

Experimental Investigation and Numerical Simulation of Energy-Exergy Performance of a Solar Desalination Equipped with a Phase Change Material

H. Samimi Akhijahani^{1*}, M. S. Barghi Jahromi², S. Madhankumar³

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Dayananda Sagar College of Engineering, Bengaluru, India

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98203.1484>

Introduction

Only three percent of the Earth's water is fresh and usable for drinking. Population growth and climate change have exacerbated water scarcity, implicating many countries, including Iran, in a crisis. Desalination, particularly using solar energy, is considered an effective solution to compensate for the shortage of fresh water resources. Iran, due to its high solar irradiation, has a high capacity for developing solar desalination systems. However, for various reasons, the efficiency of these systems is very low, and solutions are needed to improve their performance. Research has shown that Phase Change Materials (PCMs), by storing latent heat, improve the efficiency of solar collectors and the thermal stability of the system. Furthermore, the CFD (Computational Fluid Dynamics) method is a precise tool for analysing thermal behaviour and determining optimal conditions in desalination systems, and it can impact the improvement of system efficiency. The present study examined a novel combination of a helical tube containing PCM, a spray system, geothermal cooling, and a solar tracker, which leads to increased efficiency and thermal uniformity of the system.

Materials and Methods

Experimental tests were performed under various environmental conditions and at different saline water flow rates. Two system configurations were studied: one with PCM (paraffin mixture) surrounding the collector tubes and another without PCM. Data on temperature, thermal energy input and output, energy and exergy efficiencies, Performance Ratio (PR), and Recovery Ratio (RR) were recorded during the experiments. Additionally, CFD simulations were carried out using appropriate models for two-phase flow (water and air) and heat transfer to analyse the details of velocity, temperature, and phase fraction distribution within the tank and over the heat exchanger.

Results and Discussion

This research evaluates the performance of a novel solar desalination system equipped with a Phase Change Material (PCM) and conducts a Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The primary objective is to investigate the impact of adding PCM on improving the thermal efficiency and the quality of desalinated water compared to a system without PCM.

Key Findings:

- **Thermal Performance:** The presence of PCM significantly increased the working fluid temperature in the tank and reduced heat loss. The maximum thermal energy input to the tank with PCM increased by 2.85 MJ, while the total collector output energy reached 38.42 MJ.
- **Efficiency:** At a flow rate of 4.2 L min^{-1} , the collector energy efficiency increased from 42.65 to 47.27 percent, while its exergy efficiency was 8.21 percent; the desalination unit achieved an energy efficiency of 47.26 percent an exergy efficiency was 7.65 percent. With the addition of PCM, the Performance Ratio (PR) and Recovery Ratio (RR) also rose to 1.32 and 0.129, respectively.
- **Velocity Distribution:** Velocity contour plots indicated a maximum flow velocity of approximately 1.18 m s^{-1} in the central nozzle region. In PCM-equipped systems, the saline water outlet velocity decreased due to more uniform energy distribution and higher evaporation rates.
- **Temperature Distribution:** The temperature pattern within the tank and on the heat exchanger was analysed. The average saline water temperature was around 54.26°C , with insulation playing a role in reducing temperature loss.
- **Phase Fraction Distribution:** The water volume fraction was highest at the tank inlet and lowest near the bottom. The inclusion of PCM enhanced the evaporation rate by approximately 6.63%, which reduced the vapour volume fraction from 0.184 (without PCM) to 0.171 (with PCM) at 10.524 seconds, indicating greater vapour generation. However, the average vapour volume fraction throughout the desalination

process was 21.05% for the PCM system and 19.74% for the system without PCM.

- *Water Production and Quality:* The PCM-equipped system produced 987 mL of water, a significant increase compared to 842 mL from the system without PCM. Water quality analysis showed a substantial reduction in Total Dissolved Solids (TDS) with a decrease of at least a 300 mg L^{-1} , as well as a greater than 30% reduction in sodium and potassium levels relative to tap water, these results confirm the production of high-standard fresh water.

Conclusion

This study demonstrates that incorporating PCM into a solar desalination system significantly enhances its thermal performance and overall efficiency. The increased energy and exergy efficiencies, improved PR and RR, and a notable rise in desalinated water production are the main advantages of using PCM. CFD analysis provided deeper insights into the fluid dynamics and thermal distribution within the system, confirming the positive impact of PCM on evaporation processes. The quality of the produced water also meets the required standards. Total dissolved solids concentration was significantly reduced compared to municipal water (at least 300 mg L^{-1}). Overall, this system offers a robust and economical solution for water desalination, particularly in regions with limited access to potable water resources.

Keywords: Computational fluid dynamics, Evaporator, Performance ratio, Thermal contour, Thermodynamic analysis

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی عملکرد انرژی - انرژی آب شیرین کن خورشیدی مجهز به ماده تغییر فازدهنده

هادی صمیمی اخيجهانی^{۱*}، محمد صالح برقی جهرمی^۲، اس مادهانکومار^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

چکیده

کمبود آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، نیاز به فناوری‌های آب شیرین کن خورشیدی پایدار با حداقل تولید گازهای گلخانه‌ای را افزایش داده است. در این پژوهش، ارزیابی حرارتی و میزان بازده انرژی و اکسرژی یک سامانه آب شیرین کن خورشیدی مجهز به ماده تغییر فازدهنده (PCM) مورد بررسی قرار گرفته است. ماده تغییر فازدهنده درون لوله ماریچ و درون مخزن اواپراتور قرار داده شد. شبیه‌سازی عددی تحت شرایط واقعی با نرم‌افزار ANSYS Fluent انجام گردید، تا پروفایل‌های دما، دینامیک بخار و عملکرد کلی سامانه ارزیابی شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که به‌کارگیری PCM بازده انرژی را از ۴۲/۶۵٪ به ۴۷/۲۷٪ و بازده اکسرژی را از ۶/۰۱٪ به ۷/۶۵٪ افزایش داده است. تولید روزانه آب شیرین به حداکثر ۹۸۷ میلی‌لیتر رسید که ۱۷/۲٪ بیشتر از حالت بدون PCM است. همچنین در ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل CFD مشخص شد که کسر حجمی بخار ۶/۶۳٪ افزایش یافت و نسبت عملکرد (PR) به میزان ۱/۳۲ در دبی جرمی ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌دست آمد. بنابراین نتایج نشان داد که آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به PCM با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع تجدیدپذیر، علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی، دارای پتانسیل کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است و می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای قابل توسعه و پایدار برای تولید آب شیرین در مناطق دارای تنش آبی مطرح شود.

واژه‌های کلیدی: اواپراتور، تحلیل ترمودینامیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، کانتور حرارتی، نسبت عملکرد

مقدمه

آب یکی از فراوان‌ترین منابع روی زمین است که سه‌چهارم سطح آن را پوشانده است. با این حال، حدود ۹۷ درصد از آب زمین را آب شور دریاها و اقیانوس‌ها و ۳ درصد آن را آب شیرین تشکیل می‌دهد. این درصد اندک از آب زمین که بیشتر نیازهای انسان و حیوان را تامین می‌کند، در آب‌های زیرزمینی، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها وجود دارد (Kalogirou, 2005). کمبود آب و زمین به دلیل رشد جمعیت، شهرنشینی، آلودگی منابع و تأثیرات تغییرات آب و هوایی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است (Singh & Samsher, 2021). با افزایش جمعیت انسان، دسترسی به آب آشامیدنی باکیفیت در سرتاسر جهان روز به‌روز دشوارتر می‌شود. برخی از مناطق با تراکم جمعیت بالا و آب و هوای خشک مانند خاورمیانه و شمال آفریقا، مردم به‌صورت دوره‌ای با کمبود آب مواجه هستند. سازمان ملل تخمین زده است تا سال ۲۰۳۰، نزدیک به یک سوم از جمعیت جهان و به‌طور عمده در

کشورهای توسعه‌نیافته و فقیر دچار کمبود آب خواهند شد (Tang et al., 2026). از آنجایی که تمام آب شیرین را نمی‌توان مستقیماً مورد استفاده قرار داد، بنابراین استفاده از منابعی مانند آب دریا (با شوری حدود ۳/۵ درصد وزنی) و آب شور اقیانوس‌ها (با شوری حدود ۱/۷-۰/۰۵ درصد وزنی) به‌عنوان منبعی برای آب شیرین‌کن‌ها برای تولید آب شیرین جهت رفع مشکل آب و عمدتاً به روش نمک‌زدایی خورشیدی، روش مناسبی خواهد بود (Zhao, Zhao, & Chung, 2021). ایران نیز (با آن که از شمال و جنوب دسترسی به منابع آب دارد) یکی از مناطقی است که در چند دهه‌ی اخیر به دلیل بارش‌های اندک، در بیشتر نقاط دچار کمبود آب آشامیدنی شده است. بنابراین، بحث تأمین آب شرب به یک اولویت اساسی در تحقیقات مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در ارگان‌های مختلف تبدیل شده است. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت تجدیدناپذیر سوخت‌های فسیلی، روند رو به کاهش ذخایر آن‌ها و افزایش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف

* نویسنده مسئول: (Email: h.samimi@uok.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98203.1484>

۱- گروه مهندسی بیوسستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک، کالج مهندسی دایاناندا ساگار، بنگلور، هند

یک پژوهش، از CFD برای تعیین شرایط بهینه فرایند شیرین‌سازی استفاده شد و مدل توسعه‌یافته با داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید که تطابق مطلوبی میان نتایج مشاهده شد (Rezakazemi, 2018). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، فرایند تبخیر در یک آب‌شیرین‌کن پاششی با استفاده از مدل فاز گسسته در چارچوب CFD شبیه‌سازی شد و نتایج عددی با داده‌های تجربی در دبی‌های مختلف آب شور اعتبارسنجی گردید (Xuening, Lei, Yuman, Min, & Jinping, 2015). افزون بر این، مدل‌سازی یک سامانه ترکیبی فتوولتائیک-دودکش خورشیدی نشان داد که در شرایط بهینه تابش خورشیدی، تولید آب شیرین و توان خروجی سامانه به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Tawalbeh, Mohammed, Alnaqbi, Alshehhi, & Al-Othman, 2023).

با بررسی تحقیقات پیشین می‌توان دریافت که ذخیره‌سازی انرژی به شکل گرمای نهان، یکی از کارآمدترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی محسوب می‌شود (Pielichowska & Pielichowski, 2014). بر این اساس، در کلکتورهای خورشیدی از مواد تغییر فازدهنده (Phase Change Material, PCM) در قالب هندسه‌های مختلفی نظیر صفحات تخت، کپسول‌های کروی و ماژول‌های استوانه‌ای استفاده شده است. بهره‌گیری از گرمای نهان در این مواد موجب بهبود عملکرد حرارتی و کاهش نوسانات دمایی در سامانه‌های حرارتی-خورشیدی می‌شود. به‌عنوان نمونه، در پژوهشی تأثیر نقطه ذوب و ضخامت PCM بر توزیع دما بررسی شد و نتایج نشان داد که زمان ذوب به‌صورت خطی با مقدار PCM تغییر کرده و کاهش ضخامت آن موجب بهبود عملکرد سامانه می‌شود (Rostamizadeh, Khanlarkhani, & Sadrameli, 2012). همچنین بررسی عملکرد مخازن ذخیره‌سازی حرارتی مجهز به کلکتور سهموی و کره‌های حاوی PCM افزایش قابل‌توجهی در بهره‌وری سامانه نشان داد (Yang, Zhang, & Xu, 2014). در مطالعه‌ای دیگر بر روی سامانه آب‌شیرین‌کن مجهز به کلکتور خورشیدی و PCM مشخص شد که استفاده از مقادیر مناسب PCM موجب افزایش و پایداری دمای آب شور حتی در شرایط کاهش تابش خورشیدی می‌شود.

استفاده از PCM می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد سیستم‌های خورشیدی داشته باشد، از جمله استفاده از ذخیره‌سازی انرژی طبیعی (Dhivagar et al., 2023) و موم پارافین در مخزن انبساط و صفحه جاذب در کلکتور خلاء (Iranmanesh, Akhijahani, & Jahromi, 2020). تأثیر PCM بر عملکرد آب‌شیرین‌کن بررسی شده است و نتایج مربوطه به‌طور سیستماتیک ارزیابی شده‌اند (Singh, 2023). موادی که قادر به ذخیره گرمای نهان هستند، نسبت به موادی که صرفاً به ذخیره‌سازی گرمای محسوس متکی هستند، مزیت بیشتری دارند. در نتیجه، تحقیقات گسترده‌ای بر بهبود راندمان حرارتی سیستم‌های نمک‌زدایی از طریق

این منابع، پژوهش‌های اخیر به سمت بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی سوق یافته‌اند (Siddique, Turkmen, Al-Rabghi, Shabana, & Albeirutty, 2018). کشور ایران با متوسط انرژی تابشی دریافتی ۴/۵ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روز و مدت زمان تابش ۳۲۰۰ ساعت بر سال (Edalati, Ameri, & Iranmanesh, 2015) یکی از مستعدترین مناطق برای استفاده از تابش خورشیدی از جمله در آب شیرین‌کن‌ها است. تقطیر تک‌اثره (Single-Effect Distillation, SED) یک تکنیک مبتنی بر گرما است که در آن آب شور تا رسیدن به نقطه‌ی تبخیر در معرض یک منبع حرارتی قرار می‌گیرد و سپس بخار حاصل از آن از محلول جدا می‌شود. در این رویکرد، سیال کاری یک سیستم گرمایشی (که در این پژوهش مبتنی بر خورشید است)، انرژی حرارتی جمع‌آوری‌شده را به آب شور منتقل کرده و دمای آن را به آستانه‌ی تبخیر می‌رساند. سپس بخار تولیدشده به سمت یک کندانسور هدایت می‌شود، جایی که با جریان سیال سرد برخورد کرده و به‌سرعت به فاز مایع بازمی‌گردد و در نتیجه آب خالص و بدون نمک مناسب برای استفاده‌ی انسانی به‌دست می‌آید (Saidur, Elcevvadi, Mekhilef, Safari, & Mohammed, 2011). به دلیل سادگی، هزینه‌ی عملیاتی پایین و اتکا به انرژی تجدیدپذیر خورشیدی، این روش به یکی از جذاب‌ترین گزینه‌ها برای تولید آب شیرین در مناطق دورافتاده و با کمبود آب تبدیل شده است. برای تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز سیستم‌های SED، تنوع گسترده‌ای از کلکتورهای خورشیدی توسعه یافته است که هر کدام برای به حداکثر رساندن جذب تابش خورشیدی در شرایط محیطی متفاوت طراحی شده‌اند. کلکتورهای سهموی دسته‌ی پیشرفته‌ی دیگری از متمرکزکننده‌ها را تشکیل می‌دهند که شامل سطوح بازتابنده است که برای تمرکز نور خورشید بر روی یک مسیر یا نقطه‌ی قانونی باریک شکل گرفته‌اند. در این حالت شدت تابش به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و در نتیجه دمای سیال کاری در گردش در لوله‌ی گیرنده بالا می‌رود (Khosravi, Malekan, & Assad, 2019). در سال‌های اخیر، دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics, CFD) به‌عنوان یک روش تحقیقاتی قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سامانه‌های خورشیدی نظیر آب‌شیرین‌کن‌ها و خشک‌کن‌ها استفاده می‌گردد. این روش امکان پیش‌بینی دقیق رفتار حرارتی سیال، مکانیزم‌های انتقال حرارت و بهینه‌سازی ساختاری سامانه را بدون نیاز به آزمایش‌های تجربی گسترده فراهم می‌کند. استفاده از CFD در تحقیقات حرارتی خورشیدی نظیر آب‌شیرین‌کن خورشیدی، نه تنها هزینه‌ها و زمان عیب‌یابی سامانه را کاهش می‌دهد، بلکه به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا کلکتورها، گیرنده‌ها و سامانه‌های ترکیبی بهبودیافته‌ای را طراحی کنند که قادر به ارائه‌ی بازدهی بالاتر آب شیرین باشند (Khosravi et al., 2019; Shanmugaraja & Vivekanandan, 2025).

طراحی‌های مختلف کلکتور متمرکز شده است که مطالعات جدید در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- بخشی از تحقیقات جدید انجام‌شده بر روی واحدهای آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با PCM

Table 1- Some recent studies carried out on solar desalination units coupled with PCM

یافته‌های کلیدی Key findings	سیستم آب‌شیرین‌کن و کلکتور خورشیدی Desalination system and solar collector	مرجع Reference
PCM تقویت‌شده با نانوذرات، انتقال حرارت و بهره‌وری آب شیرین را بهبود بخشید؛ راندمان به‌ویژه پس از ۶۰ دقیقه اول عملیات افزایش یافت. Nanoparticle-reinforced PCM improved heat transfer and fresh water efficiency; efficiency increased, especially after the first 60 minutes of operation.	واحد نمک‌زدایی خورشیدی استوانه‌ای با PCM پارافین نانو SiC Cylindrical solar desalination unit with nano-SiC paraffin PCM	(Fayaz et al., 2024)
ادغام PCM راندمان نمک‌زدایی خورشیدی را ۳۷/۰۷٪ افزایش داد؛ سیستم بهینه‌شده با یک لایه PCM دو سانتی‌متری، ۲۱۳/۲۵ لیتر آب شیرین در روز تولید کرد. PCM integration increased the efficiency of solar desalination by 37.07%; the optimised system with a two-centimetre PCM layer produced 213.25 litres of fresh water per day.	سیستم نمک‌زدایی با کمک PVT با RO و واحد غشایی یکپارچه با PCM PVT-assisted desalination system with RO and integrated membrane unit with PCM	(Tashtoush, Al Ghadi, & Tashtoush, 2024)
حداکثر ضریب انتقال حرارت ۲۶/۷۹ وات بر متر مربع کلون حاصل شد؛ راندمان حرارتی به ۴۶/۳۳٪ رسید و بهره‌وری آب شیرین ۳۲۶۸ میلی‌لیتر بر متر مربع در روز بود. The maximum heat transfer coefficient was 26.79 W/m ² Kelvin; the thermal efficiency reached 46.23%, and fresh water productivity was 3268 ml/m ² per day.	دستگاه تقطیر خورشیدی تک‌شیبه با کلکتور سهموی خطی با استفاده از PCM و نانوسیال‌ها Single-slope solar distillation device with linear parabolic trough collector using PCM and nanofluids	(Singh & Kumar, 2024)
PCM راندمان اکسرژی و تقطیر را به‌ترتیب ۲۲/۴۳٪ و ۲۸/۷۲٪ افزایش داد، به‌همراه بهره‌وری ساعتی بالاتر آب شیرین. PCM increased the exergy and distillation efficiencies by 22.43% and 28.72%, respectively, along with higher hourly fresh water productivity.	سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی دو شیبه با محفظه خلاء و PCM Double-slope solar desalination system with vacuum chamber and PCM	(Saha et al., 2024)
حداکثر راندمان تولید آب شیرین ۳۱/۲٪ و راندمان اکسرژی ۱۹/۰۴٪، نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت تبخیر است. The maximum fresh water production efficiency of 31.2% and exergy efficiency of 19.04% indicate an increase in evaporation heat transfer.	دستگاه تقطیر خورشیدی تک‌شیبه با استفاده از پودر مغناطیسی به‌عنوان محیط متخلخل Single-stage solar distillation device using magnetic powder as the porous medium	(Dhivagar, Shoeibi, Kargarsharifabad, Ahmadi, & Sharifpur, 2022)
بهره‌وری روزانه آب شیرین به ۰/۷۹۶ لیتر بر متر مربع رسید؛ کاهش CO ₂ به دلیل افزایش مصرف انرژی، ۲۴/۵ درصد بهبود یافت. Daily fresh water productivity reached 0.796 litres per square metre; CO ₂ reduction improved by 24.5% due to increased energy consumption.	دستگاه تقطیر خورشیدی ترموالکتریک با مخزن پودر آهن و بازتابنده‌ها Thermoelectric solar distillation plant with iron powder tank and reflectors	(Shoeibi, Rahbar, Abedini Esfahlani, & Kargarsharifabad, 2022)

کارایی فرایند شیرین‌سازی را به میزان محسوسی ارتقا دهد. در این تحقیق، یک لوله دریافت‌کننده با آرایش مارپیچی که درون آن ماده تغییر فازدهنده قرار دارد، و یک واحد تغییر فازدهنده که درون اواپراتور تعبیه شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، هدف بررسی عملکرد سامانه ناشی از حذف نوسانات حرارتی و ایجاد توازن دمایی توسط PCM است. به‌عبارت دیگر، میزان کاهش دامنه نوسانات

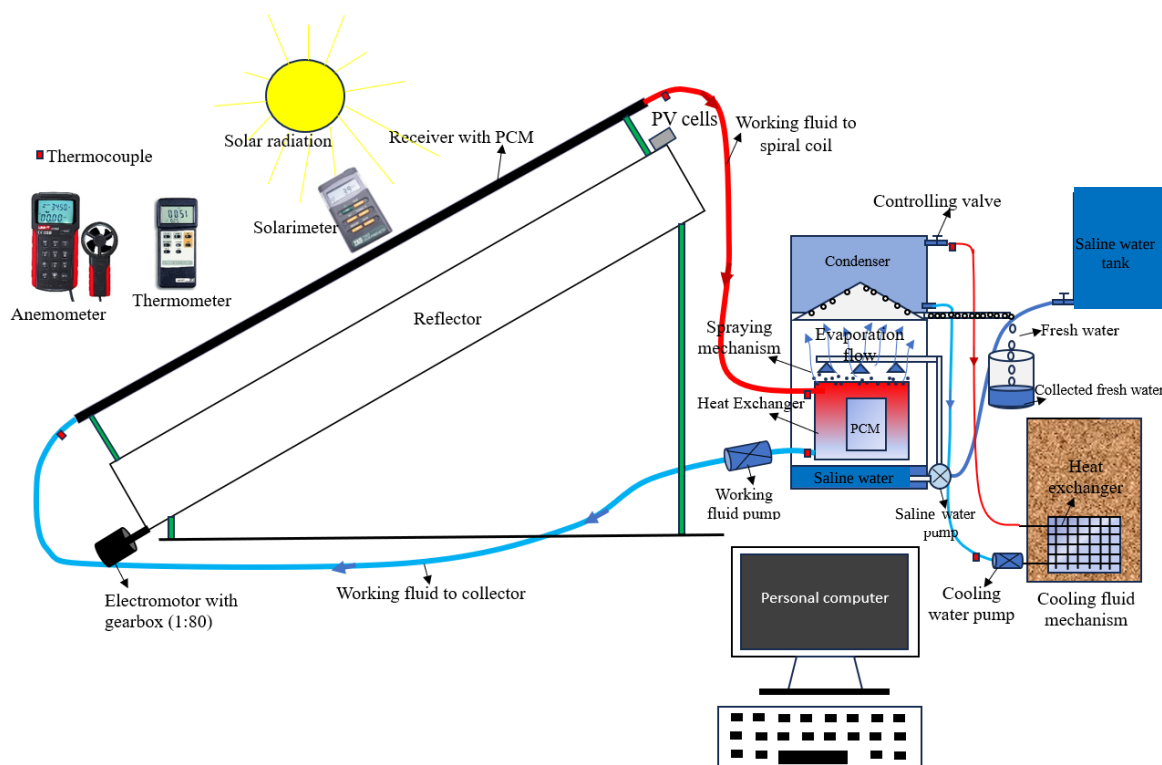
طبق نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های گذشته، عواملی مانند هزینه‌های بالا، پیچیدگی زیاد سامانه، محدودیت دسترسی به منابع انرژی، راندمان ناکافی، ابعاد بزرگ تجهیزات و نیاز به فضای قابل توجه برای استقرار واحدهای آب‌شیرین‌کن خورشیدی، سبب کاهش گرایش به استفاده از سامانه‌های خورشیدی می‌شوند. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین همچون PCM و سیستم‌های پاششی می‌تواند توان حرارتی و

دمایی و افزایش متناظر در بازده انرژی و اکسرژی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. همچنین یک سامانه پاشش درون مخزن نصب شده است تا سطح تماس برای تبخیر افزایش یافته و میزان تولید خروجی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای کاهش دمای چگالنده نیز از منبع انرژی زمین‌گرمایی کمک گرفته شده است. علاوه بر این، یک سامانه ردیاب خورشیدی مجهز به سلول‌های خورشیدی کوچک برای دنبال کردن دقیق مسیر تابش خورشید مورد استفاده قرار گرفته است که با بهره‌برداری بهتر از انرژی تابشی، راندمان حرارتی مجموعه افزایش می‌یابد. بر پایه مطالعات موجود، تحقیقات کمی درباره استفاده از PCM در داخل لوله جذب‌کننده و اواپراتور و ترکیب آن با سیستم پاشش در آب‌شیرین‌کن خورشیدی انجام شده و ترکیب این فناوری‌ها با انرژی زمین‌گرمایی نیز سابقه‌ای ندارد. افزون بر آن، برای بررسی شرایط مناسب مخزن حاوی ماده تغییر فازدهنده، تحلیل عددی با بهره‌گیری از روش CFD روی کلکتور صورت گرفته است. از این‌رو، هدف این تحقیق بررسی اثر به‌کارگیری هم‌زمان ماده تغییر فازدهنده در لوله جذب‌کننده و اواپراتور، همراه با سامانه پاشش و تحلیل عددی مبتنی بر CFD، بر بهبود عملکرد حرارتی، افزایش بازده انرژی و اگزرژی و ارتقای تولید آب شیرین در یک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی است.

مواد و روش‌ها

آب‌شیرین‌کن خورشیدی مورد مطالعه

سامانه‌ای که در این پژوهش مورد مطالعه قرار داده شده است، برگرفته از یک واحد آب‌شیرین‌کن مجهز به یک کلکتور سهموی است که در دانشگاه کردستان ساخته شده است. در این سامانه، انرژی حرارتی از طریق یک مدار بسته که کلکتور خورشیدی را به سیستم تقطیر متصل کرده‌است، به گردش درمی‌آید. سیال عامل در مدار بسته، انرژی حرارتی (آنتالپی) جذب‌شده از کلکتور خورشیدی را به گردش درآورده با جذب انرژی از لوله جاذب و انتقال به سمت مبدل حرارتی داخل مخزن (اواپراتور)، این انرژی را به آب شور منتقل می‌کند. برای گردش سیال، از یک پمپ آب جریان مستقیم (DC) استفاده شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. PCM در داخل یک لوله مسی با قطر ۶ میلی‌متر با آرایش مارپیچ (گام ۱۰ سانتی‌متر) در بخش دریافت‌کننده کلکتور قرار شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، بخش پاشش (Spray Unit) در بالای مبدل حرارتی که PCM درون آن جای داده شده است، قرار داده شده است. در ادامه در نرم‌افزار ANSYS این قسمت مدل‌سازی شده و شرایط عملکرد آن بر اساس نرخ تبخیر آب شور بهینه‌سازی شده است. اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساخته‌شده در دانشگاه کردستان عبارت است از: شاسی، بازتابنده سهموی، چارچوب فلزی سهموی، پمپ جریان مستقیم (DC) برای گردش آب در لوله دریافت‌کننده، ردیاب خورشیدی، لوله دریافت‌کننده، مجاری انتقال سیال، حسگرهای دما، لوله مارپیچ حاوی PCM، محفظه خنک‌سازی، مخزن آب، و لوله مارپیچ مسی که به‌عنوان مبدل حرارتی عمل می‌کند.



شکل ۱- شماتیک آب شیرین کن مورد استفاده در این پژوهش
Fig.1. Schematic of the solar desalination system used in this study

ذخیره سازی گرمای نهان (و مقدار مناسب گرمای محسوس)، رسانایی حرارتی مطلوب، غیرسمی بودن، غیرقابل اشتعال و غیرمنفجره بودن، و قابلیت بازیافت عالی از طریق چرخه های مکرر ذوب و انجماد. همچنین این ماده با نانوذرات و فلزات سازگاری خوبی دارد و از این رو برای کاربردهای مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی گزینه مناسبی محسوب می شود (Sharma & Sagara, 2005).

در پژوهش حاضر، پارافین RT-35 تولید شرکت Iran-Paraffin به عنوان ماده تغییر فاز، مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی های این پارافین در جدول ۲ ارائه شده است. انتخاب این نوع پارافین به دلیل قیمت مناسب و مقرون به صرفه بودن، خوردگی اندک در فرایندهای حرارتی و پایداری شیمیایی بالا انجام شده است. افزون بر این، پارافین ویژگی های مطلوب دیگری نیز دارد که آن را برای ذخیره سازی انرژی حرارتی مناسب می سازد؛ از جمله ظرفیت بالای

جدول ۲- ویژگی های پارافین استفاده شده

Table 2- The specifications of the paraffin used

ویژگی Property	مقدار Value	واحد Unit
نوع ماده Material Type	Paraffin RT-35	-
گرمای نهان ذوب Latent Heat of Fusion	210	kJ kg^{-1}
دمای ذوب شدگی Melting Temperature	34-36	$^{\circ}\text{C}$
گرمای ویژه (جامد) Thermal Conductivity (Solid)	0.2	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

گرماى ویژه (مایع) Thermal Conductivity (Liquid)	0.15	$W m^{-1} K^{-1}$
چگالی (فاز جامد) Density (Solid Phase)	880	$kg m^{-3}$
چگالی (مایع) Density (Liquid Phase)	760	$kg m^{-3}$
گرماى ویژه (جامد) Specific Heat Capacity (Solid)	2.1	$kJ kg^{-1} K^{-1}$
گرماى ویژه (مایع) Specific Heat Capacity (Liquid)	2.4	$kJ kg^{-1} K^{-1}$

ابزارهای اندازه‌گیری

برای پایش دما در نقاط مختلف سامانه، از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شد. یک ترموکوپل در بخش میانی مخزن اواپراتور و در مجاورت ناحیه تبخیر نصب گردید تا دمای سیال داخل مخزن اندازه‌گیری شود. ترموکوپل دوم بر روی سطح خارجی لوله مارپیچ و در ناحیه میانی آن تعبیه شد تا دمای مبدل حرارتی ثبت گردد. همچنین دو ترموکوپل در بخش ورودی و خروجی کلکتور خورشیدی به‌منظور اندازه‌گیری دمای سیال ورودی و خروجی نصب شد. علاوه بر این، یک ترموکوپل در محیط بیرون و در سایه، در ارتفاع تقریباً ۱/۵ متری از سطح زمین و در فاصله مناسب از سامانه، برای ثبت دمای محیط قرار داده شد. محل دقیق نصب حسگرها در شکل ۱ نشان داده شده است. سرعت جریان هوای آزاد به وسیله یک بادسنج مدل UNI-T-363 ساخت چین با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. برای تعیین میزان رطوبت محیط از دستگاه رطوبت‌سنج (مدل Lutron, HT-3600 ساخت تایوان) با دقت یک درصد استفاده گردید. همچنین شدت تابش خورشید با پیرانومتر دیجیتالی (مدل TES-1333R CMP6 ساخت تایوان) با دقت ۱ وات بر متر مربع ثبت می‌شد. در طول چهار شبانه‌روز آزمایش، مقدار آب تولیدی هر روز صبح با استفاده از ترازوی دیجیتال AND مدل FX-3000GD با ظرفیت ۱۵۰۰ گرم و دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌گردید.

مباحث تئوری

بازده انرژی و اکسرژی

نسبت انرژی مورد نیاز برای حرارت‌دهی و تبخیر سیال به میزان انرژی کل (الکتریکی و حرارتی) واردشده به آب‌شیرین‌کن در حین فرایند آب‌شیرین‌کنی، نسبت انرژی مورد مصرف نامیده می‌شود. میزان انرژی مورد استفاده با استفاده از رابطه (۱) مورد محاسبه قرار می‌گیرد (Çengel & Boles, 2015).

$$Q_w = h_{fg} \cdot m_{w, ev} \quad , \quad h_{fg} = 2 \cdot 503 \times 10^6 - 2 \cdot 386 \times 10^3 (T - 273 \cdot 16) \quad (1)$$

که در آن Q_w انرژی مورد نیاز برای تبخیر (J)، h_{fg} گرماى نهان تبخیر ($J kg^{-1}$)، $m_{w, ev}$ جرم آب تبخیرشده (kg) و T دمای آب (K) می‌باشد.

بر اساس استاندارد ASHRAE 2003 بازده انرژی با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$\eta' = \frac{Q_w}{A_c I_o} \quad (2)$$

A_c مساحت کلکتور (m^2) و I_o شدت تابش خورشیدی ($W m^{-2}$) است. نسبت انرژی مورد نیاز برای حرارت دهی و تبخیر آب به میزان انرژی کل (الکتریکی (E_{elec}) و حرارتی (Q_f)) واردشده به گرم‌کن برای تبخیر آب بازده انرژی آب‌شیرین‌کن را به‌دست می‌دهد که با استفاده از رابطه (۳) مشخص می‌شود (Mousa & Abu Arabi, 2012):

$$\eta_{des} = \frac{Q_w}{Q_f + E_{elec}} \quad (3)$$

عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی نیز با در نظر گرفتن انرژی مصرفی ویژه می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد که با مشخص شدن انرژی لازم برای تبخیر یک کیلوگرم از آب قابل محاسبه است.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (4)$$

با استفاده از رابطه (۵) نیز نسبت عملکرد (Performance Ratio, PR) و نسبت بازیافت (Recovery Ratio, RR) سامانه به‌دست می‌آید، که در آن $m_{d, sw}$ و $m_{d, sw}$ به‌ترتیب میزان دبی سیال خروجی به دبی سیال ورودی است.

$$PR = (m_{d, sw} h_{fg}) / [m_{d, sw} C_{p, sw} (T_{out} - T_{in})], \quad (5)$$

$$RR = m_{d, sw} / m_{d, sw}$$

اکسرژی به‌عنوان حداکثر کار مفید قابل استخراج از یک سیستم در حین رسیدن به تعادل ترمودینامیکی با محیط اطراف تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر، اکسرژی معیاری از کیفیت یا پتانسیل انجام کار یک مقدار معین انرژی است، در حالی که انرژی کل (آنتالپی) صرفاً کمیت انرژی را نشان می‌دهد. محاسبه بازده اکسرژی برای کل سامانه مطابق رابطه (۶) قابل محاسبه است (Taremi et al., 2024):

تأثیر قابل ملاحظه‌ای در برهم‌کنش‌های بین‌فازی در رفتار هیدرودینامیکی راکتورهای هم‌زن‌دار ندارند (Li & Chen, 2022). از این‌رو، در این پژوهش تنها نیروی درگ در معادلات مومنتوم لحاظ شده است و بنابراین F_k فقط شامل نیروی درگ F_D است. مقدار آن با استفاده از عدد رینولدز (Re_d) و ضریب درگ به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$F_D = \frac{C_D \cdot Re_d}{24} \quad (9)$$

معادلات اغتشاش: یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی‌های چندفازی، مدل‌سازی اثرات آشفتگی جریان (Turbulence) است. در این شبیه‌سازی، از مدل اغتشاش $k-\varepsilon$ برای بررسی پدیده اغتشاش در سامانه استفاده شد (Versteeg & Malalasekera, 1995). برای شبیه‌سازی جریان سیال در سیستم‌هایی مانند آب‌شیرین‌کن خورشیدی، مدل‌های مختلفی ارزیابی شدند. شبیه‌سازی نیاز داشت تا انتقال حرارت و همرفت شامل سیال عامل، لوله مسی و دیواره‌های جانبی را در نظر بگیرد. علاوه بر این، عدد رینولدز (Re) (number) در ورودی مخزن محاسبه شد و در تمام حالات، این عدد از ۲۰۰۰ فراتر رفت که نشان‌دهنده جریان هوای آشسته در سامانه بود. چندین مدل اغتشاش در نرم‌افزارهای تجاری CFD موجود بودند که به کاربران اجازه می‌دادند مناسب‌ترین مدل را برای مورد خاص خود انتخاب کنند (Norton & Sun, 2006). در میان این مدل‌ها، مدل استاندارد $k-\varepsilon$ همچنان به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود و مطالعات اخیر، کاربردهای موفق متعددی را مستند کرده‌اند (Foster, Barrett, James, & Swain, 2002).

برای این مطالعه، مدل دو-معادله‌ای قابل‌تحقق $k-\varepsilon$ (Realisable $k-\varepsilon$) که توسط شیه و همکاران (Shih, Liou, Shabbir, Yang, & Zhu, 1995) توسعه یافته است، برای مدل‌سازی جریان آشسته انتخاب شد. این مدل با ترکیب یک فرمول جدید ویسکوزیته اختلاط با یک متغیر μ و یک معادله برای اتلاف (ε) در نظر گرفته شد. معادلات انتقال برای این مدل به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \\ &+ G_b - \rho \varepsilon - Y_M - S_k \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ &- C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

G_k نشان‌دهنده انرژی جنبشی توربولانس ناشی از گرادیان‌های

$$\eta_T = \frac{m_d h_{fg} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_d} \right) + X_{B,out} - X_{sw,in}}{(I(t) \times A_o) \times \left[1 - \frac{4}{3} \times \left(\frac{T_0}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \times \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right] + \dot{W}_p} \quad (6)$$

نماد T_0 بیانگر دمای حالت مرده بر حسب کلین است (۲۹۸/۱۵)، در حالی که T_s به دمای مؤثر منبع خورشیدی اشاره دارد که معمولاً حدود ۶۰۰۰ کلین در نظر گرفته می‌شود. دمای آب تقطیرشده تولیدی با T_d مشخص می‌شود. m_d نرخ جرمی آب (kg s^{-1}) و $\dot{W}_p$ توان الکتریکی مصرفی (W) را مشخص می‌کند. همچنین، دو مقدار $X_{sw,in}$ و $X_{B,t}$ به ترتیب نمایانگر نرخ اکسرژی جریان آب خروجی از سامانه و آب ورودی (J s^{-1}) به آن هستند.

مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مخزن

برای شبیه‌سازی جریان چندفازی، از رویکرد اویلری-اویلری (Eulerian-Eulerian) استفاده شد. در این چارچوب، هر فاز پخش شده به عنوان یک فاز پیوسته فرض می‌شود و همه‌ی فازها بر اساس کسر حجمی (Volume Fraction) خود در حل معادلات مشارکت دارند. در این مدل فرض می‌شود که جزء با حجم کوچک از فاز k با کسری حجمی α_k در هر لحظه حضور دارد. با در نظر گرفتن مجموع n فاز، معادله پیوستگی برای هر یک از فازهای موجود به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود (Jianping & Shonglin, 1998):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) &= \sum_{p=1, p \neq k}^n S_{pk} \sum_{p=1, p \neq k}^n \alpha_k \\ &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ρ چگالی (kg m^{-3})، α کسر حجمی، $\vec{u}$ بردار سرعت (m s^{-1}) و S_{pk} نرخ انتقال جرم از فاز p به فاز k ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$) است که در این پژوهش مقدار آن صفر در نظر گرفته شده است. معادله مومنتوم برای فاز k به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) &= -\alpha_k \nabla \cdot (\alpha_k \alpha_k) + \alpha_k \rho_k g \\ &+ F_k \end{aligned} \quad (8)$$

F_k (N m^{-3}) نشان‌دهنده عامل تبادل مومنتوم در ناحیه تماس بین فاز k و سایر فازهای موجود در سامانه است. انتقال جرم بین فازها نادیده گرفته شده و F_k شامل نیروهای درگ (Drag) و ضریب درگ (C_D)، شناوری (Buoyancy)، لیفت (Lift)، گرانش (Gravity) ($m \text{ s}^{-2}$)، نیروی گریز از مرکز (Centrifugal) و جرم مجازی (Virtual Mass) است (Matonis, Gidaspow, & Bahary, 2020). با توجه تحقیقات موجود (Dudukovic, 2005)، به جز نیروی درگ، سایر نیروهای بین‌فازی

سرعت است، در حالی که G_b انرژی جنبشی توربولانس ناشی از اثرات شناوری (Buoyancy) را نشان می‌دهد. Y_m اتساع نوسانی (Fluctuating Dilatation) در توربولانس تراکم‌پذیر را به نرخ اتلاف کلی محاسبه می‌کند. علاوه بر این، S_k و S_ε جملات منبع هستند که به ترتیب برای k و ε اضافه شده‌اند. پارامترهای σ_k و σ_ε اعداد پراوتل توربولانتی برای k و ε هستند و $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، $C_{3\varepsilon}$ ثابت‌هایی هستند که در مدل توربولانس استفاده می‌شوند. متغیر

u_i بردار سرعت میانگین زمانی و t زمان را نشان می‌دهد. برای مش‌بندی مدل سه‌بعدی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی، باید مخزن سامانه شامل مکانیزم بازچرخش آب در نظر گرفته شود. هدف از مدل‌سازی CFD (با شرایط چندفازی) یافتن بهترین وضعیت برای دستیابی به کسر بخار بالاتر در داخل مخزن است. هندسه سامانه در محیط نرم‌افزار SolidWorks2019-2 ترسیم شده است. مشخصات هندسی سیستم در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- ویژگی‌های ابعادی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی

Table 3- The geometric specifications of the system

پارامتر Parameter	مقدار (واحد) Value (Unit)
قطر محفظه Tank diameter	300 mm
ارتفاع محفظه Tank height	400 mm
مقدار آب موجود The amount of water	4 L
قطر لوله Pipe diameter	6 mm
جریان حجمی پمپ Pump volumetric flow	2 L min ⁻¹

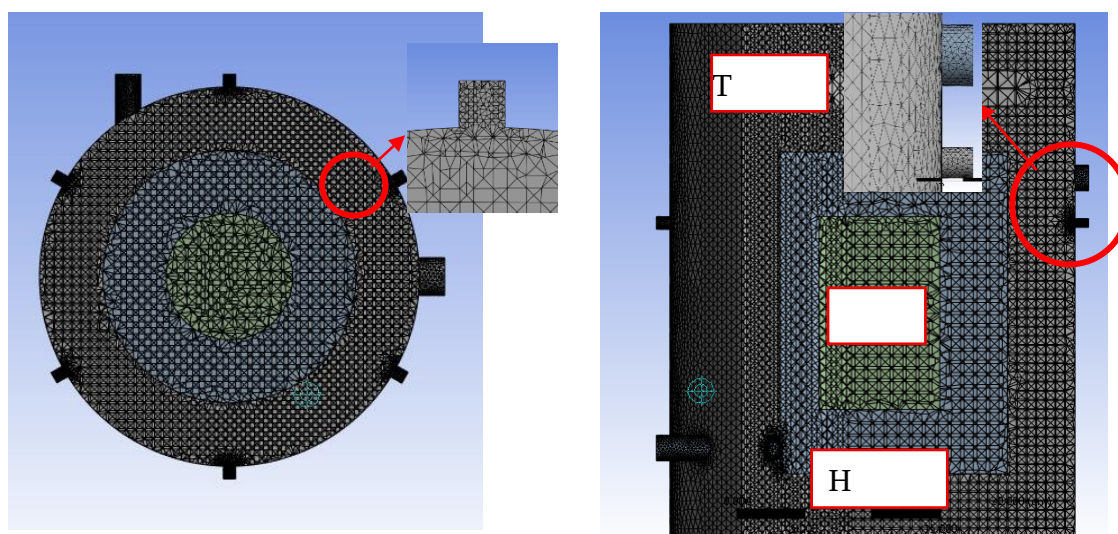
برای مش‌بندی از مش شش‌وجهی مکعبی استفاده شد. این مش ترکیبی از مش‌های ساختاریافته و بدون ساختار است که برای هندسه‌های پیچیده به کار می‌رود. تراکم مش‌بندی در نواحی نزدیک به اتصالات و همچنین خروجی و ورودی مخزن، به دلیل اختلاط شدید جریان، گرادیان بالای متغیرها و تشکیل گردابه‌ها و نواحی مرده احتمالی، بیشتر در نظر گرفته شد. برای بررسی استقلال نتایج از تعداد مش‌ها، در هر یک از شبیه‌سازی‌ها، مش‌بندی موجود ریزتر شده و شبیه‌سازی تکرار گردید. به عبارت دیگر برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به تعداد مش‌ها، سه دسته مش درشت (۱,۵۸۰,۰۰۰ سلول)، متوسط (۲,۸۴۰,۰۰۰ سلول) و ریز (۴,۷۴۰,۰۰۰ سلول) در نظر گرفته شد. معیار مقایسه، میانگین کمیت $k - \varepsilon$ در کل حجم سامانه بود.

نتایج نشان داد که مقدار این کمیت برای مش متوسط و ریز به ترتیب ۰/۱۱۵ و ۰/۱۲۱ است (اختلاف حدود ۵/۲ درصد). با توجه به هزینه محاسباتی بالاتر مش ریز (حدود ۷۰٪ زمان بیشتر) و اختلاف ناچیز نتایج، مش متوسط برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. این آزمون مطابق تحقیقات پیشین می‌باشد (Khosravi et al., 2019). موارد اشاره‌شده در جدول ۴ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که نتایج مش نوع متوسط و ریز تفاوت جزئی با یکدیگر دارند. بنابراین، نوع متوسط برای محاسبات بعدی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲، الگو و اندازه مش اعمال‌شده قابل‌مشاهده است.

جدول ۴- ویژگی‌های مش‌های اعمال‌شده

Table 4- The specifications of the applied meshes

نوع مش Mesh type	تعداد سلول‌ها Number of cells	میانگین $k - \varepsilon$ The average $k - \varepsilon$
درشت Coarse	1'580'000	0.08
متوسط Medium	2'840'000	0.115
ریز Fine	4'740'000	0.121



شکل ۲- الگوی سه‌بعدی مش اعمال شده برای مخزن اواپراتور و ماده تغییر فازدهنده

Fig. 2. Applied mesh patterns for the water tank and PCM

راکتور در هر لحظه محاسبه گردید. سپس همان مقدار مایع به صورت لحظه‌ای از طریق ورودی مذکور تا سقف مقدار جرم مایع موجود در مخزن به سیستم تزریق شد. معادلات حاکم توسط روش حجم محدود برای کل دامنه محاسباتی سیستم حل شدند. در این روش، دامنه محاسباتی به دو بخش تقسیم می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها به صورت غیرپایدار (unsteady)، سه‌بعدی و با استفاده از Ansys-Fluent انجام شد. هدف از شبیه‌سازی در این بخش، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با مقایسه آن با نتایج گزارش شده به دست آمده از بخش خروجی مخزن است. زمان‌بندی شبیه‌سازی برای زمان‌های ۰/۱۲۵، ۰/۴۷۵، ۱، ۲/۱۶۴، ۴/۲۵۶، ۷/۴۵۸ و ۱۰/۵۲۴ ثانیه لحاظ گردید. طرح هندسی مخزن مورد نظر در شبیه‌سازی‌ها به Ansys وارد شد. خواص حرارتی و فیزیکی مواد مورد استفاده در مطالعه ارائه شده در جدول ۵ لیست شده‌اند که در تحلیل سامانه وارد شده‌اند.

شرایط مرزی مورد استفاده برای سطوح جانبی مخزن و لوله مارپیچی، شرط مرزی دیواره بدون لغزش (non-slip wall boundary) است و برای دهانه ورودی، شرط مرزی ورود دبی جرمی در نظر گرفته شد. در بالای سطح مایع، یک ناحیه گازی تعریف شد و برای دهانه بالایی آن از شرط مرزی خروج جریان استفاده گردید. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر سیستم، از رویکرد QUICK استفاده شد و الگوریتم SIMPLE برای حل معادلات گسسته به کار گرفته شد. به دلیل اغتشاش بسیار بالای جریان، پس از مدتی شبیه‌سازی، فاز مایع از مخزن خارج می‌شود. ماهیت فاز مایع به گونه‌ای است که مقدار مایع در سامانه باید ثابت بماند. بنابراین، از یک UDF برای ایجاد تعادل جرمی مایع (بدون خروج مایع) استفاده شد. به عبارت دیگر، یک ورودی جریان جرمی مایع در دیواره جانبی مخزن ایجاد شد و با استفاده از کد CFD، میزان خروج جرمی مایع از بالای

جدول ۵- خواص حرارتی و فیزیکی مواد استفاده شده در سامانه

Table 5- Physico-thermal properties of the materials used in the system

ماده Material	هدایت حرارتی Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	چگالی Density (kg m ⁻³)	گرمای ویژه Specific Heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	لزجت Viscosity (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
هوا Air	0.0241	1.224	1'006.4	1.789×10 ⁻⁵
شیشه Glass	0.96	2'579	840	1.001×10 ⁻³
فوم Foam	0.041	18.2	835	-

مس Copper	401	8'960	385	-
ورق استیلی Steel sheet	80	7'874	450	-

در شکل ۳، داده‌های محیطی در روزهای آزمایش در روزهای صاف و در فواصل زمانی مشخص نمایش داده شده است. در این سامانه، سیال گرمادیده به‌طور مداوم از طریق لوله‌های مسی به مخزن انتقال یافته و با پاشش آب روی آن، تبخیر صورت می‌گرفت. برای کنترل تغییرات پارامترهای کلیدی، تعدادی حسگر دمای نوع K در نقاط مختلف نصب شد تا تغییرات دما در طول فرایند نمک‌زدایی آب را پایش کند. همچنین، شدت تابش خورشیدی با پیرانومتر و سرعت باد با بادسنج در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. میزان آب تصفیه‌شده در فواصل زمانی یک‌ساعته جمع‌آوری و با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. تغییرات زمانی پارامترهای محیطی مانند شدت تابش خورشیدی، دمای هوای اطراف، سرعت باد و رطوبت محیط که در طول آزمایش‌ها ثبت شده‌اند، در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها در بازه زمانی ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ نشان داد که حداکثر تابش خورشیدی در ساعت ۱۳:۳۰ با مقدار 942 ± 10 وات بر متر مربع ثبت شد، در حالی که حداقل مقدار آن در ساعت ۱۰:۰۰ مشاهده شد. دما نیز روند مشابهی با تابش خورشیدی داشت و در ساعت ۱۴:۰۰ به اوج خود رسید ($32/9 \pm 0/5$ درجه سلسیوس)، در حالی که رطوبت نسبی رفتار مخالف را نشان داد. میانگین پارامترهای محیطی شامل تابش خورشیدی (915 ± 8 وات بر متر مربع)، دمای هوا ($28/6$ درجه سلسیوس)، رطوبت نسبی ($15/10$ ٪) و سرعت باد ($0/61$ متر بر ثانیه) به‌دست آمد. لازم به ذکر است، این پژوهش طی دو روز متوالی، ۱۲ و ۱۳ شهریور ۱۴۰۳، در محوطه آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه کردستان و برای دو حالت دارای PCM و فاقد PCM انجام شد. به‌منظور افزایش دقت و اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار و داده‌های نهایی به‌صورت میانگین مقادیر ثبت‌شده گزارش شد. تمامی داده‌بردارها تحت شرایط یکسان، از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ انجام گرفت. دبی جریان سیال کاری سامانه $4/2$ لیتر بر دقیقه و دبی پاشش برابر با $0/75$ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

برای کمی‌سازی انحرافات داده‌های به‌دست‌آمده از مدل اعمال‌شده و داده‌های آزمایشگاهی از روش خطای نسبی به‌عنوان یک شاخص قابل‌اعتماد برای مقایسه استفاده شد. این رویکرد امکان درک واضح‌تری از میزان تطابق نتایج تجربی (D_{exp}) با پیش‌بینی‌های CFD (D_{pre}) انجام‌شده را فراهم می‌کند. برای این کار می‌توان از رابطه (۱۲) استفاده کرد (Khosravi et al., 2019):

$$E_r(\%) = \frac{|D_{pre} - D_{exp}|}{D_{pre}} \times 100 \quad (12)$$

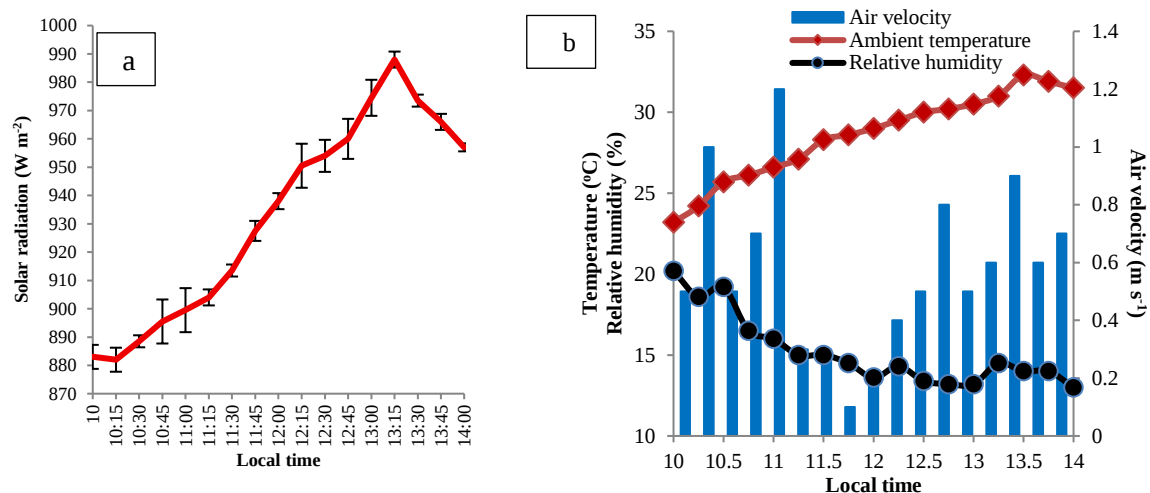
تحلیل عدم قطعیت

به‌منظور ارزیابی دقت نتایج تجربی، عدم قطعیت کمیت‌های محاسباتی با استفاده از روش انتشار خطای کلاین-مک‌کلینتاک (Kline & McClintock, 1953) تعیین شد. بر این اساس، عدم قطعیت هر کمیت وابسته R که تابعی از متغیرهای مستقل اندازه‌گیری‌شده x_1 تا x_n است، از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (Elsayed, Mansour, Yahya, Eid, & Abdel-Raouf, 2026).

$$\frac{w_R}{R} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R / \partial x_i}{R} w_{x_i} \right)^2} \quad (13)$$

با به‌کارگیری دقت ابزارهای اندازه‌گیری (ترموکوپل $\pm 0/1$ °C، پیرانومتر ± 1 W m⁻²، ترازوی دیجیتال $\pm 0/01$ g، دبی‌سنج ± 2 ٪) و اعمال آن بر روابط (۲)، (۳)، (۵) و (۶)، عدم قطعیت نسبی برای بازده انرژی کلکتور، بازده انرژی سامانه آب‌شیرین‌کن، نسبت عملکرد و بازده انرژی به‌ترتیب برابر با $\pm 0/11$ ، ± 2 ، $\pm 2/3$ و $\pm 2/8$ به‌دست آمد. کمترین سهم خطا مربوط به اندازه‌گیری دما و تابش خورشیدی و بیشترین سهم مربوط به دقت اندازه‌گیری دبی جرمی سیال بود.

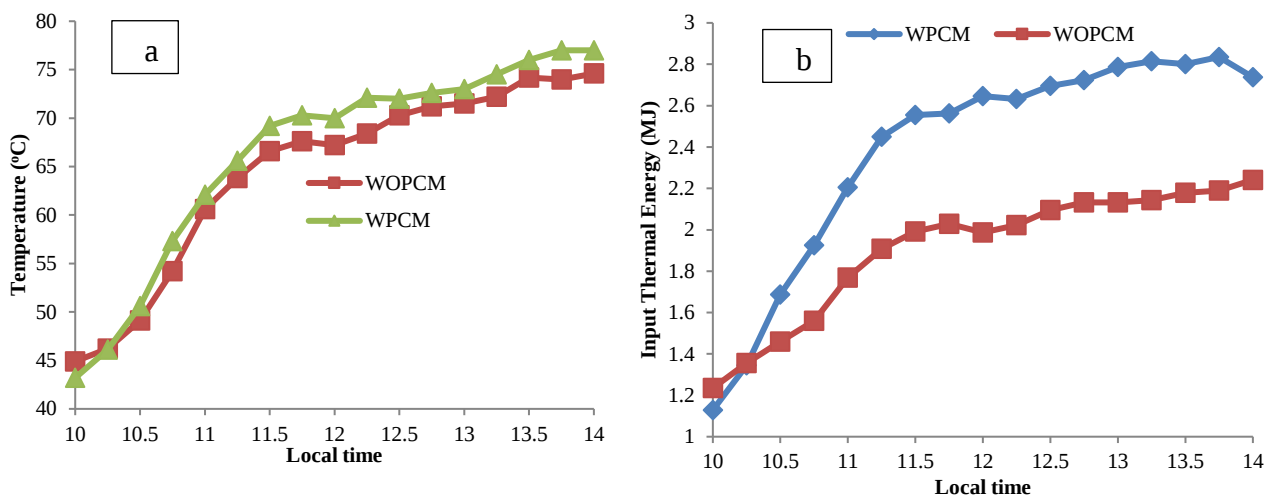
نتایج و بحث



شکل ۳- روند تغییرات الف) شدت تابش خورشیدی، ب) دمای محیط، رطوبت نسبی و سرعت باد در طول زمان‌های مشخص از آزمایش
Fig. 3. Variation trends of (a) solar irradiance, and (b) ambient temperature, relative humidity, and wind velocity during the specified times of the experiment

با اتلاف کمتر، به سیال کاری منتقل شده و مانع تلفات حرارتی در سامانه می‌شود. اما در حالت بدون مواد تغییر فازدهنده، تابش خورشیدی (به‌خصوص در مواقعی که میزان آن بالاست) به دلیل دمای بالا از لوله جاذب دفع شده و فرایند انتقال حرارت محدودتر بوده و تنها بخش کمی از انرژی ورودی به آب شور می‌رسد. به بیان دیگر، وجود ماده تغییر فازدهنده، مقدار بیشتری از گرما از کلکتور خارج می‌شود (Bahramei, Samimi-Akhijahani, Salami, & Behroozi-
 2025). علاوه بر آن به دلیل وجود حالت ماریپیج احتمال تماس بیشتر سیال کاری با سطح درونی لوله دریافت‌کننده عدد ناسلت افزایش یافته و به تبع آن جذب حرارت بهبود می‌یابد. نمونه مشابه در تحقیقات پیشین در مورد ویژگی‌های حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی نتایج مشابه را گزارش کرده‌اند (Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulovic, 2015; Li, Li, Pei, Munir, & Ji, 2016; Muñoz, Rovira, Sánchez, & Montes, 2017; Zhao, Liu, & Zhang, 2009).

در شکل ۴ (a)، تغییرات دمای مایع کاری جریان‌یافته داخل مخزن تقطیر برای دو حالت با و بدون مواد تغییر فازدهنده در سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ارائه شده است. همان‌طور که از تغییرات نمودار مشخص می‌گردد، دمای سیال در هر دو حالت متناسب با میزان تابش خورشیدی دچار نوسان شده و با افزایش یا کاهش تابش، روند گرم شدن آن نیز به ترتیب بیشتر یا کمتر می‌شود. از آن‌جا که سرعت جریان سیال ثابت نیست، مقدار افزایش یا افت دما نیز در هر حالت متفاوت بوده است. لازم به ذکر است سامانه حداقل یک ساعت پیش از آغاز ثبت اطلاعات در معرض شرایط محیطی قرار می‌گرفت تا پایدار شود. در لحظات ابتدایی شروع برداشت داده، بخشی از انرژی دریافتی توسط لوله، صرف گرم کردن مواد تغییر فازدهنده و سیال می‌شود و این موضوع باعث پایین‌تر بودن دمای اولیه سامانه می‌گردد. بالاترین مقدار دمای سیال کاری مربوط به حالت با مواد تغییر فازدهنده می‌باشد. در این حالت، حرارتی که لوله جاذب دریافت می‌کند



شکل ۴- مقایسه عملکرد سامانه در دو حالت با PCM و بدون PCM: (الف) تغییرات دمای آب داخل محفظه تقطیر و (ب) انرژی حرارتی ورودی به مخزن

Fig. 4. Comparison of system performance in two modes with and without PCM: (a) changes in water temperature inside the distillation chamber, and (b) thermal energy entering the tank

مقدار بازده متوسط روزانه انرژی مربوط به زمان‌هایی است که تابش خورشیدی کاهش یافته و PCM نیز وجود ندارد. در این شرایط، انرژی حرارتی بیشتری وارد سامانه و لوله می‌شود و تماس میان سیال کاری و بخش داخلی دریافت‌کننده افزایش می‌یابد. بنابراین، مقدار بیشتری از انرژی حرارتی توسط سیال کاری جذب می‌شود. از سوی دیگر، بیشترین بازده اکسرژی متوسط روزانه کلکتور برابر با ۸/۲۱ درصد بوده که به حالت استفاده از سامانه به همراه PCM مربوط می‌شود، در حالی که کمترین مقدار آن، برابر با ۵/۷۲ درصد، برای سامانه بدون به‌کارگیری PCM به‌دست آمده است. علت این موضوع آن است که اختلاف دمای کمتر، منجر به کاهش کسب اکسرژی از سامانه می‌شود.

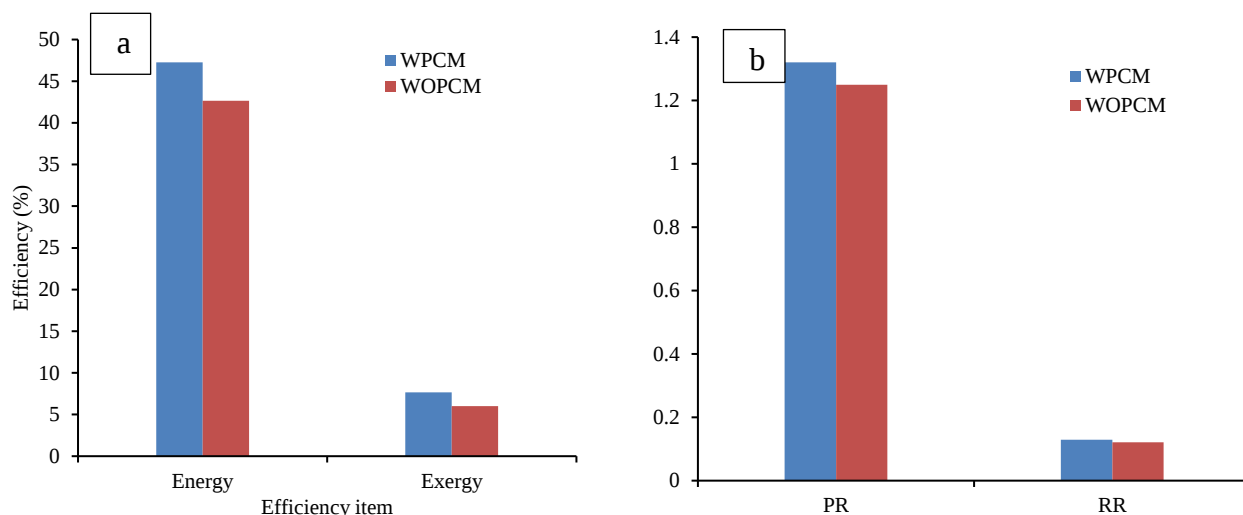
با در نظر گرفتن نحوه عملکرد کلی آب‌شیرین‌کن، بازده انرژی و اکسرژی رفتاری مشابه سامانه مجهز به کلکتور سهموی از خود نشان دادند؛ به‌طوری‌که مطابق شکل ۵ (b)، بیشترین میانگین بازده انرژی و اکسرژی به‌ترتیب برابر با ۴۷/۲۶ درصد و ۷/۶۵ درصد برای مخزن آب‌شیرین‌کن دارای PCM به‌دست آمد (رابطه (۶)). این شکل همچنین کمترین سطح بازده انرژی و اکسرژی را برای سامانه فاقد PCM نشان می‌دهد. حضور PCM در ساختار کلکتور، بازده انرژی را به میزان ۴/۶۲ درصد و بازده اکسرژی را به میزان ۲/۲۰ درصد افزایش داده است. علت این بهبود، ذخیره‌سازی گرمای نهان در ساعات اوج تابش و آزادسازی تدریجی آن در ساعات کاهش تابش می‌باشد، که منجر به کاهش تلفات حرارتی و افزایش پیوسته دمای سیال کاری می‌گردد. علاوه بر این، شکل ۵ نسبت عملکرد متوسط (Performance Ratio) را در کنار نسبت بازیافت (Recovery)

علاوه بر آن در شکل ۴ (b)، مقدار حرارت منتقل‌شده به مخزن از طریق کلکتور در دو حالت با و بدون ماده تغییر فازدهنده نمایش داده شده است. مطابق نمودار، الگوی تغییرات انرژی حرارتی ورودی مشابه رفتار دمای آب داخل مخزن سیال بوده و هم‌زمان با افزایش تابش خورشیدی، مقدار انرژی ورودی نیز بیشتر می‌شود. از ابتدای زمان برداشت داده‌ها، انرژی حرارتی روند افزایشی داشته و پس از ساعت ۱۳:۳۰ که شدت تابش کاهش پیدا می‌کند، روند نزولی مشاهده می‌شود. میزان حرارت ورودی به مخزن برای هر دو حالت با و بدون ماده تغییر فازدهنده، به‌ترتیب از ۱/۳۳۳ تا ۲/۸۵ مگاژول و ۱/۰۵ تا ۲/۲۴ مگاژول متغیر است. همچنین در این نمودار مشخص است که در ابتدای کار بخشی از گرمای تولیدشده صرف گرم‌شدن مواد تغییر فازدهنده می‌شود (حدود ۰/۱۲۹ مگاژول) و پس از آن مقدار انرژی ورودی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نوسان انرژی حرارتی در سامانه بدون مواد تغییر فازدهنده بیشتر است، زیرا فرایند جذب و رهاسازی حرارت به‌طور پیوسته انجام نمی‌شود (Alimohammadi, Samimi, Akhijahani, & Salami, 2020; Jean et al., 2015; Muñoz et al., 2017). بر این اساس مجموع انرژی حرارتی خروجی از جمع‌کننده در هر دو حالت با مواد تغییر فازدهنده و بدون آن به‌ترتیب ۳۸/۴۲ و ۳۵/۶۵ مگاژول به‌دست آمد.

ارزیابی حرارتی کلکتور بر اساس شاخص‌های میانگین روزانه انرژی و اکسرژی نشان داد که در شرایط کارکرد، که با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و حضور ماده تغییر فازدهنده (PCM) درون کلکتور همراه بود، سامانه به بیشترین بازده انرژی خود برابر با ۴۷/۲۷ درصد (با استفاده از رابطه (۲)) دست یافت (شکل ۵ (a)). در مقابل، کمترین

می‌شود. همچنین، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بیشترین مقدار نسبت بازیافت (RR) نیز برای سامانه مجهز به PCM (۰/۱۲۹) گزارش شده است.

Ratio) نمایش می‌دهد. در دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه با حضور PCM، بیشترین نسبت عملکرد برابر با ۱/۳۲ برآورد شده است که این مقدار با این واقعیت توجیه می‌شود که استفاده از PCM باعث افزایش میزان تبخیر در سامانه شده و در نتیجه نسبت عملکرد بالاتری حاصل

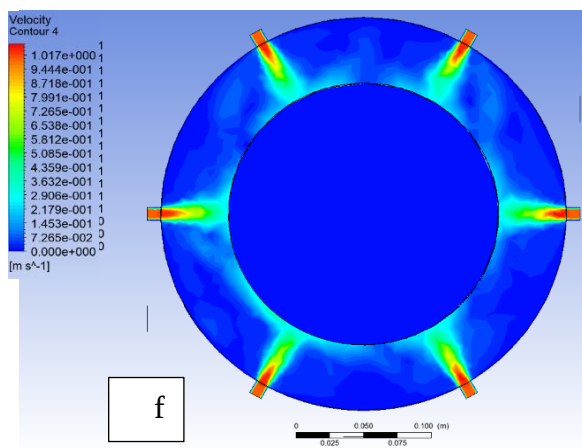
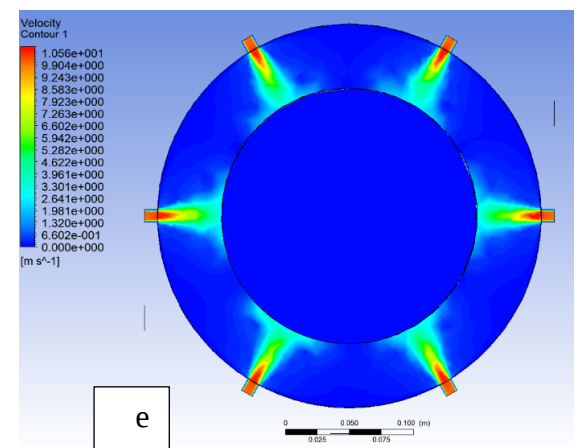
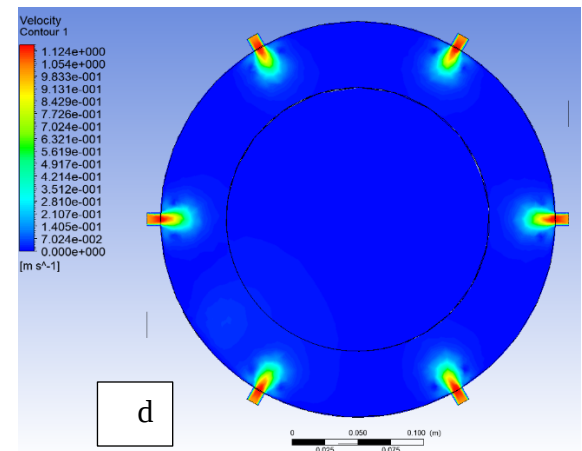
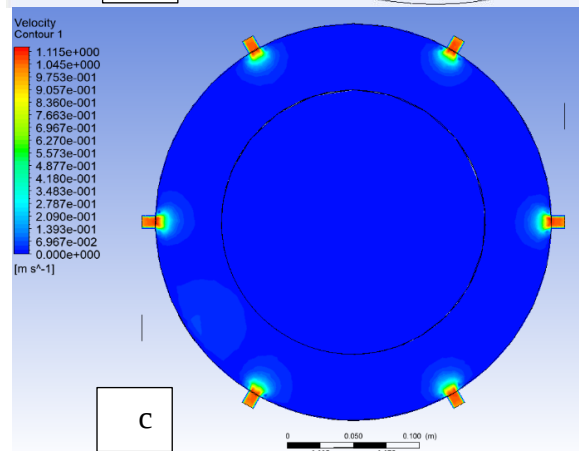
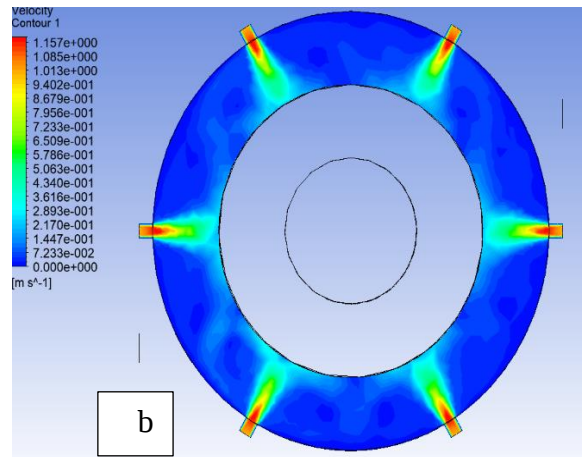
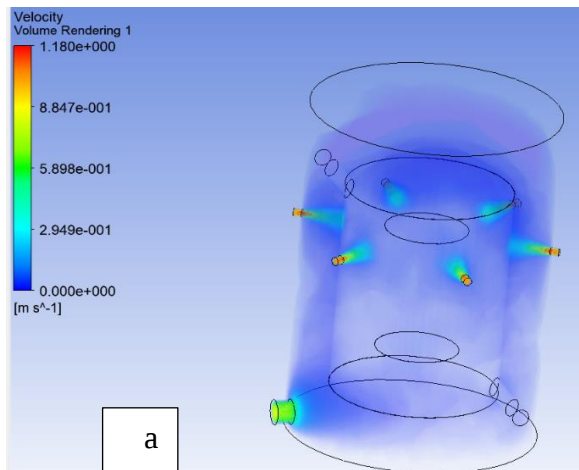


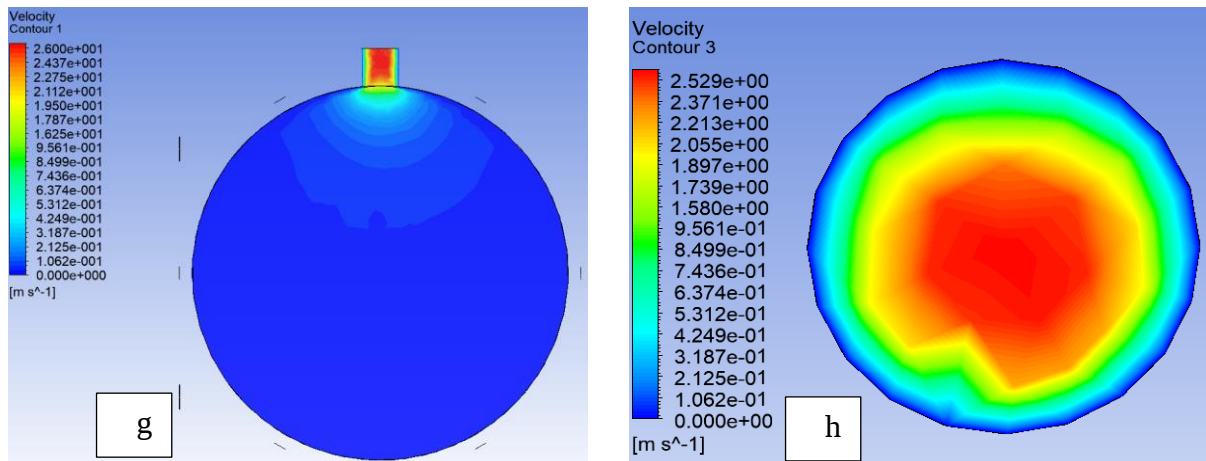
شکل ۵- الف) تاثیر وجود یا عدم وجود ماده تغییر فازدهنده بر انرژی و اکسرژی، و ب) نسبت‌های عملکرد و بازیافت سامانه

Fig. 5. (a) The effect of using PCM on Energy and Exergy, and (b) The recovery and performance ratios of the system

آب شور را در ناحیه خروجی نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، بخشی از آب شور هنگام تماس با لوله می‌دل گرم‌شده و تبخیر می‌شود که این امر سبب کاهش دبی خروجی و دستیابی به سرعت متوسط ۱/۰۹ متر بر ثانیه در ناحیه خروج می‌گردد. این مقدار برای دبی‌های ۰/۵ و ۱ لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر ۰/۷۱ تا ۱/۱۵ متر بر ثانیه بوده است (شکل ۶ g و h). شایان ذکر است که تمام این داده‌ها مربوط به سامانه‌های فاقد PCM هستند. در سامانه‌های بدون PCM، طی بازه زمانی ۰۸:۰۰ تا ۱۱:۳۰، تمام انرژی خورشیدی جذب‌شده به مخزن منتقل شده و صرف تبخیر آب شور می‌شود. اما در سامانه‌های مجهز به PCM، به دلیل توزیع یکنواخت انرژی حرارتی (Mirzaee, Salami, Akhijahani, & Zareei, 2023; Seifi, Samimi-Akhijahani, & Salami, 2024)، نرخ تبخیر افزایش یافته و در نتیجه سرعت خروجی آب شور کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، در این شرایط، فرایندهای ذخیره‌سازی (شارژ) و رهایش (دشارژ) انرژی حرارتی به صورت متناوب انجام می‌شوند.

کانتورهای سرعت سیال داخل سامانه که با روش CFD شبیه‌سازی شده‌اند، در شکل ۶ قسمت‌های (a تا h) نشان داده شده‌اند. در تمامی نماها، دبی جرمی برابر با ۰/۷۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. با افزایش نرخ پاشش، الگوی رژیم جریان نیز تغییر می‌کند. سرعت سیال در ناحیه مرکزی نازل‌ها در بیشترین مقدار بوده و در نزدیکی دیواره‌ها و لوله مارپیچ به حداقل می‌رسد (شکل ۶ a و b). در این سامانه، بیشینه سرعت جریان حدود ۱/۱۸ متر بر ثانیه است. آب شور با یک نرخ جریان کنترل‌شده وارد مخزن شده و قطرات آن به سمت ناحیه مرکزی مخزن هدایت می‌گردد (شکل ۶ c و d). با حرکت جریان به سمت بخش‌های پایین‌تر مخزن، الگوی سرعت تغییر کرده و شدت آن کاهش می‌یابد. بخشی از آب شور تزریق‌شده به دیواره مخزن حرارتی برخورد می‌کند و بخش دیگری از قطرات در قسمت پایین مخزن جمع‌آوری و بازیافت می‌شود (شکل‌های ۶ e و ۶ f). هم‌زمان با افزایش تابش خورشیدی، میانگین دمای سیال کاری در لوله گیرنده افزایش می‌یابد که این موضوع موجب کاهش بردار سرعت در ناحیه پایین می‌شود. شکل ۶ تغییرات کانتورهای سرعت



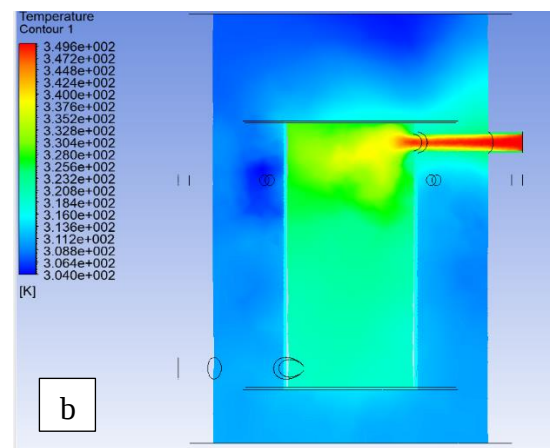
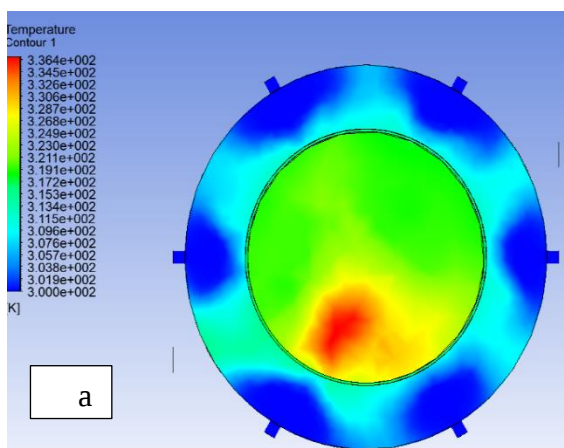


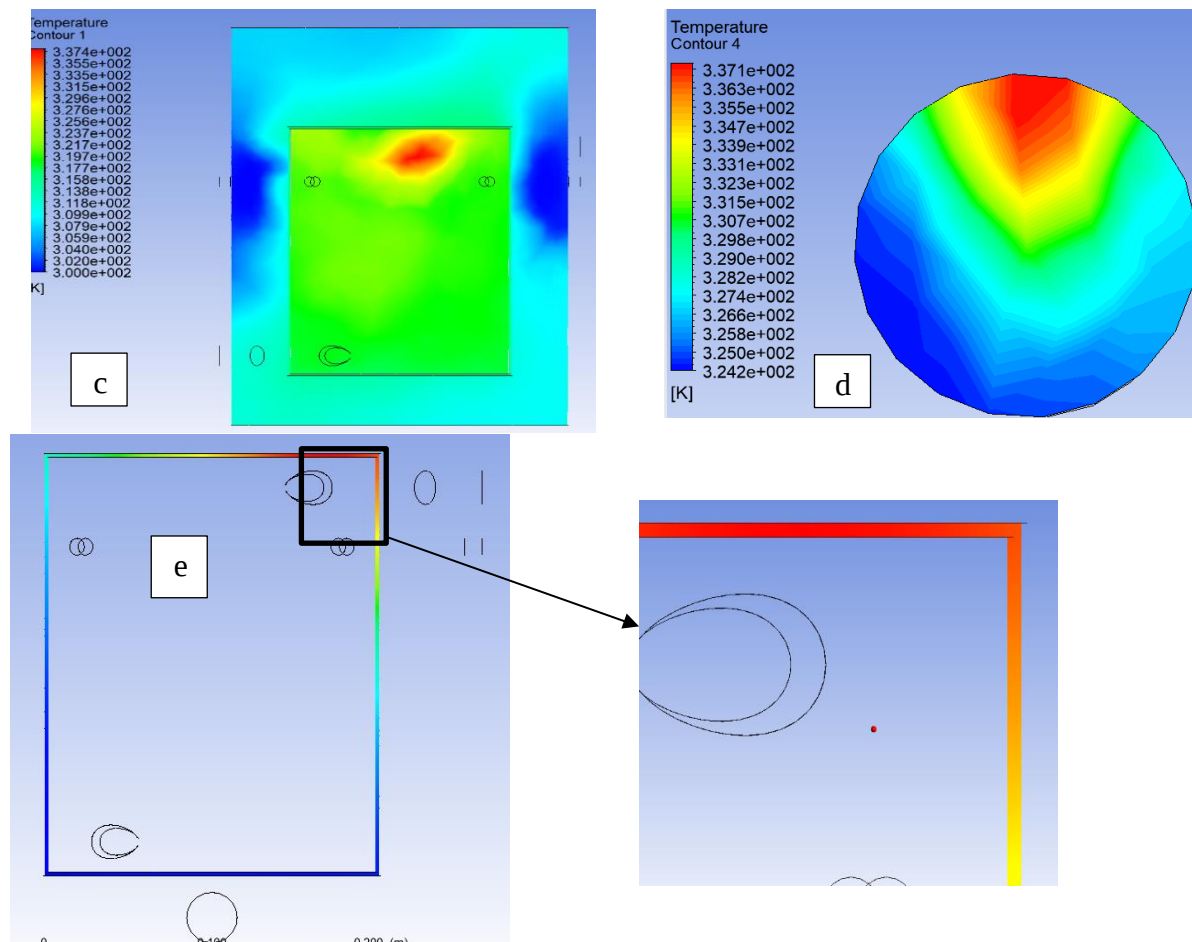
شکل ۶- کانترهای سرعت سیال در سطوح مقطع مختلف و بازه‌های زمانی متناظر داخل دامنه شبیه‌سازی

Fig. 6. Velocity contours of the fluid across multiple cross-sectional planes and corresponding time intervals within the simulation domain

نواحی نزدیک به مخزن حرارت از خود نشان می‌دهند و ضرایب انتقال حرارت بالاتر دیواره، تلفات حرارتی را تشدید می‌کنند، اما استفاده از عایق پشم شیشه ضخیم‌تر این اتلاف را کاهش می‌دهد. شکل ۷ (d) الگوی دمای ناحیه خروجی را نشان می‌دهد؛ در این فرایند، بخشی از سیال پاشیده شده تبخیر می‌شود، در حالی که باقیمانده در کف مخزن جمع شده و به سمت خروجی حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل ۷ (e) مشاهده می‌شود، دمای ناحیه ورودی بالاتر از سایر نواحی است و با حرکت به سمت پایین، دمای دیواره کاهش می‌یابد و میانگین دمای آب شور حدود ۵۴/۲۶ درجه سلسیوس است. ناحیه مرکزی مخزن به دلیل خنک‌شدگی ناشی از قطرات اتمیزه شده و بخار، دمای سیال به‌طور قابل توجه کمتری را ثبت می‌کند.

شکل ۷ نتایج توزیع دما را ارائه می‌دهد، که در آن رفتار حرارتی سامانه را هنگام پاشش آب شور بر روی مبدل حرارتی استوانه‌ای تحلیل می‌کند. در این سامانه، سیال انتقال حرارت از طریق یک لوله جاذب با PCM ماریچی، گردش می‌کند. با تشدید تابش خورشیدی، افزایش دمای آب منجر به گرم شدن سیال کاری می‌شود. شکل ۷ (a) توزیع دما در ساعت ۹ صبح را نشان می‌دهد که در آن پاشش آب شور باعث کاهش دمای مبدل حرارتی و به تبع آن افزایش دمای آب شور شده است. در این حالت، نواحی اطراف منبع حرارت بالاترین دما را دارند، در حالی که قسمت فوقانی به دلیل اثر خنک‌کنندگی فرایند پاشش، دمای کمتری نسبت به قسمت پایین نشان می‌دهد (شکل ۷ c و d). علاوه بر این، دیواره‌های مخزن دماهای پایین‌تری نسبت به



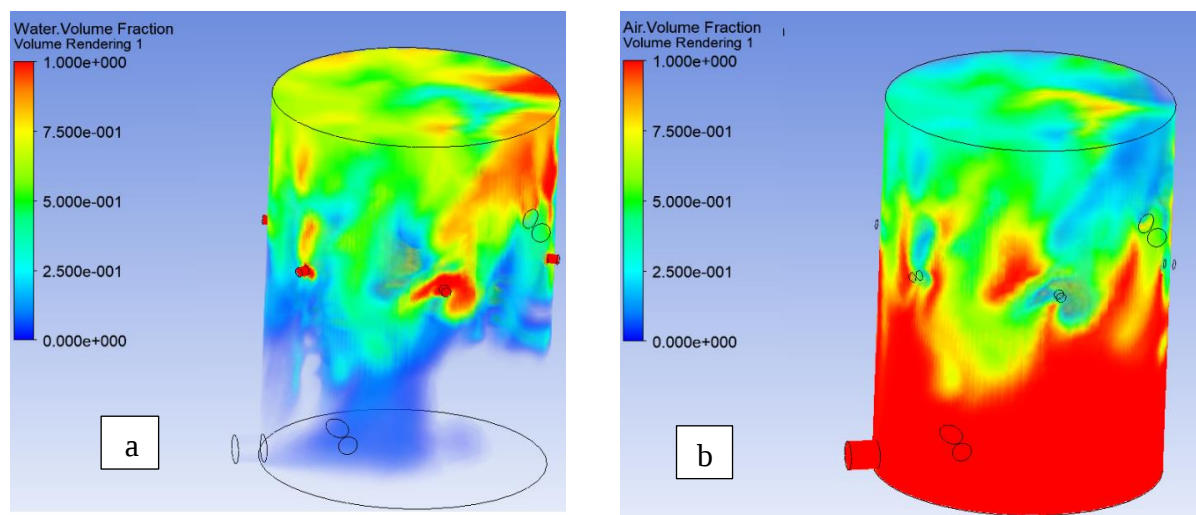


شکل ۷- کانتورهای مربوط به توزیع دما در آب‌شیرین‌کن با سامانه پاشش در ساعت ۹:۰۰
Fig. 7. Temperature distribution contours of the spraying desalination unit at 9:00 a.m

بالایی باقی بماند. با گذشت زمان در $t = 2.350$ ثانیه، گسترش نواحی آبی به شکل چشمگیری بهبود یافته است. شکل ۸ همچنین تغییرات کلی کسر حجمی در کل حجم مخزن را نشان می‌دهد که از یک الگوی یکنواخت پیروی نمی‌کند. نتایج این شبیه‌سازی، با یافته‌های مطالعات مربوط به سامانه‌های مشابه، همخوانی دارد (Marcondes, Santos, Varavei, & Sepehrnoori, 2013). با توجه به ساختار ویژه منبع حرارت داخل مخزن، توزیع کانتورهای کسر حجمی یکنواخت نبوده و برای هر نازل در صفحات مختلف، الگوی متمایزی را نشان می‌دهد. این ناهمگنی در توزیع ناشی از طراحی خاص سیستم و برهم‌کنش عوامل گوناگون حرارتی و هیدرودینامیکی در محیط مخزن است.

تغییرات نسبت حجمی در داخل مخزن

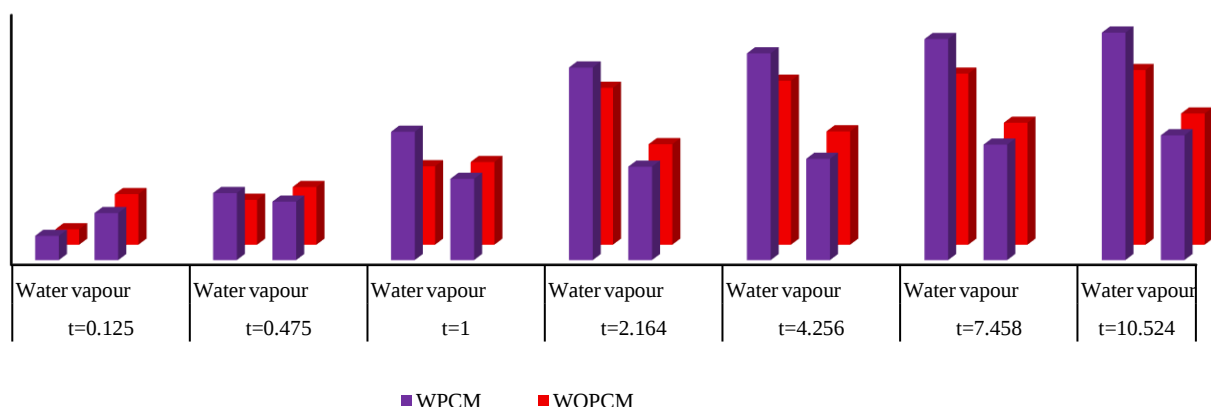
شکل ۸ (a)، تغییرات کسر حجمی آب و شکل ۸ (b) هوای داخل مخزن را نشان می‌دهد. در این تحلیل، کسر حجمی دو فاز آب و هوا در بازه‌ی بین صفر تا یک نوسان داشته است. نتایج نشان می‌دهند که در ناحیه ورودی مخزن، کسر حجمی آب به مقدار بیشینه خود می‌رسد، در حالی که سهم هوا در این بخش ناچیز است. با این حال، این نسبت در سایر قسمت‌های مخزن، به‌ویژه بخش‌های نزدیک به کف مخزن کاملاً برعکس بوده و سهم هوا به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. مکانیسم پاشش آب در فضای مخزن و برخورد قطرات با سطوح مسی موجب شده است که کسر حجمی آب در بخش‌های بالایی در سطح



شکل ۸- تغییرات نسبت حجمی هوا- آب در مخزن در لحظات $t = 0.149$ s و $t = 2.350$ s
Fig. 8. Changes in the air-water volume fractions observed at $t = 0.149$ s and $t = 2.350$ s

به ترتیب ۰/۱۷۱ و ۰/۱۸۴ اندازه گیری شد و تفاوت قابل توجه آن‌ها به ترتیب $P < 0.05$ بیانگر اثر مثبت PCM بر عملکرد سامانه است. همچنین مشاهده می‌شود که کسر حجمی w.v پس از رسیدن به نقطه اشباع، به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان‌دهنده تعادل دینامیکی بین فرایندهای تبخیر و میعان در سامانه است. با این حال، میانگین کسر حجمی برای سیستم با PCM و بدون PCM در طول فرایند شیرین سازی به ترتیب حدود ۰/۲۱ و ۰/۱۹ به دست آمد و این بدان معناست که استفاده از PCM، نرخ تبخیر را حدود ۶/۶۳٪ بهبود بخشیده است.

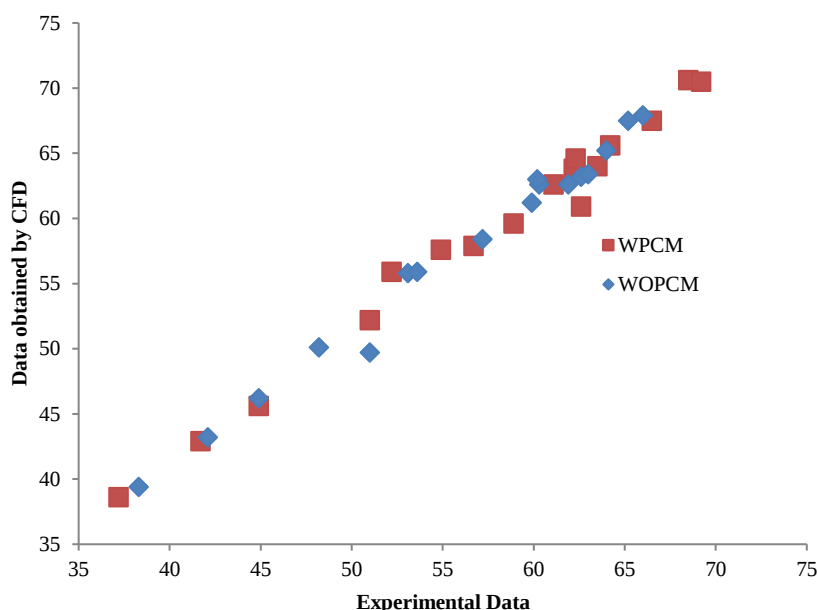
شکل ۹ سیر تکاملی زمان کسر حجمی آب (w.l) و بخار (w.v) را بین ۰/۱۲۵ تا ۱۰/۵۲۴ ثانیه نشان می‌دهد؛ در این بازه زمانی، کسر حجمی هر دو فاز با افزایش مدت زمان آزمایش افزایش یافته است. هرچند کسر حجمی آب پس از ۲/۱۶۴ ثانیه به حالت پایدار رسید. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نرخ پاشش از ۰/۵ لیتر بر ثانیه به ۰/۷۵ لیتر بر ثانیه، کسر حجمی بخار را افزایش داد، اما در نرخ ۱ لیتر بر ثانیه این روند معکوس شد، که این امر به دلیل برخورد قطرات آب با مولکول‌های بخار و بازگشت آن‌ها به چرخه است. در زمان ۱۰/۵۲۴ ثانیه، مقادیر کسر حجمی بخار برای سامانه‌های با و بدون PCM



شکل ۹- نوسانات مربوط به نسبت حجمی آب- بخار در شرایط با و بدون PCM در مخزن در لحظات مختلف بر حسب ثانیه
Fig. 9. Fluctuations in liquid and vapour volume fractions with and without PCM at various times in seconds

که چارچوب شبیه‌سازی مورد استفاده (شامل مدل مارپیچی، سیستم توزیع سیال و محفظه اسپری) با تطابق بالا ($R^2 > 0.975$) ثبت کرده است، که با یافته‌های مطالعات قبلی نیز که روند مشابه را انجام داده‌اند (Ghadirjafarbeigloo, Zamzamin, & Yaghoubi, 2014; Motahayyer Razdari, Arabhosseini, Samimi Akhijahani, & Khashehchi, 2018) مطابقت دارد.

با توجه به داده‌های تجربی و CFD و مقایسه بین داده‌ها، نشان می‌دهد که روش دینامیک سیالات عددی، دمای آب خروجی را به میزان $3/94 \pm 0/96$ درصد بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. این تفاوت ممکن است به دلیل عوامل مختلفی مانند زاویه تابش، تغییرات زمانی در شدت تابش خورشیدی، آب‌بندی محفظه‌ها و خطاهای ابزارهای اندازه‌گیری باشد. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد



شکل ۱۰ - مقایسه پروفیل دمای سیال خروجی از اندازه‌گیری‌های تجربی در مقابل پیش‌بینی‌های عددی برای آب شیرین‌کن
Fig. 10. Comparison of the outlet fluid temperature profile from experimental measurements versus numerical predictions for the desalination system

PCM بود. این کاهش ظرفیت تولید، تأثیر مستقیمی بر کاهش عدد ناسلت داشت. در مقابل، سامانه مجهز به PCM در مدت زمان ۴ ساعت، قادر به تولید ۹۸۷ سی‌سی آب بود. برای مقایسه، در سیستم‌های خورشیدی غیرفعال نرخ تولید روزانه (۱۳ ساعت در روز) حدود ۳/۸ لیتر در متر مربع گزارش شده است (Singh & Samsher, 2021). علاوه بر آن بازده انرژی ۴۷/۲۷ درصد گردید که عملکردی قابل‌قیاس با پژوهش‌های مشابه می‌باشد (Aftiss, Najim, 2025 with 62.11%; Singh & Kumar, 2024 with 46.23%). مقدار بازده اکسرژی معادل ۷/۶۵ درصد نیز به‌دست آمد. به‌کارگیری هم‌زمان لوله مارپیچی حاوی PCM، سامانه پاشش و خنک‌کاری زمین‌گرمایی به‌عنوان یک رویکرد نوین، برتری این تحقیق را نسبت به سایر آثار مشابه (Fayaz et al., 2024; Saha et al., 2024; Tashtoush et al., 2024) آشکار می‌سازد.

میزان و کیفیت آب تولیدی

با توجه به میزان حجم آب جمع‌آوری‌شده، میزان آن بسته به شرایط عملیاتی اعمال‌شده در طول آزمایش‌ها متفاوت است. در تمام آزمایش‌ها، نرخ جریان آب در مقدار بهینه ۴/۲ لیتر در دقیقه ثابت نگه داشته شد. این تثبیت جریان منجر به انتقال حرارت کارآمد با حداقل اتلاف انرژی به مخزن آب شد. لازم به ذکر است که داده‌های ارائه‌شده مربوط به دوره زمانی ۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر (به مدت ۴ ساعت) است. اگر سامانه برای ساعات طولانی‌تری (از طلوع آفتاب در ساعت ۷ صبح تا غروب آفتاب در ساعت ۸ شب) بهینه شود، ظرفیت تولید آب شیرین به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. مقدار آب تولیدشده در سامانه بدون PCM برای دوره ۴ ساعته برابر با ۸۴۲ سی‌سی اندازه‌گیری شد که به دلیل عدم وجود پارافین (که به‌عنوان تعدیل‌کننده نوسانات حرارتی عمل می‌کند) کمتر از سامانه مجهز به

است. در جدول ۳ پارامترهای مقایسه‌ای آب شیرین کن‌های خورشیدی با مواد تغییر فازدهنده نشان داده شده است.

هم‌خوانی مطلوب میان یافته‌های عملی و شبیه‌سازی‌های عددی (با خطای کمتر از ۵ درصد) گواهی بر صحت مدل‌سازی صورت گرفته

جدول ۳- مقایسه سامانه‌های آب شیرین کن خورشیدی با PCM

Table 3- Comparison of solar desalination systems with PCM

میزان تولید آب Water Production (mL m ⁻² day ⁻¹)	بازده اکسرژی (درصد) Exergy Efficiency (%)	بازده انرژی (درصد) Energy Efficiency (%)	PCM / Nano- PCM	نوع سامانه System Type	منبع Reference
2068 mL m ⁻² day ⁻¹	10.67	46.23	Nano-PCM (CuO/TiO ₂ + paraffin)	آب شیرین کن خورشیدی تک شیب + کلکتور سهموی خطی Single-slope solar still + parabolic trough collector	Singh & Kumar (2024)
66.18% increase	-	54.04	Beeswax PCM	آب شیرین کن خورشیدی لوله‌ای + PTC + مبدل حرارتی Tubular solar still + PTC + heat exchanger	Amin et al. (2025)
796 mL m ⁻² day ⁻¹	-	-	Thermoelectric module + Iron Nano	آب شیرین کن خورشیدی ترموالکتریکی Thermoelectric solar desalination	Shoeibi et al. (2022)
722 mL m ⁻² in 4 h	-	-	PCM in helical tube	PTC با PCM در لوله گیرنده PTC with PCM in receiver tube	Seifi et al. (2024)
6040 mL day ⁻¹	5.31	62.11	Moving PCM layer	آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با لایه PCM دینامیکی Single-slope solar still with dynamic PCM layer	Aftiss et al. (2025)
213.25 L day ⁻¹	-	37.07% improvement	Layered PCM (2 cm thickness)	سیستم یکپارچه + PVT + RO + PCM PCM PVT + RO + PCM integrated system	Tashtoush et al. (2024)
987 mL in 4 h (~2468 mL m ⁻² day ⁻¹)	7.65 (Still) / 8.21 (Collector)	47.27 (Collector) / 47.26 (Still)	Paraffin RT-35	آب شیرین کن خورشیدی با + لوله PCM مارپیچی + سیستم اسپری + خنک کننده زمین گرمایی Solar desalination with PTC + helical PCM tube + spray system + geothermal cooling	مطالعه حاضر Present Study

آب نشان داد که غلظت کل جامدات محلول (TDS) در مقایسه با آب شهری به‌طور قابل توجهی کاهش یافت (کاهش حداقل ۳۰۰ میلی گرم در لیتر). سطوح سدیم و پتاسیم به‌عنوان شاخص‌های کلیدی کیفیت آب آشامیدنی (Khan et al., 2023) بیش از ۳۰٪ کاهش یافت. این بهبود کیفی، کارایی سامانه را در تولید آب شیرین با استانداردهای قابل قبول را تأیید می‌کند.

جدول ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده برای غلظت عناصر مختلف و پارامترهای کیفی در دو نمونه آب شامل آب شیرین تولیدشده توسط سامانه (نمونه) و آب شرب شهری (به‌عنوان مرجع مقایسه) را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها بر حسب میلی گرم بر لیتر انجام شده است، به‌جز شاخص pH که بدون بعد می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل کیفیت

جدول ۴- مقادیر مربوط به عناصر تشکیل‌دهنده برای آب حاصل از سامانه و آب شرب

Table 4- Values of constituent elements for sample water and drinking water

عناصر Element	مقدار کمی Quantity (mg L ⁻¹)	
	آب شرب	آب نمونه
	Tap water	Sample water
کلسیم Calcium	16	6
نیترات Nitrates	1.4	0.2
آهن Iron	1.6	0
سختی کل Total Hardness	550	10.14
پتاسیم Potassium	1.6	1.2
منیزیم Magnesium	12	2.1
سدیم Sodium	3.4	0.1
اسیدیته PH	8.6	6.7
نمک Salt	0.1	0
کل مواد جامد محلول Total dissolved solids	456	72

نتیجه‌گیری

در پایان این پژوهش، نتایج جامع حاصل از بررسی عملکرد سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به PCM در مقایسه با سامانه فاقد آن، مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های CFD به‌وضوح نشان‌دهنده‌ی مزایای قابل‌توجه استفاده از PCM در این فناوری هستند.

مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

۱. بهبود عملکرد حرارتی: حضور PCM به‌عنوان یک مخزن حرارتی، توانایی سامانه را در جذب، ذخیره و آزادسازی انرژی خورشیدی به‌طور مؤثری افزایش داد. این امر منجر به افزایش دمای آب شور در حال چرخش در مخزن و در نتیجه، افزایش انتقال حرارت به سیال کاری و بهبود بازده انرژی و اگزرژی کلکتور و واحد آب‌شیرین‌کن گردید. رسیدن به بازده انرژی کلکتور از ۴۲/۶۵٪ به ۴۷/۲۷٪، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای این سامانه در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی است.

۲. افزایش در تولید آب شیرین: یکی از برجسته‌ترین نتایج، افزایش حدود ۱۷/۲٪ در میزان آب شیرین تولیدی توسط سامانه مجهز به PCM بود (از ۸۴۲ سی‌سی به ۹۸۷ سی‌سی در مدت زمان ۴ ساعت). این بهبود مستقیماً به نرخ تبخیر بالاتر و پایدارتر ناشی از آزادسازی تدریجی انرژی ذخیره‌شده در PCM نسبت داده می‌شود.

۳. تأیید کیفیت بالای آب تولیدی: غلظت کل جامدات محلول در مقایسه با آب شهری به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت (کاهش حداقل ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و سطوح یون‌های مضر مانند سدیم و پتاسیم، تضمین‌کننده سلامت مصرف‌کنندگان بود. این کیفیت بالا، قابلیت اطمینان سامانه را برای تأمین آب آشامیدنی در مناطق بحران‌زده تأیید می‌کند.

۴. تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی: این تحلیل تصویری دقیق از توزیع میدان‌های سرعت، دما و فازهای بخار و مایع در داخل سامانه ارائه داد. این شبیه‌سازی‌ها نه تنها نتایج تجربی را تأیید کردند، بلکه مکانیزم‌های دقیق تأثیر PCM بر فرایندهای انتقال حرارت و تبخیر را آشکار ساختند و امکان شناسایی نواحی با پتانسیل بهبود بیشتر را فراهم آوردند.

با توجه به افزایش بازده انرژی از ۴۲/۶۵٪ به ۴۷/۲۷٪ و افزایش تولید آب شیرین به میزان ۱۷/۲٪، استفاده از PCM در این سامانه به‌طور غیرمستقیم منجر به کاهش حدود ۱۵-۱۰٪ در انرژی ورودی مورد نیاز به‌ازای هر لیتر آب شیرین تولیدی می‌شود که معادل صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف سوخت‌های فسیلی در کاربردهای واقعی است. این پژوهش کاربرد مؤثر PCM را در ارتقای کارایی سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی اثبات می‌کند. سامانه پیشنهادی، با ترکیب بهینه انرژی خورشیدی و فناوری ذخیره‌سازی حرارت، راهکاری پایدار، اقتصادی و زیست‌محیطی برای مقابله با کمبود آب

مشارکت نویسندگان

هادی صمیمی اخیهجانی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی،
جمع‌آوری داده‌ها، شبیه‌سازی عددی، تهیه اولیه متن
محمد صالح برقی چهرمی: مشاوره فنی، مفهوم‌سازی،
تصویرسازی نتایج، تکمیل متن
اس مادهانکومار: روش‌شناسی، اعتبارسنجی، ویرایش متن
انگلیسی

شیرین در مناطق مختلف، به‌ویژه در نواحی با دسترسی محدود به منابع آبی و انرژی پایدار، ارائه می‌دهد. تحقیقات آتی می‌تواند بر روی بهینه‌سازی بیشتر نوع و مقدار PCM، بهبود طراحی کلکتور، تحلیل اقتصادی دقیق و ارزیابی چرخه عمر زیست‌محیطی و بررسی اثرات بلندمدت عملکرد سامانه تمرکز کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه کردستان انجام شده است.

References

1. 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>
2. Aftiss, R., Najim, M., Tbatou, T., & Hissouf, M. (2025). Numerical study of conventional solar still integrated dynamic PCM layer. *Desalination*, 600, 118493. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118493>.
3. Amin, M., Putra, N., Rizal, T. A., Umar, H., Ginting, S. F., Amir, F., & Kusuma, M. H. (2025). Enhanced tubular solar still performance using nano beeswax/graphene phase change materials and parabolic trough collectors. *Journal of Energy Storage*, 124, 116884. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116884>
4. ASHRAE. (2003). *Solar energy use*. In *ASHRAE Handbook—HVAC Applications* (Chapter 33). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
5. Bahramei, R., Samimi-Akhijahani, H., Salami, P., & Behrooz-Khazaei, N. (2025). Life cycle assessment and CFD evaluation of an innovative solar desalination system with PCM and geothermal system. *Journal of Energy Storage*, 120, Article 116116. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116116>
6. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach (8th ed.)*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
7. Dhivagar, R., Shoeibi, S., Kargarsharifabad, H., Ahmadi, M. H., & Sharifpur, M. (2022). Performance enhancement of a solar still using magnetic powder as an energy storage medium-exergy and environmental analysis. *Energy Science & Engineering*, 10(8), 3154-3166. <https://doi.org/10.1002/ese3.1210>
8. Dhivagar, R., Shoeibi, S., Parsa, S. M., Hoseinzadeh, S., Kargarsharifabad, H., & Khiadani, M. (2023). Performance evaluation of solar still using energy storage biomaterial with porous surface: an experimental study and environmental analysis. *Renewable Energy*, 206, 879-889. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.097>
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. Elsayed, M., Mansour, M. S., Yahya, H., Eid, M. A., & Abdel-Raouf, M. M. (2026). Thermal buffering with medium-temperature PCM for enhanced solar still performance in hot Egyptian conditions. *Scientific Reports*, 16(1), 12733. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-47006-7>
11. Fayaz, H., Ramesh, S., Afzal, A., Ağbulut, Ü., Khan, S. A., Asif, M., ... & Linul, E. (2024). Investigation of numerical phase transition of nano-enhanced SiC/paraffin wax PCM in solar-assisted water desalination system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 102528. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102528>
12. Foster, A. M., Barrett, R., James, S. J., & Swain, M. J. (2002). Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration*, 25(8), 1102-1109. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00108-6)
13. Ghadirjafarbigloo, S., Zamzamian, A. H., & Yaghoubi, M. (2014). 3-D numerical simulation of heat transfer and turbulent flow in a receiver tube of solar parabolic trough concentrator with louvered twisted-tape inserts. *Energy procedia*, 49(Supplement C), 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.040>
14. Iranmanesh, M., Akhijahani, H. S., & Jahromi, M. S. B. (2020). CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*, 145, 1192-1213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>
15. Jianping, W., & Shonglin, X. (1998). Local hydrodynamics in a gas-liquid-solid three-phase bubble column reactor. *Chemical Engineering Journal*, 70(1), 81-84. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(97\)00120-4](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(97)00120-4)
16. Jean, J., Brown, P.R., Jaffe, R.L., Buonassisi, T., & Bulovic, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy*

- and Environmental Science, 8(4), 1200-1219. <https://doi.org/10.1039/c4ee04073b>
17. 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>
 18. 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>
 19. 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>
 20. Khopkar, A. R., Rammohan, A. R., Ranade, V. V., & Dudukovic, M. P. (2005). Gas-liquid flow generated by a Rushton turbine in stirred vessel: CARPT/CT measurements and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*, 60(8-9), 2215-2229. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.044>
 21. Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
 22. 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>
 23. Li, D., & Chen, W. (2022). Effects of impeller types on gas-liquid mixing and oxygen mass transfer in aerated stirred reactors. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 360-373. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.019>
 24. Marcondes, F., Santos, L. O. S., Varavei, A., & Sepehrnoori, K. (2013). A 3D hybrid element-based finite-volume method for heterogeneous and anisotropic compositional reservoir simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 342-351. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.04.024>
 25. Matonis, D., Gidaspow, D., & Bahary, M. (2002). CFD simulation of flow and turbulence in a slurry bubble column. *AIChE Journal*, 48(7), 1413-1429. <https://doi.org/10.1002/aic.690480706>
 26. Mirzaee, P., Salami, P., Akhijahani, H. S., & Zareei, S. (2023). Life cycle assessment, energy and exergy analysis in an indirect cabinet solar dryer equipped with phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 61, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106760>
 27. Motahayyer Razdari, M., Arabhosseini, A., Samimi Akhijahani, H., & Khashehchi, M. (2018). Application of CFD in optimization of solar dryer absorber plate. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(2), 285-294. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.240246.664981>
 28. Mousa, H., & Abu Arabi, M. (2012). Desalination and hot water Production using solar still enhanced by external solar collector. *Desalination and Water Treatment*, 51, 1296-1301. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699237>
 29. 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>
 30. Norton, T., & Sun, D. W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD)—an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(11), 600-620. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>
 31. 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>
 32. Rezakazemi, M. (2018). CFD simulation of seawater purification using direct contact membrane desalination (DCMD) system. *Desalination*, 443, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.048>
 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. Saha, S., Sarker, M. R. I., Kader, M. A., Ahmed, M. M., Tuly, S. S., & Mustafi, N. N. (2024). Development of a vacuum double-slope solar still for enhanced freshwater productivity. *Solar Energy*, 270, 112385. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112385>
 35. Saidur, R., Elcevadi, E., Mekhilef, S., Safari, A., & Mohammed, H. A. (2011). An overview of different distillation methods for small scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4756-4764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.077>
 36. Seifi, J., Samimi-Akhijahani, H., & Salami, P. (2024). Investigating the thermo-economic performance and modeling of a parabolic solar collector with phase change material in the receiver tube in a solar desalination. *Desalination*, 572, 116980. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116980>
 37. Shanmugaraja, R., & Vivekanandan, S. (2025). Development of a 3D simulation model for biochar-PCM composites integrated with a solar still system. *Journal of Energy Storage*, 132, 117662. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117662>
 38. Sharma, S. D. & Sagara, K. (2005). Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, 2(1), 1-56. <https://doi.org/10.1081/GE-200051299>

39. Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
40. Shoeibi, S., Rahbar, N., Abedini Esfahlani, A., & Kargarsharifabad, H. (2022). Energy matrices, economic and environmental analysis of thermoelectric solar desalination using cooling fan. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(17), 9645-9660. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11217-7>
41. Siddique, M., Turkmen, N., Al-Rabghi, O. M., Shabana, E., & Albeirutty, M. H. (2018). Small-scale low pressure 'single effect distillation' and 'single stage flash' solar driven barometric desalination units: a comparative analysis. *Desalination*, 444, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.011>
42. Singh, V. K., & Kumar, D. (2024). An experimental investigation and thermo-economic performance analysis of solar desalination system by using nano-enhanced PCM. *Materials Today Sustainability*, 27, 100884. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100884>
43. Singh, A. K., & Samsher. (2021). Material conscious energy matrix and enviro-economic analysis of passive ETC solar still. *Materials Today: Proceedings*, 38(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.117>
44. Singh, A. K. (2023). Mathematical analysis of optimized requisites for novel combination of solar distillers. *Journal of Engineering Research*, 11(4), 515-525. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100121>
45. Tang, S., Zhang, Q., Gong, X., Xu, C.-Y., Singh, V. P., Sun, F., Feng, Y., Li, Z., & Han, L. (2026). Emergent constraints reveal underprediction of future global water availability under anthropogenic forcing. *Global and Planetary Change*, 257, 105252. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.105252>
46. Taremi, A. A., Joseph, A., Elsayad, M. M., Abdullah, A. S., Sharshir, S. W., & Jang, S. H. (2024). Thermoenviroeconomic assessment of upgraded solar desalination with heat pump, various active and passive modifications. *Process Safety and Environmental Protection*, 184, 411-427. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.016>
47. Tashtoush, B., Al Ghadi, M., & Tashtoush, N. (2024). Advancing solar-powered hybrid FO-MD desalination: integrating PVT collectors and PCM for sustainable water production in residential building. *Energy and Buildings*, 313, 114246. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114246>
48. Tawalbeh, M., Mohammed, S., Alnaqbi, A., Alshehhi, S., & Al-Othman, A. (2023). Analysis for hybrid photovoltaic/solar chimney seawater desalination plant: A CFD simulation in Sharjah, United Arab Emirates. *Renewable Energy*, 202, 667-685. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.106>
49. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Harlow, Essex, England: Longman Scientific & Technical.
50. Xuening, F., Lei, C., Yuman, D., Min, J., & Jinping, F. (2015). CFD modeling and analysis of brine spray evaporation system integrated with solar collector. *Desalination*, 366, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.027>
51. 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. *Energy and Buildings*, 64, 639-646. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045>
52. 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, 1-5. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918378>
53. Zhao, Q., Zhao, D. L. & Chung, T.S. (2021). Thin-film nanocomposite membranes incorporated with defective ZIF-8 nanoparticles for brackish water and seawater desalination. *Journal of Membrane Science*, 625, 119158. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119158>