

Design and Performance Evaluation of a Solar Water Heating System with a Storage Tank to provide Hot Water for a Model Residential Building in the Cities of Tehran and Kashan

Zahra Parsai¹, Majid Sabzpooshani^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering– Thermofluids, University of Kashan, Kashan, Iran, za.parsai@gmail.com

² Department of Mechanical Engineering– Thermofluids, University of Kashan, Kashan, Iran, spooshan@kashanu.ac.ir

Keywords:

solar water heater, thermal energy supply, residential building, energy simulation, Iran

Original Research Article

Paper History:

Received: 2026/06/23

Revise: 2026/08/20

Accepted: 2026/08/25

Abstract: Solar water heating collectors are considered one of the most important options for providing thermal energy to buildings due to their use of renewable energy, reduced fossil fuel consumption, and low operating costs. In this study, the performance of a solar water heating system for a residential building in the cities of Tehran and Kashan was evaluated dynamically and over a one-year period, using the TRNSYS software. The results showed that solar radiation in both cities had a specific seasonal behavior such that the highest radiation was observed in the warm season and the lowest in the winter. The analysis of energy results showed that the useful energy produced by the collector was directly related to the intensity of radiation and reached more than 5000 kJ/h during peak radiation periods. Although heat losses increased with increasing collector operating temperature, the useful energy produced prevailed over losses during most hours of the year. Also, the need for auxiliary energy was almost zero in the summer and increased in the winter. The thermal behavior of the storage tank showed that the water temperature was within a stable range for most of the hours. The annual collector efficiency was 57.37% in Kashan and 55.08% in Tehran, indicating the optimal performance of the system in both climates. Overall, the results indicate that the system is able to adequately supply the thermal load of the building and that areas with higher radiation, such as Kashan, provide more optimal conditions for the operation of solar thermal systems.

How to cite this article: Z, Parsai, M, Sabzpooshani. "Design and Performance Evaluation of a Solar Water Heating System with a Storage Tank to provide Hot Water for a Model Residential Building in the Cities of Tehran and Kashan". "Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 4, PP. 37- 60, 2026. <https://doi.org/10.22052/EEM.2026.258962.1183>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

The increasing energy demand in residential buildings and the necessity of reducing fossil fuel consumption have encouraged the application of renewable energy technologies, particularly solar thermal systems. Solar water heating systems are considered an effective solution for supplying domestic hot water and part of the thermal energy demand of buildings due to their simple structure, low operating costs, and the capability of utilizing clean solar energy. However, the thermal performance of these systems is strongly influenced by climatic conditions, solar radiation intensity, collector characteristics, and thermal storage behavior. Therefore, accurate modelling and dynamic performance evaluation are required to assess the feasibility and effectiveness of solar water heating systems under different climatic conditions.

Iran has considerable solar energy potential; however, the wide climatic diversity of the country results in different levels of solar system performance in various regions. The selection of appropriate locations and the evaluation of system behavior under realistic operating conditions are essential for improving the efficiency and economic feasibility of solar thermal applications. Therefore, this study aims to design, model, and evaluate the dynamic thermal performance of a solar water heating system with a storage tank for supplying hot water and part of the thermal demand of a model residential building in two different climatic conditions. The main objective is to investigate the influence of climate conditions on solar radiation availability, useful thermal energy production, auxiliary energy consumption, storage tank temperature, and collector efficiency.

Materials and Methods

In this study, a dynamic simulation model was developed using the TRNSYS software environment to evaluate the performance of a solar water heating system during a one-year simulation period (8760 hours). Initially, a reference residential building was

modelled based on a validated international study. The geometric characteristics, construction materials, thermal properties of building components, internal heat gains, and operating conditions were implemented to ensure the accuracy and reliability of the numerical model.

After validation, the solar water heating system was integrated with the building model. The system consisted of a flat plate solar collector, thermal storage tank, and auxiliary heating unit. The governing equations were solved based on energy conservation principles, considering heat transfer interactions among the collector, storage tank, and surrounding environment. The performance of the system was investigated for two representative cities in Iran, Tehran and Kashan, considering their different climatic conditions.

The main evaluated parameters included total, direct, and diffuse solar radiation, useful thermal energy generated by the collector (Q_u), thermal losses (Q_l), auxiliary energy demand (Q_{aux}), storage tank temperature variation, and annual solar collector efficiency. The obtained results were analyzed to determine the effect of climatic conditions on the thermal performance of the solar water heating system.

Result

The simulation results showed that solar radiation in both investigated cities followed a clear seasonal pattern. The highest radiation levels occurred during warm months, while the lowest values were observed during winter. The analysis of solar radiation received by the collector surface indicated that the inclination and orientation of the collector improved solar energy absorption and increased the available solar input. Due to the higher solar radiation availability in Kashan compared with Tehran, the solar collector received higher energy input, resulting in improved thermal performance.

The analysis of useful energy production demonstrated that the collector thermal output was directly related to solar radiation

intensity. During peak radiation periods, the useful energy generated by the collector exceeded 5000 kJ/h, indicating the effective conversion of solar radiation into thermal energy. Although thermal losses increased with increasing collector operating temperature, the useful energy production remained higher than thermal losses during most hours of the year. This confirms the suitable thermal performance of the solar collector under both climatic conditions.

The results of auxiliary energy consumption indicated that the contribution of the auxiliary heating system was strongly dependent on seasonal conditions. During summer, sufficient solar energy availability significantly reduced the need for auxiliary energy, and the required auxiliary energy approached nearly zero in some periods. However, during winter, reduced solar radiation increased the contribution of the auxiliary system to satisfy the thermal demand of the building.

The storage tank temperature analysis showed stable thermal behavior throughout the annual simulation period. The tank temperature remained within the defined operating range for most hours of the year. During periods with high solar radiation, the stored thermal energy increased, and the tank temperature reached values above 80°C in some periods. This behavior indicated the capability of the storage tank to accumulate solar thermal energy during favorable conditions. In colder periods, lower solar availability resulted in reduced temperature levels and lower thermal storage capacity.

The evaluation of annual collector efficiency demonstrated that the system maintained acceptable performance in both climates. The annual efficiency of the solar collector was calculated as 57.37% in Kashan and 55.08% in Tehran. The higher efficiency obtained in Kashan was attributed to greater solar radiation availability and more favorable climatic conditions. The results indicate that although, regions with higher solar potential achieve better system performance both cities provide suitable

conditions for solar water heating applications.

Discussion and Conclusion

The results of this study demonstrate that climatic conditions have a significant influence on the performance of solar water heating systems. The developed TRNSYS model successfully described the dynamic interaction between solar radiation availability, collector thermal performance, storage tank behavior, and auxiliary energy requirements. The results confirmed that solar radiation intensity is the main factor controlling useful thermal energy production and collector efficiency.

The production of more than 5000 kJ/h useful thermal energy during peak radiation periods indicates the high potential of the solar collector for providing thermal energy in residential applications. In addition, the significant reduction of auxiliary energy demand during summer demonstrates the capability of the system to reduce conventional energy consumption. The stable temperature behavior of the storage tank also confirms the effectiveness of thermal energy storage in improving system reliability.

The comparison between Tehran and Kashan shows that climatic characteristics directly affect the annual performance of solar thermal systems. Kashan, with higher solar radiation availability, achieves higher annual collector efficiency compared with Tehran. Therefore, geographical location and climatic conditions should be considered as important factors in the designing and application of solar water heating systems.

Overall, the findings have indicated that solar water heating systems can effectively contribute to reducing fossil fuel consumption and improving energy efficiency in residential buildings. The developed simulation approach provides a useful framework for evaluating solar thermal systems under different climatic conditions and supports future optimization and implementation of renewable energy technologies in the building sector.

طراحی و ارزیابی عملکرد سیستم آب گرم کن خورشیدی به همراه منبع ذخیره، برای تأمین آب گرم مصرفی یک ساختمان مسکونی نمونه در شهرهای تهران و کاشان

زهرا پارسای^۱، مجید سبزوшانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، za.parsai@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، spooshan@kashanu.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

آبگرم کن خورشیدی، تأمین انرژی حرارتی، ساختمان مسکونی، شبیه‌سازی انرژی، ایران

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹

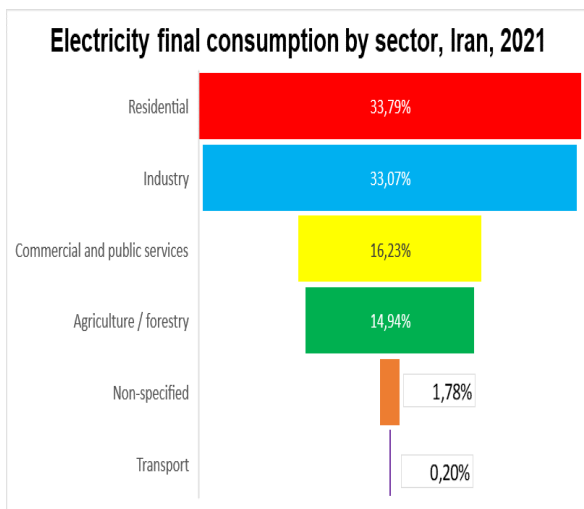
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

چکیده: کلکتورهای آب گرم کن خورشیدی به دلیل بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و هزینه بهره‌برداری پایین، از مهم‌ترین گزینه‌ها در تأمین انرژی حرارتی ساختمان‌ها محسوب می‌شوند. در این پژوهش، عملکرد یک سامانه آب گرم کن خورشیدی برای یک ساختمان مسکونی در دو شهر تهران و کاشان با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس (Trnsys Software) به صورت دینامیکی و در بازه زمانی یک‌ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تابش خورشیدی در هر دو شهر دارای رفتار فصلی مشخصی است؛ به طوری که بیشترین میزان تابش در فصل گرم سال و کمترین مقدار آن در فصل زمستان مشاهده می‌شود. تحلیل نتایج انرژی نشان داد که انرژی مفید تولیدی کلکتور ارتباط مستقیمی با شدت تابش داشته و در دوره‌های اوج تابش به بیش از 5000 kJ/h رسیده است. هرچند تلفات حرارتی با افزایش دمای عملکرد کلکتور افزایش یافته، اما در اغلب ساعات سال انرژی مفید تولیدی بر تلفات غلبه داشته است. همچنین نیاز به انرژی کمکی در فصل تابستان تقریباً صفر بوده و در فصل زمستان افزایش یافته است. بررسی رفتار حرارتی مخزن ذخیره نشان داد که دمای آب در بیشتر ساعات در محدوده پایدار قرار داشته است. بازه سالانه کلکتور در کاشان $57/37\%$ و در تهران $55/08\%$ به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سامانه در هر دو اقلیم است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که سامانه قادر به تأمین مناسب بار حرارتی ساختمان بوده و مناطق با تابش بالاتر، مانند کاشان، شرایط بهینه‌تری برای بهره‌برداری از سامانه‌های خورشیدی حرارتی فراهم می‌کنند.

۱. مقدمه

می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌ها داشته باشد. [۵].

در ایران، الگوی مصرف انرژی در بخش خانگی نشان‌دهنده وابستگی بالا به انرژی الکتریکی و سوخت‌های فسیلی است. این موضوع در شکل به خوبی مشاهده می‌شود. شایان‌ذکر است که استفاده از انرژی در ایران در بخش صنعتی، تجاری و سرویس عمومی، کشاورزی و جنگل‌داری به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در این بین استفاده از انرژی الکتریکی در بخش حمل‌ونقل در رتبه آخر قرار دارد.



شکل (۱): میزان مصرف نهایی انرژی الکتریکی به تفکیک بخش برای کشور ایران در سال ۲۰۲۱ [۵]

این موضوع، در کنار قیمت پایین حامل‌های انرژی ناشی از یارانه‌های گسترده، منجر به شدت مصرف انرژی بالا در مقایسه با میانگین جهانی شده است. از سوی دیگر، ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، از پتانسیل قابل‌توجهی در زمینه انرژی خورشیدی برخوردار است؛ به گونه‌ای که میانگین تابش سالانه خورشید در بسیاری از مناطق کشور بین ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز گزارش شده است [۶]. این شرایط، فرصت مناسبی برای توسعه سامانه‌های خورشیدی حرارتی در مقیاس ساختمان فراهم می‌کند.

در میان فناوری‌های خورشیدی حرارتی، کلکتورهای آب‌گرم‌کن خورشیدی به دلیل ساختار ساده، هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری پایین، عدم نیاز به سیال واسط پیچیده و ایمنی عملیاتی بالا، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای گرمایش فضا و پیش‌گرمایش هوای ورودی ساختمان‌ها محسوب می‌شوند [۷]. با این حال، عملکرد این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی،

انرژی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی توسعه پایدار، نقشی تعیین‌کننده در رشد اقتصادی، رفاه اجتماعی و امنیت زیست‌محیطی ایفا می‌کند. افزایش جمعیت جهانی، توسعه شتابان شهرنشینی و گسترش فناوری‌های نوین موجب شده است که تقاضای انرژی در دهه‌های اخیر با آهنگی فزاینده رشد کند. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از این تقاضا همچنان از طریق منابع فسیلی تأمین می‌شود؛ منابعی که علاوه بر محدود بودن، اثرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و تشدید پدیده گرمایش جهانی به همراه دارند [۱]. این چالش‌ها، لزوم بازنگری در الگوهای تولید و مصرف انرژی را بیش‌ازپیش آشکار ساخته‌اند.

بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تولید انرژی اولیه و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در سطح جهان طی دو دهه اخیر به ترتیب حدود ۴۹ و ۴۳ درصد افزایش یافته است [۲]. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، به‌عنوان عامل اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود و پیامدهای آن شامل افزایش دمای متوسط زمین، تغییر الگوهای بارش، افزایش وقوع پدیده‌های حدی آب‌وهوایی و تهدید امنیت غذایی است.

مطابق سناریوهای ارائه‌شده در گزارش‌های بین‌المللی، برای محدودکردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوران پیشاصنعتی، کاهش چشمگیر انتشار CO₂ در تمامی بخش‌های مصرف‌کننده انرژی ضروری است [۳]. در این راستا، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار بهبود بهره‌وری انرژی، به‌عنوان دو راهبرد مکمل، نقشی کلیدی در تحقق اهداف اقلیمی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی ایفا می‌کنند.

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهان محسوب می‌شود. آمارها نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد از مصرف نهایی انرژی و نزدیک به ۳۰ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن جهانی به این بخش اختصاص دارد [۴]. در ساختمان‌های مسکونی، سهم عمده مصرف انرژی مربوط به گرمایش فضا، سرمایش، تهویه مطبوع و تأمین آب گرم مصرفی است. از این رو، به‌کارگیری راهکارهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر و سامانه‌های کارآمد تأمین انرژی در این بخش

طراحی کلکتور، ویژگی‌های ساختمان و الگوی مصرف انرژی قرار دارد. افزون بر این، ناپیوستگی تابش خورشیدی موجب می‌شود که بدون استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، بهره‌برداری پایدار از این سامانه‌ها با محدودیت مواجه شود.

۲. پیشینه تحقیق

۱.۲. کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت و آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی

سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی یکی از موفق‌ترین و پرکاربردترین فناوری‌های بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در بخش ساختمان به شمار می‌روند، زیرا تأمین آب گرم مصرفی معمولاً حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی ساختمان‌های مسکونی را به خود اختصاص می‌دهد [۸]. شواهد موجود نشان می‌دهد که این سامانه‌ها در ایران از نظر فنی قابلیت اطمینان مناسبی دارند، هرچند عملکرد واقعی آن‌ها به عواملی نظیر شرایط اقلیمی، طراحی کلکتور، ظرفیت ذخیره‌سازی، میزان تلفات حرارتی و نحوه بهره‌برداری وابسته است [۸-۱۱].

برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، ابتدا لازم است تابش خورشید توسط یک تجهیز مناسب جمع‌آوری شود. این وظیفه بر عهده کلکتور خورشیدی است که به‌عنوان اصلی‌ترین جزء سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی، انرژی تابشی را جذب کرده و آن را به سیال عامل منتقل می‌کند. از دیدگاه ترمودینامیکی، کلکتور خورشیدی نوعی مبدل حرارتی است که انرژی تابشی خورشید را به انرژی گرمایی قابل استفاده تبدیل می‌کند؛ بنابراین، ویژگی‌هایی نظیر ضریب جذب بالا، ضریب هدایت حرارتی مناسب، ضریب گسیل پایین، مقاومت در برابر دماهای بالا و خوردگی از مهم‌ترین معیارهای طراحی کلکتورها محسوب می‌شوند [۸، ۱۲].

کلکتورهای خورشیدی حرارتی را می‌توان بر اساس ساختار و نحوه تمرکز تابش به سه گروه اصلی شامل کلکتورهای صفحه تخت، کلکتورهای لوله خلاء و کلکتورهای متمرکز تقسیم کرد که هر یک برای محدوده مشخصی از دما و کاربرد مناسب هستند [۱۳]. در میان این فناوری‌ها، کلکتورهای صفحه تخت به دلیل ساختار ساده، هزینه ساخت پایین، قابلیت اطمینان بالا، نگهداری آسان و استفاده مستقیم از آب به‌عنوان سیال عامل، رایج‌ترین گزینه برای سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی ساختمان‌های مسکونی محسوب می‌شوند [۱۴]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در صورت طراحی مناسب، این کلکتورها قادرند سهم

قابل توجهی از بار آب گرم مصرفی ساختمان را تأمین کنند. برای نمونه، در یک مطالعه انجام‌شده روی ساختمان مسکونی، سامانه طراحی‌شده توانست حدود ۷۵ درصد نیاز سالانه آب گرم را توسط انرژی خورشیدی تأمین کند و با استفاده از منبع حرارتی کمکی، کل نیاز ساختمان را پوشش دهد [۸]. همچنین نتایج پایش میدانی ده واحد مسکونی در تهران نشان داد که سامانه‌های ترموسیفون مجهز به کلکتور صفحه تخت و مخزن ذخیره ۱۵۰ لیتری به بازده حرارتی متوسط سالانه حدود ۵۸ درصد دست یافته و تا ۷۰ درصد نیاز آب گرم مصرفی را تأمین کرده‌اند [۹].

ابعاد کلکتور و ظرفیت مخزن ذخیره از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی هستند. برای یک خانوار چهار نفره در ایران، مصرف روزانه آب گرم حدود ۲۴۰ لیتر و انرژی حرارتی متناظر آن حدود ۳۱/۶ مگاژول (۸/۷۸ کیلووات‌ساعت) در روز گزارش شده است [۱۵]. این مقادیر مبنای تعیین سطح کلکتور و حجم مخزن ذخیره در طراحی سامانه محسوب می‌شوند. مطالعات بهینه‌سازی نیز نشان داده‌اند که برای ساختمان‌های مسکونی، استفاده از کلکتورهای صفحه تخت همراه با مخازن ذخیره در حدود ۱۵۰ لیتر، تعادل مناسبی میان عملکرد حرارتی و هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد می‌کند [۱۰-۱۱]. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای بر روی یک ساختمان نمونه در اسلام‌آباد، استفاده از کلکتوری با سطح ۶ مترمربع و مخزن ذخیره ۱۵۰ لیتری موجب دستیابی به بازده حرارتی ۵۹/۸ درصد و ذخیره حدود ۶/۶۸ کیلووات‌ساعت انرژی برای ساعات بدون تابش شد [۱۱]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، سامانه‌ای مجهز به کلکتور ۴/۴۱ مترمربعی و مخزن ۹۰۰ لیتری توانست سالانه بیش از ۶۰۵۰ کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی انرژی ایجاد کرده و مصرف انرژی کمکی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۱۶].

بهبود عملکرد حرارتی کلکتورهای صفحه تخت همواره یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهش در این حوزه بوده است. یکی از نخستین راهکارهای ارائه‌شده، توسعه کلکتورهای دوگذر و چندگذر بود که با افزایش زمان ماند سیال و افزایش سطح تبادل حرارتی، امکان استخراج انرژی بیشتری از صفحه جاذب را فراهم می‌کند [۹-۱۰]. با این وجود، افزایش طول مسیر جریان معمولاً موجب افزایش افت فشار و در نتیجه افزایش توان پمپاژ مورد نیاز می‌شود؛ بنابراین طراحی این کلکتورها مستلزم ایجاد تعادل میان افزایش انتقال حرارت و محدودیت‌های هیدرولیکی است.

۲.۲. ذخیره‌سازهای حرارتی در سامانه‌های آب گرم کن

خورشیدی

ذخیره‌سازی حرارتی یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های آب گرم کن خورشیدی است، زیرا امکان استفاده از انرژی جمع‌آوری شده را در ساعات بدون تابش، دوره‌های ابری و زمان‌های اوج مصرف فراهم می‌کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که بدون استفاده از یک سامانه ذخیره‌سازی مناسب، بخش قابل توجهی از انرژی حرارتی تولیدشده قابل بهره‌برداری نخواهد بود و در نتیجه سهم خورشیدی سامانه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد [۱۶]، [۲۵]، [۲۶]. از این رو، عملکرد کلی سامانه نه تنها به مشخصات کلکتور، بلکه به نوع و کیفیت عملکرد مخزن ذخیره نیز وابسته است [۸]، [۲۷].

در میان فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی، مخازن ذخیره لایه‌ای آب گرم به دلیل سادگی، هزینه پایین و سازگاری مناسب با سامانه‌های خورشیدی مسکونی، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. در این نوع مخازن، آب گرم به‌طور طبیعی در بخش فوقانی و آب سرد در قسمت پایینی مخزن قرار می‌گیرد و این جدایش دمایی در اثر اختلاف چگالی سیال شکل می‌گیرد [۲۹-۲۷]. برخلاف مخازن کاملاً مخلوط، هدف اصلی در مخازن لایه‌ای تنها ذخیره انرژی نیست، بلکه حفظ توزیع دمایی در امتداد ارتفاع مخزن و تأمین آب گرم با کیفیت دمایی مناسب در زمان برداشت است [۲۸-۲۷].

مطالعات عددی و تجربی نشان داده‌اند که حفظ لایه‌بندی حرارتی می‌تواند عملکرد سامانه‌های آب گرم کن خورشیدی را به‌طور محسوسی بهبود دهد. نتایج شبیه‌سازی‌های کلاسیک بیانگر آن است که استفاده از مخزن لایه‌ای در مقایسه با مخزن کاملاً مخلوط، بسته به شرایط بهره‌برداری، موجب افزایش ۵ تا ۱۵ درصدی عملکرد سامانه می‌شود و این بهبود در سامانه‌های تأمین آب گرم مصرفی بیش از سایر کاربردها مشاهده شده است [۳۰]. دلیل اصلی این مزیت آن است که لایه‌بندی حرارتی، دمای بالای بخش فوقانی مخزن را برای مصرف حفظ کرده و هم‌زمان دمای آب برگشتی به کلکتور را کاهش می‌دهد؛ شرایطی که موجب افزایش اختلاف دمای مؤثر در کلکتور و در نتیجه بهبود بازده حرارتی آن می‌شود [۲۸-۲۷].

مطالعات جدید مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) نیز اهمیت لایه‌بندی حرارتی را تأیید کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کیفیت لایه‌بندی، میزان انرژی مفید

در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها بیشتر به اصلاح هندسه صفحه جاذب و مسیر جریان سیال معطوف شده است. استفاده از زبری‌های مصنوعی، فین‌ها، صفحات موج‌دار، موانع جریان و سایر ساختارهای هندسی، از مهم‌ترین روش‌های افزایش انتقال حرارت در کلکتورهای صفحه تخت محسوب می‌شوند [۲۱-۱۸]. این اصلاحات با افزایش آشفتنگی جریان، کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی و بهبود اختلاط سیال، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش بازده حرارتی کلکتور می‌شوند. با این حال، اغلب این تغییرات با افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک همراه هستند؛ از این رو، ارزیابی عملکرد واقعی کلکتورها باید به‌صورت هم‌زمان از دیدگاه حرارتی و هیدرولیکی انجام شود [۲۲].

نتایج مطالعات تجربی نیز این موضوع را تأیید می‌کند. استفاده از ریزرهای مارپیچی-کنگره‌ای در کلکتورهای صفحه تخت توانسته است بازده حرارتی را تا ۶۱/۵۹ درصد افزایش دهد، هرچند ضریب اصطکاک نیز بین ۵۹/۳ تا ۹۷/۶ درصد افزایش یافته است [۱۴]. در مقابل، استفاده از صفحات جاذب چندکاناله با هندسه V-کنگره‌ای علاوه بر افزایش بازده حرارتی متوسط روزانه از ۵۸/۶ به ۶۹/۴ درصد، موجب کاهش افت فشار و توان پمپاژ نسبت به طرح‌های متداول شده است [۲۳]. همچنین استفاده از صفحات جاذب با هندسه‌های دایروی و دوزنقه‌ای نیز افزایش بازده حرارتی تا حدود ۱۲/۸۵ درصد را نشان داده است [۲۴]. این نتایج بیانگر آن است که انتخاب هندسه مناسب صفحه جاذب و مسیر جریان می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد کلکتور داشته باشد.

در مجموع، مرور ادبیات نشان می‌دهد که کلکتورهای صفحه تخت همچنان مناسب‌ترین گزینه برای سامانه‌های آب گرم کن خورشیدی ساختمان‌های مسکونی هستند. با این حال، انتخاب کلکتور مناسب تنها بر اساس بیشینه کردن بازده حرارتی امکان‌پذیر نیست، بلکه باید اثر متقابل پارامترهایی نظیر سطح کلکتور، دبی جریان، افت فشار، توان پمپاژ، شرایط اقلیمی، هزینه سرمایه‌گذاری و نحوه اتصال به مخزن ذخیره به‌صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار گیرد [۱۱]، [۱۴]، [۲۲-۲۴]. این رویکرد جامع، زمینه طراحی سامانه‌هایی با بازده حرارتی بالاتر، مصرف انرژی کمتری و عملکرد پایدارتر را در شرایط واقعی بهره‌برداری فراهم می‌کند.

شبکه لوله‌کشی می‌تواند از مقادیر اسمی بیشتر باشد؛ از این رو، ارزیابی سامانه‌های خورشیدی باید علاوه بر تحلیل انرژی، کیفیت لایه‌بندی، تلفات حرارتی و شرایط واقعی بهره‌برداری را نیز به صورت هم‌زمان در نظر بگیرد [۲۹]، [۳۴].

۳.۲. خلأهای پژوهشی

مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که عملکرد سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد. تهران به دلیل برخورداری از داده‌های میدانی متعدد، تنوع شرایط آب‌وهوایی و پیچیدگی محیط شهری، یکی از مهم‌ترین بسترهای ارزیابی سامانه‌های خورشیدی محسوب می‌شود [۸-۱۱]. دامنه وسیع تغییرات دمای محیط، وجود پدیده‌هایی مانند آلودگی هوا و سایه‌اندازی شهری و همچنین انجام مطالعات متعدد در مقیاس ساختمان‌های مسکونی، سامانه‌های هیبرید و ذخیره‌سازی حرارتی، این شهر را به مرجع مناسبی برای اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی تبدیل کرده است [۹-۱۰]، [۲۵-۲۶].

در مقابل، اگرچه مطالعات مستقیمی درباره سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی در شهر کاشان محدود است، اما پژوهش‌های انجام‌شده در شهرهای اقلیمی مشابه مانند ساوه و کرمان نشان داده‌اند که مناطق مرکزی ایران از پتانسیل بسیار مناسبی برای توسعه سامانه‌های حرارتی خورشیدی برخوردار هستند [۱۵]، [۳۷]. این مطالعات علاوه بر گزارش سهم خورشیدی بالا و صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف سوخت‌های فسیلی، بیانگر آن هستند که انتخاب مناسب کلکتور، ظرفیت ذخیره و راهبرد بهره‌برداری می‌تواند عملکرد سامانه را به میزان چشمگیری بهبود دهد [۱۵]، [۳۷].

در مجموع، مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که اگرچه هر یک از اجزای سامانه شامل کلکتور، مخزن ذخیره و شرایط اقلیمی به صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما مطالعات اندکی به ارزیابی هم‌زمان اثر طراحی کلکتور، رفتار مخزن لایه‌ای و تغییرات اقلیمی در قالب یک سامانه یکپارچه پرداخته‌اند [۹]، [۱۱]، [۳۴]. به‌ویژه، مقایسه مستقیم عملکرد یک سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی مجهز به مخزن ذخیره لایه‌ای در دو شهر تهران و کاشان در ادبیات موجود کمتر مشاهده می‌شود. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه حاضر را برای بررسی اثر هم‌زمان نوع کلکتور، رفتار مخزن ذخیره، سهم خورشیدی و نیاز به انرژی کمکی در دو اقلیم متفاوت ایران آشکار می‌سازد.

ذخیره‌شده در مخزن افزایش یافته و راندمان کلی سامانه بهبود می‌یابد [۱۵]. در مقابل، بررسی رفتار مخازن مجهز به مبدل جداره‌ای نشان داده است که با افزایش زمان دشارژ، ضخامت ناحیه ترموکلاین افزایش یافته و اختلاط داخلی مخزن تشدید می‌شود که در نهایت به کاهش تدریجی انرژی ذخیره‌شده منجر خواهد شد [۱۹]؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد مخازن لایه‌ای تنها بر اساس دمای متوسط مخزن کافی نیست و تحلیل توزیع دما در ارتفاع مخزن، پایداری ترموکلاین و تغییرات انرژی نیز باید مورد توجه قرار گیرد [۲۸]، [۳۱].

کیفیت لایه‌بندی علاوه بر شرایط بهره‌برداری، به طراحی هندسی و نحوه اتصال مخزن نیز وابسته است. پژوهش‌های تجربی نشان داده‌اند که محل ورود و خروج سیال، نحوه شارژ و دشارژ، سرعت جریان و استفاده از تجهیزات خودلایه‌بند از مهم‌ترین عوامل حفظ یا تخریب لایه‌بندی حرارتی هستند [۲۹]. به همین دلیل، استفاده از ورودی‌های چندسطحی، لوله‌های هدایت‌کننده، پخش‌کننده‌های جریان و سایر تجهیزات کنترل‌کننده اختلاط به عنوان راهکارهای مؤثر برای افزایش پایداری لایه‌بندی پیشنهاد شده است [۲۹]. همچنین نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که مخازن عمودی نسبت به مخازن افقی شرایط مناسب‌تری برای حفظ شناوری طبیعی و کاهش اختلاط ایجاد می‌کنند [۲۹].

از دیدگاه مدل‌سازی، مخزن لایه‌ای معمولاً به تعدادی لایه افقی تقسیم شده و معادلات جرم و انرژی برای هر لایه به صورت مستقل حل می‌شود [۲۷]. این رویکرد امکان پیش‌بینی دقیق‌تر توزیع دما، میزان اختلاط و رفتار گذرای سامانه را فراهم می‌کند و به همین دلیل در اغلب نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سامانه‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات بلندمدت نیز نشان داده‌اند که کیفیت لایه‌بندی تأثیر بیشتری بر پایداری دمای آب خروجی نسبت به افزایش ساده حجم مخزن دارد [۲۸]. علاوه بر این، در برخی پیکربندی‌ها استفاده از تبادل حرارت مستقیم نسبت به مبدل‌های غوطه‌ور موجب افزایش ۱۸ تا ۲۳ درصدی سهم خورشیدی سامانه شده است که اهمیت حفظ لایه‌بندی حرارتی را بیش از پیش نشان می‌دهد [۳۲].

با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، بخش عمده مطالعات موجود بر عملکرد کلی سامانه یا رفتار مخازن متداول متمرکز بوده‌اند و پژوهش‌های محدودی به بررسی هم‌زمان عملکرد کلکتور، رفتار مخزن لایه‌ای و شرایط اقلیمی مختلف پرداخته‌اند [۹]، [۳۳]. همچنین مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تلفات واقعی مخزن و

۳. مدل سازی روابط حاکم

۳.۱. فرضیات مدل سازی و معادلات حاکم

معادلات موازنه انرژی برای اجزای مختلف کلکتور آب گرم کن با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده زیر نوشته شده است:

۱. انتقال حرارت و جریان سیال به صورت یک بعدی در راستای جریان فرض شده است.

۲. ظرفیت حرارتی پوشش شیشه ای، صفحه جاذب و عایق ناچیز در نظر گرفته شده است.

۳. تلفات حرارتی جانبی و نشتی سیال قابل صرف نظر فرض شده اند.

۴. جذب تابش خورشیدی توسط سیال داخل کانال ناچیز در نظر گرفته شده است.

۵. خواص ترموفیزیکی سیال با دما ثابت فرض شده اند.

۶. تغییرات دمای سیال تنها در راستای جریان بررسی شده است.

کلکتور مورد استفاده از نوع صفحه تخت بوده و شامل صفحه جاذب، پوشش شیشه ای و لایه عایق حرارتی است. پوشش شیشه ای به منظور کاهش تلفات حرارتی جابه جایی و تشعشعی و افزایش جذب انرژی خورشیدی به کار گرفته شده است، در حالی که بخش زیرین کلکتور به طور کامل عایق کاری شده تا اتلاف حرارت به حداقل برسد. سیال عامل پس از عبور از مجاری کلکتور، انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب را دریافت کرده و به مخزن ذخیره منتقل می کند. در مدل سازی حاضر، رفتار حرارتی کلکتور بر اساس معادله شماره ۱ نظر گرفته شده:

رابطه کلی راندمان حرارتی کلکتور [۳۸]:

$$Qu = A_c F_R [(\tau\alpha) I_T - U_L (T_i - T_a)] \quad (۱)$$

که در آن:

Q_u : نرخ انرژی مفید خروجی کلکتور (kJ/h)

A_c : سطح کلکتور (m^2)

F_R : ضریب برداشت حرارت

$(\tau\alpha)$: حاصل ضرب ضریب عبور پوشش و ضریب جذب صفحه

I_T : شدت تابش کل خورشیدی روی سطح کلکتور ($kJ/h.m^2$)

U_L : ضریب کلی تلفات حرارتی ($W/m^2.K$)

T_i : دمای ورودی سیال به کلکتور

T_a : دمای محیط

راندمان حرارتی کلکتور نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

[۳۸]

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_T} \quad (۲)$$

با در نظر گرفتن وابستگی ضریب تلفات حرارتی به اختلاف دما، رابطه راندمان کلکتور به فرم استاندارد زیر بازنویسی می شود:

[۳۸]

$$\eta = a_0 - a_1 \left(\frac{T_i - T_a}{I_T} \right) - a_2 \left(\frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \right) \quad (۳)$$

که در آن:

a_0 : ضریب بازده اپتیکی کلکتور

a_1 : ضریب تلفات حرارتی مرتبه اول

a_2 : ضریب تلفات حرارتی مرتبه دوم

در این پژوهش، اختلاف دمای کلکتور مطابق رابطه زیر تعریف شده است:

$$\Delta T = T_i - T_a \quad (۴)$$

تحلیل انرژی

به منظور ارزیابی کیفیت انرژی و تعیین قابلیت کلکتور خورشیدی در تبدیل انرژی حرارتی به کار مفید، تحلیل انرژی بر پایه قانون دوم ترمودینامیک انجام می شود. برخلاف تحلیل انرژی که تنها بر اصل بقای انرژی استوار است، تحلیل انرژی میزبان توان بالقوه انرژی برای انجام کار مفید و همچنین منابع اتلاف ناشی از فرایندهای برگشتناپذیر را مشخص می کند. از این رو، تحلیل انرژی شاخص مناسب تری برای ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی کلکتور خورشیدی محسوب می شود. در این بخش روابط حاکم بر موازنه و راندمان انرژی کلکتور صفحه تخت ارائه شده است.

بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، موازنه انرژی کلکتور به صورت زیر نوشته می شود: [۳۹]

$$\sum \dot{E}_{x,in} - \sum \dot{E}_{x,out} = \sum \dot{E}_{x,dest} \quad (۵)$$

که در آن $\dot{E}_{x,in}$ ، $\dot{E}_{x,out}$ و $\dot{E}_{x,dest}$ به ترتیب نرخ انرژی ورودی، خروجی و تخریب شده را نشان می دهند. در کلکتور خورشیدی صفحه تخت، انرژی ورودی شامل دو مؤلفه است: انرژی ناشی از تابش خورشیدی جذب شده $\dot{E}_{x,in-rad}$ و انرژی سیال عامل در ورودی کلکتور $\dot{E}_{x,f,in}$. در مقابل، انرژی خروجی تنها شامل انرژی سیال عامل در خروجی کلکتور $\dot{E}_{x,f,out}$ است. بنابراین، اختلاف بین مجموع انرژی های

تمرکز بر جزء اصلی سامانه، تنها موازنه و راندمان اگزرژی کلکتور مورد بررسی قرار گرفته است. این رویکرد ضمن کاهش حجم محاسبات، امکان ارزیابی دقیق‌تر اثر پارامترهای طراحی و شرایط عملکرد بر تخریب اگزرژی و راندمان ترمودینامیکی کلکتور را فراهم می‌کند، بدون آنکه بر اعتبار نتایج مقایسه‌ای پژوهش تأثیر محسوسی داشته باشد.

محدودیت‌های پژوهش

اگرچه در این پژوهش تلاش شده عملکرد یک سامانه آب‌گرمکن خورشیدی مجهز به مخزن ذخیره با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار ترنسپس و بر پایه داده‌های اقلیمی معتبر مورد ارزیابی قرار گیرد، با این حال نتایج حاصل باید با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌های مدل تفسیر شوند.

نخست، در این مطالعه شبیه‌سازی بر اساس فایل‌های اقلیمی استاندارد سال هواشناسی مرجع نرم‌افزار متونورم انجام شده است. این داده‌ها میانگین بلندمدت شرایط اقلیمی را نشان می‌دهند و برای طراحی و ارزیابی عملکرد سالانه سامانه‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، شرایط حدی مانند روزهای کاملاً ابری، طوفان‌های گردوغبار، بارندگی‌های شدید یا موج‌های گرمایی که ممکن است در عملکرد واقعی سامانه تأثیرگذار باشند، در این مدل به‌صورت مستقل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

دوم، برخی فرضیات متداول مدل‌سازی به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و مطابق با رویه رایج در مطالعات مشابه در نظر گرفته شده است. از جمله می‌توان به ثابت فرض کردن برخی خواص ترموفیزیکی سیال عامل در محدوده دمای کاری، ناچیز فرض کردن افت فشار در مدار گردش سیال و صرف‌نظر کردن از ظرفیت حرارتی برخی اجزای فرعی سامانه اشاره کرد. هرچند این فرضیات در بسیاری از مطالعات معتبر حوزه شبیه‌سازی سامانه‌های خورشیدی پذیرفته شده‌اند، اما ممکن است در شرایط بهره‌برداری خاص موجب ایجاد اختلاف جزئی بین نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی شوند.

سوم، پژوهش حاضر بر ارزیابی عملکرد حرارتی سامانه در مرحله طراحی و بهره‌برداری ایده‌آل متمرکز بوده است؛ از این‌رو اثر عواملی نظیر رسوب‌گذاری در کلکتور و مبدل حرارتی، کاهش راندمان ناشی از فرسودگی تجهیزات، آلودگی سطح جاذب، تغییر کیفیت عایق‌کاری و نیازهای تعمیر و نگهداری در مدل لحاظ

ورودی و خروجی بیانگر میزان تخریب اگزرژی ناشی از برگشت‌ناپذیری‌های موجود در فرایند انتقال حرارت داخل کلکتور است.

افزایش اگزرژی سیال عامل در اثر عبور از کلکتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$\dot{E}_{x,f,out} - \dot{E}_{x,f,in} = \dot{m}C_p \left[(T_o - T_i) - T_a \ln \left(\frac{T_o}{T_i} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن $\dot{m}$ ، C_p و T_o به‌ترتیب دبی جرمی سیال، ظرفیت گرمایی ویژه و دمای محیط هستند.

اگزرژی تابش خورشیدی ورودی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$\dot{E}_{x,in-rad} = I_T A_c \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (7)$$

$$\dot{E}_{x,in-rad} = I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right) \quad (8)$$

که در آن T_s دمای مؤثر خورشید است. در بسیاری از مطالعات تحلیل اگزرژی کلکتورهای خورشیدی، مقدار $T_s = 4500 K$ به‌عنوان دمای مؤثر منبع تابش خورشیدی در نظر گرفته می‌شود و در این پژوهش نیز همین مقدار استفاده شده است [۴۱].

در نهایت، راندمان اگزرژی کلکتور به‌عنوان نسبت افزایش اگزرژی سیال عامل به اگزرژی تابش خورشیدی ورودی تعریف شده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

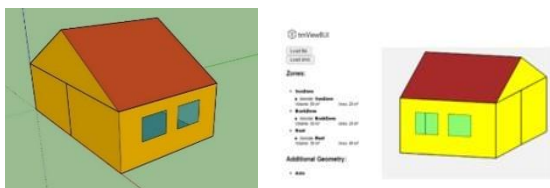
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}C_p \left[(T_o - T_i) - T_a \ln \left(\frac{T_o}{T_i} \right) \right]}{I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right)} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که در این پژوهش، تحلیل اگزرژی تنها برای کلکتور خورشیدی انجام شده است. هدف اصلی مطالعه، ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی کلکتور و بررسی تأثیر تغییرات اعمال‌شده بر این جزء از سامانه است. از آنجا که سایر اجزای سامانه، شامل مخزن ذخیره، پمپ، مبدل حرارتی، لوله‌ها و تجهیزات جانبی، در تمامی سناریوهای شبیه‌سازی بدون تغییر باقی مانده‌اند، میزان تولید و تخریب اگزرژی آن‌ها در تمامی حالات تقریباً ثابت بوده و در مقایسه عملکرد سناریوهای مختلف تأثیر قابل توجهی ندارد؛ بنابراین، به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و

نشده است. بدیهی است این عوامل می‌توانند در بهره‌برداری بلندمدت بر عملکرد واقعی سامانه تأثیرگذار باشند.

چهارم، این پژوهش تنها عملکرد سامانه را در دو شهر تهران و کاشان مورد ارزیابی قرار داده است. اگرچه این دو شهر به‌عنوان نمایندگان دو شرایط اقلیمی متفاوت انتخاب شده‌اند، تعمیم مستقیم نتایج به سایر مناطق کشور نیازمند انجام شبیه‌سازی با داده‌های اقلیمی همان مناطق خواهد بود.

پنجم، در این مطالعه زاویه نصب کلکتور، سطح کلکتور، حجم مخزن ذخیره و سایر پارامترهای طراحی بر اساس مقادیر طراحی ثابت انتخاب شده‌اند و تحلیل حساسیت این پارامترها انجام نشده است. هرچند انجام چنین تحلیلی می‌تواند در تعیین پارامترهای بهینه طراحی مفید باشد، اما خارج از اهداف اصلی این پژوهش بوده است که بر ارزیابی عملکرد سامانه تحت شرایط طراحی مشخص تمرکز دارد.



شکل (۲): (سمت راست) ساختمان شبیه‌سازی شده در مطالعه راشد و همکاران [۱] (سمت چپ) تصویر ساختمان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اسکچ‌آپ به‌منظور صحت‌سنجی

با وجود محدودیت‌های فوق، استفاده از مدل دینامیکی ترنسپس، بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی استاندارد، تعریف الگوی مصرف واقعی آب گرم مصرفی و اعتبارسنجی مدل با نتایج مطالعات مرجع، موجب شده است نتایج این پژوهش از دقت و قابلیت اطمینان مناسبی برای ارزیابی عملکرد حرارتی سامانه در مرحله طراحی اولیه برخوردار باشند.

۲.۳. مدل‌سازی ساختمان مرجع برای صحت‌سنجی

پس از ایجاد مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار اسکچ‌آپ و انتقال آن به محیط ترنسپس، شرایط بهره‌برداری ساختمان شامل نرخ نفوذ هوا، بارهای داخلی، برنامه حضور ساکنان و شرایط اقلیمی مطابق مطالعه مرجع تعریف شد و شبیه‌سازی سالانه انجام گرفت.

در این پژوهش، به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل شبیه‌سازی و افزایش قابلیت اعتماد نتایج، فرایند اعتبارسنجی پیش از انجام تحلیل‌های اصلی انجام شد. بدین منظور، ابتدا یک ساختمان مرجع معرفی‌شده در مطالعه راشد و همکاران [۱] در محیط نرم‌افزار ترنسپس بازسازی شد و سپس نتایج حاصل از مدل توسعه‌یافته با نتایج گزارش‌شده در آن مطالعه مقایسه شد. این رویکرد، یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی صحت مدل‌های شبیه‌سازی انرژی ساختمان است و امکان بررسی توانایی مدل در بازتولید رفتار حرارتی گزارش‌شده در یک مطالعه معتبر را فراهم می‌کند.

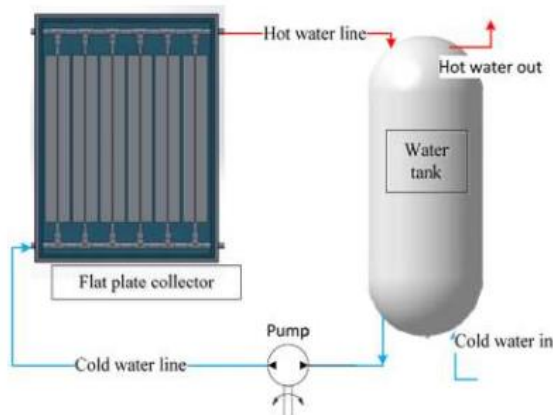
در مرحله اعتبارسنجی، تمامی مشخصات هندسی ساختمان، خواص ترموفیزیکی اجزای پوسته، شرایط مرزی، برنامه بهره‌برداری، بارهای داخلی، نرخ تهویه و داده‌های اقلیمی مطابق اطلاعات ارائه‌شده در مطالعه مرجع تعریف شدند تا هرگونه اختلاف ناشی از تفاوت در داده‌های ورودی به حداقل برسد. پس از تکمیل مدل، شبیه‌سازی دینامیکی سالانه برای یک دوره ۸۷۶۰

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتایج مدل بازسازی‌شده از نظر روند تغییرات دمای عملیاتی و دمای هوای داخلی، تطابق مناسبی با نتایج گزارش‌شده توسط راشد و همکاران [۱] دارند. هر دو مدل رفتار فصلی مشابهی را نشان می‌دهند و زمان وقوع بیشینه‌ها و کمینه‌های دمایی نیز تقریباً منطبق است. اختلاف‌های مشاهده‌شده عمدتاً در برخی ساعات محدود سال و در حوالی نقاط اوج دما دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از تفاوت در روش استخراج داده‌ها از نمودار مرجع، تقریب اعداد گزارش‌شده در مقاله اصلی، تفاوت در گام زمانی شبیه‌سازی یا گرد کردن پارامترهای ورودی باشد.

به‌منظور ارائه یک شاخص کمی از میزان انطباق، اختلاف نسبی متوسط میان منحنی‌های دمایی دو مدل محاسبه شد که

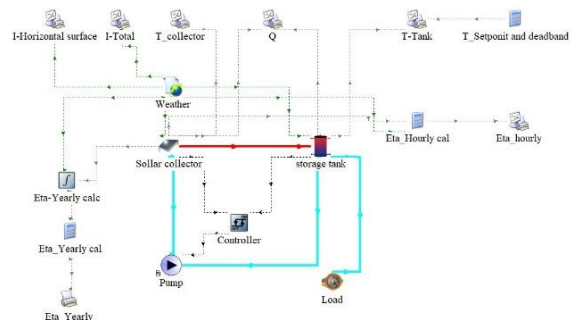
داده‌ها نماینده شرایط متوسط اقلیمی بلندمدت هر شهر بوده و شامل اطلاعات ساعتی تابش مستقیم، تابش پخش، تابش کل، دمای محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد و سایر پارامترهای موردنیاز شبیه‌سازی هستند. استفاده از فایل‌های TMY موجب می‌شود نتایج به شرایط یک سال خاص وابسته نبوده و بیانگر عملکرد متعارف سامانه در اقلیم هر منطقه باشند.

شکل (۴)، سامانه کامل آب‌گرم‌کن خورشیدی مورد تحلیل در این بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل (۴): اجزای سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی [۱۷]

ساختار کلی سامانه شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ترنسیس شامل اجزای اصلی سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی، داده‌های اقلیمی و تجهیزات کنترلی است که نمای کلی آن در شکل ۵ ارائه شده است. این ساختار امکان تحلیل دینامیکی و بررسی رفتار گذرای سامانه را در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌سازد و شرایط لازم برای ارزیابی دقیق عملکرد حرارتی سامانه تحت شرایط واقعی بهره‌برداری را مهیا می‌کند.

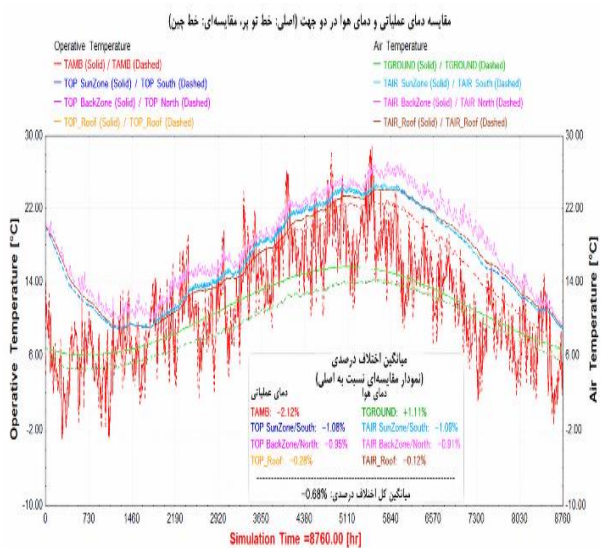


شکل (۵): نمودار ترنسیس مربوط به شبیه‌سازی سامانه آب-گرم‌کن خورشیدی

سامانه شبیه‌سازی‌شده از یک کلکتور خورشیدی، مخزن ذخیره آب گرم، پمپ گردش سیال، کنترلر و فایل داده‌های اقلیمی تشکیل شده است. به‌منظور مدل‌سازی کلکتور خورشیدی از مدل

حدود ۰/۶۸ درصد به دست آمد. با این حال، این مقدار تنها به‌عنوان یک معیار مقایسه‌ای میان نتایج مدل حاضر و داده‌های استخراج‌شده از مطالعه مرجع گزارش می‌شود و نباید به‌عنوان شاخص جامع اعتبارسنجی مدل تلقی شود. با توجه به همخوانی مناسب روند تغییرات دمایی، انطباق زمان وقوع قله‌ها و اختلاف محدود میان مقادیر دما، می‌توان نتیجه گرفت که مدل توسعه‌یافته از دقت کافی برای انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای این پژوهش برخوردار است.

بر این اساس، مدل اعتبارسنجی‌شده به‌عنوان مبنای شبیه‌سازی سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی در شهرهای تهران و کاشان مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۳): مقایسه دمای به‌دست‌آمده با دمای مطالعه راشد و همکاران [۱]

۳.۳. شبیه‌سازی و مدل سامانه انرژی

مدل‌سازی ساختمان و سامانه انرژی با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس ۱۸ (منتشرشده در سال ۲۰۱۷) انجام شده است. این نرم‌افزار یکی از معتبرترین و پرکاربردترین ابزارهای شبیه‌سازی دینامیکی سامانه‌های انرژی ساختمان بوده و به دلیل قابلیت مدل‌سازی رفتار گذرای سامانه‌های خورشیدی، در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی در محیط ترنسیس مدل‌سازی شد و داده‌های اقلیمی شهرهای تهران و کاشان از پایگاه داده نرم‌افزار متونورم استخراج گردید. ساختمان مورد نظر برای شبیه‌سازی از مرجع [۱] و مطابق شکل ۲ انتخاب شده است.

داده‌های اقلیمی مورد استفاده بر مبنای سال هواشناسی تپ (Typical Meteorological Year (TMY)) تهیه شده‌اند. این

تغییرات تابش مستقیم (I_{beam})، تابش پخشی $I_{diffused}$ و تابش کل I_{total} بر سطح افقی را در طول یک سال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو شهر دارای رفتار فصلی مشابهی هستند؛ به‌طوری‌که بیشترین شدت تابش در ماه‌های گرم سال و کمترین مقدار آن در فصل زمستان رخ می‌دهد. این رفتار ناشی از تغییر زاویه ارتفاع خورشید، طول روز و میزان انرژی دریافتی خارج از جو در طول سال است و با روابط شناخته‌شده هندسه خورشیدی مطابقت دارد.

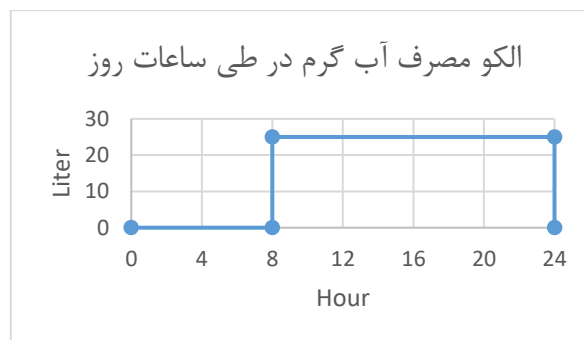
بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که سهم تابش مستقیم در هر دو شهر به‌مراتب بیشتر از تابش پخشی است. این موضوع بیانگر غالب بودن شرایط آسمان صاف در بیشتر روزهای سال است که برای عملکرد کلکتورهای صفحه تخت بسیار مطلوب محسوب می‌شود، زیرا این کلکتورها در حضور تابش مستقیم قادر به جذب انرژی بیشتری هستند. در مقابل، در دوره‌هایی که سهم تابش پخشی افزایش می‌یابد، اگرچه کل انرژی دریافتی کاهش پیدا نمی‌کند، اما به دلیل کاهش شدت تابش مؤثر بر صفحه جاذب، نرخ جذب انرژی و در نتیجه انرژی مفید تولیدی کلکتور نیز کاهش می‌یابد.

مقایسه دو شهر نشان می‌دهد که شهر کاشان در اغلب ماه‌های سال از شدت تابش کل و به‌ویژه تابش مستقیم بیشتری نسبت به تهران برخوردار است. علت این اختلاف را می‌توان به ویژگی‌های اقلیم گرم و خشک کاشان نسبت داد. کاهش رطوبت نسبی، میزان کمتر پوشش ابر و تعداد بیشتر ساعات آفتابی موجب افزایش عبور پرتوهای خورشیدی از جو و در نتیجه افزایش سهم تابش مستقیم می‌شود. در مقابل، تهران به دلیل شرایط جوی پیچیده‌تر، آلودگی هوا، رطوبت نسبی بالاتر در برخی فصول و افزایش پراکندگی پرتوهای خورشیدی، سهم بیشتری از تابش را به صورت پخشی دریافت می‌کند که این موضوع موجب کاهش انرژی قابل استفاده توسط کلکتور خورشیدی می‌شود.

از دیدگاه ترمودینامیکی، افزایش تابش مستقیم علاوه بر افزایش شار حرارتی جذب‌شده توسط صفحه جاذب، اختلاف بین انرژی جذب‌شده و تلفات حرارتی را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین نرخ انتقال حرارت مفید به سیال عامل افزایش یافته و راندمان سامانه بهبود پیدا می‌کند. به همین دلیل، انتظار می‌رود در شهری مانند کاشان نه تنها انرژی مفید کلکتور بیشتر باشد، بلکه نیاز به استفاده از سامانه گرمایش کمکی نیز کاهش یابد؛ موضوعی که در نتایج بخش‌های بعدی نیز مشاهده خواهد شد.

۱۶۵ در محیط ترنسیس استفاده شده است که قابلیت تحلیل عملکرد حرارتی کلکتور را بر اساس شرایط تابش خورشیدی و پارامترهای عملکردی فراهم می‌کند. مساحت کلکتور موردنظر مطابق با مطالعه رملای و همکاران [۴۲] برابر با 2 m^2 در نظر گرفته شده است. به عنوان سیال داخل کلکتور، آب با ظرفیت گرمای ویژه 4.19 kJ/Kg.k در نظر گرفته شد. همچنین برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، یک مخزن ذخیره آب گرم با استفاده از مدل ۴ در نرم‌افزار ترنسیس مدل‌سازی شده است. گنجایش مخزن ذخیره‌سازی مطابق با مطالعه زاهدی و گیتی‌فر [۴۲] مطابق با الگوی مصرف خانوارهای ایرانی روزانه برابر با ۴۰۰ با ۴۰۰ در نظر گرفته شده است. این مخزن نقش مهمی در متعادل‌سازی نوسانات دمایی و تأمین پایدار انرژی حرارتی ایفا می‌کند.

به‌منظور ایجاد جریان سیال در مدار حرارتی، از پمپ مدل ۱۱۴ استفاده شده و کنترل عملکرد سامانه و مدیریت فرایند انتقال حرارت از طریق کنترلر تعبیه‌شده در سامانه انجام گرفته است. داده‌های اقلیمی موردنیاز، شامل تابش خورشیدی، دمای محیط و سایر پارامترهای هواشناسی شهر تهران، با استفاده از نرم‌افزار متونورم استخراج و به محیط ترنسیس وارد شده‌اند. الگوی مصرف آب گرم در ساختمان هم از ساعت ۸ صبح تا ۱۲ شب مطابق با شکل ۶ در نظر گرفته شده است.



شکل (۶): الگو مصرف آب گرم در طی ساعات روز

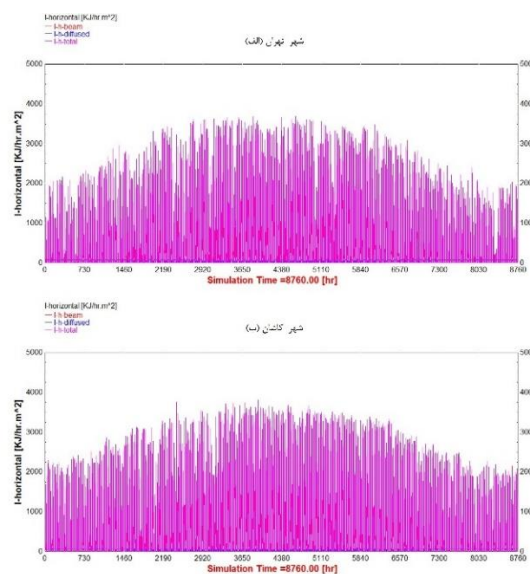
شبیه‌سازی سامانه برای یک دوره زمانی یک‌ساله انجام شده است تا امکان ارزیابی عملکرد سامانه در شرایط مختلف فصلی و تحلیل جامع رفتار حرارتی آن در طول سال فراهم گردد.

۴. یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی دینامیکی نشان می‌دهد که شدت و نحوه توزیع تابش خورشیدی مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده عملکرد سامانه آب گرم کن خورشیدی در هر دو شهر تهران و کاشان است. شکل ۷ که از نتایج خروجی نرم افزار ترنسیس استخراج شده است،

این رفتار با نتایج اعلایی و همکاران [۸] و همچنین تیواری و همکاران [۱۷] که اثر شرایط اقلیمی بر میزان انرژی خورشیدی دریافتی را بررسی کرده‌اند، مطابقت دارد. همچنین زاهدی و گیتی‌فر [۴۲] نیز در شبیه‌سازی سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی در اقلیم ایران نشان دادند که اختلاف شدت تابش سالانه یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد تفاوت در عملکرد حرارتی سامانه‌های خورشیدی است.

در مجموع، تحلیل شکل ۷ نشان می‌دهد که تفاوت عملکرد سامانه در دو شهر مورد مطالعه پیش از هر چیز ناشی از تفاوت در پتانسیل تابش خورشیدی است؛ بنابراین، انتخاب موقعیت جغرافیایی مناسب و شناخت دقیق ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه، یکی از عوامل کلیدی در طراحی و بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی محسوب می‌شود. این یافته همچنین توضیح می‌دهد که چرا در ادامه نتایج، سامانه نصب‌شده در کاشان انرژی مفید بیشتری تولید کرده، نیاز کمتری به انرژی کمکی داشته و راندمان سالانه بالاتری نسبت به سامانه مشابه در تهران به دست آورده است.



شکل (۷): تغییرات تابش کل I_{total} ، تابش مستقیم (I_{beam})، تابش پخش $I_{diffused}$ بر روی سطح افقی برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۸ تغییرات تابش مستقیم، تابش پخش و تابش کل را بر روی سطح شیب‌دار کلکتور در دو شهر تهران و کاشان نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار انرژی خورشیدی دریافت‌شده بر سطح شیب‌دار در هر دو شهر به‌طور محسوسی بیشتر از سطح افقی است. این موضوع نشان می‌دهد که زاویه

نصب کلکتور به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بیشترین میزان انرژی خورشیدی را در طول سال دریافت کند. از دیدگاه هندسه خورشیدی، تغییر زاویه سطح جاذب موجب افزایش زاویه برخورد مؤثر پرتوهای خورشیدی و در نتیجه افزایش مؤلفه عمود تابش بر سطح کلکتور می‌شود. این امر باعث افزایش شار حرارتی جذب‌شده توسط صفحه جاذب و کاهش بازتاب پرتوها شده و در نهایت بازده حرارتی کلکتور را بهبود می‌بخشد.

نتایج نشان می‌دهد که در شهر تهران، مقدار تابش کل روی سطح کلکتور در ساعات اوج تابش از حدود $4000 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2$ فراتر می‌رود، در حالی که در شهر کاشان این مقدار در بخش قابل توجهی از سال بیشتر بوده و مدت زمان بهره‌برداری مؤثر کلکتور نیز طولانی‌تر است. این تفاوت را می‌توان به شرایط اقلیمی دو منطقه نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که اقلیم گرم و خشک کاشان با رطوبت کمتر، تعداد ساعات آفتابی بیشتر و سهم بالاتر تابش مستقیم، امکان جذب انرژی خورشیدی بیشتری را نسبت به تهران فراهم می‌کند. در مقابل، وجود ابر بیشتر، رطوبت نسبی بالاتر و آلودگی هوا در تهران سبب افزایش سهم تابش پخشی و کاهش انرژی قابل جذب توسط کلکتور می‌شود.

از منظر انتقال حرارت، افزایش تابش دریافتی موجب افزایش دمای صفحه جاذب و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت به سیال عامل می‌شود. هرچند افزایش دمای صفحه سبب افزایش تلفات حرارتی جابجایی و تابشی نیز می‌شود، اما در شرایطی که شدت تابش خورشیدی بالا باشد، نرخ افزایش انرژی جذب‌شده از نرخ افزایش تلفات بیشتر بوده و در نتیجه انرژی مفید تولیدی کلکتور افزایش می‌یابد؛ بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده در تابش دریافتی روی سطح کلکتور، یکی از مهم‌ترین دلایل اختلاف عملکرد سامانه در دو شهر محسوب می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های پژوهش‌های پیشین همخوانی مناسبی دارد. این نتایج با نتایج کالوگرو [۴] درباره تأثیر زاویه نصب کلکتور و همچنین نتایج المنیا و همکاران [۱۳] که مدل ترنسیس کلکتور صفحه تخت را توسعه داده‌اند، همخوانی دارد. علاوه بر این، صدیق و مایاس [۱۱] نیز گزارش کردند که انتخاب صحیح زاویه نصب کلکتور موجب افزایش سهم خورشیدی و کاهش نیاز به انرژی کمکی می‌شود.

بر این اساس، شکل ۸ نشان می‌دهد که علاوه بر شدت تابش، نحوه استقرار کلکتور نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سامانه دارد و انتخاب صحیح زاویه نصب می‌تواند بدون افزایش سطح

آفتابی طولانی تر و شرایط جوی پایدارتر در کاشان است. از سوی دیگر، افزایش سهم تابش پخششی و کاهش شدت تابش مؤثر در تهران باعث شده است که نرخ جذب انرژی در کلکتور نسبت به کاشان کاهش یابد. این نتیجه با نتایج شکل های ۷ و ۸ نیز کاملاً سازگار است و نشان می دهد که اختلاف عملکرد سامانه در دو شهر عمدتاً ریشه در تفاوت شرایط اقلیمی دارد.

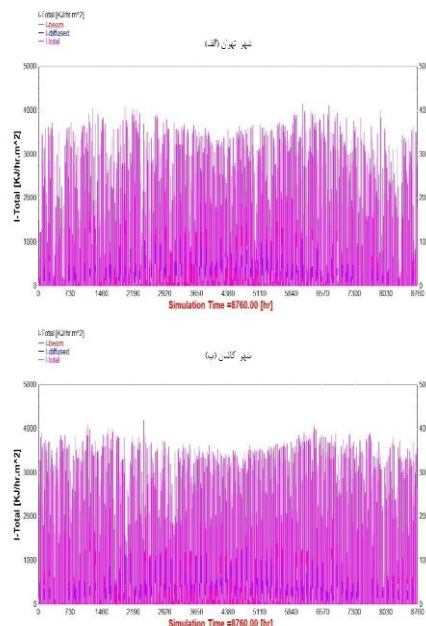
تحلیل تلفات حرارتی نیز نشان می دهد که با افزایش دمای کاری کلکتور، میزان تلفات حرارتی افزایش می یابد. این رفتار مطابق اصول انتقال حرارت است، زیرا با افزایش اختلاف دمای بین صفحه جاذب و هوای محیط، تلفات ناشی از جابجایی و تشعشع افزایش پیدا می کند. با وجود این، در تمام دوره های شبیه سازی مقدار انرژی مفید تولیدشده از تلفات حرارتی بیشتر بوده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب کلکتور و مناسب بودن ضرایب اپتیکی و عایق کاری آن است. در شهر کاشان به دلیل دمای بالاتر صفحه جاذب، مقدار تلفات حرارتی اندکی بیشتر از تهران مشاهده می شود؛ اما این افزایش در مقایسه با افزایش انرژی جذب شده ناچیز بوده و در نهایت راندمان کل سامانه همچنان بالاتر باقی می ماند.

بررسی انرژی کمکی نیز نشان می دهد که این پارامتر رابطه معکوسی با انرژی مفید کلکتور دارد. در فصل تابستان و دوره های با تابش زیاد، انرژی کمکی تقریباً به صفر می رسد که بیانگر توانایی سامانه در تأمین کامل نیاز آب گرم مصرفی است. در مقابل، در فصل زمستان به دلیل کاهش شدت تابش، کوتاه تر شدن طول روز و افزایش بار حرارتی ساختمان، وابستگی به سامانه کمکی افزایش می یابد. این روند در تهران شدیدتر از کاشان مشاهده می شود که ناشی از پتانسیل کمتر انرژی خورشیدی در این شهر است. کاهش نیاز به انرژی کمکی در کاشان نشان می دهد که سامانه خورشیدی قادر است سهم بیشتری از بار حرارتی سالانه را بدون مصرف سوخت های فسیلی تأمین کند.

این روند با نتایج بیگلریان و همکاران [۱۰]، ابوعایشه و الشریف [۱۶] و رملای و همکاران [۴۳] کاملاً مطابقت دارد؛ این مطالعات نیز نشان داده اند که افزایش تابش موجب افزایش انرژی مفید و کاهش سهم سامانه کمکی می شود.

در مجموع، تحلیل شکل ۹ نشان می دهد که عملکرد حرارتی سامانه نتیجه برهم کنش میان انرژی جذب شده، تلفات حرارتی و انرژی کمکی است و هرگونه افزایش در شدت تابش خورشیدی، در صورتی که با طراحی مناسب کلکتور همراه باشد، می تواند به

کلکتور، انرژی جذب شده و در نتیجه بازده سالانه سامانه را بهبود بخشد.



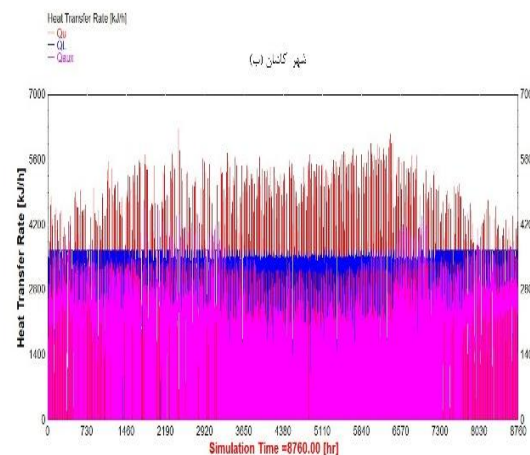
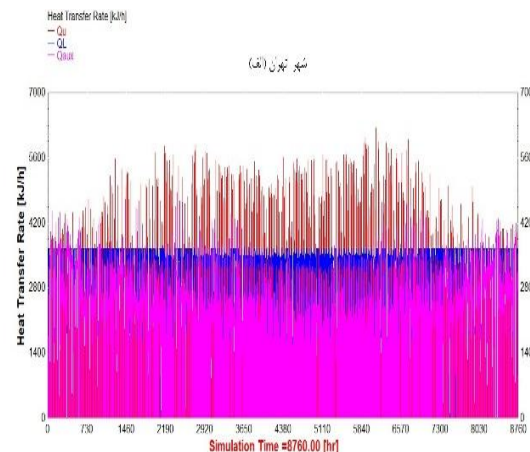
شکل (۸): تغییرات تابش کل I_{total} ، تابش مستقیم (I_{beam}) تابش پخششی $I_{diffused}$ بر روی سطح کلکتور برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۹ تغییرات انرژی مفید تولیدشده توسط کلکتور، تلفات حرارتی و انرژی کمکی مورد نیاز را در طول سال برای شهرهای تهران و کاشان نشان می دهد. بررسی هم زمان این سه پارامتر امکان ارزیابی عملکرد واقعی سامانه را فراهم می کند، زیرا راندمان حرارتی کلکتور تنها تابع انرژی جذب شده نیست، بلکه به تعادل بین انرژی جذب شده، تلفات حرارتی و میزان انرژی مورد نیاز از سامانه کمکی نیز وابسته است.

نتایج نشان می دهد که روند تغییرات انرژی مفید کلکتور در هر دو شهر همبستگی بسیار بالایی با شدت تابش خورشیدی دارد. در ماه های گرم سال و هم زمان با افزایش تابش مستقیم، نرخ انتقال حرارت به سیال عامل افزایش یافته و انرژی مفید تولیدشده در برخی ساعات از 5000 kJ/h نیز فراتر می رود. دلیل این رفتار آن است که افزایش شار تابشی جذب شده توسط صفحه جاذب موجب افزایش اختلاف دمای بین صفحه و سیال عامل شده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت جابجایی داخل لوله های کلکتور افزایش می یابد. این روند بیانگر عملکرد مناسب کلکتور در تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی حرارتی قابل استفاده است.

مقایسه نتایج دو شهر نشان می دهد که مقدار انرژی مفید تولیدشده در کاشان در اغلب ماه های سال بیشتر از تهران است. این اختلاف مستقیماً ناشی از شدت بیشتر تابش مستقیم، ساعات

افزایش انرژی مفید، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و بهبود بازده سالانه سامانه منجر شود.



شکل (۹): نرخ انرژی مفید تولیدی کلکتور (Q_u)، تلفات حرارتی سامانه (Q_l) و انرژی کمکی تأمین‌شده (Q_r) از منبع کمکی برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۱۰ تغییرات دمای مخزن ذخیره را در طول یک سال برای شهرهای تهران و کاشان نشان می‌دهد. بررسی این نتایج بیانگر آن است که رفتار حرارتی مخزن تابعی از برهم‌کنش میان انرژی جذب‌شده توسط کلکتور، نرخ برداشت آب گرم مصرفی، تلفات حرارتی مخزن و شرایط اقلیمی حاکم بر هر منطقه است. به همین دلیل، دمای مخزن تنها منعکس‌کننده عملکرد کلکتور نیست، بلکه شاخصی از عملکرد کل سامانه شامل کلکتور، مخزن ذخیره و الگوی مصرف نیز محسوب می‌شود.

مطابق شکل ۱۰، میانگین دمای مخزن در هر دو شهر دارای روند فصلی مشخصی است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش تابش خورشیدی از ابتدای فصل بهار، دمای مخزن نیز به‌تدریج افزایش یافته و در ماه‌های ژوئیه و اوت به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این رفتار ناشی از افزایش انرژی حرارتی منتقل‌شده از کلکتور به

مخزن و کاهش سهم سامانه گرمایش کمکی در این دوره است. در مقابل، در فصل زمستان به دلیل کاهش شدت تابش خورشیدی، کوتاه‌تر شدن ساعات روز و افزایش بار حرارتی ساختمان، انرژی دریافتی مخزن کاهش یافته و میانگین دمای آن نیز افت می‌کند. با وجود این، دمای مخزن در تمام ماه‌های سال در محدوده مناسب برای تأمین آب گرم مصرفی باقی مانده است که بیانگر عملکرد مناسب سامانه کنترل و ظرفیت مناسب مخزن ذخیره است.

مقایسه نتایج دو شهر نشان می‌دهد که میانگین دمای مخزن در کاشان در تمامی ماه‌های سال اندکی بیشتر از تهران است و این اختلاف در فصل تابستان محسوس‌تر می‌شود. علت این موضوع را می‌توان به شدت تابش بیشتر، تعداد ساعات آفتابی بالاتر و انرژی مفید بیشتر تولیدشده توسط کلکتور در اقلیم گرم و خشک کاشان نسبت داد. در چنین شرایطی، انرژی بیشتری در مخزن ذخیره شده و نوسانات دمایی نیز کاهش می‌یابد. در مقابل، در تهران به دلیل کاهش نسبی انرژی دریافتی از خورشید و وابستگی بیشتر به منبع گرمایش کمکی، دمای مخزن در برخی ماه‌ها اندکی کمتر از کاشان است.

از دیدگاه ترمودینامیکی، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی موجب کاهش نوسانات دمای آب خروجی و افزایش قابلیت اطمینان سامانه در ساعات بدون تابش می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مخزن ۴۰۰ لیتری انتخاب‌شده توانسته است نقش مؤثری در متعادل‌سازی نوسانات تولید انرژی کلکتور ایفا کند؛ به‌گونه‌ای که حتی در ساعات کاهش تابش نیز دمای آب در محدوده قابل قبول باقی مانده است. این موضوع بیانگر آن است که حجم مخزن با ظرفیت کلکتور و بار مصرفی ساختمان تناسب مناسبی داشته است.

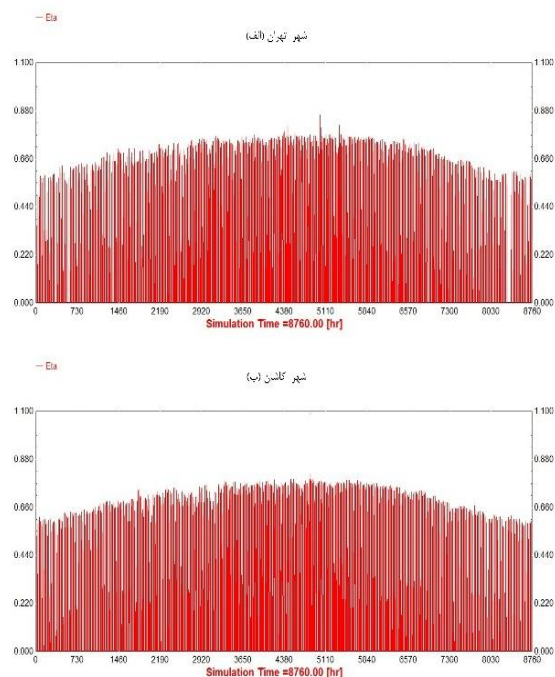
این نتایج با مطالعات بوهال و همکاران [۲۷]، کرول و کوپیک [۲۸]، کرفکلپک پراکاو [۲۹] و مایستر موریسون [۳۴] همخوانی دارد که نشان دادند حفظ لایه‌بندی حرارتی موجب افزایش کیفیت ذخیره انرژی و کاهش نیاز به سامانه کمکی می‌شود.

در مجموع، تحلیل شکل ۱۰ نشان می‌دهد که عملکرد مناسب مخزن ذخیره نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش پایداری عملکرد سامانه داشته و اختلاف دمای مشاهده‌شده میان تهران و کاشان عمدتاً ناشی از تفاوت پتانسیل انرژی خورشیدی دو اقلیم است، نه تفاوت در طراحی سامانه.

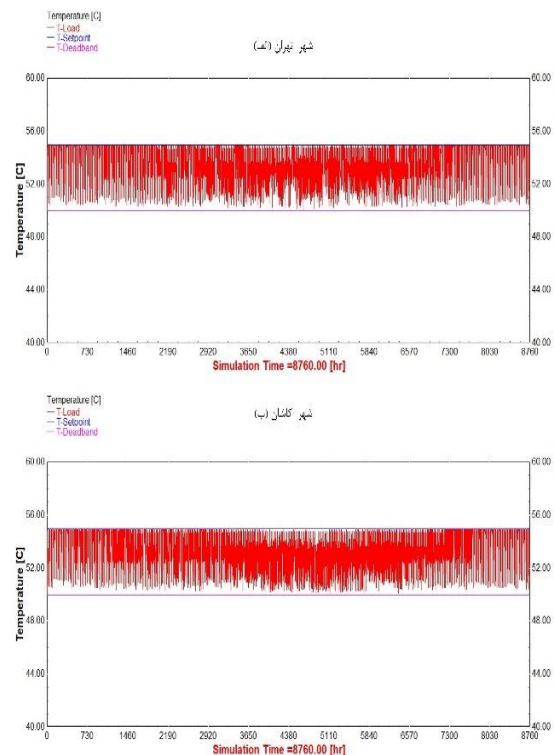
اگرچه در فصل تابستان دمای صفحه جاذب افزایش یافته و در نتیجه تلفات حرارتی نیز بیشتر می شود، اما افزایش هم زمان شدت تابش خورشیدی موجب می شود سهم انرژی مفید از تلفات بیشتر باقی بماند؛ بنابراین راندمان کلکتور در این دوره در بیشترین مقدار خود قرار می گیرد. نوسانات مشاهده شده در بازه لحظه ای نیز ناشی از تغییرات شدت تابش، تغییر شرایط جوی و الگوی برداشت آب گرم مصرفی است و رفتار غیرعادی یا افت ناگهانی در عملکرد سامانه مشاهده نمی شود که این موضوع بیانگر پایداری عملکرد مدل شبیه سازی است.

مقایسه دو شهر نشان می دهد که بازه لحظه ای کلکتور در کاشان در بخش عمده ای از سال اندکی بیشتر از تهران است. علت این اختلاف را می توان به سهم بیشتر تابش مستقیم، ساعات آفتابی بیشتر و شرایط جوی پایدارتر نسبت داد. هرچند افزایش دمای محیط در کاشان موجب افزایش دمای کاری کلکتور و در نتیجه افزایش نسبی تلفات حرارتی می شود، اما تأثیر مثبت افزایش انرژی خورشیدی دریافتی بر این تلفات غلبه کرده و در نهایت راندمان بالاتری حاصل می شود.

این نتایج با مطالعات سخایی و ولیپور [۱۴]، فن و همکاران [۲۳] و شارما و همکاران [۲۴] همخوانی دارد که افزایش شدت تابش را عامل اصلی افزایش راندمان کلکتورهای صفحه تخت معرفی کرده اند.



شکل (۱۱): تغییرات بازه کلکتور خورشیدی را در طول یک سال برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)



شکل (۱۰): نمودار تغییرات دمای تانک (T_{Load}) در طول یک سال برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۱۱ تغییرات بازه لحظه ای کلکتور خورشیدی را در طول یک سال برای دو شهر تهران و کاشان نشان می دهد. بازه کلکتور یکی از مهم ترین شاخص های ارزیابی عملکرد سامانه های خورشیدی است و بیانگر نسبت انرژی حرارتی مفید منتقل شده به سیال عامل به انرژی خورشیدی تابیده شده بر سطح کلکتور است؛ بنابراین، تغییرات این پارامتر علاوه بر شدت تابش خورشیدی، تحت تأثیر دمای محیط، دمای سیال ورودی، اختلاف دمای صفحه جاذب و شرایط انتقال حرارت نیز قرار دارد.

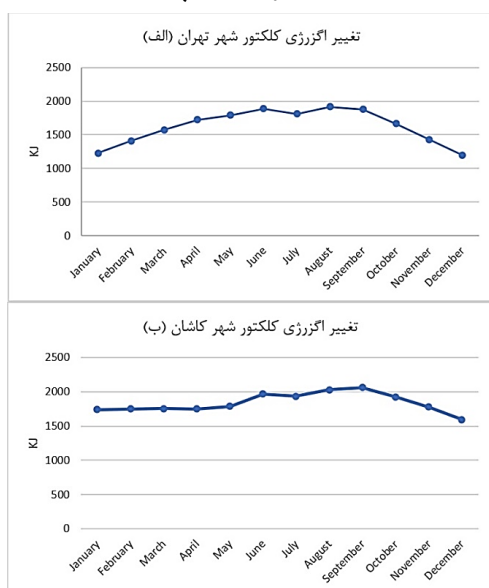
نتایج نشان می دهد که بازه کلکتور در هر دو شهر دارای روندی فصلی بوده و با افزایش شدت تابش خورشیدی از زمستان به تابستان افزایش می یابد. در ماه های سرد سال، کاهش شدت تابش و افزایش اختلاف دمای صفحه جاذب و محیط موجب افزایش تلفات حرارتی شده و در نتیجه بازه کلکتور در محدوده پایین تری قرار می گیرد. با افزایش شدت تابش در فصل بهار و تابستان، انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب با نرخ بیشتری نسبت به تلفات حرارتی افزایش یافته و در نتیجه بازه کلکتور نیز به مقادیر بالاتر می رسد. این رفتار با معادله کلاسیک بازه کلکتورهای صفحه تخت که تابعی از نسبت اختلاف دمای سیال و محیط به شدت تابش خورشیدی است، کاملاً همخوانی دارد.

گزارش کرده‌اند در اقلیم‌های با تابش بیشتر، بازده سالانه کلکتور و سهم خورشیدی افزایش یافته و وابستگی به سامانه کمکی کاهش پیدا می‌کند.

در مجموع، تحلیل شکل ۱۲ نشان می‌دهد که هرچند سامانه در هر دو اقلیم عملکرد مطلوبی دارد، اما بهره‌برداری از سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی در مناطق با تابش مستقیم بیشتر و اقلیم گرم و خشک، نظیر کاشان، از نظر انرژی تولیدی و بازده سالانه مزیت بیشتری خواهد داشت. این یافته می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای انتخاب محل نصب سامانه‌های خورشیدی، طراحی ظرفیت کلکتور و برنامه‌ریزی توسعه فناوری‌های خورشیدی در مناطق مختلف کشور مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۱۲): بازده ماهانه کلکتور در طول سال برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)



شکل (۱۳): تغییرات انرژی کلکتور در طول سال برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۱۲ میانگین بازده ماهانه کلکتور را برای شهرهای تهران و کاشان نشان می‌دهد. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که تغییرات بازده ماهانه کاملاً از الگوی تغییرات تابش خورشیدی تبعیت می‌کند؛ به‌گونه‌ای که کمترین مقدار بازده در ماه‌های زمستان و بیشترین مقدار آن در ماه‌های تابستان مشاهده می‌شود. این روند بیانگر آن است که عملکرد سامانه بیش از هر عامل دیگری تحت تأثیر انرژی خورشیدی قابل دریافت قرار دارد.

مطابق نتایج، بازده کلکتور در ماه دسامبر به حدود ۳۶ درصد در تهران و ۴۱ درصد در کاشان می‌رسد. در این دوره، کاهش زاویه تابش خورشید، کوتاه بودن طول روز و افزایش اختلاف دمای بین صفحه جاذب و محیط، موجب افزایش تلفات حرارتی و کاهش بازده می‌شود. با آغاز فصل بهار و افزایش ارتفاع خورشید، شدت تابش و مدت‌زمان تابش مؤثر افزایش یافته و در نتیجه بازده کلکتور نیز روندی صعودی پیدا می‌کند. این روند تا ماه ژوئیه ادامه یافته و بازده به حدود ۶۶ درصد در تهران و ۷۰ درصد در کاشان می‌رسد. پس از پایان تابستان و کاهش تدریجی انرژی خورشیدی دریافتی، بازده نیز به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد.

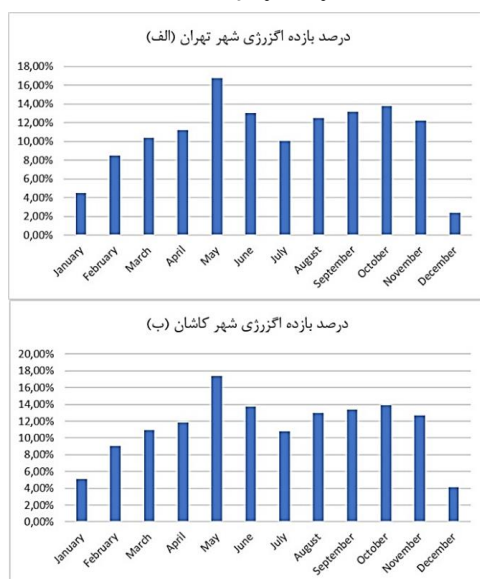
از منظر مهندسی، اختلاف حدود ۴ درصدی بازده ماهانه در فصل تابستان و اختلاف ۲/۲۹ درصدی بازده سالانه میان دو شهر، اگرچه از نظر عددی نسبتاً محدود است، اما در مقیاس بهره‌برداری سالانه می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه انرژی تولیدی و کاهش مصرف سوخت کمکی شود؛ بنابراین، همین اختلاف کوچک در راندمان می‌تواند در سامانه‌های بزرگ یا پروژه‌های انبوه‌سازی به صرفه‌جویی انرژی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری منجر شود.

بازده سالانه سامانه در شهر تهران برابر ۵۵/۰۸ درصد و در شهر کاشان ۵۷/۳۷ درصد به دست آمد. این مقادیر در محدوده راندمان گزارش‌شده برای کلکتورهای صفحه تخت در مطالعات تجربی و عددی قرار دارند و نشان می‌دهند که مدل توسعه‌یافته از دقت و قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است. همچنین این نتایج با پژوهش‌های انجام‌شده بر روی سامانه‌های مشابه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد که در آن‌ها راندمان سالانه کلکتورهای صفحه تخت معمولاً در بازه ۵۰ تا ۶۵ درصد گزارش شده است.

این نتیجه با یافته‌های محمد [۹]، صدیق و مایاس [۱۱]، ابو عایشه و الشریف [۱۶] و زاهدی و گیتی‌فر [۴۲] سازگار است که

حرارتی، موجب افزایش کیفیت ترمودینامیکی انرژی تولیدی می شود که این موضوع با روند مشاهده شده در شکل ۱۳ مطابقت دارد.

در مجموع، نتایج شکل ۱۳ نشان می دهد که ارزیابی عملکرد سامانه صرفاً بر اساس انرژی تولیدی کافی نیست و تحلیل انرژی اطلاعات دقیق تری درباره کیفیت انرژی و میزان کار مفید قابل استحصال ارائه می دهد. بر این اساس، بهره برداری از سامانه در اقلیم هایی با تابش بیشتر مانند کاشان، علاوه بر افزایش انرژی دریافتی، موجب بهبود عملکرد ترمودینامیکی کل سامانه نیز می شود که این موضوع در طراحی و بهینه سازی سامانه های خورشیدی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



شکل (۱۴): بازده ماهانه انرژی در طول سال برای دو شهر تهران (الف) و کاشان (ب)

شکل ۱۴ تغییرات ماهانه بازده انرژی کلکتور خورشیدی را برای دو شهر تهران و کاشان نشان می دهد. برخلاف انرژی کلکتور که روندی نسبتاً یکنواخت در طول سال دارد، بازده انرژی دارای تغییرات بیشتری بوده و بیشترین مقدار آن در ماه های میانی سال مشاهده می شود. همچنین بازده انرژی در شهر کاشان تقریباً در تمامی ماه ها اندکی بیشتر از تهران است که نشان دهنده کیفیت بالاتر انرژی حرارتی تولید شده در این اقلیم است.

از دیدگاه ترمودینامیکی، بازده انرژی تنها به مقدار انرژی تولیدی وابسته نیست، بلکه کیفیت انرژی و میزان قابلیت تبدیل آن به کار مفید را نیز در نظر می گیرد. در شرایطی که تابش خورشیدی بیشتر بوده و اختلاف دمای سیال خروجی با دمای محیط افزایش می یابد، سهم انرژی قابل تبدیل به کار مفید افزایش

همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، انرژی کلکتور در هر دو شهر روندی فصلی مشابه با تغییرات تابش خورشیدی دارد، اما مقدار آن در تمامی ماه های سال در شهر کاشان بیشتر از تهران است. بیشترین مقدار انرژی در ماه های تابستان، به ویژه آگوست و سپتامبر، مشاهده می شود، در حالی که کمترین مقدار آن مربوط به ماه های زمستان است. این رفتار نشان می دهد که افزایش شدت تابش خورشیدی علاوه بر افزایش انرژی جذب شده، موجب افزایش کیفیت ترمودینامیکی انرژی قابل استحصال نیز می شود.

از دیدگاه ترمودینامیکی، برخلاف انرژی که تنها مقدار گرمای منتقل شده را بیان می کند، انرژی بیانگر بیشترین کار مفید قابل استخراج از انرژی حرارتی است؛ بنابراین مقدار انرژی علاوه بر شدت تابش، به اختلاف دمای سیال و محیط نیز وابسته است. در ماه های گرم سال، افزایش تابش خورشیدی سبب افزایش دمای صفحه جاذب و سیال خروجی شده و در نتیجه اختلاف دمای بین سیال و محیط افزایش می یابد؛ این موضوع موجب افزایش سهم انرژی قابل تبدیل به کار مفید و در نتیجه افزایش انرژی کلکتور می شود. در مقابل، در ماه های زمستان کاهش شدت تابش و کاهش دمای سیال خروجی باعث افت کیفیت انرژی حرارتی و کاهش انرژی تولیدی می شود.

همچنین مشاهده می شود که مقادیر انرژی در کاشان در تمام طول سال از تهران بیشتر است. این اختلاف را می توان به شرایط اقلیمی خشک تر، تعداد ساعات آفتابی بیشتر و شدت تابش بالاتر در کاشان نسبت داد که موجب افزایش دمای عملکرد کلکتور و کاهش سهم اتلاف های نسبی می شود. در نتیجه، علاوه بر افزایش انرژی جذب شده، کیفیت انرژی حرارتی تولید شده نیز در این شهر بالاتر است.

این نتایج با مطالعات انجام شده در زمینه سامانه های آب گرم کن خورشیدی همخوانی دارد. اعلائی و همکاران [۸] نشان دادند که عملکرد حرارتی و کیفیت انرژی خروجی سامانه به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و میزان تابش خورشیدی قرار دارد. همچنین صدیق و مایاس [۱۱] گزارش کردند که افزایش تابش خورشیدی و انتخاب مناسب مشخصات سامانه موجب افزایش سهم انرژی مفید و کاهش وابستگی به سامانه کمکی می شود. از سوی دیگر، مطالعات بیگلریان و همکاران [۱۰] و المانیا و همکاران [۱۳] نیز نشان داده اند که بهبود شرایط عملکرد کلکتور و افزایش دمای سیال خروجی، علاوه بر افزایش بازده

یافته و در نتیجه بازده انرژی نیز بیشتر می‌شود. در شهر کاشان، به دلیل شدت تابش بالاتر و شرایط جوی پایدارتر، دمای خروجی کلکتور در بسیاری از ماه‌های سال بیشتر از تهران بوده و این موضوع موجب کاهش اتلافات نسبی و افزایش بازده انرژی شده است. در مقابل، در ماه‌های سرد سال، کاهش شدت تابش و افزایش اختلاف دمای کلکتور با محیط، نرخ اتلاف حرارتی را افزایش داده و موجب افت بازده انرژی در هر دو شهر می‌شود. این نتایج با مبانی نظری ارائه‌شده در پیشینه تحقیق نیز سازگار است. کالوگرو [۷] بیان می‌کند که تحلیل انرژی شاخص مناسب‌تری نسبت به تحلیل انرژی برای ارزیابی عملکرد واقعی سامانه‌های خورشیدی است، زیرا علاوه بر مقدار انرژی، کیفیت آن را نیز ارزیابی می‌کند. همچنین مرور جامع پاتک و همکاران [۲] نشان می‌دهد که افزایش دمای مفید سیال و کاهش اتلافات برگشت‌ناپذیر، مهم‌ترین عوامل افزایش بازده انرژی در سامانه‌های خورشیدی هستند. از سوی دیگر، مطالعات المانیا و همکاران [۱۳] و سخایی و ولیپور [۱۴] نیز نشان داده‌اند که هر عاملی که موجب بهبود انتقال حرارت در کلکتور و افزایش دمای خروجی سیال شود، علاوه بر افزایش بازده حرارتی، موجب بهبود بازده انرژی نیز خواهد شد؛ بنابراین، اختلاف مشاهده‌شده میان تهران و کاشان را می‌توان نتیجه مستقیم کیفیت بهتر انرژی خورشیدی قابل بهره‌برداری در اقلیم گرم و خشک کاشان دانست. از دیدگاه مهندسی، نتایج این شکل نشان می‌دهد که انتخاب محل نصب سامانه تنها بر اساس میزان انرژی تولیدی کافی نیست، بلکه کیفیت انرژی تولیدشده نیز باید در فرایند طراحی مورد توجه قرار گیرد. در کاربردهایی که نیازمند دماهای بالاتر یا کیفیت انرژی بیشتری هستند، مانند سامانه‌های گرمایش فضا یا سامانه ترکیبی خورشیدی، استفاده از مناطقی با بازده انرژی بالاتر می‌تواند عملکرد کلی سامانه را بهبود داده و اتلافات ترمودینامیکی را کاهش دهد؛ بنابراین، تحلیل هم‌زمان انرژی و انرژی، دید جامع‌تری از عملکرد سامانه ارائه کرده و امکان طراحی بهینه سامانه‌های خورشیدی متناسب با شرایط اقلیمی مختلف را فراهم می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی دینامیکی نشان داد که عملکرد سامانه آب‌گرم‌کن خورشیدی تنها تابع میزان انرژی خورشیدی دریافتی نیست، بلکه به برهم‌کنش میان شرایط اقلیمی، عملکرد حرارتی کلکتور، رفتار مخزن ذخیره و کیفیت ترمودینامیکی انرژی نیز

وابسته است. مقایسه عملکرد سامانه در شهرهای تهران و کاشان نشان داد که با وجود یکسان بودن مشخصات کلکتور، حجم مخزن ذخیره، راهبرد کنترلی و شرایط بهره‌برداری، تفاوت در ویژگی‌های اقلیمی دو شهر موجب اختلاف محسوس در انرژی مفید تولیدی، انرژی کمکی، انرژی و بازده سامانه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که ارزیابی عملکرد سامانه‌های خورشیدی باید علاوه بر تحلیل انرژی، بر مبنای کیفیت انرژی نیز انجام شود. نتایج مربوط به تابش خورشیدی نشان داد که شهر کاشان به دلیل برخورداری از اقلیم گرم و خشک، تعداد ساعات آفتابی بیشتر و سهم بالاتر تابش مستقیم، انرژی خورشیدی بیشتری نسبت به تهران دریافت می‌کند. افزایش شدت تابش موجب افزایش شار حرارتی جذب‌شده توسط صفحه جذب و افزایش اختلاف دمای مؤثر میان صفحه جذب و سیال عامل شده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این رفتار سبب افزایش انرژی مفید کلکتور و کاهش وابستگی سامانه به انرژی کمکی می‌شود. این روند با نتایج مطالعات اعلائی و همکاران [۸]، تیواری و همکاران [۱۷] و همچنین زاهدی و گیتی‌فر [۴۲] همخوانی دارد که شرایط اقلیمی را یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد سامانه‌های آب‌گرم‌کن خورشیدی معرفی کرده‌اند.

تحلیل انرژی سامانه نشان داد که افزایش تابش خورشیدی مستقیماً موجب افزایش انرژی مفید کلکتور و کاهش نیاز به سامانه کمکی می‌شود. در ماه‌های تابستان تقریباً تمام انرژی موردنیاز آب گرم مصرفی توسط کلکتور تأمین شده و مصرف انرژی کمکی به حداقل رسیده است، در حالی که در فصل زمستان کاهش تابش موجب افزایش سهم سامانه کمکی شده است. این رفتار با نتایج بیگلریان و همکاران [۱۰] و ابو عایشه و الشریف [۱۶] مطابقت دارد که نشان دادند افزایش سهم خورشیدی مستقیماً موجب کاهش مصرف انرژی کمکی ساختمان می‌شود.

در کنار افزایش انرژی مفید، نتایج نشان داد که افزایش دمای صفحه جذب موجب افزایش تلفات حرارتی کلکتور نیز می‌شود. این موضوع از دیدگاه انتقال حرارت کاملاً منطقی است، زیرا با افزایش اختلاف دمای کلکتور و محیط، نرخ اتلاف حرارت از طریق همرفت و تشعشع افزایش می‌یابد. با وجود این، در هر دو شهر مقدار انرژی مفید همواره بیشتر از تلفات حرارتی بوده است که بیانگر طراحی مناسب کلکتور صفحه تخت و عملکرد مطلوب

سامانه‌های خورشیدی تنها با تحلیل انرژی قابل ارزیابی نیست و بررسی کیفیت انرژی نیز ضروری است.

بررسی بازده انرژی نیز نشان داد که اگرچه روند تغییرات آن مشابه بازده حرارتی کلکتور است، اما حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات شرایط محیطی و اختلاف دمای عملکرد دارد. بیشترین بازده انرژی در ماه‌هایی مشاهده شد که علاوه بر شدت تابش مناسب، شرایط دمایی نیز امکان استفاده مؤثرتر از انرژی حرارتی را فراهم کرده است. همچنین بازده انرژی در شهر کاشان در اکثر ماه‌های سال اندکی بیشتر از تهران بود که نشان می‌دهد این اقلیم علاوه بر افزایش انرژی دریافتی، بهره‌برداری مؤثرتری از کیفیت انرژی خورشیدی نیز فراهم می‌کند؛ بنابراین تحلیل انرژی اطلاعاتی را ارائه می‌دهد که تنها از طریق تحلیل انرژی قابل دستیابی نیست و می‌تواند معیار مناسب‌تری برای مقایسه عملکرد سامانه در اقلیم‌های مختلف باشد.

از دیدگاه مهندسی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب محل نصب سامانه خورشیدی تأثیر مستقیمی بر عملکرد حرارتی و ترمودینامیکی آن دارد. در مناطقی با تابش مستقیم بیشتر مانند کاشان، بدون تغییر در سطح کلکتور یا ظرفیت مخزن، می‌توان انرژی مفید و انرژی بیشتری تولید کرد و همزمان وابستگی سامانه به تجهیزات گرمایشی کمکی را کاهش داد. در مقابل، در اقلیم‌هایی مانند تهران که تغییرات شرایط جوی بیشتر است، بهینه‌سازی ظرفیت مخزن ذخیره، راهبرد کنترلی و طراحی سامانه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند تا کاهش تابش در دوره‌های سرد سال جبران شود.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کلکتور صفحه تخت همراه با مخزن ذخیره حرارتی، گزینه‌ای مناسب برای تأمین آب گرم مصرفی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم‌های مختلف ایران است.

مراجع

- [1] Rashad, M., Żabnieńska-Góra, A., Norman, L., Jouhara, H., "Analysis of energy demand in a residential building using TRNSYS," Energy, Vol. 254, p. 124357, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124357>.
- [2] Pathak, S. K., Tyagi, V. V., Chopra, K., Kalidasan, B., Pandey, A. K., Goel, V., Saxena, A., Ma, Z., "Energy, exergy, economic and environmental analyses of solar air heating systems with and without thermal energy storage

آن در شرایط اقلیمی مورد مطالعه است. این نتیجه با مطالعات سخایی و ولپور [۱۴] و فن و همکاران [۲۳] همخوانی دارد که نشان دادند طراحی مناسب صفحه جاذب می‌تواند ضمن افزایش انتقال حرارت، اثر افزایش تلفات را کنترل کرده و بازده حرارتی مطلوبی ایجاد کند.

رفتار مخزن ذخیره نیز بیانگر نقش مؤثر ذخیره‌سازی حرارتی در پایداری عملکرد سامانه بود. ذخیره انرژی در ساعات اوج تابش و آزادسازی تدریجی آن در ساعات بدون تابش باعث کاهش نوسانات دمای آب خروجی و کاهش وابستگی لحظه‌ای سامانه به منبع کمکی شد. این رفتار با نتایج بوها و همکاران [۲۷]، کرول و کوپیک [۲۸] و مایستر موریسون [۳۴] مطابقت دارد که اهمیت لایه‌بندی حرارتی و ذخیره‌سازی مناسب را در افزایش سهم خورشیدی و پایداری عملکرد سامانه گزارش کرده‌اند.

نتایج تحلیل انرژی که در این پژوهش به‌عنوان مکمل تحلیل انرژی انجام شد، نشان داد که کیفیت انرژی تولیدشده نیز همانند انرژی مفید تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد. مقدار انرژی کلکتور در هر دو شهر از روندی فصلی تبعیت می‌کند و در ماه‌های با تابش بیشتر افزایش می‌یابد، اما مقادیر آن در تمامی ماه‌های سال در شهر کاشان بیشتر از تهران است. این موضوع بیانگر آن است که شرایط اقلیمی مناسب‌تر نه تنها انرژی بیشتری در اختیار سامانه قرار می‌دهد، بلکه قابلیت تبدیل این انرژی به کار مفید را نیز افزایش می‌دهد. از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک، افزایش دمای سیال خروجی و افزایش اختلاف دمای آن با محیط موجب افزایش کیفیت انرژی و کاهش اتلاف‌های نسبی ناشی از برگشت‌ناپذیری فرایند انتقال حرارت می‌شود. این یافته با نتایج مطالعات اعلایی و همکاران [۸]، صدیق و مایاس [۱۱] و المانیا و همکاران [۱۳] همخوانی دارد که تأکید کرده‌اند عملکرد واقعی

for sustainable development: A systematic review," Journal of Energy Storage, Vol. 59, p. 106521, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.est.2022.106521>.

[3] IRENA, "Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050," International Renewable Energy Agency, 2020. Available: <http://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.

[4] Kalogirou, S. A., Agathokleous, R., Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Palombo, A.,

- "Development and validation of a new TRNSYS Type for thermosiphon flat-plate solar thermal collectors: Energy and economic optimization for hot water production in different climates," *Renewable Energy*, Vol. 136, pp. 632–644, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.086>.
- [5] IEA, "Iran – Share of electricity in final consumption," International Energy Agency, 2024. Available: <http://www.iea.org/countries/iran/electricity>.
- [6] Ismaeel, H. H., Yumrutaş, R., "Thermal performance of a solar-assisted heat pump drying system with thermal energy storage tank and heat recovery unit," *International Journal of Energy Research*, Vol. 44, No. 5, pp. 3426–3445, 2020. <http://doi.org/10.1002/er.4966>.
- [7] Kalogirou, S. A., "Solar Energy Engineering: Processes and Systems," 3rd ed. Academic Press, Elsevier, 2024. <http://doi.org/10.1016/C2021-0-02041-1>.
- [8] Alayi, R., Khalilpoor, N., Heshmati, S., Najafi, A., Issakhov, A., "Thermal and environmental analysis solar water heater system for residential buildings," *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2021, pp. 1–9, 2021. <http://doi.org/10.1155/2021/6838138>.
- [9] Mohammed, F. H., "Field measurement and analysis of small-scale solar water heating systems in urban residential areas," *International Journal of Engineering and Computer Science*, Vol. 14, No. 08, pp. 27649–27654, 2025. <http://doi.org/10.18535/ijecs.v14i08.5219>.
- [10] Biglarian, H., Sharfabadi, M. M., Alizadeh, M., Gharraei, H., "Performance investigation of solar thermal collector with auxiliary heater for space heating," *Journal of Central South University*, Vol. 28, No. 11, pp. 3466–3476, 2021. <http://doi.org/10.1007/s11771-021-4868-6>.
- [11] Sadiq, M., Mayyas, A. T., "Design of the solar water heating system for local communities in Pakistan," *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 8, p. 100496, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100496>.
- [12] Abdelmaksoud, W. A., "Solar energy utilization for underfloor heating system in residential buildings," *Energy Reports*, Vol. 12, pp. 979–987, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.006>.
- [13] Al-Manea, A., Al-Rbaihat, R., Kadhim, H. T., Alahmer, A., Yusaf, T., Egab, K., "Experimental and numerical study to develop TRNSYS model for an active flat plate solar collector with an internally serpentine tube receiver," *International Journal of Thermofluids*, Vol. 15, p. 100189, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100189>.
- [14] Sakhaei, S. A., Valipour, M. S., "Thermal performance analysis of a flat plate solar collector by utilizing helically corrugated risers: An experimental study," *Solar Energy*, Vol. 207, pp. 235–246, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.023>.
- [15] Alayi, R., Ahmadi, M. H., Visei, A. R., Sharma, S., Najafi, A., "Technical and environmental analysis of photovoltaic and solar water heater cogeneration system: A case study of Saveh City," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 16, No. 2, pp. 447–453, 2020. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa077>.
- [16] Abu-Aeshah, A. Y., Elsherif, M. M., "Performance analyses of solar water heating system with thermal storage using SAM simulation," *IJEES*, Vol. 3, No. 1, pp. 01–09, 2025. <http://doi.org/10.65998/ijeess.v3i1.104>.
- [17] Tiwari, A. K., Gupta, S., Joshi, A. K., Raval, F., Sojitra, M., "TRNSYS simulation of flat plate solar collector based water heating system in Indian climatic condition," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 5360–5365, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.794>.
- [18] Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Al Busaidi, A. S., Gholami, A., "Photovoltaic-thermal systems applications as dryer for agriculture sector: A review," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 47, p. 103047, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103047>.
- [19] Herrando, M., Wang, K., Huang, G., Otanicar, T., Bany Mousa, O., Agathokleous, R. A., Ding, Y., Kalogirou, S., Ekins-Daukes, N., Taylor, R. A., Markides, C. N., "A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 97, p. 101072, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101072>.
- [20] Belmonte, J. F., Ramírez, F. J., Almendros-Ibáñez, J. A., "A stochastic thermo-economic analysis of solar domestic hot-water systems in compliance with building energy code requirements: The case of Spain," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 52,

- p. 102007, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102007>.
- [21] Hamed Banirazi Motlagh, S., Hosseini, S. M. A., Pons-Valladares, O., "Integrated value model for sustainability assessment of residential solar energy systems towards minimizing urban air pollution in Tehran," *Solar Energy*, Vol. 249, pp. 40–66, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.047>.
- [22] Yuan, X., Heikari, L., Hirvonen, J., Liang, Y., Virtanen, M., Kosonen, R., Pan, Y., "System modelling and optimization of a low temperature local hybrid energy system based on solar energy for a residential district," *Energy Conversion and Management*, Vol. 267, p. 115918, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115918>.
- [23] Fan, M., You, S., Gao, X., Zhang, H., Li, B., Zheng, W., Sun, L., Zhou, T., "A comparative study on the performance of liquid flat-plate solar collector with a new V-corrugated absorber," *Energy Conversion and Management*, Vol. 184, pp. 235–248, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.044>.
- [24] Sharma, H. K., Kumar, S., Verma, S. K., "Comparative performance analysis of flat plate solar collector having circular & trapezoidal corrugated absorber plate designs," *SSRN Journal*, 2022. <http://doi.org/10.2139/ssrn.4007968>.
- [25] Manikandana, K., Santhappan, J. S., Al-Khaldi, S. N., Ahamed, N. M. B., "Implementation of thermal storage material to enhance the performance of domestic solar water heater," *BIOPOLYMER, SMART MATERIALS AND ENGINEERING MATERIALS*, p. 020014, 2024. <http://doi.org/10.1063/5.0194162>.
- [26] Saleh, H. F., Eleiwi, M. A., Mokhlif, N. D., "Improving the performance of a home solar water heater system using porous materials and reflectors," *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, Vol. 31, No. 2, pp. 244–254, 2024. <http://doi.org/10.25130/tjes.31.2.23>.
- [27] Bouhal, T., Fertahi, S., Agrouaz, Y., El Rhafiki, T., Kousksou, T., Jamil, A., "Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study," *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 441–455, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.061>.
- [28] Król, B., Kupiec, K., "Thermal stratification in solar storage tanks: Long-term modelling and efficiency analysis," *Energies*, Vol. 19, No. 3, p. 627, 2026. <http://doi.org/10.3390/en19030627>.
- [29] Krafcik, M., Perackova, J., "Experimental measurements of hot water stratification in a heat storage tank," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 471, p. 022014, 2019. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/471/2/022014>.
- [30] Sharp, M. K., Loehrke, R. I., "Stratified thermal storage in residential solar energy applications," *COO-4523-1*, 6070534, 1978. <http://doi.org/10.2514/3.62417>.
- [31] Li, Q., Huang, X., Tai, Y., Gao, W., Wenxian, L., Liu, W., "Thermal stratification in a solar hot water storage tank with mantle heat exchanger," *Renewable Energy*, Vol. 173, pp. 1–11, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.105>.
- [32] Abdelsalam, M. Y., Teamah, H. M., Lightstone, M. F., Cotton, J. S., "Hybrid thermal energy storage with phase change materials for solar domestic hot water applications: Direct versus indirect heat exchange systems," *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 77–88, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.121>.
- [33] Fertahi, S. ed-Dîn, Jamil, A., Benbassou, A., "Review on solar thermal stratified storage tanks (STSST): Insight on stratification studies and efficiency indicators," *Solar Energy*, Vol. 176, pp. 126–145, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.028>.
- [34] Meister, C., Beausoleil-Morrison, I., "Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank," *Solar Energy*, Vol. 222, pp. 145–159, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.025>.
- [35] Sohani, A., Cornaro, C., Shahverdian, M. H., Moser, D., Pierro, M., Olabi, A. G., Karimi, N., Nižetić, S., Li, L. K. B., Doranehgard, M. H., "Techno-economic evaluation of a hybrid photovoltaic system with hot/cold water storage for poly-generation in a residential building," *Applied Energy*, Vol. 331, p. 120391, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120391>.
- [36] Alidadi Shamsabadi, A., Jahangiri, M., Rezaei, T., Yadollahi Farsani, R., Seryani, A., Hakim, S., "The design of a seasonal heat

- storage system with a geothermal heat pump for a residential building in Tehran," *Journal of Energy Development and Technology*, Vol. 20, No. 6, pp. 1606–1626, 2022. <http://doi.org/10.1108/JEDT-01-2021-0016>.
- [37] Panahi, R., Khanjanpour, M. H., Javadi, A. A., Akrami, M., Rahnama, M., Ameri, M., "Analysis of the thermal efficiency of a compound parabolic integrated collector storage solar water heater in Kerman, Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 36, p. 100564, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100564>.
- [38] Klein, S. A., "TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program," Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison, Madison, Wisconsin, USA, 2017. Available: <http://trnsys.org/>.
- [39] Duffie, J. A., Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes," 1st ed. Wiley, 2013. <http://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- [40] Jafarkazemi, F., Ahmadifard, E., "Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors," *Renewable Energy*, Vol. 56, pp. 55–63, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.031>.
- [41] Petela, R., "Exergy of heat radiation," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 86, No. 2, pp. 187–192, 1964. <http://doi.org/10.1115/1.3687092>.
- [42] Remlaoui, A., Nehari, D., Kada, B., Nasir, N. A. A. M., Abd-Elmonem, A., Alhubieshi, N., ElSeabee, F. A. A., Hussain, S. M., "Numerical simulation of a forced circulation solar water heating system," *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, p. 28999, 2024. <http://doi.org/10.1038/s41598-024-80576-y>.
- [43] Zahedi, R., Gitifar, S., "TRNSYS simulation of water heating system based on flat plate solar collector in Iranian climate," *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 1–8, 2024. <http://doi.org/10.22034/jrenew.2024.190653>.