



The University of Tehran Press

Numerical Study of the Effect of Phase Change Material (PCM) on the Performance of the Evacuated Solar Collector System in Tehran's Climatic Conditions

Roozbeh Yousefnezhad¹ | Behrang Sajadi^{2*}

1. M.Sc., School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: roozbeh.you@gmail.com

2. Corresponding Author, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: bsajadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 21 September 2025

Revised: 21 November 2025

Accepted: 21 December 2025

Published Online: 28 May 2026

Keywords:

Evacuated solar collector,
Phase change material (PCM),
Solar radiation,
Domestic water heating systems.

ABSTRACT

In this study, the effect of using phase change materials (PCMs) on the performance of an evacuated tube solar collector for domestic heating applications under the climatic conditions of Tehran was investigated numerically. To solve the governing system of equations, the forward difference numerical method was employed. The equations were solved in such a way that the final temperature of the system at the end of each complete cycle would be equal to the initial temperature at the beginning of the next cycle. The results indicate that adding a phase change material improves the system's efficiency under various weather conditions; however, this improvement depends on several parameters such as ambient temperature and solar radiation intensity. For example, in the system analyzed in this study, during the month of August, incorporating a phase change material led to 4.1% increase in overall efficiency. Furthermore, comparing the temperature variations of the system with and without the phase change material shows that adding the PCM allows for energy storage and temperature regulation during peak solar radiation and the release of stored latent heat when the radiation intensity decreases. This process ultimately leads to an improvement in the overall performance of the system.

Cite this article: Yousefnezhad, R. & Sajadi, B. (2026). Numerical Study of the Effect of Phase Change Material (PCM) on the Performance of the Evacuated Solar Collector System in Tehran's Climatic Conditions. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 329-347. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.403900.1192>



© Roozbeh Yousefnezhad, Behrang Sajadi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.403900.1192>

Introduction

Solar energy, as one of the clean and renewable energy sources, has gained significant attention as an environmentally friendly and economically viable solution to meet global energy demands. This energy source, through technologies that convert sunlight into usable energy, is utilized in various forms such as electricity generation, water heating and cooling, and even industrial processes.

With technological advancements, solar energy conversion systems have become one of the main energy sources worldwide, and the costs of installation and operation have decreased significantly. Moreover, the use of solar energy contributes to sustainable development, reduces dependence on fossil fuels, and lowers greenhouse gas emissions.

Solar energy utilization and storage have numerous applications in both domestic and industrial fields, including desalination units and industrial furnaces. For this reason, researchers have focused on developing solutions to enhance the efficiency of such systems.

One of these areas of study involves solar water heating systems using heat pipes. Solar domestic water heating systems, through solar thermal collectors, heat water by absorbing solar radiation. The

collectors capture sunlight and convert it into heat, which is then absorbed by the working fluid passing through them. This thermal energy may be stored or directly used as needed.

Since solar collectors are the most critical components of solar water heating systems, this study focuses on investigating the use of phase change materials (PCMs) and their impact on improving system efficiency for evacuated solar collectors in residential applications.

Materials and Methods

This study employs real environmental data from Tehran, such as temperature and solar radiation variations combined with the governing mathematical equations of evacuated tube solar collector systems. Using a set of appropriate simplifying assumptions, the system is analyzed under various operating conditions to compare its performance both with and without the incorporation of a phase change material (PCM). In addition, the study investigates how different PCM types, varying water demand levels, and ambient conditions influence the overall efficiency and performance of the system.

Results and Conclusion

This paper investigates the effect of using a storage tank containing phase change material (PCM) on the performance of an evacuated solar collector under the climatic conditions of Tehran. An analysis of the collector temperature variations during August revealed that incorporating Myristic Acid as the PCM in the storage tank allowed the system temperature to remain constant for 36 minutes, corresponding to the energy absorption phase of the material. During the cooling process, the system temperature remained constant for 51 minutes, representing the release phase of the stored energy as the PCM transitioned from liquid to solid. This controlled storage and release of thermal energy ultimately resulted in a 4.1% improvement in system efficiency. Further analysis conducted for different months and varying climatic conditions showed that the use of PCM led to an average efficiency increase between 2.7% and 4.1%, with slightly higher improvements observed during warmer months.

In addition, the comparison of different phase change materials indicated that the type and thermo-physical properties of the PCM significantly influence system performance. For instance, using Rubitherm-RT20, which has a relatively lower melting point compared to Myristic Acid, reduced system efficiency by 7.9%. Additionally, the results demonstrated that the water consumption rate, or more specifically, the ratio of PCM mass to water volume in the storage tank, has a considerable impact on system efficiency. Therefore, the amount of PCM incorporated into the tank should be carefully determined to ensure an optimal balance between the PCM and the water volume.

As a result, it is recommended that future research expand upon the current work by incorporating a layered temperature model capable of simulating thermal stratification effects. Additionally, performing a thermo-economic analysis to simultaneously evaluate both thermal and economic impacts is advised. Adopting such an approach can provide a deeper understanding of the system's actual performance and play a significant role in optimizing its design and improving its cost-effectiveness. Also, Studying the optimal PCM mass fraction in the storage tank can serve as a valuable direction for future research on integrating phase change materials into evacuated solar collector systems.



مطالعه عددی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده بر کارایی سیستم کلکتور خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی تهران

روزبه یوسف‌نژاد^۱ | بهرنگ سجادی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: roozbeh.you@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bsajadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

کلکتور خورشیدی،

ماده تغییر فاز دهنده،

شار خورشیدی،

سیستم‌های گرمایش آب خانگی.

در این پژوهش تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده روی کارایی سیستم کلکتور خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی تهران برای سیستم گرمایش خانگی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، به منظور حل دستگاه معادلات حاکم بر سیستم از روش عددی تفاضل پیشرو استفاده شده و تلاش شده است که معادلات به گونه‌ای حل شوند که دمای نهایی سیستم در پایان یک مرحله حل با دمای شروع سیستم در ابتدای مرحله بعد برابر باشد. بررسی انجام شده نشان می‌دهد افزودن ماده تغییر فاز دهنده در شرایط آب‌وهوایی مختلف به افزایش کارایی سیستم منجر می‌شود، اما این افزایش تابع پارامترهای مختلفی همچون دمای محیط و شار تابشی است. به طور مثال، در سیستم مفروض در این پژوهش، در ماه آگوست، اضافه کردن ماده تغییر فاز دهنده موجب افزایش ۴/۱ درصدی کارایی سیستم می‌شود. همچنین، بررسی تغییرات دمای سیستم با در نظر گرفتن ماده تغییر فاز دهنده و مقایسه آن با تغییرات دمای سیستم بدون ماده تغییر فاز دهنده نمایانگر این موضوع است که افزودن ماده تغییر فاز دهنده موجب ذخیره انرژی و کنترل دما در اوج تابش و رهاسازی این انرژی نهفته در زمان کاهش شار می‌شود که این امر در نهایت موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود.

استناد: یوسف‌نژاد، روزبه و سجادی، بهرنگ (۱۴۰۵). مطالعه عددی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده بر کارایی سیستم کلکتور خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی تهران. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۲) ۳۲۹-۳۴۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.403900.1192>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© روزبه یوسف‌نژاد، بهرنگ سجادی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.403900.1192>



۱. مقدمه

انرژی خورشید یکی از منابع انرژی پاک و قابل تجدید، به عنوان راه حلی محیط زیستی و اقتصادی برای تأمین نیازهای انرژی جهانی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این منبع انرژی، با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های تبدیل نور خورشید به انرژی قابل استفاده، به شکل‌های مختلفی مانند تولید برق، گرمایش و خنک کردن آب، و حتی انجام فرایندهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنولوژی‌های پراکنده تبدیل انرژی خورشیدی، به یکی از منابع اصلی انرژی در دنیا تبدیل شده و با پیشرفت فناوری، هزینه‌های نصب و بهره‌برداری از آن به شدت کاهش یافته است. علاوه بر این، استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند به توسعه پایدار، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند.

استفاده از انرژی خورشیدی و ذخیره‌سازی آن کاربردهای بسیاری در زمینه‌های خانگی و صنعتی از جمله آب‌شیرین‌کن‌ها و کوره‌های صنعتی دارد. به همین دلیل، گسترش راه‌حلی‌هایی به منظور افزایش کارایی در خصوص این نوع سیستم‌ها مورد توجه محققان بوده است. یکی از این موارد در رابطه با سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی با لوله‌های حرارتی بوده است. سیستم‌های گرمایش آب خانگی خورشیدی با استفاده از کلکتورهای حرارتی خورشیدی، آب را با دریافت انرژی تابشی خورشید گرم می‌کنند. کلکتورهای خورشیدی پرتوهای خورشید را جذب کرده و آن‌ها را به حرارت تبدیل می‌کنند. این حرارت سپس توسط مایع کاری که از کلکتور عبور می‌کند، جذب می‌شود و ممکن است ذخیره شده یا به صورت مستقیم استفاده شود. از آنجا که کلکتورهای خورشیدی مهم‌ترین بخش از سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی هستند، این مطالعه روش‌هایی برای بهبود کارایی آن‌ها ارائه می‌دهد.

در یک مطالعه تجربی کارایی حرارتی یک کلکتور خالص خورشیدی لوله‌ای با استفاده از سه نوع لوله جذب‌کننده مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در این تحقیق از نانوسیال سیلیکا/آب - اتیلن گلیکول درون لوله‌های جذب‌کننده استفاده شد. داده‌های تجربی شامل دمای لحظه‌ای ورودی و خروجی، دمای محیط و تابش خورشید اندازه‌گیری شده و مقایسه لازم بین عملکرد حرارتی لوله‌های ماریچ، ماریچ هلیکال و U شکل صورت گرفت. نتایج تجربی نشان داد استفاده از هر دو نوع لوله ماریچ و ماریچ هلیکال به طور قابل توجهی کارایی را بهبود داد، با این وجود لوله‌های ماریچ هلیکال عملکرد بهتری داشتند. علاوه بر این، در صورت عدم استفاده از نانوذرات، محاسبات اقتصادی نشان داد استفاده از لوله‌های ماریچ و ماریچ هلیکال هزینه را به مقدار ۶۰ و ۷۲ درصد افزایش داد و در صورت استفاده از نانوسیال در لوله‌های ماریچ هلیکال باعث افزایش ۳/۴ برابری هزینه شد. در پژوهشی دیگر عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت^۱ (FPSC) به صورت تجربی و تحلیلی بررسی شد [۲]. نانوسیال مورد مطالعه SiO_2 و آب دی‌یونیزه با غلظت حجمی تا ۰/۶ درصد و قطر نانوذرات ۲۰-۳۰ نانومتر بود. آزمون‌ها و مدل‌سازی بر اساس استاندارد ASHRAE انجام و با یکدیگر مقایسه شد تا مدل توسعه‌یافته را تأیید کند. سیستم معادلات حاصل شده با استفاده از یک روش تفاضل محدود ضمنی حل شد. علاوه بر این، هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال SiO_2 به طور جامع بررسی شدند. یافته‌های اندازه‌گیری نشان داد نانوذرات سیلیکا، با وجود هدایت حرارتی پایین، پتانسیل بزرگی برای بهبود عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت دارند. همچنین، تحلیل پارامترهای مشخص کارایی کلکتور خورشیدی نشان داد اثر نانوذرات بر بهبود عملکرد در مقادیر بالاتر دمای کاهش یافته، بیشتر واضح است. کارایی حرارتی، دمای خروجی سیال کاری و همچنین دمای صفحه جذب‌کننده مدل‌سازی شده با نتایج آزمایشی تأیید و تطابق قابل قبولی بین نتایج به دست آمده حاصل شد. حداکثر انحراف برای دمای خروجی سیال و دمای صفحه جذب‌کننده کلکتور به ترتیب ۰/۷ و ۳/۷ درصد است.

بوهال و همکاران با استفاده از طراحی مخزن ذخیره‌سازی خورشیدی و ادغام ماژول‌های مواد تغییر فازدهنده^۲ (PCM)، یک سیستم تولید آب گرم خورشیدی بهینه و کارآمد ارائه دادند [۳]. برای این منظور، دو روش عددی برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشیدی با استفاده از ماده تغییر فازدهنده در شرایط واقعی و با در نظر گرفتن نیازهای مصرفی معمولی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد انتخاب یک روش عددی مناسب بسیار مؤثر است و می‌تواند در بهبود عملکرد سیستم و بهینه‌سازی ماده تغییر فازدهنده تأثیرگذار باشد. همچنین، افزایش مقدار ماده تغییر فازدهنده

1. Flat plate solar collector (FPSC)

2. Phase change material (PCM)

می‌تواند باعث کاهش سرعت ذوب و کاهش انتقال حرارت به محیط شود. در همین زمینه، رنفی و همکاران با استفاده از کلکتورهای خورشیدی هوایی با مواد تغییرفازدهنده و با اضافه کردن فن به سیستم، خروجی حرارتی سیستم را افزایش دادند و موفق به افزایش دمای هوای خروجی سیستم شدند [۴]. این بهبود در عملکرد سیستم توانست به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم گرمایشی منجر شود. بنابراین، نشان داده شد که استفاده از کلکتورهای خورشیدی هوایی با مواد تغییر فاز و اضافه کردن فن به سیستم، می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم گرمایشی ایجاد کند. در پژوهشی دیگر، تأثیر ذخیره‌سازی انرژی حرارتی حالت جامد با حرارت نهان در کلکتور خورشیدی هوایی از طریق آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی بررسی شد [۵]. در این پژوهش دو کلکتور خورشیدی هوایی ساخته شدند، که یکی از کلکتورها شامل کلکتور جذب خورشیدی از جنس ورق فلزی بود و کلکتور دیگر شامل صفحه جذب حاوی ماده تغییرفازدهنده بر پایه پارافین بود. برای تست، تغییر موج مربعی شدت تابش خورشید در نظر گرفته شد و تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های تجربی مشاهده شد. در نهایت ثابت شد که دامنه‌های نوسان دمای هوای خروجی در کلکتور دارای صفحه جذب از ورق فلزی نسبت به کلکتور دارای صفحه جذب حاوی ماده تغییرفازدهنده از ۱۱ کلوین به ۵ کلوین کاهش یافت که نشان از تأثیر مثبت و مستقیم استفاده از ماده تغییرفازدهنده است.

ایده کلکتورهای صفحه تخت خلأ^۱ (EFP) بیش از ۴۰ سال پیش ارائه شد، اما علی‌رغم مزایای ادعایی آن، تولیدکنندگان بسیار کمی نسخه‌های تجاری را توسعه داده‌اند. این وضعیت هم نشان‌دهنده مشکلات فنی در ساخت صفحات آب‌بندی شده با قیمت رقابتی و هم عدم آگاهی از مزایای چنین صفحاتی است. فرتاهی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) و مطالعات تجربی به طراحی بهینه تانک‌های ذخیره آب گرم که با کلکتورهای خلأ خورشیدی ادغام شده پرداختند [۶]. این تحقیق به تعداد لوله‌های گرم‌کن که در مخزن قرار داده شده‌اند توجه ویژه‌ای دارد و تأثیر آن بر عملکردهای انرژی مخزن، از جمله ضریب انتقال حرارت، را بررسی کرده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد با افزایش تعداد لوله‌های گرم‌کن، دمای متوسط مخزن افزایش می‌یابد و ساختار جریان از نظر لایه‌ای و آشفتگی بودن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. آیا و همکاران نیز به بهینه‌سازی کلکتور خلأ خورشیدی با استفاده از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید^۳ (SA) و مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند [۷]. در فرایند بهینه‌سازی، سطح جذب در سه حالت مختلف و بر اساس پارامترهای مهم هندسی از جمله طول، قطر و تعداد لوله‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت، ۲۵۹ هندسه کلکتور مختلف ساخته و مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از طراحی آزمایش‌ها نشان داد پارامترهای مؤثر در عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی عبارت‌اند از: قطر لوله‌ها، سطح جذب و سرعت جریان جرمی سیال. نتایج فرایند بهینه‌سازی نشان داد حداقل سطح جذب برای یک هندسه بهینه ۲/۴۹ مترمربع است که ۱۹/۴ درصد کمتر از هندسه تجاری با در نظر گرفتن دمای خروجی یکسان است. قطر لوله‌ها حدود ۳۰ درصد افزایش، طول لوله‌ها ۴۰ درصد کاهش، هزینه هندسه بهینه و تعداد لوله‌های تخلیه‌شده ۳۸/۹ درصد کاهش و در نهایت کارایی حرارتی ۲۶/۳ درصد نسبت به هندسه تجاری افزایش یافت. در تحقیقی دیگر که توسط افرندی و همکاران انجام شد، کلکتورهای لوله خلأ با سه پیکربندی لوله‌های جذب به صورت مارپیچ، لوله مارپیچی و لوله U شکل مورد بررسی قرار گرفت [۸]. این تنظیمات به صورت تجربی در چهار نرخ جریان حجمی مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، و ۴۰ لیتر در ساعت) ارزیابی شدند. لوله‌های جذب در داخل کلکتور خورشیدی لوله خلأ مرتب شدند تا حجم سیال کاری یکنواخت را تضمین کنند و آزمایش‌ها برای هر سه پیکربندی به طور هم‌زمان در روزهای جداگانه انجام شد. هدف از این ارزیابی این بود که چگونه آرایش لوله‌های جذب بر ذخیره انرژی حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد کارایی حرارتی کلکتورهای لوله خلأ با نرخ جریان حجمی بالاتر در تمام پیکربندی‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، لوله مارپیچی عملکرد بهتری را در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها نشان داد.

شراره‌ای و همکاران به بررسی بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی مجهز به پره با استفاده از مواد تغییرفازدهنده پرداختند [۹]. در مطالعه آن‌ها، تأثیر هندسه پرها بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک ترکیب‌شده با مواد تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار

1. Evacuated flat plate (EFP)
2. Computational fluid dynamics (CFD)
3. Simulated annealing (SA)

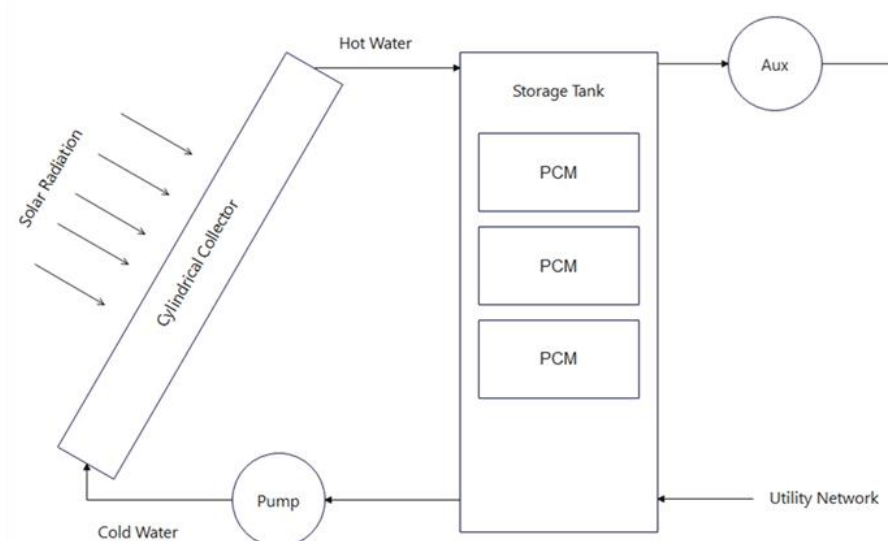
گرفت. نتایج پژوهش یادشده نشان داد افزایش طول پرها موجب بهبود کارایی و کاهش دمای صفحات خورشیدی می‌شود. همچنین، استفاده از پره‌های سه‌شاخه نسبت به پره‌های مستطیلی، عملکرد سیستم را حدود ۱/۵ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این، محفظه‌های غیرمستطیلی ماده تغییرفازدهنده نسبت به طراحی‌های سنتی، خنک‌کاری بهتری فراهم می‌کند و نرخ ذوب بالاتری را از خود نشان می‌دهد. در حوزه کلکتورهای خلاً خورشیدی، فلینسکی و همکاران تأثیر به‌کارگیری ماده تغییرفازدهنده درون کلکتور خلاً خورشیدی و اثر آن بر عملکرد سیستم آب‌گرم خورشیدی را بررسی کردند [۱۰]. آن‌ها دمای آب گرم داخل مخزن و نسبت جذب انرژی خورشیدی در سیستم آب گرم خانگی را برای شهر چستوخوفا در لهستان محاسبه کردند. پژوهش یادشده نشان داد کارایی کلکتورهای خلاً خورشیدی حاوی مواد تغییرفازدهنده بین ۳۳ تا ۶۶ درصد متغیر است که این مقدار به‌شدت تابش و دمای ماده تغییرفازدهنده بستگی دارد. همچنین، مشخص شد که استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای ذخیره‌سازی انرژی در زمان‌های اوج مصرف (مانند بعدازظهر) مفید است، زیرا فرایند تغییر فاز این مواد امکان آزادسازی پیوسته حرارت در دوره‌های با تابش کم خورشید را فراهم می‌کند و در نتیجه، عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. مهلا و همکاران در یک پژوهش عملی به بررسی اثر افزودن ماده تغییرفازدهنده به سیستم کلکتور خورشیدی پرداختند [۱۱]. در پژوهش یادشده از استامید به عنوان ماده تغییرفازدهنده استفاده شده و عملکرد سالانه کلکتور هوای خورشیدی لوله خلاً با استفاده از مواد تغییرفازدهنده ارائه شد. عملکرد سیستم با پیکربندی پره‌های دایره‌ای به همراه بازتابنده‌ها با نرخ جریان هوای ۰/۰۳۵ کیلوگرم بر ثانیه به مدت ۱۲ روز معمولی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پژوهش یادشده نشان داد حداکثر میانگین دمای ماده تغییرفازدهنده برابر با ۸۷/۸ درجه سلسیوس و حداکثر میانگین راندمان کلکتور برابر با ۳۱/۴ درصد بوده که نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از ماده تغییرفازدهنده بر عملکرد سیستم است. در پژوهشی دیگر، داهو و همکارانش به بررسی کارایی سیستم کلکتور خلاً خورشیدی به همراه ماده تغییرفازدهنده و فوم فلزی پرداختند [۱۲]. در تحقیق یادشده مدل دوبعدی جدیدی به منظور پیش‌بینی کارایی سیستم ایجاد و کارایی سیستم در ۴ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج نشان داد سیستم دارای فوم فلزی و ماده تغییرفازدهنده با اختلاف ۹ درصد نسبت به سایر سیستم‌ها دارای بالاترین کارایی در میان سیستم‌های مورد بررسی بود. این پژوهش همچنین نشان داد اندازه منافذ فوم‌های فلزی، فرایند دینامیکی ذخیره‌سازی و رهاسازی گرما در سیستم پیشنهادی را اندکی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد بیشتر مطالعات پیشین تنها به بررسی عملکرد کلکتورهای خلاً خورشیدی به صورت مستقل پرداخته‌اند و تجهیزات کمکی را در تحلیل خود لحاظ نکرده‌اند. در حالی که در مقیاس صنعتی، استفاده از کلکتور به‌تنهایی نمی‌تواند کارایی مطلوبی داشته باشد و لازم است در روزهای سرد یا با تابش کم، از سامانه‌های کمکی برای حفظ عملکرد سیستم استفاده شود. این تجهیزات جانبی نقش مهمی در تداوم کارکرد سیستم در شرایط غیر ایده‌آل تابشی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی کلکتور خلاً خورشیدی مجهز به سامانه کمکی و تحت شرایط اقلیمی شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، کلکتورهای خلاً با سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر مواد تغییرفازدهنده و سیستم گرم‌کن جانبی ترکیب شده‌اند تا عملکرد حرارتی سیستم در شرایط واقعی محیطی ارزیابی شود. همچنین، اثر عوامل مؤثری همچون نوع ماده تغییرفازدهنده، دمای محیط، شدت تابش خورشید و ماه کاری سیستم بر کارایی کلی و پایداری عملکرد حرارتی سیستم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲. روش پژوهش

کلکتورهای خورشیدی بر اساس فرایند جذب و انتقال حرارت از تابش خورشید به آب طراحی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این سیستم‌ها تابش خورشید به صفحات یا لوله‌های کلکتور برخورد می‌کند و بخشی از انرژی دریافتی از خورشید باعث گرم شدن جریان آب عبوری از کلکتور می‌شود. این جریان توسط پمپی که در قسمت ورودی کلکتور تعبیه شده ایجاد می‌شود، به طوری که آب سرد وارد کلکتور شده و آب گرم‌شده توسط تابش خورشید، پس از خروج از کلکتور، در مخزن آب ذخیره می‌شود. در صورت وجود بار مصرفی از سیستم، آب از مخزن خارج خواهد شد. در مسیر خروج آب مصرفی از کلکتور، یک سیستم گرمایشی کمکی وجود دارد که در صورت کافی نبودن دمای آب خروجی، جریان آب را تا رسیدن به دمای مطلوب

گرم می‌کند. به منظور حفظ تعادل در سیستم و نگهداری آب کافی، به میزان خروج آب گرم از مخزن، آب سرد شهری وارد مخزن می‌شود تا میزان آب در مخزن همیشه به حالت پر باقی بماند.



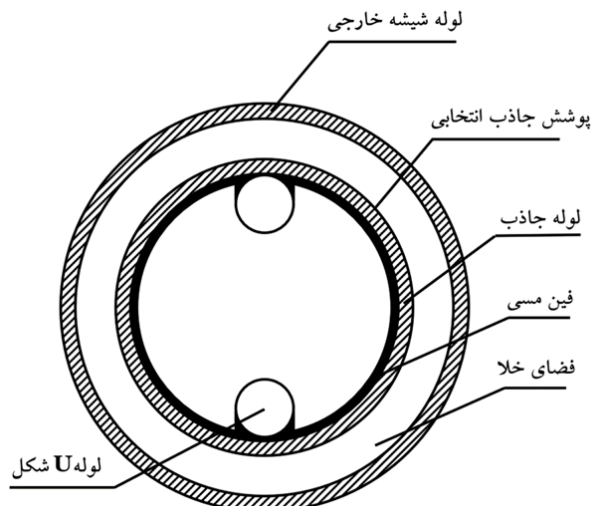
شکل ۱. طرح شماتیک نحوه کار کلکتورهای خورشیدی

در سیستم‌های خورشیدی به منظور ذخیره‌سازی انرژی می‌توان از مواد تغییرفازدهنده در داخل مخزن ذخیره استفاده کرد که مطالعه تأثیر این مواد در بهبود عملکرد کلکتور، موضوع اصلی این پژوهش است. هدف از استفاده از این نوع مواد در مخزن، استفاده از خاصیت تغییر فاز این مواد از جامد به مایع است. این مواد در زمان تغییر فاز به انرژی معادل با گرمای نهان ذوب خود نیاز دارند که این مقدار زیاد از آن توسط تابش خورشید تأمین می‌شود. به بیان دیگر، در زمان تغییر فاز، انرژی تابش خورشید به جای گرم کردن آب مخزن، صرف ذوب کردن ماده تغییرفازدهنده می‌شود. به همین صورت، در زمان سرد شدن آب مخزن و رسیدن مجدد به دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده این ماده از حالت مذاب به حالت جامد تبدیل می‌شود و این بار گرمایی معادل با گرمای نهان ذوب را به مخزن پس می‌دهد و از سرد شدن سریع آب مخزن جلوگیری می‌کند. مواد تغییرفازدهنده مانند باتری در زمان اضافه بار، انرژی را در خود ذخیره می‌کنند و در زمان نیاز آن را آزاد می‌کنند. داده‌های مربوط به چند ماده تغییرفازدهنده مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ترموفیزیکی مواد تغییرفازدهنده مورد بررسی در این پژوهش

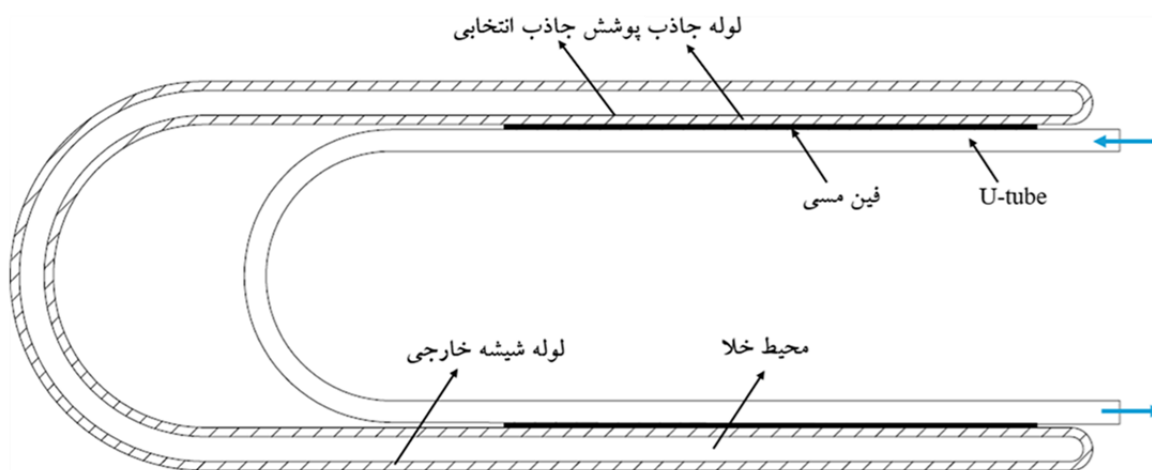
نام ماده	دمای ذوب (K)	چگالی (kg/L)	ظرفیت گرمایی ویژه مایع (J/kgK)	ظرفیت گرمایی ویژه جامد (J/kgK)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)
Myristic acid (C ₁₄ H ₂₈ O ₂)	۳۳۱	۸۶۲	۲۴۵۰	۱۸۴۰	۱۹۹
Paraffin	۳۳۲	۹۰۰	۳۰۰۰	۲۳۰۰	۱۸۹
Salt hydrate	۳۲۴	۲۳۲۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۴
Tristearin (C ₅₇ H ₁₁₀ O ₆)	۳۲۹	۸۶۲	۲۰۰۰	۱۳۰۰	۱۹۱
Erythritol (C ₄ H ₁₀ O ₄)	۳۹۱	۱۴۵۰	۲۶۰۰	۱۳۴۰	۳۴۰
Rubitherm-RT20	۲۹۳	۸۵۰	۲۳۰۰	۲۰۰۰	۱۷۰
Sodium nitrate (NaNO ₃)	۵۸۰	۲۲۶۰	۱۹۰۰	۱۴۰۰	۱۸۰

کلکتور خورشیدی در نظر گرفته شده در این مطالعه از نوع لوله خلأ شیشه‌ای دوجداره است. این لوله‌ها در یک طرف به هم متصل شده و یک پوشش جاذب روی سطح خارجی لوله داخلی کشیده شده است. فضای بین دو لوله خلأ است. در این گونه از کلکتورها، اتلاف حرارتی به دلیل کاهش اتلاف‌های هدایتی و جابه‌جایی بسیار کم است. نمای مقطع عرضی لوله خلأ در شکل ۲ نشان شده است.



شکل ۲. نمای مقطع عرضی کلکتور خورشیدی لوله‌ی خلأ

همچنین، نمایی از برش روبه‌روی کلکتور خورشیدی لوله‌ی خلأ نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمای برش روبه‌روی کلکتور خورشیدی لوله‌ی خلأ

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است، لوله‌های U شکل داخل یک پره استوانه‌ای با انطباق فشاری قرار می‌گیرند. انرژی خورشیدی به وسیله پوشش جاذب، جذب می‌شود که برابر با تشعشع خورشیدی ورودی منهای افت اپتیکی است و سپس انرژی خورشیدی جذب‌شده به سیال عامل آب منتقل می‌شود. به بیانی دیگر، حرارت دریافتی خالص برابر است با اختلاف بین انرژی خورشیدی دریافتی و افت حرارتی از لوله شیشه‌ای که به دلیل مکانیزم‌های انتقال حرارت هدایت، جابه‌جایی و تشعشعی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش عملکرد حرارتی کلکتور با مدل تحلیلی یک‌بعدی برای یک واحد کلکتور لوله‌ی خلأ شیشه‌ای بررسی می‌شود. برای ساده‌سازی محاسبات بدون از دست دادن چشمگیر دقت، فرضیات زیر انجام می‌شود:

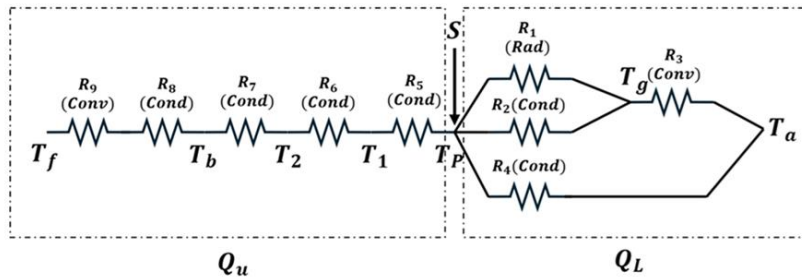
- مقاومت حرارتی هدایتی لایه شیشه‌ای بیرونی ناچیز است؛
 - از جذب تشعشع خورشیدی توسط لوله شیشه‌ای بیرونی صرف نظر می‌شود؛
 - ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین لوله شیشه‌ای و هوای خارج ثابت است؛
- داده‌های هندسی و مکانیکی کلکتور و مخزن مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۳].

جدول ۲. مشخصات هندسی و ترموفیزیکی کلکتور استوانه‌ای و مخزن

نام پارامتر	نماد	مقدار	واحد
سطح مقطع مخزن	A_s	۵	m^2
قطر پوشش جاذب	D	۳۷	mm
قطر داخلی لوله بیرونی	D_g	۴۵	mm
سطح مؤثر کلکتور	A_c	۲/۵	m^2
جرم آب موجود در مخزن	m_s	۱۵۰	kg
ضریب انتقال حرارت مخزن	U_s	۳/۲۳	W/m^2K
ضریب انتقال حرارت بین پوشش جاذب و هوا از سر کلکتور	U_e	۰/۴	W/m^2K
ضریب انتقال حرارت بین لوله بیرونی و محیط	h_{g-a}	۱۲/۷	W/m^2K
ضریب انتقال حرارت در لوله بیرونی	$h_{p-g.c}$	۰/۲۸	W/m^2K
ضریب گسیلندگی پوشش جاذب انتخابی	ϵ_p	۰/۰۸۰	-
ضریب گسیلندگی سطح داخلی لوله بیرونی	ϵ_g	۰/۰۸۴	-
ضریب انتقال حرارت سطح بیرونی پوشش جاذب تا سطح بیرونی پره	C_b	۲۹	W/m^2K
ضریب انتقال حرارت تماسی	C_B	۳۰	W/m^2K
ضریب جابه‌جایی جریان آب	h_{fi}	۷۰۰	W/m^2K
ثابت استفان - بولتزمن	σ	$۵/۶۷ \times 10^{-8}$	W/m^2K

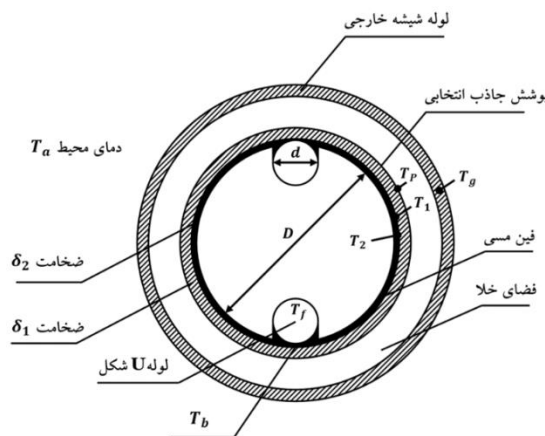
۳. معادلات حاکم

طرح شماتیک مقاومت گرمایی اجزای کلکتور استوانه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، بخشی از انرژی تابشی (S) در اثر تبادل حرارت با محیط هدر می‌رود (Q_L) و بخش دیگر آن صرف گرم کردن آب داخل لوله U شکل می‌شود (Q_u). در این شکل دمای محیط با T_a ، دمای آب با T_f ، دمای پوشش جذب کننده با T_p و دمای شیشه بیرونی با T_g نشان داده شده است.



شکل ۴. طرح شماتیک مقاومت گرمایی اجزای کلکتور استوانه‌ای

در شکل ۵ جزئیات هر مقاومت به صورت جدول ۳ تعریف شده است.



شکل ۵. کلکتور خورشیدی لوله خلأ شیشه‌ای و پارامترهای تعریف شده

جدول ۳. جزئیات مقاومت‌های حرارتی موجود در سیستم

مقاومت	توضیح	معادل
R_1	انتقال حرارت تشعشی بین سطح بیرونی لوله داخلی و سطح داخلی لوله بیرونی	$1/h_{p-g,r}$
R_2	انتقال حرارت هدایت در لوله بیرونی	$1/h_{p-g,c}$
R_3	انتقال حرارت جابه‌جایی بین لوله بیرونی و محیط	$1/h_{g-a}$
R_4	انتقال حرارت بین پوشش جاذب و هوا از سر کلکتور	U_e
$R_5 + R_6$	انتقال حرارت هدایت در لوله بیرونی و پره	$1/C_b$
$R_7 + R_8$	انتقال حرارت تماسی و هدایت در لوله‌های آب	$1/C_B$
R_9	انتقال حرارت جابه‌جایی در لوله‌های آب	$1/h_{f,i}$

با در نظر گرفتن مقاومت گرمایی معادل اتلافی (R_L)، مقدار ضریب انتقال حرارت اتلافی (U_L) برابر است با:

$$U_L = \frac{1}{R_L} = U_e + U_t \quad (1)$$

که در آن U_e ضریب انتقال حرارت بین پوشش جاذب و هوا از سر کلکتور و U_t انتقال حرارت بین پوشش جاذب و هوا از بدنه کلکتور است. U_e را می‌توان با استفاده از معادله ۲ به دست آورد:

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} = \frac{(UA)_{edge}}{\pi DL} \quad (2)$$

که در آن $(UA)_{edge}$ حاصل ضرب ضریب تلفات لبه و سطح، D قطر پوشش جاذب و L طول استوانه است. همچنین، مقدار U_t با استفاده از معادله ۳ به دست می‌آید:

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_{g-a}} + \frac{1}{h_{p-g,r} + h_{p-g,c}}} \quad (3)$$

که در آن h_{g-a} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین شیشه و هوای محیط، $h_{p-g,r}$ ضریب انتقال حرارت تابشی بین پوشش جاذب و شیشه و $h_{p-g,c}$ ضریب انتقال حرارت هدایتی بین پوشش جاذب و شیشه است. هر چند روابطی برای به دست آوردن مقادیر $h_{p-g,r}$ و $h_{p-g,c}$ به صورت تئوری وجود دارد؛ اما مقادیر آن به کیفیت ساخت دستگاه کلکتور و خلوص مواد مورد استفاده در کلکتور بستگی زیادی دارد. به همین دلیل، در این پژوهش از مقادیر تجربی یافته‌شده در پژوهش‌های قبلی برای این متغیرها استفاده شده است. مقدار ضریب انتقال حرارت تابشی $h_{p-g,r}$ تابع دما بوده و با تغییر دمای پوشش جاذب و شیشه تغییر می‌کند که با معادله ۴ بیان می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$h_{p-g,r} = \frac{\sigma \epsilon_p}{1 + \frac{\epsilon_p D}{\epsilon_g D_g} (1 - \epsilon_p)} (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g) \quad (4)$$

که در آن ϵ_p ضریب گسیلندگی پوشش جاذب انتخابی^۱، ϵ_g ضریب گسیلندگی سطح داخلی لوله بیرونی^۲، σ ثابت استفان-بولتزمن^۳ و D_g قطر داخلی لوله شیشه‌ای بیرونی است.

به همین شکل با در نظر گرفتن مقاومت گرمایی معادل (R_u) می‌توان ضریب انتقال حرارت غیراتلافی (U_u) را به دست آورد:

$$U_u = \frac{1}{R_u} = \frac{1}{R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9} = \frac{1}{\frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{h_{f,i}}} \quad (5)$$

که در آن C_b ضریب انتقال حرارت در لوله بیرونی و پره، C_B نماینده انتقال حرارت تماسی و هدایت در لوله‌های آب و $h_{f,i}$ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در لوله‌های آب است.

1. Emissivity of the selective absorbing coating
2. Emissivity of the inner surface of glass tube
3. Stefan-Boltzmann constant

از آنجا که Q_u صرف گرم کردن آب مخزن می‌شود، می‌توان معادله ۶ را برای محاسبه دمای آب در هر لحظه نوشت:

$$\dot{Q}_u = m_s c_p \frac{dT_s}{dt} + \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) + U_s A_s (T_s - T_a) \quad (6)$$

ترم اول سمت راست در معادله ۶ بیانگر نرخ انرژی مورد نیاز برای تغییر دمای آب مخزن، ترم دوم بیانگر نرخ انرژی مورد نیاز برای گرم کردن دبی آب شهری ورودی به مخزن و ترم سوم نرخ انرژی هدررفته از مخزن بر اثر تبادل گرمای جابه‌جایی با محیط است. در این معادله T_s دمای آب مخزن در هر لحظه، c_p ظرفیت گرمایی آب، m_s جرم آب موجود در مخزن، \dot{m}_L دبی آب ورودی به مخزن، T_{L_i} دمای آب ورودی به مخزن در هر لحظه و U_s و A_s به ترتیب ضریب انتقال حرارت و سطح خارجی مخزن است.

در صورت وجود ماده تغییرفازدهنده یک متغیر کمکی به نام Q_{stored} با مقدار اولیه صفر تعریف می‌شود و دمای جدید در صورتی که دمای فعلی کمتر از دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد، با استفاده از معادله ۷ و اگر دمای فعلی بیشتر از دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد، با استفاده از معادله ۸ محاسبه می‌شود:

$$(T_s)_{new} = (T_s)_{old} + \frac{\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A_s (T_s - T_a)}{m_s c_p + m_{pcm} c_{pcm,s}} dt \quad (7)$$

$$(T_s)_{new} = (T_s)_{old} + \frac{\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A_s (T_s - T_a)}{m_s c_p + m_{pcm} c_{pcm,l}} dt \quad (8)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به علت تفاوت در ظرفیت گرمایی ویژه ماده تغییرفازدهنده در دو حالت مایع و جامد از دو معادله متفاوت استفاده شده است. در معادله ۷، m_{pcm} جرم و $c_{pcm,s}$ ظرفیت گرمایی ویژه ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد است. همچنین در معادله ۸، $c_{pcm,l}$ ظرفیت گرمایی ویژه ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع است. با توجه به مقدار $(T_s)_{new}$ چهار حالت مختلف ممکن است اتفاق بیفتد:

حالت ۱: اگر دمای جدید مخزن کمتر از دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده و مقدار Q_{stored} کمتر یا مساوی با صفر باشد:

$$\begin{cases} (T_s)_{new} = (T_s)_{old} + \frac{\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A (T_s - T_a)}{m_s c_p + m_{pcm} c_{pcm,s}} dt \\ (Q_{stored})_{new} = (Q_{stored})_{old} \end{cases} \quad (9)$$

حالت ۲: اگر دمای جدید مخزن بیشتر یا مساوی با دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد و مقدار Q_{stored} کمتر از حاصل ضرب جرم در گرمای نهان ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد:

$$\begin{cases} (T_s)_{new} = (T_s)_{old} \\ (Q_{stored})_{new} = (Q_{stored})_{old} + [\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A (T_s - T_a)] dt \end{cases} \quad (10)$$

حالت ۳: اگر دمای جدید مخزن بیشتر یا مساوی با دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد و مقدار Q_{stored} بیشتر یا مساوی با حاصل ضرب جرم در گرمای نهان ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد:

$$\begin{cases} (T_s)_{new} = (T_s)_{old} + \frac{\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A (T_s - T_a)}{m_s c_p + m_{pcm} c_{pcm,l}} dt \\ (Q_{stored})_{new} = (Q_{stored})_{old} \end{cases} \quad (11)$$

حالت ۴: اگر دمای جدید مخزن کمتر از دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد و مقدار Q_{stored} بیشتر یا مساوی با حاصل ضرب جرم در گرمای نهان ذوب ماده تغییرفازدهنده باشد:

$$\begin{cases} (T_s)_{new} = (T_s)_{old} \\ (Q_{stored})_{new} = (Q_{stored})_{old} + [\dot{Q}_u - \dot{m}_L c_p (T_s - T_{L_i}) - U A (T_s - T_a)] dt \end{cases} \quad (12)$$

پس از حل معادلات، مقدار دمای مخزن در هر لحظه به دست می‌آید. به منظور بررسی و مقایسه عملکرد کلکتور در حالت‌های مختلف، پارامتری به نام ضریب خورشیدی (SF) به شکل معادله ۱۳ تعریف می‌شود:

$$SF = \frac{Q_{solar}}{Q_{total}} = \frac{Q_{req} + Q_{loss} - Q_{aux}}{Q_{req} + Q_{loss}} \quad (13)$$

در این معادله منظور از Q_{req} انرژی مورد نیاز برای رسیدن مخزن از دمای آب شهری به دمای مطلوب 60°C است. بنابراین می‌توان آن را به صورت معادله ۱۴ بازنویسی کرد:

$$Q_{req} = \dot{m}_L c_p (60 - T_{Li}) \quad (14)$$

که در آن T_{Li} دمای آب شهری و \dot{m}_L دبی آب شهری ورودی به مخزن است.

همچنین، منظور از Q_{loss} در معادله ۱۳، انرژی از دست‌رفته از مخزن در اثر تبادل حرارت با محیط اطراف است و با معادله ۱۵ نشان داده می‌شود:

$$Q_{loss} = U_s A_s (T_s - T_a) \quad (15)$$

پارامتر Q_{aux} نیز مقدار انرژی تأمین‌شده توسط سیستم گرمایشی کمکی است و به صورت معادله ۱۶ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} Q_{aux} = \dot{m}_L c_p (60 - T_s) & \text{if } T_s \leq 60 \\ Q_{aux} = 0 & \text{if } T_s > 60 \end{cases} \quad (16)$$

در این پژوهش به منظور حل معادلات حاکم از روش تفاضل پیشرو استفاده شده است. در این روش، به منظور تخمین مقدار مشتق تابع، از مقدار تابع در مرحله کنونی و مقدار تابع در مرحله بعدی حل استفاده می‌شود. همچنین، به منظور بررسی همگرایی از شاخص دمای اولیه سیستم استفاده شده است. به این منظور، الگوریتم حل مسئله به صورت متوالی به حل دستگاه معادلات می‌پردازد تا زمانی که دمای سیستم در پایان یک مرحله حل با دمای سیستم در شروع مرحله بعد برابر شود. علاوه بر این، همان‌گونه که در بخش فرضیات بیان شد، باید خاطر نشان کرد که به منظور ساده‌سازی مسئله، در استخراج معادلات حاکم از روش ظرفیت فشرده استفاده شده است؛ به این معنا که تغییر دما درون مخزن ذخیره‌سازی ناچیز در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی صحت این فرض، از شاخص عدد بایو^۱ استفاده می‌شود [۱۶]:

$$Bi = \frac{hV_s}{kA_s} \quad (17)$$

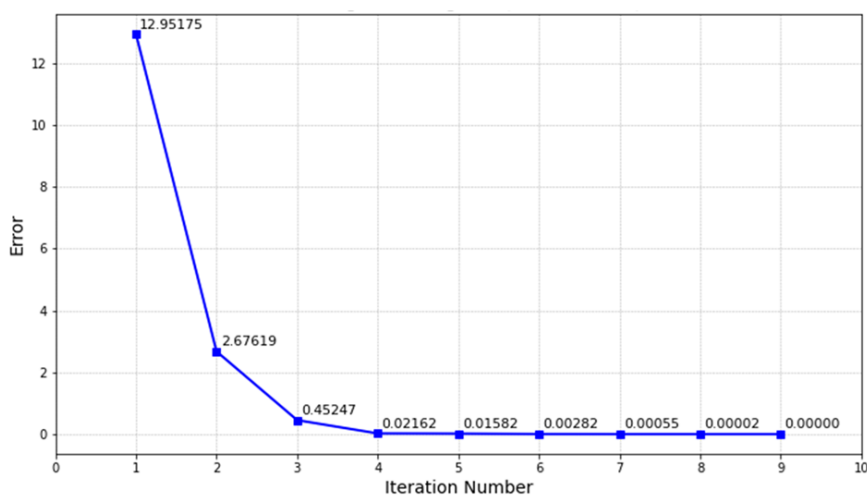
که در آن h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، k ضریب هدایت حرارتی ماده تغییرافزنده و V_s و A_s به ترتیب حجم و سطح ماده تغییرافزنده است. با استفاده از معادله ۱۷ و مقادیر ارائه‌شده در جدول ۲، عدد بایو سیستم برابر 0.16 است. این مسئله بیانگر آن است که گرادیان دما در ماده تغییرافزنده کم و به طور قابل قبولی به فرض ظرفیت فشرده نزدیک است.

۴. یافته‌ها

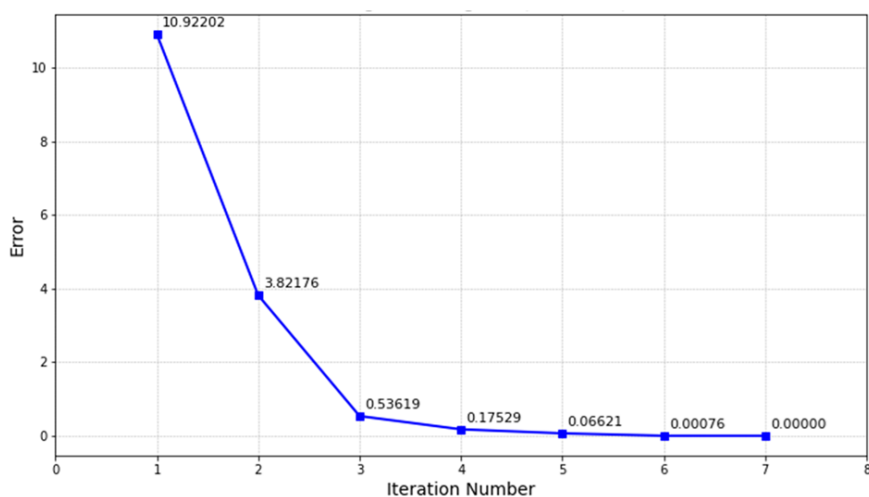
به منظور بررسی صحت حل معادلات حاکم، نمودار همگرایی متغیر دما برای سیستم مورد مطالعه در دو حالت بدون ماده تغییرافزنده و با ماده تغییرافزنده، به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، الگوریتم مورد نظر برای کلکتور بدون ماده تغییرافزنده در ۹ مرحله و برای کلکتور با ماده تغییرافزنده در ۷ مرحله به دقت خطای مورد نظر می‌رسد و همگرا می‌شود.

در ادامه، نتایج حاصل از مطالعه عملکرد کلکتور برای شهر تهران ارائه می‌شود. داده‌های مربوط به توان تابش خورشیدی جذب‌شده توسط کلکتور و دمای هوای شهر تهران در ماه آگوست در شکل ۸ نشان داده شده است. توان جذب‌شده با ضرب کردن سطح مؤثر کلکتور ($2/5$ مترمربع) در شار تابش خورشید به دست می‌آید. همچنین، داده‌های الگوی نرخ برداشت آب نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. این نمودار شامل الگوی مصرف برای ۷۵ و ۱۵۰ و ۳۰۰ لیتر طی روز است. در این تحقیق به طور

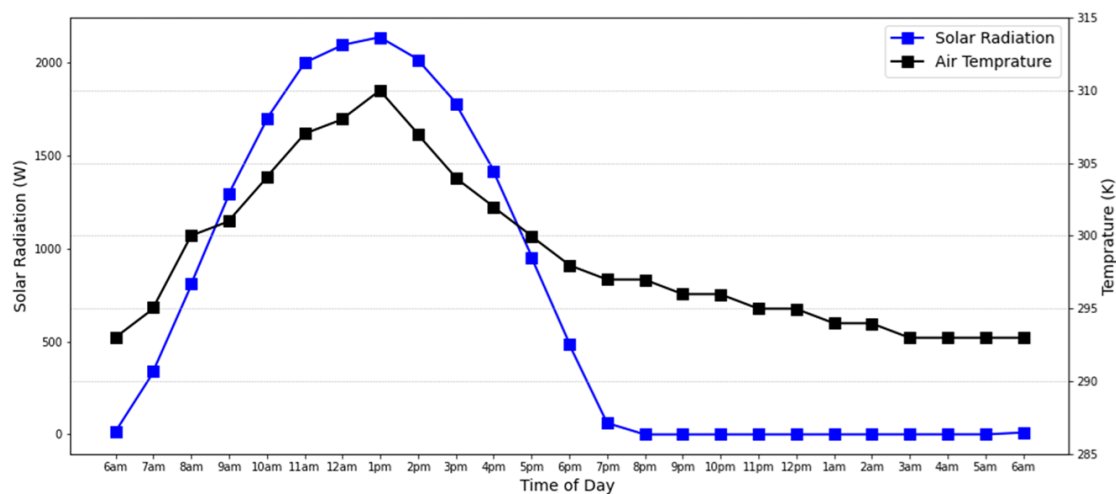
پیش‌فرض از داده‌های ماه آگوست و همچنین، الگوی برداشت ۱۵۰ لیتر استفاده شده است. منظور از الگوی برداشت ۱۵۰ لیتر این است که طی یک شبانه‌روز، در مجموع ۱۵۰ لیتر آب از مخزن برداشت می‌شود [۱۰].



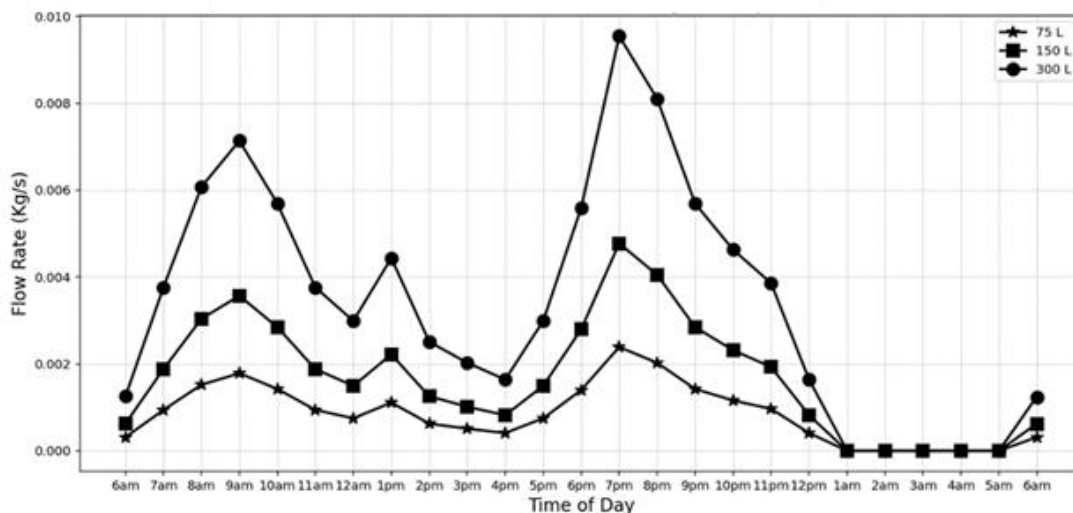
شکل ۶. نمودار همگرایی معادلات حاکم بر سیستم برای کلکتور بدون ماده تغییرفازدهنده



شکل ۷. نمودار همگرایی معادلات حاکم بر سیستم برای کلکتور با ماده تغییرفازدهنده



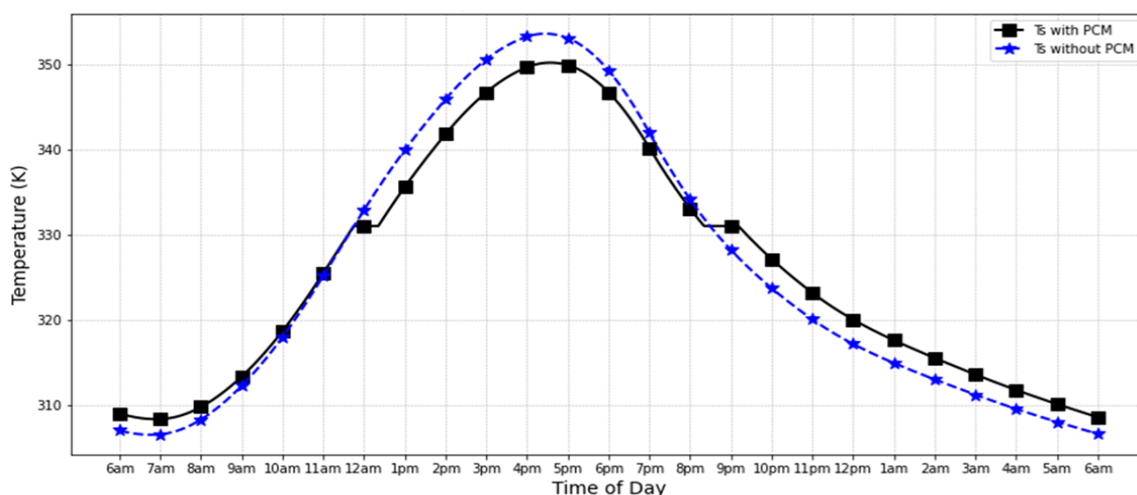
شکل ۸. شار انرژی دریافتی کلکتور و دمای هوای تهران طی روز در ماه آگوست



شکل ۹. نرخ آب مصرفی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز

۴-۱. بررسی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده روی عملکرد سیستم

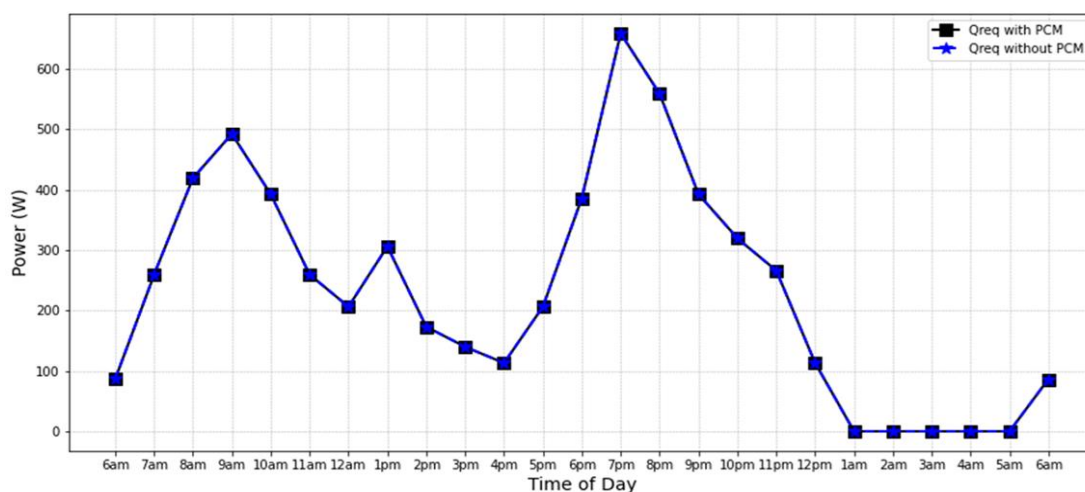
در این بخش به منظور مطالعه میزان اثرگذاری ماده تغییر فاز دهنده از ماده میریستیک اسید^۱ به منظور انجام محاسبات استفاده شده که خواص ترموفیزیکی آن در جدول ۱ آمده است. نمودار دمای مخزن با برداشت ۱۵۰ لیتر آب در روز در ماه آگوست در حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده و همراه با ماده تغییر فاز دهنده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



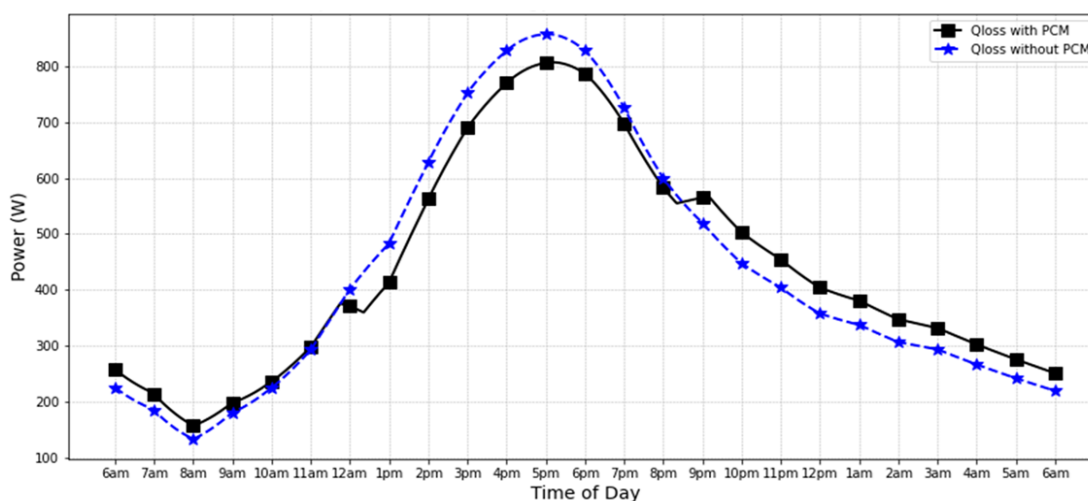
شکل ۱۰. تأثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده میریستیک اسید بر تغییرات دمای مخزن طی روز در ماه آگوست

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای مخزن در ساعت ۱۱:۴۵ صبح به دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده رسیده و سپس به مدت ۳۶ دقیقه در این دما ثابت مانده است. این امر به این معنا است که در این مدت تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده از جامد به مایع اتفاق افتاده و گرمای دریافتی از خورشید صرف تغییر فاز شده است. به همین شکل با کاهش انرژی تابشی خورشید در بعد از ظهر، دمای مخزن دوباره در ساعت ۲۰:۲۰ بعد از ظهر به دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده رسیده است و این بار تغییر فاز از مایع به جامد اتفاق افتاده است. زمان تغییر فاز در این فرایند ۵۱ دقیقه به طول انجامیده و در این مدت دمای مخزن روی دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده ثابت مانده است. همچنین، از این نمودار می‌توان کمتر شدن دمای مخزن در زمان اوج تابش و بیشتر شدن دمای مخزن در زمان کاهش تابش را مشاهده کرد. به بیانی دیگر، ماده تغییر فاز دهنده انرژی را در اوج تابش جذب می‌کند و در

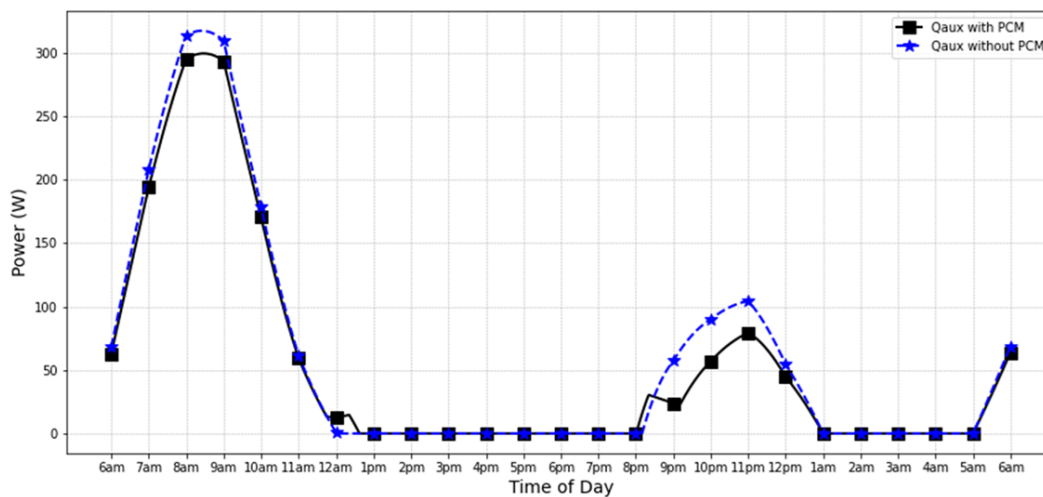
زمان کمبود تابش آن را دوباره به آب پس می‌دهد. نمودارهای مربوط به مقایسه نرخ Q_{req} ، Q_{loss} و Q_{aux} به ترتیب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. توان مورد نیاز کلکتور طی روز در ماه آگوست



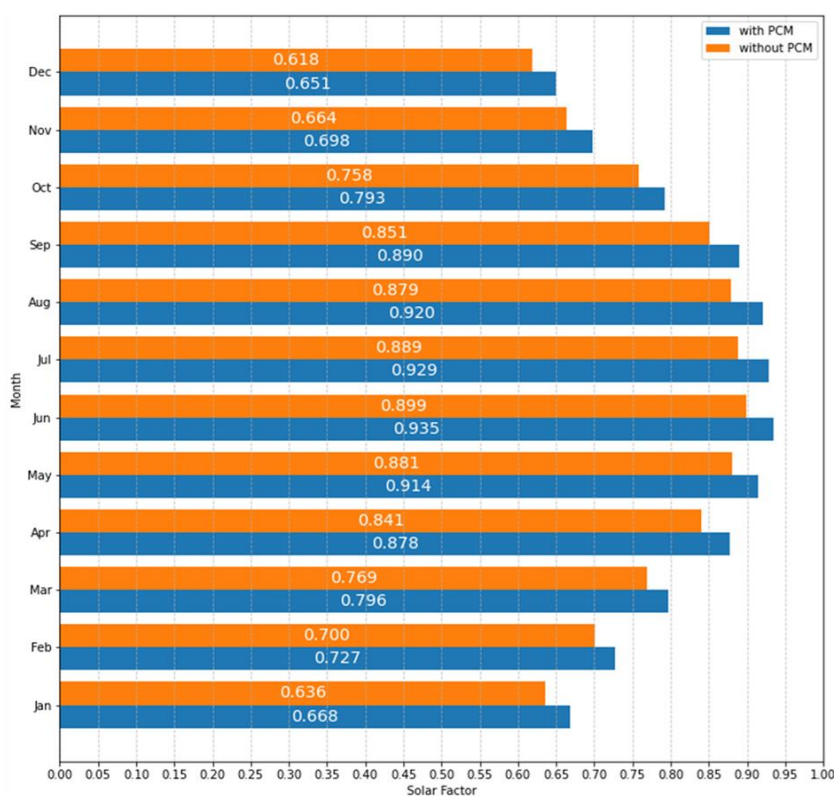
شکل ۱۲. تأثیر استفاده از ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید بر توان اتلافی کلکتور طی روز در ماه آگوست



شکل ۱۳. تأثیر استفاده از ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید بر توان سیستم گرمایشی کمکی طی روز در ماه آگوست

با محاسبه سطح زیر نمودارهای فوق، مقادیر انرژی مورد نیاز، انرژی اتلافی و انرژی کمکی محاسبه می‌شود و با استفاده از آن‌ها مقدار ضریب خورشیدی در یک روز به دست می‌آید. ضریب خورشید در حالت بدون ماده تغییرفازدهنده به مقدار 0.879 و در حالت همراه با ماده تغییرفازدهنده به مقدار 0.920 به دست می‌آید که این امر نشان‌دهنده بهبود کارایی سیستم است. همچنین، با توجه به نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۲، می‌توان این‌گونه دریافت کرد که در زمان اوج تابش که اختلاف دما بین کلکتور و محیط به حداکثر مقدار خود می‌رسد، ماده تغییرفازدهنده با کنترل حرارت اجازه کاهش سریع دما را نمی‌دهد که این امر باعث بهبود کارایی سیستم در درازمدت می‌شود. بررسی نمودار شکل ۱۳ هم تأییدکننده این موضوع است که در ساعاتی که کمبود انرژی تابشی، که سیستم کمکی برای افزایش دمای آب وارد عمل می‌شود، سیستم دارای ماده تغییرفازدهنده عملکرد بهتری در کنترل دما دارد که این امر باعث کاهش انرژی مورد نیاز توسط سیستم کمکی می‌شود. مجموعه عوامل یادشده در نهایت به بهبود کارایی سیستم کلکتور خلاً خورشیدی منجر می‌شود.

به منظور بررسی کارایی سیستم بدون ماده تغییرفازدهنده و مقایسه آن با سیستم با ماده تغییرفازدهنده، کارایی سیستم در دو حالت برای میریستیک اسید در ماه‌های مختلف سال در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق نتایج، اضافه کردن ماده تغییرفازدهنده به سیستم موجب ارتقای کارایی سیستم در تمامی ماه‌ها شده است و به صورت میانگین باعث افزایش ۳ تا ۴ درصدی کارایی سیستم می‌شود. همچنین با بررسی دقیق‌تر نمودارها و مقادیر کارایی، می‌توان چنین دریافت کرد که تأثیر افزودن ماده تغییرفازدهنده روی کارایی سیستم در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد سال است.

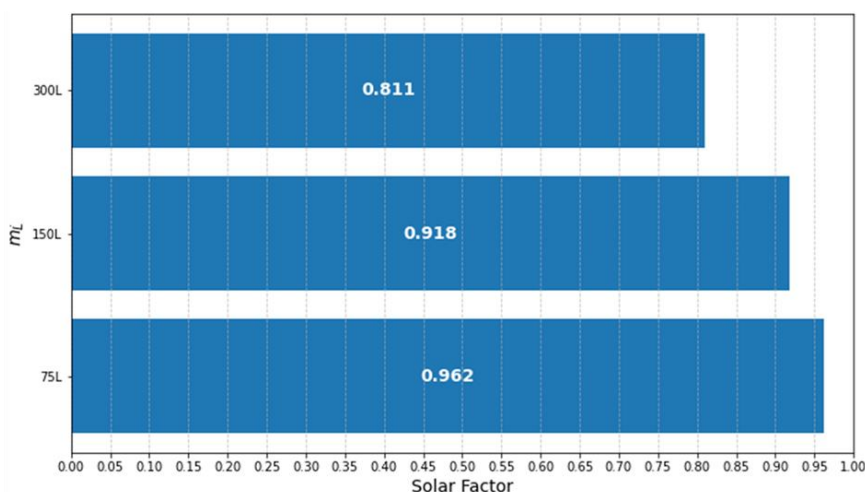


شکل ۱۴. تأثیر استفاده از ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید روی کارایی سیستم خورشیدی در ماه‌های مختلف سال

۲-۴. بررسی تأثیر مقدار برداشت آب روی عملکرد سیستم

همان‌طور که اشاره شد، نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ با فرض استفاده از الگوی مصرف ۱۵۰ لیتر در روز است. به منظور بررسی تأثیر برداشت آب بر عملکرد سیستم، معادلات حاکم بر سیستم در الگوی مصرف ۷۵ لیتر و ۳۰۰ لیتر در روز هم بررسی و نتایج آن در شکل ۱۵ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش مصرف روزانه، شاهد افزایش ۱۵ درصدی ضریب خورشیدی و بهبود کارایی هستیم. دلیل این امر می‌تواند افزایش نسبت مقدار ماده تغییرفازدهنده به حجم آب

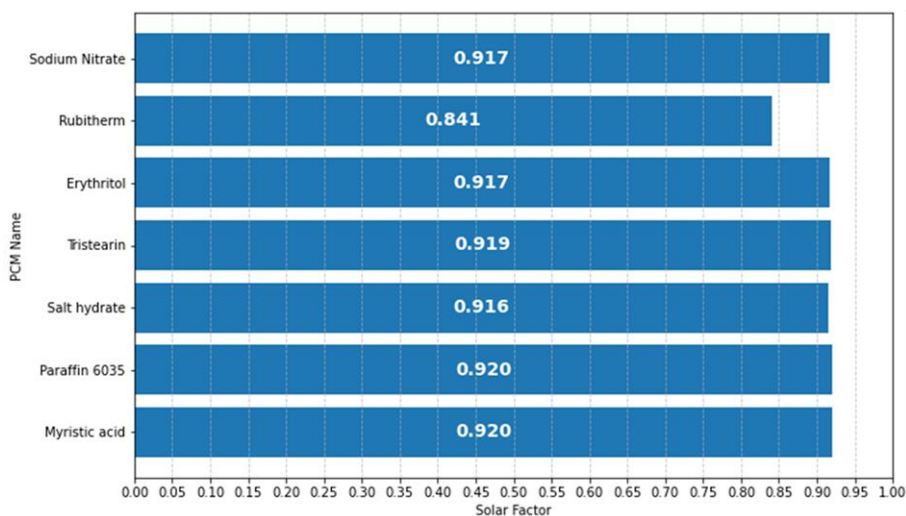
مصرفی باشد که به کنترل بهتر دما در مخزن منجر می‌شود. این مسئله بیانگر این موضوع است که به دلیل استفاده بهینه از ماده تغییرفازدهنده مقدار این ماده باید متناسب با حجم آب مصرفی تعیین شود تا حداکثر افزایش کارایی در سیستم به دست آید.



شکل ۱۵. تأثیر مصرف روزانه آب بر ضریب خورشیدی برای ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید در ماه آگوست

۴-۳. بررسی تأثیر نوع ماده تغییرفازدهنده روی عملکرد سیستم

همان‌طور که اشاره شد، بررسی انجام شده و نتایج ارائه شده در قسمت‌های قبل برای ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید بود. به منظور بررسی تأثیر استفاده از مواد مختلف روی عملکرد سیستم، معادلات حاکم بر سیستم برای تمامی مواد یادشده در جدول ۱ حل شده و نتایج کارایی هر ماده تغییرفازدهنده در شکل ۱۶ ارائه شده است. بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۶ بیانگر این موضوع است که اکثر مواد تغییرفازدهنده انتخابی باعث افزایش قابل قبول کارایی سیستم می‌شوند. در این میان، پارافین و میریستیک اسید بالاترین کارایی را در میان مواد تغییرفازدهنده دارند. همچنین، در میان مواد بررسی شده، Rubitherm-RT20 دارای کمترین کارایی است. یکی از دلایل مهم این رفتار می‌تواند به دلیل نقطه ذوب پایین این ماده باشد. با توجه به اینکه این ماده دارای نقطه ذوب پایین است، تغییر فاز در این ماده در دمای پایین و در زمانی که شار خورشید در بیشینه مقدار خود قرار ندارد، اتفاق می‌افتد. این مسئله موجب می‌شود که در ساعت اوج تابش که بیشترین هدررفت انرژی نیز وجود دارد، ماده تغییرفازدهنده کارایی قابل قبولی را ارائه ندهد.



شکل ۱۶. مقایسه ضریب خورشید در ماه آگوست برای مواد تغییرفازدهنده مختلف

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استفاده از مخزن ذخیره دارای ماده تغییرفازدهنده در آب‌وهوای اقلیم تهران روی کلکتور خورشیدی بررسی شده است. بررسی تغییرات دمای کلکتور در شرایط آب‌وهوایی ماه آگوست نشان داد استفاده از ماده تغییرفازدهنده میریستیک اسید در مخزن ذخیره، موجب می‌شود که دمای سیستم مفروض به مدت ۳۶ دقیقه ثابت بماند که این بازه زمانی مربوط به جذب انرژی توسط ماده تغییرفازدهنده بوده است. همچنین در فرایند سرد شدن سیستم، دمای سیستم به مدت ۵۱ دقیقه ثابت بوده که این بازه زمانی مربوط به تغییر فاز ماده تغییرفازدهنده از حالت مایع به جامد بوده است. این ذخیره و آزادسازی انرژی در زمان مورد نیاز در نهایت به افزایش کارایی سیستم به مقدار ۴/۱ درصد منجر شد. بررسی سیستم یادشده در ماه‌های دیگر سال و شرایط آب‌وهوایی متفاوت نشان داد در تمامی ماه‌ها، استفاده از ماده تغییرفازدهنده به طور متوسط موجب افزایش کارایی سیستم بین ۲/۷ تا ۴/۱ درصد می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد این افزایش کارایی در ماه‌های گرم سال به مقدار جزئی بیشتر است.

بررسی مواد تغییرفازدهنده مختلف نشان داد نوع ماده تغییرفازدهنده و ویژگی فیزیکی و شیمیایی آن می‌تواند تأثیر به‌سزایی در مقدار افزایش کارایی سیستم داشته باشد. به طور مثال، استفاده از Rubitherm-RT20 که دارای نقطه ذوب نسبتاً پایینی است در مقایسه با میریستیک اسید باعث کاهش کارایی سیستم به مقدار ۷/۹ درصد می‌شود. همچنین، بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میزان مصرف آب و به بیانی دیگر، نسبت ماده تغییرفازدهنده به حجم آب موجود در مخزن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی سیستم داشته باشد. از این‌رو، مقدار ماده تغییرفازدهنده افزوده‌شده به مخزن ذخیره باید به صورت دقیق تعیین شود تا نسبت مناسبی میان ماده تغییرفازدهنده و میزان آب موجود در مخزن وجود داشته باشد. مطالعه میزان بهینه ماده تغییرفازدهنده در مخزن ذخیره می‌تواند موضوع قابل بررسی برای پژوهش‌های آینده مربوط به استفاده از ماده تغییرفازدهنده در سیستم‌های خورشیدی باشد.

درخور یادآوری است که به منظور ساده‌سازی، تحلیل ارائه‌شده در این پژوهش بر اساس مدل ظرفیت فشرده انجام شده است. در این رویکرد، فرض می‌شود که دمای داخل مخزن ذخیره در هر لحظه از زمان یکنواخت است و بنابراین، گرادیان دمای قابل توجهی بین بخش‌های مختلف مخزن وجود ندارد. اگرچه این فرض باعث ساده‌تر شدن فرمول‌بندی تحلیلی و کاهش پیچیدگی محاسباتی می‌شود، اما سطحی از تقریب را در نتایج ایجاد می‌کند. بر اساس بعضی از مطالعات پیشین، این ساده‌سازی می‌تواند به انحراف از رفتار واقعی سیستم منجر شود. علاوه بر این، تحلیل حاضر تأثیر بازده عملکردی سیستم گرمایش و همچنین، پیامدهای اقتصادی انتخاب‌های طراحی بر هزینه کل سیستم را در نظر نگرفته است. ارزیابی جامع این عوامل می‌تواند درک دقیق‌تر و کامل‌تری از عملکرد واقعی سیستم فراهم کند. در نتیجه، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود که کار فعلی با در نظر گرفتن یک مدل دمای لایه‌ای که بتواند اثرات لایه‌بندی حرارتی در مخزن را شبیه‌سازی کند، گسترش یابد. همچنین، انجام یک تحلیل انرژی - اقتصادی برای بررسی هم‌زمان اثرات حرارتی و اقتصادی توصیه می‌شود. اتخاذ چنین رویکردی می‌تواند دید عمیق‌تری از عملکرد واقعی سیستم ارائه دهد و در بهینه‌سازی طراحی و افزایش صرفه اقتصادی آن نقش مؤثرتری داشته باشد.

منابع

- [1] Gholipour S, Afrand M, Kalbasi R. Introducing two scenarios to enhance the vacuum U-tube solar collector efficiency by considering economic criterion. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021; 124: 228–237.
- [2] Jouybari HJ, Nimvari ME, Saedodin S. Thermal performance evaluation of a nanofluid-based flat-plate solar collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019; 137: 1757–1774.
- [3] Bouhal T, El Rhafiki T, Kousksou T, Jamil A, Zeraouli Y. PCM addition inside solar water heaters: Numerical comparative approach. *Journal of Energy Storage*. 2018; 19: 232–246.
- [4] Bo R, Fu W, Meng X, Zhang G. Employing a fan to improve the wintery heating performance of solar air collectors with phase-change material: An experimental comparison. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 50: 103425.
- [5] Charvát P, Klimeš L, Pech O, Hejčík J. Solar air collector with the solar absorber plate containing a PCM – Environmental chamber experiments and computer simulations. *Renewable Energy*. 2019; 143: 731–740.
- [6] Fertahi SD, Bouhal T, Kousksou T, Jamil A, Benbassou A. Experimental study and CFD thermal assessment of horizontal hot water storage tank integrating evacuated tube collectors with heat pipes. *Solar Energy*. 2018; 170: 234–251.
- [7] Alfaro-Ayala JA, López-Núñez OA, Gómez-Castro FI, Ramírez-Minguela JJ, Uribe-Ramírez AR, Belman-Flores JM, et al. Optimization of a solar collector with evacuated tubes using the simulated annealing and computational fluid dynamics. *Energy Conversion and Management*. 2018; 166: 343–355.
- [8] Gholipour S, Afrand M, Kalbasi R. Improving the efficiency of vacuum tube collectors using new absorbent tubes arrangement: Introducing helical coil and spiral tube adsorbent tubes. *Renewable Energy*. 2020; 151: 772–781.
- [9] Jiryaei Sharahi H, Roshan AM, Moghimi, M. Numerical study of thermal management and performance enhancement of finned solar cells by phase change materials. *Energy Equipment and Systems*. 2024; 12(4), 399–421.
- [10] Feliński P, Sekret, R. Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system. *Energy and Buildings*. 2017; 152: 558–567.
- [11] Mehla N., Kumar M., Yadav A. Annual performance evaluation of evacuated tube solar air collector with phase change material. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2020; 142(3): 031007.
- [12] Dhaou MH, Mellouli S, Alresheedi F, El-Ghoul Y. Numerical assessment of an innovative design of an evacuated tube solar collector incorporated with pcm embedded metal foam/plate fins. *Sustainability*. 2021; 13(19):10632.
- [13] Ma L, Lu Z, Zhang J, Liang R. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. *Building and Environment*. 2010; 45: 1959-1967.
- [14] Shirinbakhsh M, Mirkhani N, Sajadi B. A comprehensive study on the effect of hot water demand and PCM integration on the performance of SDHW system. *Solar Energy*. 2018; 159: 405-414.
- [15] Duffie JA, Bechman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York, USA: John Wiley & Sons; 1980.
- [16] Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, Dewitt DP. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, USA: John Wiley & Sons; 2011.