansys-Fluent شبیه‌سازی شده و داده‌های خروجی به‌صورت 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 آب‌شیرین‌کن‌های 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 نسبتاً مناسب، قیمت مناسب و سطح اشغال کمتر، بیشتر مورد توجه بوده و محققان سعی در بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها دارند (Motevali, 2013). تاکنون فناوری‌های زیادی برای بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از انواع نانوسیال‌ها، تعقیب‌کننده‌های خورشیدی دقیق، لوله تحت‌خلاء به‌عنوان دریافت‌کننده و منعکس‌کننده ثانویه اشاره نمود. یکی از منابع اتلاف انرژی در جمع‌کننده‌های سهموی شکل مربوط به لوله دریافت‌کننده است. مقداری از انرژی خورشیدی که به خط کانونی جمع‌کننده منعکس می‌شود، به علت خصوصیات ناسازگار سیال کاری، 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 آب‌شیرین‌کن خورشیدی گردد، استفاده از سامانه تعقیب‌کننده دقیق و منطبق بر حداکثر تابش خورشیدی است. در پژوهشی تأثیر سامانه تعقیب‌کننده بر روی جمع‌کننده سهموی به‌صورت 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 آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند، که جمع‌کننده‌های سهموی به دلیل قالب‌نچندان پیچیده، بالا بودن بازده و همچنین مقرون‌به‌صرفه بودن نسبت به جمع‌کننده‌های دیگر بسیار موثر و مفید هستند (Abdessemed, Bougriou, Guerraiche, & Abachi, 2018).

علاوه بر آن پژوهش‌هایی نیز در زمینه تأثیر استفاده از سیال کاری مختلف بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی سهموی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که انرژی حرارتی ورودی به سامانه برای نانوسیال، روغن، گلیسرین و آب به‌عنوان سیال کاری در سامانه به‌ترتیب حدود MJ ۱۷/۳۶، MJ ۱۸/۴۶، MJ ۱۷/۷۶ و MJ ۱۶/۸۰ بود. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی به روش CFD نشان داد که روش CFD می‌تواند عملکرد سامانه را با سیالات کاری مختلف با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Alimohammadi, Samimi Akhijahani, & Salami, 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، Cu ، Al_2O_3 /روغن، TiO_2 و Fe_3O_4 -آب به‌عنوان سیال‌های 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 سیال کاری بررسی شد، نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز راندمان با استفاده از روش CFD نشان‌دهنده آن بود که به‌کارگیری آب به‌عنوان سیال کاری، تلفات کمتری در دماهای بالای دارد (Kumar, Vijayan, & Baskar, 2016).

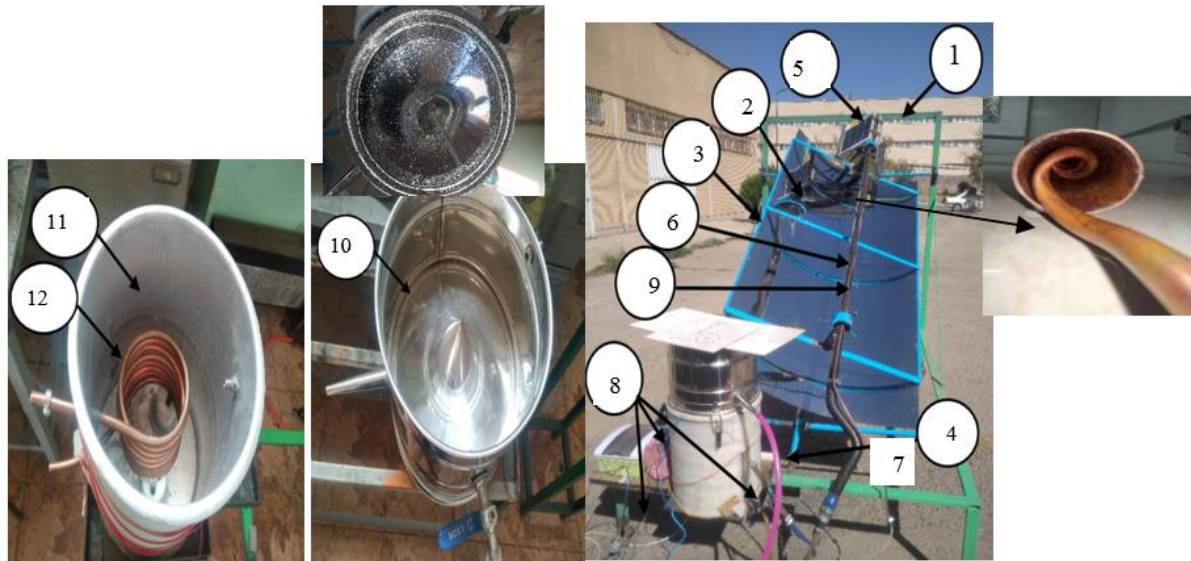
همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های آب‌شیرین‌کن مشکلاتی از قبیل اقتصادی نبودن سامانه، پیچیدگی‌های بیش‌از حد، عدم دسترسی به منابع انرژی، بازده کم، بزرگ بودن سامانه و اشغال فضای زیاد می‌باشند. این موارد باعث می‌گردد، تمایل به استفاده از سامانه‌های خورشیدی کاهش یابد. در تحقیق حاضر برای افزایش کارایی سامانه از یک لوله ماریپچ حاوی مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده استفاده شد. به عبارت دیگر حالت ماریپچ و مواد تغییرفازدهنده به‌طور هم‌زمان باعث متعادل نمودن گرماگیری و گرمادهی در لوله شده و راندمان را تا حد قابل‌قبول 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 به‌طور دقیق از یک سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی که شامل سلول‌های خورشیدی کوچک هستند استفاده می‌گردد. 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 آب‌شیرین‌کن قبلاً انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

۱۰- واحد سردساز، ۱۱- مخزن سیال، ۱۲- لوله ماریپیچ 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 به‌عنوان 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.

شرح دستگاه آب‌شیرین‌کن 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- منعکس‌کننده 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،



شکل ۱- اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش شامل: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس‌کننده 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 سردکننده، ۱۱- مخزن سیال و ۱۲- لوله ماریپیچ درون مخزن

Fig.1. The main components of the solar water desalination system are: 1- Chassis, 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, and 12- Spiral pipe inside the tank

انتقال آن به سیال عامل است که مهم‌ترین بخش هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. از ورق استیل براق ضدزنگ صیقل، به‌عنوان 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 دریافت‌کننده متمرکز شده و به سیال عامل انتقال می‌یابد.

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 جدول ۱ لیست شده است. ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه آب‌شیرین‌کن و سپس زیرمجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود. کار اصلی جمع‌کننده، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و

جدول ۱ - جزئیات جمع کننده سهموی و سامانه آب شیرین کن

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

سیستم اصلی Primary system	اجزا Parts	جزئیات اجزا Part details
Solar collector	Parabolic trough collector	Reflector: Stainless steel (Area: $1500 \times 900 \text{ mm}^2$, thickness: 1 mm) with the reflection coefficient of 0.91, absorption coefficient of 0.1, and concentration factor of 25. The inclination angle was 45° north-south.
	Receiving element	A 30 mm copper tube, 1mm thickness
Desalination system	Tank	An Aluminum tank, with diameter of 300 mm and height of 500 mm, covered by glass wool with thickness of 40 mm (for insulation)
	Spiral PCM tube	A copper tube with 1 mm thickness, 6 turns, and 10 mm pitch, placed in the middle of the tank and 100mm from the bottom.
	Working fluid	Nanofluid (Water + Al_2O_3 , 3.75%)
	Fluid pump Distillation system	DC 12-volt, Max. 10 Ampere, 5.9 l/min, Model (NM, 32-60-180) 0.5 mm thick steel, with a conical water collector, and capacity of 10 liters.
Tracking mechanism	Electromotor	A DC electromotor, 12 V, 40 rpm, Model: JSX69-370, China.
	Gearbox	A 1:80 Gearbox, Model: 2363-75-China
	Detectors	Two 10 Watt PV, Monocrystal, RT010-M, Restar solar Co, China
	Controlling circuit PV Panel	An Arduino, UNO R3 (connected to a laptop) 10W, YL 10C-18b, Module efficiency: 17.4%, Current at P_{\max} : 0.56A

توضیح روند کارکرد سامانه

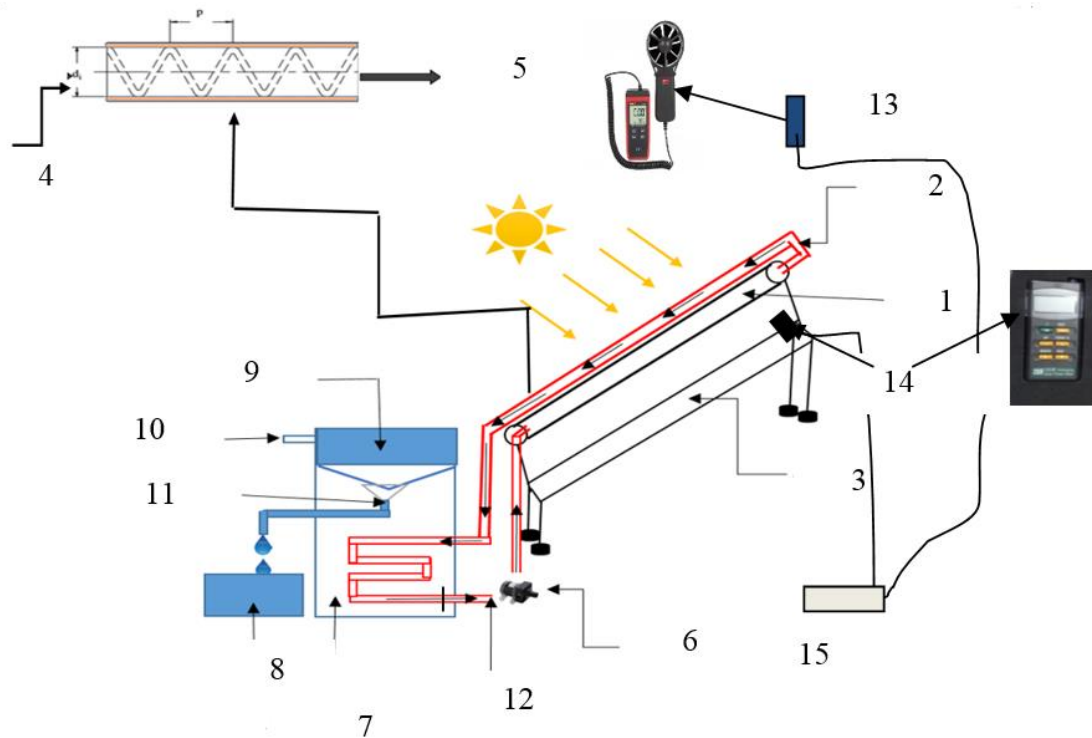
مهم ترین قسمت یک سامانه حرارتی خور شیدی، جمع کننده آن می باشد و در جمع کننده سهموی لوله دریافت کننده (۱) نقش مهمی در بازده حرارتی جمع کننده دارد. استفاده از بخش ذخیره کننده انرژی باعث می گردد که انرژی حرارتی در ساعات اوج تابش در آن ذخیره شده و در هنگام کاهش تابش خور شیدی آزاد گردد. هند سه سامانه آب شیرین کن خور شیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. سیال جریان یافته (۴) در درون لوله ماریپیچ داخل مخزن به وسیله پمپ به داخل لوله ای جاذب جمع کننده سهموی وارد می شود. همان طور که اشاره شد درون لوله جاذب یا لوله دریافت کننده، یک لوله مسی ماریپیچ با گام ۷ سانتی متر 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 می گردد. بخشی از این انرژی حرارتی توسط لوله PCM که در درون لوله جاذب قرار گرفته، جذب شده و بخش دیگر باعث گرم شدن سیال کاری جریان یافته از لوله جاذب می گردد. آب گرم شده به وسیله پمپ (۶) از طریق مجاری جریان سیال (۲) به درون لوله ماریپیچ داخل مخزن (۷) می رود و سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می شود و سپس آب از طریق خروجی لوله ماریپیچ به درون لوله جاذب جریان پیدا می کند. در واقع مسیر جریان سیال کاری (آب) یک فرآیند بسته است که سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می شود.

فرآیند سردسازی با استفاده از یک منبع (۹) که در قسمت فوقانی مخزن تقطیر (۷) قرار گرفته انجام می شود. در این حالت قطرات بخار

در این مطالعه هدف ذخیره کردن انرژی بوده و در عین حال سعی بر آن است که دمای درون مخزن ذخیره کننده بین 80°C تا 100°C درجه سلسیوس باشد. در نتیجه از آب به عنوان سیال ذخیره کننده و انتقال دهنده انرژی در سامانه استفاده شد. لوله جاذب جمع کننده 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 سانتی متر 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 سنگریزه ها استفاده گردید. در این حالت با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب ($1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) ($192/4$) که مقدار آن از ظرفیت گرمایی ویژه سنگریزه ($1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) ($282/0$) بیشتر است، امکان گرمایش سامانه در مدت زمان کم به دلیل افزایش مساحت درگیر با سیال افزایش پیدا می کند (Nasri, Benatiallah, Kalloum, & Benatiallah, 2019). در مرکز مخزن یک لوله فنری تعبیه شده است و برای ورود و خروج این لوله فنری ماریپیچی، دو دریچه بر روی بدنه مخزن قرار گرفته است. برای جلوگیری از تلفات حرارتی، اطراف مخزن با عایق به ضخامت ۱۰ میلی متر از جنس فوم پوشش داده شد. در ورودی جمع کننده یک پمپ سیال ۱۲ ولت دی سی قرار گرفته است. برای تهیه آب شور، با توجه به این که در صد 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.

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 می‌گردد. شماتیک اجزای اشاره‌شده به همراه بادسنج (۱۳) و پیرانومتر (۱۴) و ثبت‌کننده داده (۱۶) در شکل ۲ نمایش داده شده است.

درون مخزن به سطح زیرین مخزن سرد ساز (که به صورت یک قیف معکوس است) برخورد کرده و عمل میعان صورت می‌گیرد. قطرات ایجاد شده در واحد سرد ساز 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 به‌عنوان ورودی مخزن که پیش‌گرمایش در آن انجام شده مورد استفاده در سامانه قرار گیرد. فرآیند شیرین‌سازی آب شور در سامانه آن‌قدر ادامه



شکل ۲- شماتیک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با جزئیات شامل: ۱- لوله جاذب، ۲- خروجی سیال، ۳- منعکس‌کننده، 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 و ۱۵- دیتالاگر

Fig.2. Schematic of solar desalination: 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, and 15- Datalogger

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 گرمایی 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 دریافت‌کننده مرکزی قرار گرفت. خواص ترمو-فیزیکی پارافین در جدول ۲ ارائه شده است.

ماده تغییر فازدهنده و نحوه قرارگیری آن درون لوله

ماریج

تغییر فازدهنده‌ی به‌کارگرفته در این آزمایش پارافین وکس ساخت شرکت ایران پارافین به مقدار ۱۷۱ گرم می‌باشد. مواد تغییر فازدهنده، 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

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)	گرما نهان Latent 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

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 جمع کننده در روزهای آزمایش در شکل ۳ 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 مترمربع) 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.

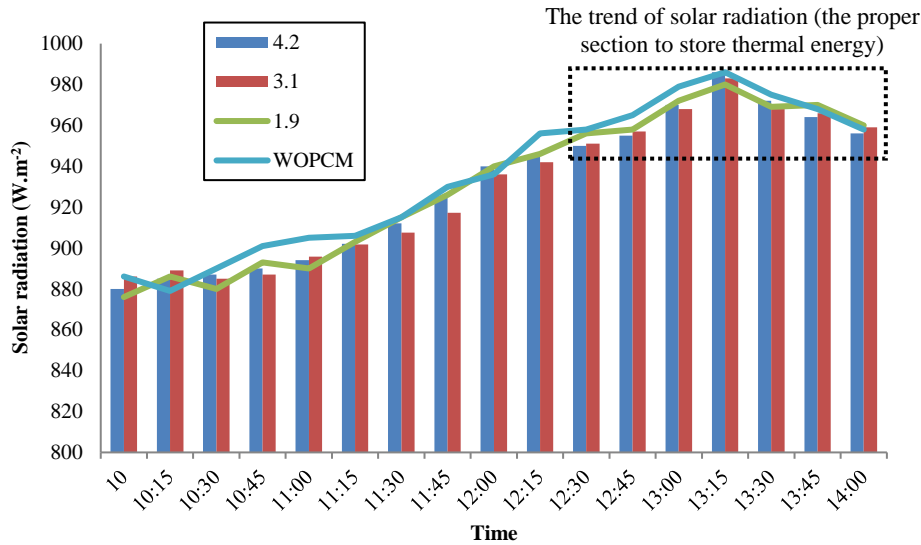
میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی در طول روزهای آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی در جو زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده‌های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا رخ می‌دهد و باعث افزایش دمای هوا می‌شود. با افزایش میزان گرد و خاک و آلاینده‌های محیطی این افزایش دما بیشتر خواهد بود (Rehman & 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 & 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 در صد تا ۱۳ در صد 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.

سامانه تعقیب کننده تابش خورشیدی پنلی

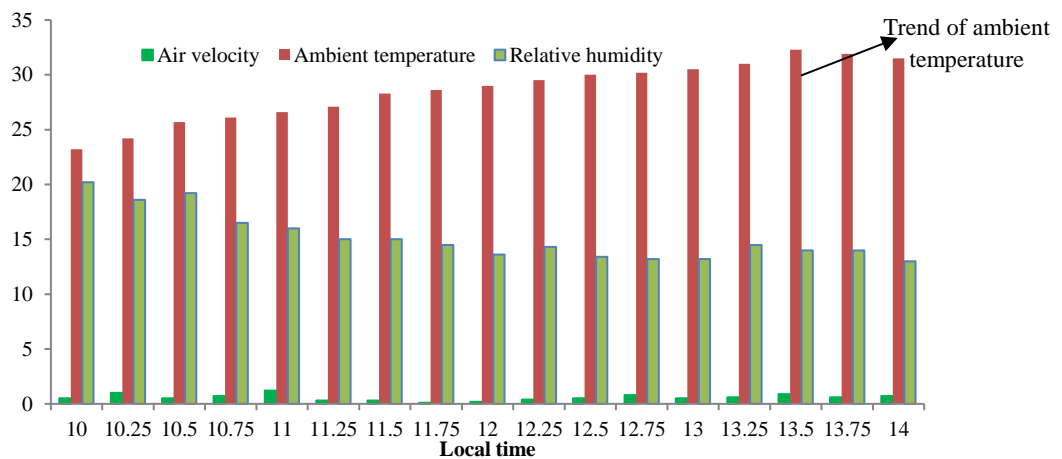
استفاده از سامانه تعقیب کننده خورشیدی مناسب، یکی از روش‌های مهم در افزایش راندمان دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. این سامانه دارای دو عدد پنل خورشیدی مدل RT010M است که با زاویه ۴۵ درجه در قسمت بالای لوله جاذب جمع کننده سهموی قرار گرفته است. با تغییر زاویه تابش خورشید در طول ساعات روز، سامانه تعقیب کننده خورشید جمع کننده را ملزم به تغییر زاویه به موازات خورشید می‌کند. در طول روز، زاویه تابش خورشید باید بر سطح جمع کننده عمود قرار گیرد تا بیشترین راندمان سامانه به دست آید. در سامانه تعقیب کننده، جریان عبوری از پنل خورشیدی به برد آردوینو-36Lenovo Z500 انتقال و سپس به موتور محرک جمع کننده فرمان داده و به‌ازای هر بار که پنل‌ها تابش خورشید را حس می‌کند و اختلاف بین دو خروجی پنل به وجود می‌آید، الکتروموتور قرار داده شده بر روی محور جمع کننده سهموی فعال شده و جمع کننده را در جهت تابش خورشید تغییر مکان می‌دهد. با استفاده از یک الکتروموتور جریان مستقیم ۱۲ ولت گیربکس‌دار محور جمع کننده 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 ماریچ قرار داده شد. هم چنین دو حس‌گر دما در خروجی و ورودی جمع کننده 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 رطوبت‌سنج (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



شکل ۳- تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول زمان آزمایش
Fig.3. Changes in solar radiation intensity during the test time



شکل ۴- روند تغییرات دما، رطوبت و سرعت هوای محیط در طول ساعات داده‌گیری
Fig.4. Changes in temperature, humidity, and ambient air velocity during the hours of data collection

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c I_o} = \frac{m c_p (T_{oi} - T)}{A_c I_o} \quad (2)$$

سیستم ذخیره‌سازی شامل لوله مسی است که داخل لوله دریافت‌کننده 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 ماریپیج از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی که شدت تابش خورشیدی در سطح پایینی 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 داخل لوله

محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع‌کننده 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 (۱) محاسبه شود:

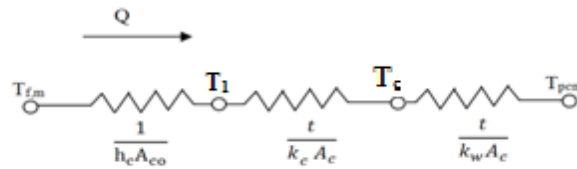
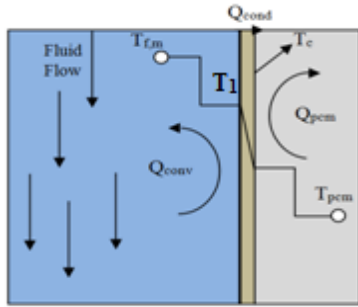
$$\dot{Q}_u = A_c F_R ([I_o (\tau\alpha)] - U_L (T_i - T_o)) \quad (1)$$

($\tau\alpha$) فاکتور جذب انرژی خورشیدی است.

بازده گرمایی جمع‌کننده مطابق با ASHRAE standard 2003

با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (Eltawil, Mostafa, Azam, ۲۰۱۸) (& Alghannam, 2018):

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 می دهد (Esakkimuthu et al., 2013). در این حالت دمای پارافین (PCM) افزایش یافته و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می کند (شکل ۵).



شکل ۵- مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به عنوان ماده PCM
Fig.5. Heat transfer circuit for fluid, copper tube, and paraffin as PCM material

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره سازی و تخلیه رخ می دهد، انرژی مبادله پذیر کل با روابط ارائه شده در منبع (Goyal, Tiwari, & Garg, 1998) تعریف می شود.

بازده انرژی

نسبت انرژی مصرف شده برای تقطیر آب درون مخزن به کل انرژی مصرف شده سامانه آب شیرین کن در طول مسیر فرآیند شیرین سازی را نسبت انرژی مصرفی می گویند. انرژی مصرفی برای تبخیر آب از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است (Morad, El-Maghawry, & Wasfy, 2017).

$$Q_w = h_{fg} \cdot m_{w, ev} \quad , \quad h_{fg} = 2 \cdot 503 \times 10^6 - 2 \cdot 386 \times 10^3 (T - 273 \cdot 16) \quad (10)$$

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

بر این اساس بازده انرژی جمع کننده طبق استاندارد ASHRAE 2003 از رابطه (۱۱) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\eta' = \frac{Q_w}{A_c I_o} \quad (11)$$

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن و تبخیر آب و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به گرمکن، برای تعیین بازدهی تبخیر آب، رابطه (۱۲) لحاظ می گردد (Mousa & Abu Arabi, 2012).

$$\eta_{des} = \frac{Q_w}{Q_f + E_{elc}} \quad (12)$$

عملکرد آب شیرین کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه

جمع کننده و محفظه تقطیر کننده منتقل می نماید. انرژی جذب شده توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله های مسی به عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع کننده سه موی، شامل سیال، دیواره و PCM که به عنوان سیستم ذخیره سازی به کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی جمع کننده می باشد. شکل ۳ انرژی

میزان انرژی گرمایی منتقل شده از جمع کننده به سیال، می تواند در نظر گرفتن دمای ورودی ($T_{f, in}$) و خروجی ($T_{f, out}$) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شود (Serale, Goia, & Perino, 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f, in} - T_{f, out}) \quad (3)$$

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:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f, m} - T_{c, m}) \quad (4)$$

که در آن h_c به کمک رابطه زیر تعیین می گردد.

$$h_c = \frac{k}{d} Nu \quad (5)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پراتنل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در جمع کننده لازم و ضروری هستند. عدد ناسلت می باشد که مقدار آن برای این تحقیق با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، Re و Pr به ترتیب عدد رینولدز و عدد پراتنل هستند.

این اعداد با استفاده از رابطه (۷) و (۸) بیان می شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (8)$$

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه (۹) قابل محاسبه است (Koca, Oztop, Koyunc, & Varol, 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c, m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (9)$$

(SEC) محاسبه می‌گردد. SEC به صورت انرژی لازم برای تبخیر کردن یک کیلوگرم از آب تعریف می‌شود که به صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (13)$$

تاریخ و محل انجام آزمایش

این پژوهش طی چهار آزمایش مجزا در ۴ روز متوالی ۲، ۳، ۴ و ۵ شهریور ماه، سال ۱۴۰۱ برای سه دبی حجمی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده 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 تغییرفازدهنده 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.

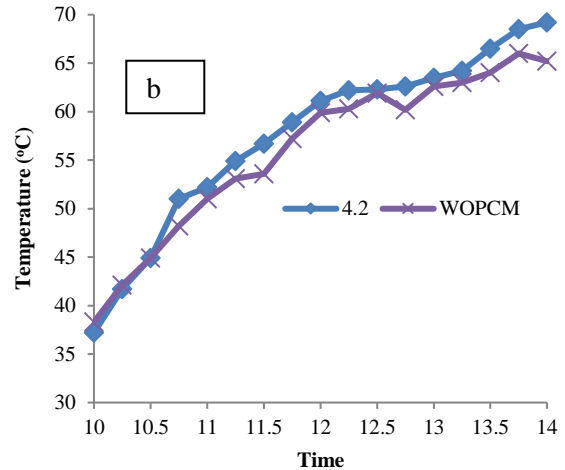
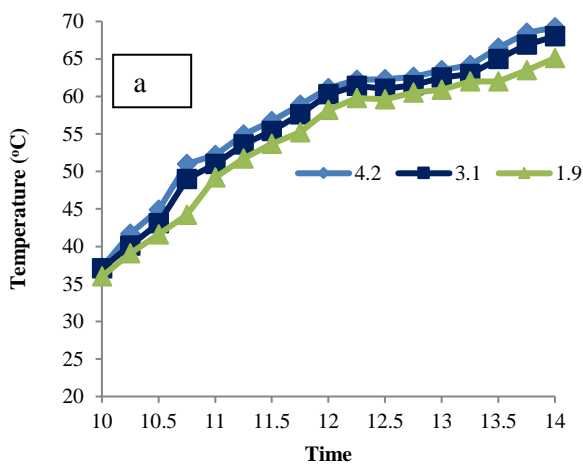
نتایج و بحث

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 همان‌طور که اشاره شد از آب به عنوان سیال کاری (به دلیل ظرفیت گرمایی 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 واردشده به لوله دریافت‌کننده صرف گرم کردن مواد تغییرفازدهنده و لوله ماریپیچ درون دریافت‌کننده 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 سریعاً 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 جمع‌کننده خارج می‌شود (Goudarzi, Shojaeizadeh, & Nejati, 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 تغییرفازدهنده است. در این حالت نوسانات حرارتی به وجود آمده از تابش خورشیدی به وسیله لوله ماریپیچ حاوی مواد تغییرفازدهنده جذب و یا آزاد شده بنابراین حرارت تولیدی متعادل می‌شود. علاوه بر آن دمای آب شور برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. در این حالت به دلیل احتمال تماس بیشتر سیال کاری 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, Liu, & Zhang, 2009; Li, Li, Pei, Munir, & Ji, 2016; Muñoz, Rovira, Sánchez, & Montes, 2017; Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulovic, 2015).

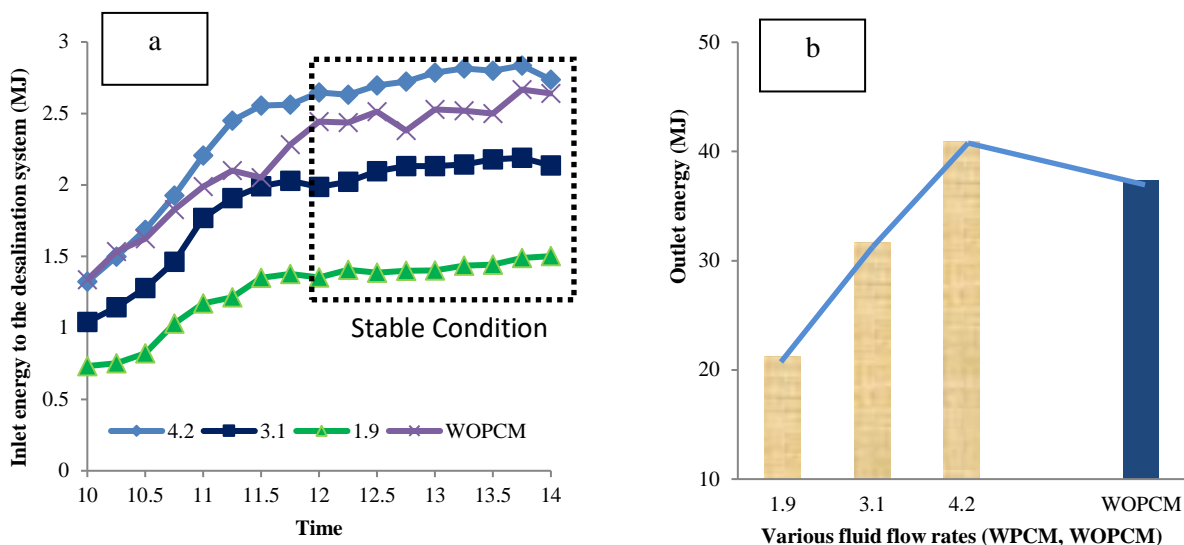


شکل ۶- تغییرات دمای آب داخل محفظه تقطیر: الف) برای شرایط مختلف از جریان سیال و ب) برای دو حالت با تغییر فاز دهنده و بدون تغییر فاز دهنده با جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه

Fig.6. Changes of water temperature inside the distillation chamber: a) for different fluid flows and b) for two conditions with (4.2) and without (WOPCM) phase changer and fluid flow of 4.2 l min⁻¹

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 آب شیرین کن خورشیدی در حالتی که لوله دریافت کننده بدون مواد تغییر فاز دهنده 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 (تقریباً 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 تغییر فاز دهنده کار می‌کند به دلیل عدم انرژی گیری 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 جمع کننده 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 تغییر فاز دهنده بیشتر از حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه است. انرژی حرارتی ورودی در این حالت ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.

در شکل ۷-الف انرژی گرمایی وارد شده به مخزن از طریق جمع کننده 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 ماریچ 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 داده برداری 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 مستقیماً 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 سیال کاری در درون لوله جاذب، کاهش یافته و حتی الامکان به آب شور درون محفظه انتقال می‌یابد. انرژی ورودی به مخزن برای دبی‌های ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه

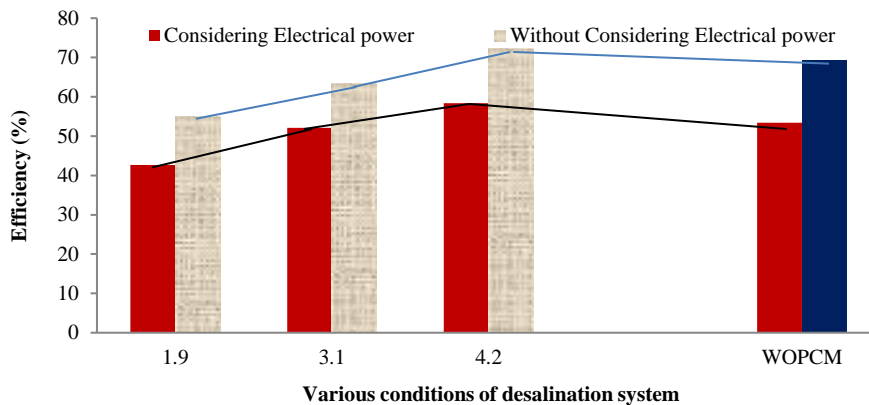


شکل ۷- الف) تغییرات انرژی حرارتی ورودی و ب) انرژی کل ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای دبی‌های مختلف از سیال کاری و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده نسبت به زمان

Fig.7. a) Variations of input thermal energy and 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

هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی کمتر است (۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد). با توجه به این که 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, Malekan, & Assad, 2019; Alimohammadi et al., 2020). سایر محققان که از سامانه‌های خورشیدی برای تأمین انرژی گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌ها استفاده نموده‌اند، نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Lim et al., 2016, Cheng & Zhan, 2016).

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 تغییرفازدهنده استفاده نشده است با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، بازده حرارتی در

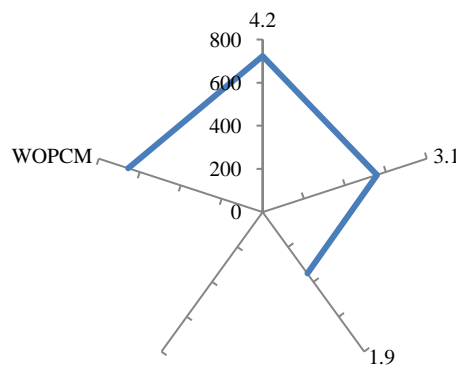


شکل ۸- تغییرات بازده جمع‌کننده خورشیدی با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی
Fig.8. Collector efficiency variations with and without considering electrical energy

آفتاب) به کار 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 مترمربع است که با توجه به عدم وجود لوله ماریپچ با پارافین درون لوله جاذب گرما و کاهش عدد ناسلت، کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. این حالت باعث می‌شد که ضریب انتقال حرارت همرفت درون لوله دریافت‌کننده تابش خورشیدی کاهش یافته و انرژی از اطراف لوله تلف شود. بنابراین دمای سیال کاهش یافته و سرعت تبخیر کمتر شود.

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 این که 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 مترمربع 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



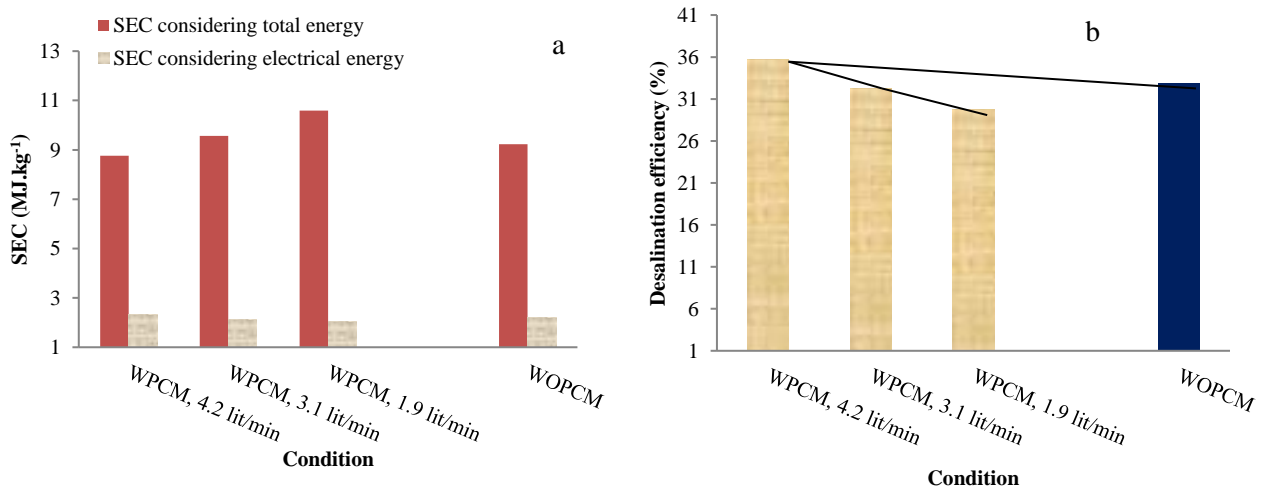
شکل ۹- میزان آب تولیدی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی
Fig.9. The amount of fresh water produced by solar desalination

برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد

بازده آب‌شیرین‌کن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

می‌یابد. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده ۲/۲۰ مگاژول بر کیلوگرم حاصل شد. علاوه بر این، راندمان کلی سامانه تبخیرکننده 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 به‌وسیله پمپ (برای جریان سیال در سامانه تبخیرکننده و جمع‌کننده خورشیدی) و انرژی حرارتی ورودی کاهش می‌یابد. بیشترین بازده به میزان ۳۵/۷۲٪ و کمترین آن ۲۹/۷۰٪ به ترتیب برای دبی ۱/۹ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌دست آمد. بازده تبخیر نمودن آب شور توسط سامانه با استفاده از ماده تغییرفازدهنده به دلیل بیشتر بودن مجموع انرژی حرارتی ورودی به سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی حداقل به میزان ۸/۱ درصد بهبود پیدا کرد. وجود ماده تغییرفازدهنده باعث می‌شود، انرژی خروجی از جمع‌کننده خورشیدی به میزان ۹/۴۱ درصد افزایش یابد.

تغییرفازدهنده 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 تغییرفازدهنده 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 جمع‌آوری‌شده 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



شکل ۱۰-الف) مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی آب شیرین‌کن خورشیدی در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییرفازدهنده

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

آزمایشگاه مرکزی دانشگاه کردستان انتقال داده شد. نمونه‌های خارج‌شده 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).

ارزیابی کیفی آب مقطر به‌دست‌آمده

برای ارزیابی کیفی آب مقطر حاصل از سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی سه‌موی، نمونه به آزمایشگاه تخصصی آب و پساب



شکل ۱۱- نمونه آب خروجی از سامانه آب شیرین 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 می توان دریافت که میزان سختی و کل مواد جامد محلول در آب نمونه نسبت به آب شرب شهری به میزان قابل توجهی کاهش یافته اند. علاوه بر آن میزان اسیدیته که یکی از مشخصات آب شرب می باشد 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, Shcheklein, & Ali, 2021). برای پتاسیم و سدیم مقادیر مجاز به ترتیب بین ۵ تا ۱۰ و ۱ تا ۳ میلی گرم بر لیتر می باشد (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 می توان دریافت که آب نمونه با کاهش مواد جامد محلول و سختی می تواند برای مصرف به صورت شرب مورد استفاده قرار گیرد.

در جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از ارزیابی نمونه در آزمایشگاه، نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مربوط به پارامترها می توان دریافت که میزان سختی و کل مواد جامد محلول در آب نمونه نسبت به آب شرب شهری به میزان قابل توجهی کاهش یافته اند. علاوه بر آن میزان اسیدیته که یکی از مشخصات آب شرب می باشد 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

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		عنصر
	Quality or Quantity (mg l ⁻¹)		
	آب شرب خام Tap water	آب نمونه Sample water	
Calcium	17	6	کلسیم
Nitrates	1.65	0.3	نیترات
Iron	1.2	0	آهن
Total Hardness	556	10.17	سختی کل
Potassium	1.36	1.1	پتاسیم
Magnesium	12	2.5	منیزیم
Sodium	4.2	0.1	سدیم
PH	8.8	6.9	اسیدیته
Salt	0.15	0	نمک
Total dissolved solids	426	76	کل مواد جامد محلول

این سامانه از دو پنل خورشیدی ۱۰ وات و یک مدار آردوینو استفاده گردید. در سامانه پیشین از حس گرهای فتو سل برای برآورد نمودن تعقیب خورشیدی استفاده شده بود. سامانه مذکور به دلیل عدم

کارایی استفاده از سامانه تعقیب کننده پنلی
همان طور که اشاره شد یکی از نوآوری های قابل توجهی که در این سامانه قرار داده شد، استفاده از سامانه تعقیب کننده پنلی بود. در

حساسیت قابل توجه و عدم واکنش‌پذیری 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 به‌دست‌آمده بود، این در حالی است که برای سامانه حاضر این راندمان ۵۸/۴۲ درصد حاصل شد. کوچک‌ترین انحراف از خط کانونی جمع‌کننده سهموی باعث افت حرارتی سامانه می‌گردد. بنابراین می‌توان دریافت استفاده از پنل‌های خورشیدی باعث بهبود کارایی حرارتی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شده است.

نتیجه‌گیری

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

قرارگیری ماده تغییرفازدهنده در داخل لوله، باعث شد بازده حرارتی و کارایی سامانه نسبت به حالت بدون مواد تغییرفازدهنده

بهبود یابد.

دمای آب شور داخل لوله در حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده نمی‌شود، بیشتر بود. بیشترین 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 به‌ترتیب ۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد به‌دست آمد.

مقدار تولیدی آب شیرین با دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت به‌دست آمد.

آب استحصال شده از سامانه دارای سختی کمتری نسبت به آب شرب معمولی بود. هرچند مواد آلی موجود در آن کاهش یافته بود. استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی باعث شد بازده حرارتی سامانه به میزان ۹/۸۶ درصد بهبود یابد.

References

1. 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>
2. Abu-Arabi, M., Al-harashsh, 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. 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>
7. Cheng, P., & Zhan, X. (2016). Stability of organic solar cells: challenges and strategies. *Chemical Society Reviews*, 45, 2544-2582. <https://doi.org/10.1039/C5CS00593>
8. 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>
9. Edalati, S., Ameri, M., & Iranmanesh, M. (2015). Comparative performance investigation of mono-and polycrystalline 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>
10. 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.2021.1000859>
11. 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>
12. 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>
 13. Goudarzi, K., Shojaeizadeh, E., & Nejati, F. (2014). An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H₂O 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>
 14. 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](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9)
 15. 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>
 16. 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://doi.org/10.1504/IJCAT.2005.006940>
 17. 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>
 18. 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>
 19. Koca, A., Oztobh, 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>
 20. 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.
 21. 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>
 22. 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>
 23. 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>
 24. Motevali, A. (2013). Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.], TarbiatModares University, Tehran, Iran.
 25. 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>
 26. 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>
 27. Nasri, B., Benatallah, A., Kalloum, S., & Benatallah, 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>
 28. 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 Journal of Ambient Energy*, 125, 1-6. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1594376>
 29. 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>
 30. 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.org/10.1088/1755-1315/154/1/012004>
 31. 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>
 32. 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>
 33. 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>
 34. 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>
35. 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>
36. 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.org/10.1109/APPEEC.2009.4918378>