ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *;*(*):*-*

Modares Mechanical Engineering

DOI:
journal homepage: mme.modares.ac.ir

DESIGN AND ENERGY ANALYSIS OF THE SOLAR-ASSISTED UNDERFLOOR HEATING SYSTEM FOR A TEMPORARY PREFABRICATED HOUSE

Mohsen Falahi[1], Majid Siavashi[1*], Sepehr Mousavi[1]

[1] Applied Multi-Phase Fluid Dynamics Laboratory, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: **** **, *
Revised: **** **, *
Accepted: *** **, *
ePublished: **** **, *

ABSTRACT

Temporary prefabricated post-disaster shelters suffer from severe energy loss and poor indoor thermal stability during cold seasons due to low thermal mass and lightweight envelopes. In this study, an integrated low-temperature hydronic underfloor heating system coupled with flat-plate solar collectors and an auxiliary gas boiler is designed and evaluated to ensure thermal comfort and reduce fossil fuel reliance. The transient thermal behavior and energy balances were modeled through dynamic building energy simulation (using the EnergyPlus simulation engine) over a full annual cycle, validated against benchmark TRNSYS models. The proposed system was comparatively analyzed against a conventional boiler-radiator configuration across three distinct climate zones: cold (Tabriz), semi-arid moderate (Tehran), and hot-arid (Yazd). The results demonstrate that the solar-assisted radiant floor system successfully stabilizes indoor temperatures within the comfort range of 20–22 °C during extreme winter periods. Furthermore, compared to traditional radiator heating, the system achieves annual fuel savings of 32.3%, 29.5%, and 27.8%, while reducing annual CO_2 emissions by 20%, 14%, and 15% in Tabriz, Yazd, and Tehran, respectively, highlighting its superior performance in cold climates with intense heating loads.

Keywords: Air conditioning, Underfloor heating, Energy analysis, Solar energy

How to cite this article
Names, Title. Modares Mechanical Engineering; *(*): ****-****.

*Corresponding author's email: msiavashi@iust.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-7615-9689

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

Pre-Proof Version

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. *؛*(*):* _*
مهندسی مکانیک مدرس
DOI:
صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

طراحی و تحلیل انرژی سیستم گرمایش از کف برای یک نمونه خانه از پیش ساخته‌شده با تامین انرژی از پنل‌های خورشیدی

محسن فلاحی[۱]، مجید سیاوشی[۱*]، سپهر موسوی[۱]

[۱] آزمایشگاه دینامیک سیالات چندفازی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: **/**/****
بازنگری: **/**/****
پذیرش: **/**/****
ارائه آنلاین: **/**/****

چکیده

سازه‌های پیش‌ساخته اسکان موقت به دلیل جداره‌های سبک و ظرفیت حرارتی ناچیز، با اتلاف شدید انرژی و ناپایداری دمای داخلی در فصول سرد مواجه هستند. در این پژوهش، به‌منظور ارتقای آسایش حرارتی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در شرایط اضطراری، یک سیستم یکپارچه گرمایش از کف هیدرونیک جفت‌شده با کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت و بویلر کمکی گازسوز برای یک واحد اسکان موقت طراحی و ارزیابی شده است. رفتار حرارتی گذرا و موازنه انرژی سیستم با استفاده از روش شبیه‌سازی دینامیکی پیوسته (موتور عددی انرژی‌پلاس) در طول یک سال کامل مدل‌سازی شد و صحت مدل بر اساس تطابق با نتایج معتبر نرم‌افزار ترنسیس به اثبات رسید. عملکرد سیستم پیشنهادی به صورت تطبیقی در سه پهنه اقلیمی سرد (تبریز)، معتدل (تهران) و گرم‌وخشک (یزد) با سامانه متداول رادیاتوری مقایسه گردید. نتایج نشان داد که این سیستم ترکیبی دمای فضای داخلی را حتی در روزهای بحرانی زمستان در محدوده آسایش ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس تثبیت می‌کند. همچنین، پیاده‌سازی این پیکربندی در مقایسه با سیستم گرمایشی متداول، مصرف سوخت فسیلی سالانه را در اقلیم‌های تبریز، یزد و تهران به ترتیب ۳۲.۳٪، ۲۹.۵٪ و ۲۷.۸٪ و انتشار سالانه دی‌اکسید کربن را به ترتیب ۲۰٪، ۱۴٪ و ۱۵٪ کاهش می‌دهد که بیانگر کارایی برجسته این راهکار در مناطق سردسیر با بار حرارتی بالا است.

کلیدواژه‌ها: تهویه مطبوع، گرمایش از کف، تحلیل انرژی، انرژی خورشیدی

نحوه ارجاع به این مقاله
اسامی نویسندگان، عنوان مقاله، مهندسی مکانیک مدرس. * (*): ****-****.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: msiavashi@iust.ac.ir
*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۷۶۱۵-۹۶۸۹

Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

TMU Press, Pre-Proof Version

۱- مقدمه

وقوع بلایای طبیعی با ایجاد بحران‌های گسترده و آسیب به زیرساخت‌های زیستی، همواره جوامع انسانی را با چالش‌های پیچیده‌ای روبه‌رو می‌سازد. در چنین شرایط اضطراری، فراهم ساختن سریع سرپناه برای آسیب‌دیدگان نقشی حیاتی در مدیریت بحران دارد. خانه‌های پیش‌ساخته سبک (کانکس‌ها) متداول‌ترین و مؤثرترین گزینه برای اسکان اضطراری به شمار می‌روند؛ با این حال، فقدان سامانه‌های مناسب کنترل محیطی در کنار ساختار سبک جداره‌ها سبب می‌شود شرایط حرارت محیطی داخل این سازه‌ها نامساعد بوده و سلامت ساکنان را تهدید کند [۱]. از سوی دیگر، بخش ساختمان سهم عمده مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سطح جهان در بر می‌گیرد. با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی و لزوم صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی، بهره‌گیری از ظرفیت‌های انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه تابش خورشید برای پوشش بارهای حرارتی فضاهای زیستی بسیار امیدوارکننده است. ایران با برخورداری از پتانسیل تابش قابل‌توجه، بستری مناسب برای گسترش این فناوری‌ها دارد؛ برای نمونه، مناطقی نظیر تبریز با دریافت سالانه حدود ۱۶۰۰ کیلووات ساعت تابش بر متر مربع، شرایط مطلوبی برای بهره‌برداری از سامانه‌های گرمایش خورشیدی فراهم می‌آورند [۲]. در این راستا، سامانه‌های گرمایش از کف تابشی به دلیل عملکرد در دماهای پایین‌تر (حدود ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس) نسبت به رادیاتورهای همرفتی، قابلیت کوپل‌شدن بسیار بالایی با کلکتورهای حرارتی خورشیدی دارند و می‌توانند حرارتی یکنواخت و آسایش‌بخش را در محیط داخل مهیا کنند[۳].

مطالعات متعددی به ارزیابی فنی و اقتصادی کلکتورهای خورشیدی در سامانه‌های گرمایشی پرداخته‌اند. دونجلینی و همکارانش [٤] یک مدل پویا در محیط نرم‌افزار متلب سیمولینک توسعه دادند که قادر به شبیه سازی ساعت‌به‌ساعت یک سیستم گرمایش خورشیدی برای تولید آب گرم خانگی همراه با واحد ذخیرسازی حرارتی بود. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب پوشش خورشیدی سیستم ارتباط نزدیکی با پروفایل‌های مصرف روزانه آب دارد. نوگوئرا و همکاران [٥] نیز با هدف بهینه‌سازی فنی و اقتصادی این تجهیزات، نرم‌افزاری را در محیط متلب بر پایه روش نمودار اف و استانداردهای فنی برزیل تدوین کردند که امکان اندازه‌گیری و مقایسه سیستم‌های گردش طبیعی و اجباری را با کلکتورهای صفحه تخت و تخلیه‌شده فراهم می‌کرد. آیومپ و دافی [٦] و گانجو و همکاران [۷] نیز در مطالعات تجربی و عددی خود، تاثیر پارامترهای اقلیمی، زاویه استقرار و دبی جریان را بر عملکرد و بازده حرارتی کلکتورهای صفحه تخت به اثبات رساندند نتایج آن‌ها مشخص کرد که بازدهی حرارتی سیستم با افزایش دمای محیط، تابش خورشیدی و دبی جرمی بهبود یافته، اما با افزایش دمای آب ورودی کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر با هدف کاهش هزینه‌های حرارتی، اتار و همکاران [۸] یک سیستم گرمایش آب خورشیدی زمین‌گرمایی مبتنی بر مبدل‌های حرارتی مویینه‌ای در محیط نرم‌افزار ترنسیس شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج عددی و تجربی آن‌ها نشان داد که سیستم پیشنهادی هزینه گرمایش را بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. ال اوغلا و همکاران [۹] به تحلیل فنی-اقتصادی سه سیستم تهویه مطبوع (تراکمی متداول، جذبی خورشیدی لیتیم بروماید-آب و تراکمی فتوولتائیک خورشیدی) تحت بار برودتی ثابت پرداختند و نشان دادند که سیستم جذبی خورشیدی از نظر ارزش فعلی خالص مقرون‌به‌صرفه‌تر از سیستم فتوولتائیک است. همچنین آرایا و همکاران [۱۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی مساحت کلکتور و حجم ذخیرسازی آب در ۱۸۲ مکان مختلف پرداختند تا حداکثر صرفه‌جویی در چرخه عمر حاصل شود و نتایج حاکی از آن بود که دمای مصرف آب، عمدتاً مناطق با تابش بالاتر را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

از سوی دیگر، بررسی نحوه توزیع حرارت و رفتار سامانه‌های تابشی نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است. جائو و همکاران [۱۱] اقلیم داخلی ساختمان را با پنج نوع طرح کارگذاری لوله‌های گرمایش از کف (یکنواخت و غیر یکنواخت با فواصل ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر) به کمک شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که میدان دمای هوای داخلی بالای کف تا ارتفاع ۰.۱ متری کاملاً یکنواخت بوده و بیشترین اختلاف دما حداکثر ۱ درجه سلسیوس است و یک چیدمان یکنواخت را به عنوان بهینه‌ترین ساختار توصیه کردند. مارکز و همکاران [۱۲] چندین راهبرد کنترلی را برای یک سیستم هیدرونیک که دو واحد انتهایی کف تابشی و فن‌کویل را ترکیب می‌کرد، مقایسه نمودند. شبیه‌سازی‌های آن‌ها در ترنسیس برای سه شهر بزرگ نشان داد که سیستم ترکیبی بالاترین امتیاز آسایش حرارتی را کسب می‌کند، اما مصرف انرژی سیستم عمدتاً تحت تاثیر عملکرد بار جزئی پمپ حرارتی قرار دارد. همچنین ادغام مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های تابشی گام نوینی در مدیریت بار حرارتی است. فلنسکی و سکرت [۱۳] اثر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در داخل کلکتور لوله تخلیه‌شده را بررسی کرده و بهبود ۲۰.۵ درصدی کسر خورشیدی سالانه را گزارش کردند. ملک‌پور و همکاران [۱٤] نیز از کلکتور خورشیدی سهموی به عنوان منبع گرمایش دو اطاقک آزمایش مجهز به گرمایش از کف ماسه‌ای و حاوی نمک هیدرات بهره بردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که انرژی گرمایی نهان ذخیرشده در مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند دمای هوای اتاق را برای بیش از ۴ ساعت پس از غروب خورشید در شرایط راحت حفظ کند و کلکتور سهموی بیش از ۸۰ درصد بارهای گرمایش اتاقک را در سردترین زمان در تهران فراهم می‌آورد.

ترکیب فناوری گرمایش از کف با کلکتورهای خورشیدی روشی بسیار موثر در نیل به ساختمان‌های با اتلاف انرژی صفر است. ای بلوس و همکاران [۱٥] این ساختار ترکیبی را در نرم‌افزار ترنسیس برای اقلیم آتن مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که اختصاص ۳۰ مترمربع گردآورنده صفحه تخت می‌تواند ۹۰ درصد بار گرمایی ساختمان را پوشش دهد و سیستم قادر است با افزودن تنها ۵ مترمربع به مساحت گردآورنده‌ها، شرایط فضای داخل را بدون نیاز به انرژی کمکی در بالاترین سطح آسایش حفظ نماید. لو و همکاران [۱٦] نیز مدل ترنسیس یک کف مواد تغییر فاز دهنده جفت‌شده با سیستم گرمایش آب خورشیدی را توسعه داده و آن را با آزمایش مقایسه کردند. نتایج نشان داد که این سیستم نوسانات دمایی کوچک‌تر و فرآیند گرمایش طولانی‌تری داشته و در صورت حفظ دمای داخلی روی ۲۰ درجه سلسیوس، ۵.۸۷ درصد در مصرف انرژی نسبت به سیستم تابشی معمولی صرفه‌جویی می‌کند. پلیتاریت و همکاران [۱۷] به بررسی انواع سیستم‌های گرمایش پمپ حرارتی خورشیدی از کف با و بدون مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. شبیه‌سازی ترنسیس آن‌ها برای ساختمانی در آتن نشان داد که استفاده از لایه مواد تغییر فاز دهنده بار گرمایشی را حدود ۴۰ درصد و هزینه‌های متغیر را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و دوره بازپرداخت ساده سیستم خورشیدی بدون مواد تغییر فاز دهنده برابر ۱۰.۲ سال و با مواد تغییر فاز دهنده نزدیک به ۱۸.۳ سال است. کریمی و همکاران [۱۸] به مطالعه تطبیقی سیستم گرمایش از کف خورشیدی در سه شهر تهران، تبریز و کیش پرداختند و نشان دادند مصرف سوخت سالانه در تهران ۱۲٥.۳۹ و در تبریز ۳۰۳.٥۸ مگاوات ساعت نسبت به حالت بدون کلکتور کاهش می‌یابد و دوره بازپرداخت سیستم برای این سه شهر به ترتیب ۸.۲، ۹.۴ و ۱۲.۱ سال است.

در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به پایداری انرژی و ارتقای تاب‌آوری حرارتی در پناهگاه‌های اسکان اضطراری و واحدهای پیش‌ساخته به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. لی و همکاران [۲۰] با بررسی استراتژی‌های تاب‌آوری انرژی در سرپناه‌های پیش‌ساخته مدولار پس از سانحه، بر لزوم یکپارچه‌سازی سیستم‌های انرژی خورشیدی فتوولتائیک و حرارتی با رویکردهای غیرفعال معماری برای تضمین خودکفایی و بهبود سلامت محیط زیستی ساکنان تأکید کردند. سارمنتو و همکاران [۲۱] عملکرد انرژی و آسایش حرارتی سرپناه‌های مدولار ساخته‌شده از ساندویچ‌پانل‌های کامپوزیتی سبک را در سه اقلیم حاد ارزیابی نموده و نشان دادند که به دلیل اینرسی حرارتی بسیار پایین این سازه‌ها، اتلاف گرما در شرایط سرمای زمستان به‌شدت بحرانی است و ترکیب سایه‌اندازها و پوشش‌های بازتابی پوسته می‌تواند نیاز به ضخامت عایق را تا ۳۰ درصد تعدیل کند. از سوی دیگر، در حوزه بهینه‌سازی سامانه‌های تابشی کف، حسینی و همکاران [۲۲] به ارزیابی فنی-اقتصادی سامانه یکپارچه گرمایش از کف هیدرونیک جفت‌شده با کلکتورهای خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز در اقلیم سرد پرداختند و نشان دادند که کنترل دقیق دبی جریان و فاصله لوله‌گذاری کف تابشی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۷۵ درصد کاهش داده و نوسانات دمای داخلی را در باند آسایش تثبیت نماید. همچنین رامش و رحمان [۲۳] در یک مطالعه مروری جامع پیرامون تاب‌آوری انرژی ساختمان‌ها در شرایط اختلال و حوادث اقلیمی، اثبات کردند که عملکرد پوسته و به‌ویژه بهره‌گیری از اینرسی لایه‌های کف، مهم‌ترین عامل در کند کردن افت دمای بحرانی در زمان قطع حامل‌های انرژی فسیلی و تضمین بقای زیستی ساکنان در اقلیم‌های سردسیر به شمار می‌رود.

با ارزیابی موشکافانه پیشینه تحقیق مشخص می‌شود که عمده مطالعات سیستم‌های گرمایش از کف خورشیدی بر روی ساختمان‌های مسکونی یا اداری متداول با دیوارهای سنگین بتنی یا آجری متمرکز بوده‌اند و فرآیند انتقال حرارت گذرا در سازه‌های سبک و پیش‌ساخته با ظرفیت حرارتی ناچیز (مانند کانکس‌های اسکان موقت) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از ابعاد کمتر دیده شده در حوزه گرمایش پاک، کاربرد آن در سازه‌های اسکان موقت پس از بلایای طبیعی است. ایران یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان در کمربند آلپ-هیمالیا است و تأمین سریع مسکن اضطراری برای بازماندگان در آن امری حیاتی است. خانه‌های پیش‌ساخته موقت (کانکس‌ها) گرچه نیاز اولیه را برآورده می‌کنند، اما کیفیت پایین محیط داخلی و جداره‌های فوق‌العاده ضعیف آن‌ها مشکلات حرارتی حادی ایجاد می‌کند. تمرکز مطالعه حاضر بر کاربرد این پیکربندی در یک واحد پیش‌ساخته سبک با کاربری اسکان موقت است. در این راستا، رفتار دمایی واحد مورد بررسی، مصرف سالانه گاز طبیعی و انتشار دی‌اکسید کربن سامانه گرمایش از کف خورشیدی مجهز به بویلر کمکی، با سامانه متداول بویلر رادیاتور در شرایط اقلیمی

In Press, Pre-Proof Version

تبریز، تهران و یزد مقایسه می‌شود. بنابراین، سهم پژوهش حاضر، ارزیابی تناسب و عملکرد این راهکار گرمایشی برای مشخصات سازه و الگوی بهره‌برداری واحد اسکان موقت مورد مطالعه است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تعریف مسئله

در این پژوهش، رفتار حرارتی و مصرف انرژی یک واحد پیش‌ساخته اسکان موقت (کانکس امدادی) به مساحت زیربنای ۲۱.۳۶ متر مربع (ابعاد ۵.۶۲ متر در ۳.۸۰ متر) تحت اثر شرایط اقلیمی متغیر در طول یک دوره یک‌ساله مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های سبک اسکان موقت به دلیل ضخامت کم جداره‌ها و اینرسی حرارتی ناچیز، در فصول سرد سال به‌سرعت حرارت داخلی را از دست داده و با افت شدید دما روبه‌رو می‌شوند. برای غلبه بر این چالش و ارتقای آسایش حرارتی ساکنان همگام با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، یک سامانه نوین گرمایش از کف هیدرونیک یکپارچه‌شده با کلکتورهای حرارتی خورشیدی صفحه تخت و بویلر پشتیبان گازسوز پیشنهاد شده است.

مسئله حاضر بر پایه مقایسه تطبیقی عملکرد حرارتی، مصرف سوخت سالانه و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن سامانه پیشنهادی با سامانه مرسوم بویلر و رادیاتور همرفتی تعریف شده است. این ارزیابی برای سه اقلیم با ویژگی‌های آب‌وهوایی کاملاً متمایز در فلات ایران شامل تبریز (اقلیم سرد و کوهستانی)، تهران (اقلیم معتدل و نیمه‌خشک) و یزد (اقلیم گرم و خشک) صورت می‌پذیرد. در این مدل‌سازی، طبق الزامات استاندارد آسایش حرارتی زمستانی، دمای فضای داخلی در طول ساعات بهره‌برداری بر روی محدوده ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس تثبیت می‌شود. الگوی بهره‌برداری بر مبنای حضور دو نفر در بازه زمانی ساعت ۱۶:۰۰ الی ۱۰:۰۰ روز بعد به همراه بار حرارتی متعارف تجهیزات داخلی متناسب با کاربری اسکان اضطراری تنظیم گردیده است. همچنین، کلیه تبادلات حرارتی شامل اتلافات رسانشی گذرا از جداره‌های چندلایه دیوار، کف و سقف شیب‌دار، نرخ نفوذ هوای آزاد و دریافت‌های غیرفعال تابشی از پنجره‌های دوجداره به‌صورت دینامیکی و پیوسته در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه می‌شوند.

۲-۲- معادلات حاکم بر گردآوری انرژی خورشیدی

در این پژوهش، اجزای اصلی سیستم خورشیدی شامل کلکتور صفحه تخت، مبدل حرارتی کلکتور-مخزن، پمپ‌های گردش سیال و سیستم‌های کنترلی هستند. نرخ جمع‌آوری انرژی مفید توسط کلکتور صفحه تخت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_u = A_c F_R[H_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] = (\dot{m}C_p)_c(T_o - T_i) \quad (۱)$$

که در آن، A_c مساحت کلکتور، F_R ضریب تصحیح (کارایی) کلکتور، H_T نرخ تابش کل برخوردی بر روی سطح کلکتور کج‌شده، $\tau\alpha$ حاصل‌ضرب انتقال پوشش و جذب صفحه، U_L ضریب تلفات انرژی کل کلکتور، T_i دمای سیال در ورودی کلکتور، T_a دمای محیط، T_0 دمای سیال در خروجی کلکتور و $(\dot{m}C_p)_c$ نرخ ظرفیت گرمایی سیال کلکتور است. ضریب کارایی کلکتور (F_R) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F_R = \frac{(\dot{m}C_p)_c}{A_c U_L}\left[1 - \exp\left(\frac{-F' U_L A_c}{(\dot{m}C_p)_c}\right)\right] \quad (۲)$$

که در آن F' ضریب کارایی هندسه کلکتور است. میزان تابش روی سطح کج‌شده کلکتور (H_T) با استفاده از مؤلفه‌های تابش مستقیم (H_b) و پراکنده (H_d) روی سطح افقی و بازتاب زمین (e) به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$H_T = H_b R_b + H_d\frac{1+\cos(s)}{2} + e(H_b + H_d)\frac{1-\cos(s)}{2} \quad (۳)$$

در این رابطه، s شیب کلکتور و R_b نسبت تابش مستقیم تابیده‌شده بر روی سطح کج‌شده به سطح افقی است که برای نیم‌کره شمالی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - s)\cos\delta\cos\omega + \sin(\varphi - s)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta} \quad (۴)$$

که در آن φ عرض جغرافیایی، δ انحراف خورشیدی و ω زاویه ساعت است. بازتاب زمین (e) در شرایط بدون برف برابر با ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فرآیند شبه‌پایدار در مبدل حرارتی کلکتور-مخزن با اثربخشی ϵ_c، نرخ انتقال انرژی مفید به شکل زیر اصلاح می‌گردد.

$$Q_u = F'_R A_c[H_T(\tau\alpha) - U_L(T - T_a)] \quad (۵)$$

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left\{1 + \left[\frac{F_R A_c U_L}{(\dot{m}C_p)_c}\right]\left[\frac{(\dot{m}C_p)c}{\epsilon_c(\dot{m}C_p)min} - 1\right]\right\}^{-1} \quad (۶)$$

که در آن T دمای آب در مخزن ذخیره و F'_R/F_R ضریب جریمه مبدل حرارتی است.

۲-۳- موازنه انرژی مخزن ذخیره و بارهای حرارتی

با فرض مخزن ذخیره به‌صورت کاملاً مخلوط، معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییرات دمای مخزن بر اساس تعادل انرژی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$MC_p\frac{dT}{dt} = Q_d - (Q_L - E_L) - (Q_w - E_w) \quad (۷)$$

فرموله می‌شود که در آن M جرم آب داخل مخزن، Q_d نرخ انتقال انرژی جمع‌آوری‌شده به مخزن، Q_L بار گرمایش فضا، E_L نرخ انرژی کمکی برای گرمایش فضا، Q_w بار آب گرم مصرفی و E_w نرخ انرژی کمکی برای آب گرم خانگی است. بار گرمایش فضا (Q_L) با استفاده از مدل درجه-زمان به صورت خطی با اختلاف دمای داخل (T_r) و محیط (T_a) متناسب است $(Q_L = UA(T_r - T_a))$ که در این رابطه، UA ثابت بار گرمایش ساختمان در شرایط طراحی است.

موازنه حرارتی حاکم بر تأمین بار گرمایشی فضای مسکونی (Q_{space}) در سامانه پیشنهادی طبق رابطه زیر است :

$$Q_{\text{space}} = Q_u + Q_{\text{boiler,net}} - Q_{\text{loss,tank}} - Q_{\text{loss,pipe}} \quad (۸)$$

که در آن، Q_u انرژی گرمایی مفید استخراج‌شده از کلکتورهای خورشیدی، $Q_{\text{boiler,net}} = \eta_{\text{boiler}} \cdot Q_{\text{fuel}}$ گرمای مفید تحویلی از بویلر کمکی با راندمان حرارتی نامی ۸۲٪، $Q_{\text{loss,tank}}$ نرخ تلفات حرارتی سطحی مخزن ذخیره (با ضریب عایق‌بندی $U_{\text{tank}} = 0.6\ \text{W/m}^2\text{K}$ متناسب با دمای آب مخزن و محیط)، و $Q_{\text{loss,pipe}}$ تلفات انتقال در خطوط لوله‌کشی عایق‌شده است .با توجه به ابعاد کوچک سازه اسکان موقت و دبی پایین پمپ‌های سیرکولاتور مدار خورشیدی و کف، توان مصرفی پمپ‌ها در رده تجهیزات توان‌پایین بوده و اثر آن در مقایسه با بارهای سوخت فسیلی بویلر صرف‌نظرپذیر است؛ لذا ارزیابی‌ها بر مصرف مستقیم سوخت متمرکز گردیده‌اند.

۲-۴- مشخصات هندسی و مصالح سازه اسکان موقت (کانکس)

ساختمان پیش‌ساخته موقت مورد بررسی، دارای یک طبقه با مساحت کاربری ۲۱/۳۶ متر مربع (ابعاد ۵/۶۲ متر در ۳/۸۰ متر) است. پلان دو و سه بعدی ساختمان به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ به نمایش درآمده است. مشخصات لایه‌بندی جدارها و ضخامت مصالح ساختمانی بکار رفته در مدل‌سازی عددی که منطبق بر شرایط واقعی کانکس‌های امدادی است، در جدول ۱ خلاصه شده است. سازه دارای پنجره به ابعاد ۱/۷۴ در ۰/۹۵ متر یک درب ورودی با ابعاد ۲ در ۰/۹۰ متر بر روی جدار سازه است.

خواص ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در این شبیه‌سازی دینامیکی شامل ضخامت، ضریب هدایت حرارتی (k)، چگالی (ρ) و گرمای ویژه (C_p) در جدول ۲ ارائه شده است.

در مرحله مدل‌سازی سیستم هیدرونیک، لوله‌گذاری کف مطابق شکل ۳ با آرایش رفت و برگشتی (Serpentine) و با گام ۲۵ سانتی‌متر در لایه میانی کف (بین تخته چوب زیرین و الوار چوبی رویین) تعبیه شده است .لوله‌ها از نوع پنج‌لایه-PEX Al-PEX با قطر اسمی ۱۶ میلی‌متر و طول کل ۱۰۶.۷ متر هستند که از جعبه کلکتور دیواری منشعب شده و با حفظ فاصله استاندارد از دیواره‌های خارجی، تمام زیربنای حرارتی ۲۱.۳۶ مترمربعی سازه را به‌صورت پیوسته پوشش می‌دهند تا ضمن دستیابی به توزیع دمایی کاملاً یکنواخت، از ایجاد گرادیان حرارتی موضعی در سازه سبک جلوگیری شود .همچنین نرخ حضور افراد برابر با ۲ نفر (در بازه زمانی ۱۶:۰۰ الی ۱۰:۰۰ روز بعد) تنظیم گردیده است .مطابق الزامات آسایش زمستانی، سامانه کنترل دما به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شده است که در صورت افت دمای اتاق به زیر ۲۲ درجه سلسیوس، پمپ‌های مدار فعال شده و دمای فضا را همواره بالاتر از محدوده بحرانی ۱۸ درجه سلسیوس حفظ نمایند.

۲-۵- پیکربندی سیستم گرمایش از کف خورشیدی

سیستم تهویه مطبوع و حرارتی مدل‌سازی شده در این پژوهش مطابق شکل ۴ از سه حلقه اصلی شامل حلقه خورشیدی، حلقه کف گرم تابشی و حلقه آب گرم کمکی تشکیل شده است. سیال واسط پس از گرم شدن توسط کلکتورهای خورشیدی، به سمت مخزن ذخیره خورشیدی جریان یافته و انرژی حرارتی را در آنجا ذخیره می‌کند. در این شبیه‌سازی، مطابق شکل ۵ کلکتورهای صفحه تخت لعاب‌دار با مساحت کل حدود ۴ متر مربع بر روی سقف قرار گرفته‌اند. مشخصات فنی، هندسی و راندمان کلکتورها در جدول ۳ خلاصه شده است.

جهت ارتقای ایمنی و بازدهی حرارتی سیستم، یک شیر سه طرفه حرارت‌دهی در خروجی مخزن ذخیره تعبیه شده است تا دمای آب ارسالی به ناحیه گرمایشی را روی مقدار بهینه $40^\circ C$ ثابت نگه دارد و از افزایش بیش از حد دما جلوگیری کند. علاوه بر این، یک سیستم کنترل هوشمند دمای متغیر در مدار قرار گرفته است؛ وظیفه این کنترلر آن است که در صورت افت دمای هوای بیرون

جدول ۱ لایه‌بندی ساختاری دیوار، کف و سقف ساختمان پیش‌ساخته

Table 1 Structural layering of walls, floors and ceilings of prefabricated buildings

	Floor	Wall	Roof
External layer	Wood	Color metal sheet	Color metal sheet

In Press, Pre-Proof Version

Intermediate layer	-	Rock wool	EPS
Internal layer	-	Color metal sheet	Color metal sheet

جدول ۲ مشخصات ترموفیزیکی مصالح ساختمانی واحد پیش‌ساخته اسکان موقت [۱]

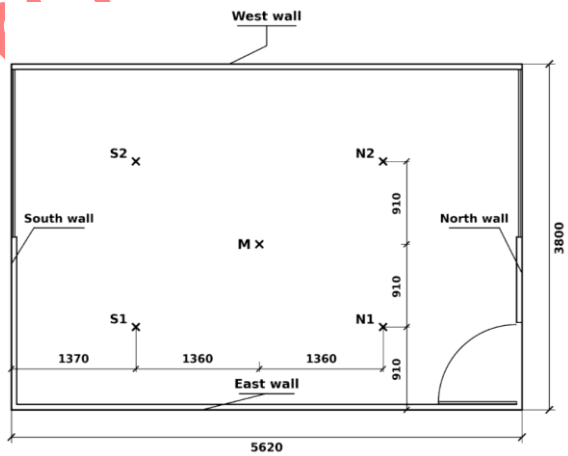
Table 2 Thermophysical characteristics of building materials for housing [1]

Material	Wood	EPS	Rock wool	Colormetal sheet
Thickness (m)	0.1	0.075	0.05	0.0005
Thermal conductivity (W/(m.K))	0.15	0.035	0.041	45.28
Density (kg/m³)	521	20	71	8000
Specific heat (J/(kg.K))	1630	1100	1100	460

جدول ۳ مشخصات مشخصات کلکتورها

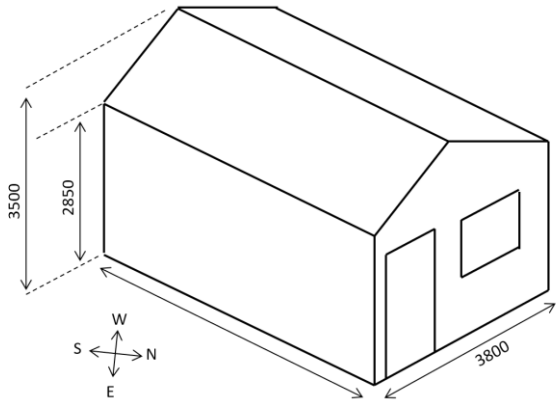
Table 3 Technical Specifications and Performance Parameters of the Solar Collectors

Technical Specification	Numerical Value / Description
Collector Type	ACR Solar Skyline
Number of Collectors	4 units (2 parallel rows × 2 series collectors per row)
Gross Area per Collector	$\mathbf{0.94}$ m² ($\mathbf{10.1}$ ft²)
Net Aperture Area per Collector	$\mathbf{0.85}$ m² ($\mathbf{9.12}$ ft²)
Total Collector Array Area	$\approx \mathbf{4.0}$ m²
Optical & Thermal Efficiency (SRCC)	$C_0 = 0.603$, $C_1 = -3.867$ W/m²K, $C_2 = -0.0015$ W/m²K²



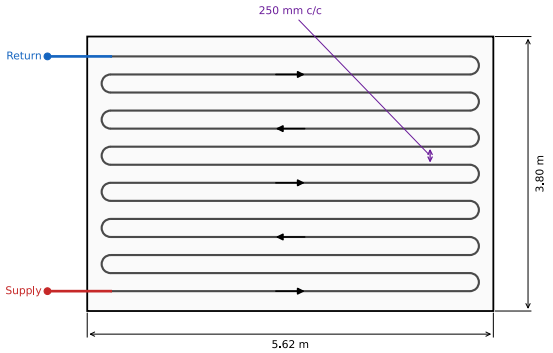
شکل ۱ پلان دو بعدی ساختمان پیش‌ساخته موقت مدل‌شده (واحد میلی‌متر)

Fig. 1 2D plan of a modeled temporary prefabricated building (mm)



شکل ۲ پلان سه بعدی ساختمان پیش‌ساخته موقت مدل‌شده (واحد میلی‌متر)

Fig. 2 3D plan of temporary prefabricated building modeled (mm)



شکل ۳ شماتیک آرایش لوله‌گذاری گرمایش از کف

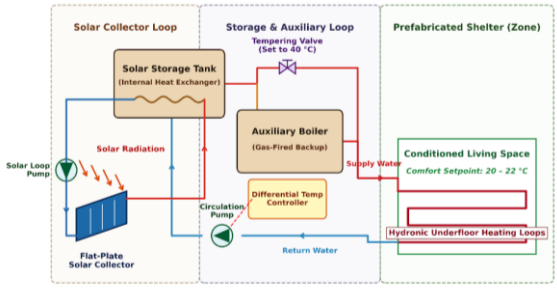
Fig. 3 Schematic of the underfloor heating piping layout

به زیر $5^{\circ}C$، دمای آب گرمایش از کف را به صورت پیوسته و خطی متناسب با شدت سرما تا حداکثر $50^{\circ}C$ افزایش دهد تا افت حرارتی ناگهانی واحد پیش‌ساخته اسکان موقت جبران شود. یک بویلر پشتیبان گازسوز نیز در خط قرار دارد تا در صورت عدم کفایت تابش خورشید (به‌ویژه در ماه‌های بحرانی مانند دی و بهمن)، انرژی کمکی مورد نیاز گرمکن را تأمین کند. در بخش شبیه‌سازی سیستم تابشی، از مدل جریان متغیر با محدوده عملکرد شیر گاز برابر با $2^{\circ}C$ حول نقطه تنظیم استفاده شده است که نرخ جریان جرم سیال را به صورت خطی متناسب با بار حرارتی ناحیه تعدیل می‌نماید.

۲-۶- پیکربندی سیستم گرمایشی بویلر و رادیاتور

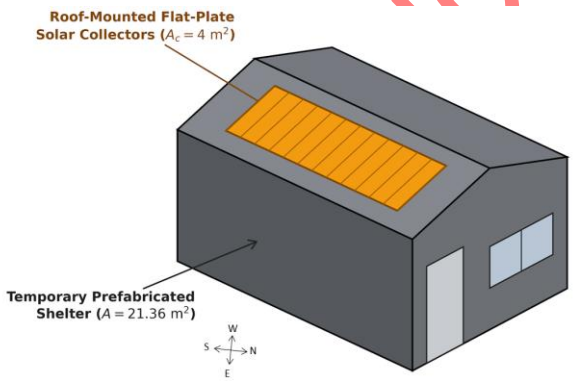
ساختمان در نرم افزار دیزاین‌بیلدر، برای دوره یکساله از ابتدای ژانویه تا انتهای دسامبر شبیه سازی شده است. برای رفع نیازهای گرمایشی، هدف استفاده از سیستم گرمایش از کف است. اما برای مقایسه با سیستم‌های گرمایشی دیگر، ابتدا سیستم گرمایش با رادیاتور مدل می‌شود. سیستم گرمایش بویلر و رادیاتور یکی از رایجترین انواع سیستم‌های گرمایش مرکزی است که معمولا در ساختمانهای مسکونی و تجاری استفاده می‌شود. در این سیستم، آب توسط بویلر گرم شده و به رادیاتورها منتقل می‌شود. رادیاتورها وسیله‌ای هستند که گرمای آب گرم را به هوای اتاق منتقل می‌کنند. این سیستم از یک بویلر و یک رادیاتور تشکیل شده است (شکل ۶). دمای طراحی آب خروجی از بویلر $80^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. سوخت بویلر نیز گاز طبیعی است. به‌منظور اطمینان از صحت مقایسه مصرف انرژی، کلیه پارامترهای مرزی، بارهای زیستی و الزامات آسایش حرارتی در هر دو سامانه کاملاً یکسان لحاظ شدند. در هر دو مدل، نقطه تنظیم دمای آسایش حرارتی فضای داخل بر روی 20 °C (با آستانه روشن شدن سامانه در دمای زیر 22 °C و کف بحرانی 18 °C) تثبیت شده است. الگوی حضور ساکنان (۲ نفر در بازه زمانی ۱۶:۰۰ الی ۱۰:۰۰ روز بعد با توان حرارتی ۱۰۰ وات بر نفر)، نرخ نفوذ هوای آزاد (1.0 ACH) و بارهای داخلی ناشی از روشنایی و تجهیزات نیز در هر دو مدل به‌صورت همسان تعریف گردیدند. تفاوت عملکردی دو سامانه ناشی از ساختار هیدرولیکی و دمای کارکرد پایانه‌های آن‌ها است؛ در سامانه متداول رادیاتوری، آب با دمای رفت 80 °C در مدار به گردش درمی‌آید، در حالی که در سامانه گرمایش از کف خورشیدی، به دلیل مکانیزم تابش سطحی، دمای رفت آب روی 40 °C تا 45 °C در مدار ۱۰۷ متری لوله‌های پنج‌لایه مدفون در کف تنظیم شده است. بویلر کمکی در سامانه خورشیدی با راندمان اسمی کاملاً یکسان با بویلر مرجع (۸۲٪) در خروجی مخزن ذخیره خورشیدی (با ظرفیت ۳۶.۱ لیتر در تبریز، ۲۷.۷ لیتر در تهران و ۲۸.۲ لیتر در یزد) تعبیه شده است تا از طریق کنترلر تفاضلی دما و شیر سه‌طرفه اختلاط، تنها در صورت کسری گرمای تولیدی کلکتورهای خورشیدی وارد مدار گردد.

In Press, Pre-Production Version



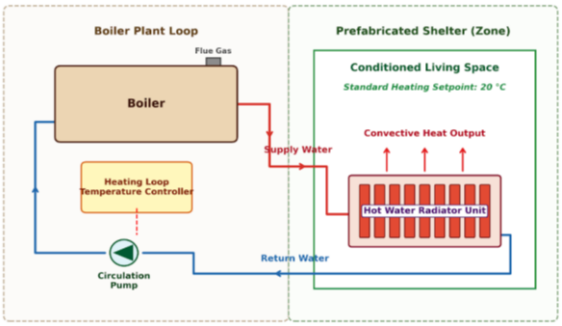
شکل ۴ شماتیک سیستم گرمایش از کف کوپل‌شده با آبگرمکن خورشیدی

Fig. 4 Schematic of a floor heating system coupled with a solar water heater



شکل ۵ مدل سه بعدی ساختمان و کلکتور مدل‌شده در نرم‌افزار

Fig. 5 3D model of the building and collector modeled in the software



شکل ۶ سیستم گرمایش بویلر و رادیاتور مدل‌شده در نرم‌افزار

Fig. 6 Boiler and radiator heating system modeled in software

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

۳-۱- اعتبارسنجی مدل کامپیوتری

به‌منظور اطمینان از صحت محاسبات، بارهای حرارتی و فرآیندهای گذرا در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، فرآیند اعتبارسنجی بر اساس بازتولید نتایج یک مطالعه مرجع انجام گرفته است. بدین منظور، مدل هندسی و شرایط مرزی مربوط به ساختمان سه‌منطقه‌ای پژوهش راشاد و همکاران [۱۹] که با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس انجام شده بود، به طور دقیق در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر پیاده‌سازی گردید. ساختمان مورد بررسی شامل دو ناحیه گرمایشی (شمالی و جنوبی) هر یک به مساحت ۲۰ m^2 و یک فضای شیروانی غیرگرمایشی به مساحت ۴۰ m^2 با تخصیص داده‌های اقلیمی لندن است. تنظیمات دمای هدف در زمستان روی ۲۰$^\circ C$ و در تابستان روی ۲۵$^\circ C$ لحاظ شده است. مساحت پنجره‌های دو جداره (با ضریب انتقال حرارت کلی ۱/۴ W/m^{2}K) برابر ۲/۴ متر مربع، نرخ تعویض هوای نفوذی ۱ ACH و بار حرارتی روشنایی و تجهیزات ۴/۹ W/m^2 است. پس از انجام شبیه‌سازی دینامیکی دوره یک‌ساله (۸۷۶۰ ساعت)، نتایج حاصل از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با داده‌های استخراج‌شده از ترنسیس مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۷، روند تغییرات دمای عملیاتی ناحیه جنوبی را در دو نرم‌افزار مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق بسیار بالایی میان دمای پیش‌بینی‌شده توسط هر دو شبیه‌ساز به‌ویژه در فرآیندهای نوسانی اوج تابستان و فصل گرمایش زمستانی وجود دارد.

علاوه بر شاخص‌های دما، میزان تقاضای انرژی گرمایشی ساختمان (W/m^2) نیز در هر دو نرم‌افزار استخراج و مقایسه گردید که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، هر دو الگوریتم رفتار فصلی کاملاً هم‌زمانی را نشان می‌دهند و تقاضای گرمایش در اواسط دوره سالانه (بین ساعات ۳۵۰۰ تا ۶۵۰۰) به درستی صفر شده است. برای اعتبارسنجی کمّی، شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و ضریب تبیین (R^2) در گام‌های زمانی شبیه‌سازی سالانه استخراج شدند. برای دمای عملیاتی فضای داخلی، مقادیر $\mathrm{RMSE} = 0.78\,^\circ\mathrm{C}$ ، $\mathrm{MBE} = -0.42\,^\circ\mathrm{C}$ و $R^2 = 0.978$ حاصل شد. همچنین در پیش‌بینی نرخ تقاضای گرمایشی فضا، مقادیر $\mathrm{RMSE} = 1.84\ \mathrm{W/m^2}$ ، $\mathrm{MBE} = -0.68\ \mathrm{W/m^2}$ و $R^2 = 0.962$ به دست آمد. بر اساس الزامات استاندارد ASHRAE، انحراف معیار نرمال‌شده کمتر از ۱۰٪ و ضریب همبستگی بالاتر از ۰.۹۵ نشان‌دهنده دقت و انطباق بسیار عالی حل‌کننده انرژی‌پلاس در دیزاین‌بیلدر بوده و قابلیت اعتماد نتایج توسعه‌یافته در این مقاله را تضمین می‌نماید. مقایسه حاضر بر بازتولید نتایج عددی مطالعه مرجع و بررسی سازگاری پیش‌بینی‌های دو محیط شبیه‌سازی برای رفتار حرارتی ساختمان استوار است. بنابراین، این ارزیابی، اعتبارسنجی تجربی مستقیم مجموعه سامانه خورشیدی–گرمایش از کف مورد مطالعه محسوب نمی‌شود. نبود مقایسه مستقیم با داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای پیکربندی حاضر، از محدودیت‌های پژوهش است.

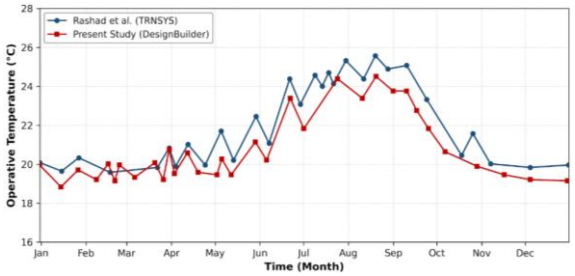
۳-۲- ارزیابی تغییرات دما

دمای منطقه، از جمله دمای هوا، تابش و دمای عملیاتی، و همچنین دمای حباب خشک در خارج از ساختمان، برای حالت بدون سیستم گرمایش و همین‌طور با سیستم گرمایش از کف خورشیدی و برای سه شهر در نظر گرفته شده در شکل ۹ ارائه شده است. دمای هوا دمای منطقه‌ای است که توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود. همان‌طور که در شکل های ۹ (الف و ب) نشان داده شده است، دما برای ساختمان بدون سیستم گرمایش در تبریز بین ۵- تا ۳۲.۵ درجه سلسیوس و برای ساختمان های دارای سیستم گرمایش از کف خورشیدی از ۲۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس متغیر است. دمای عملیاتی میانگین دمای تابشی و هوا است. دمای هوا، تابش و عملکرد برای ساختمان در تهران، همانطور که در شکل های ۹ (پ و ت) نشان داده شده است، برای ساختمان بدون گرمایش معمولی واقع در محدوده ۵- تا ۳۷.۵ درجه سلسیوس و برای ساختمان با کلکتورهای خورشیدی و گرمایش از کف بین ۲۰-۳۵ درجه در نوسان است. در شکل ۹ (ث و ج) دمای یزد نشان داده شده است. برای هر دو ساختمان، یعنی بدون و با سیستم گرمایش از کف با کلکتور خورشیدی، دما به ترتیب از ۷.۵ تا ۳۷.۵ و ۲۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس متغیر است. از آنجایی که تابش خورشید در طول سال متغیر است و در ژانویه به حداقل خود می‌رسد، دمای ساختمان دارای کلکتورهای خورشیدی، به ویژه در تهران و تبریز همانطور که در شکل‌های مربوطه نشان داده شده است، دچار نوسانات قابل توجهی می‌شود که در دی ماه با کاهش چشمگیر دنبال می‌شود.

تحلیل نمودارهای استخراج‌شده نشان می‌دهد که در حالت پایه (بدون سیستم گرمایشی)، دمای داخل واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در هر سه شهر افت بسیار شدیدی پیدا می‌کند. این افت دما در اقلیم سرد تبریز به وضوح شدیدتر است و دمای داخل را به زیر محدوده آسایش حرارتی (حتی تا نزدیک به دمای یخزدگی در زمستان) می‌رساند که برای سکونت افراد غیرقابل تحمل است. در شهرهای تهران و یزد نیز نوسانات دمای شب و روز در حالت پایه بسیار زیاد است.

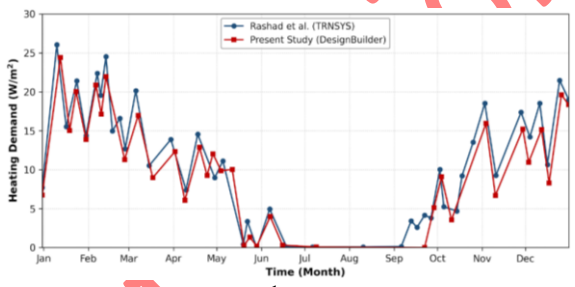
اما با فعال‌سازی سیستم گرمایش از کف خورشیدی هیدرونیک، رفتار حرارتی سازه به طور کامل تغییر می‌کند. به دلیل توزیع یکنواخت حرارت از سطح کف و کارکرد مداوم سیستم کنترل دمای ستپوینت، دمای داخل واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در تمام طول شبانه‌روز در محدوده استاندارد آسایش حرارتی کاملاً تثبیت می‌شود. نکته مهم در این شبیه‌سازی این است که لایه چوبی کف واحد پیش‌ساخته اسکان موقت به عنوان یک لایه واسط، تاخیر حرارتی مناسبی ایجاد کرده و مانع از افت ناگهانی دما در ساعات اولیه غروب آفتاب می‌شود. این پایداری ملموس دما، تأییدکننده موفقیت طراحی سیستم هیدرونیک خورشیدی در تأمین شرایط آسایش حرارتی ساکنان اسکان موقت، بدون اتکا به سیستم‌های پرخطر سنتی است.

In Press, Pre-Proof



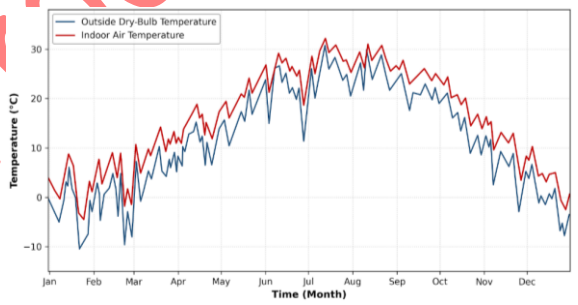
شکل ۷ مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای دمای اتاق با اعمال سیستم گرمایش و سرمایش ساختمان

Fig. 7 Comparison of simulation results for room temperature with building heating and cooling systems



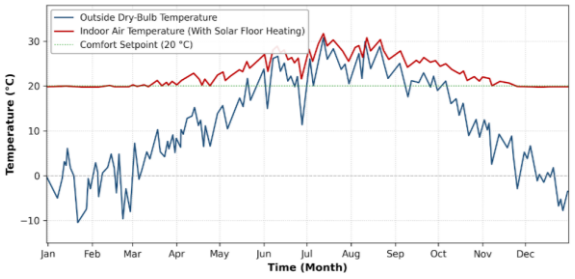
شکل ۸ مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای تقاضای گرمایش ساختمان

Fig. 8 Comparison of simulation results for building heating demand



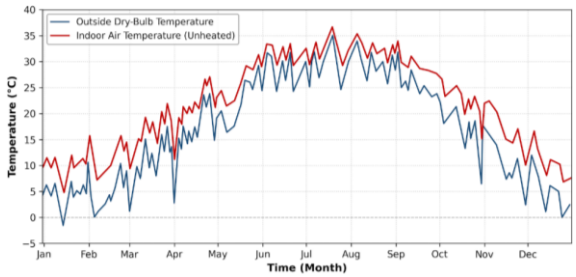
شکل ۹ الف تبریز

Fig. 9 a



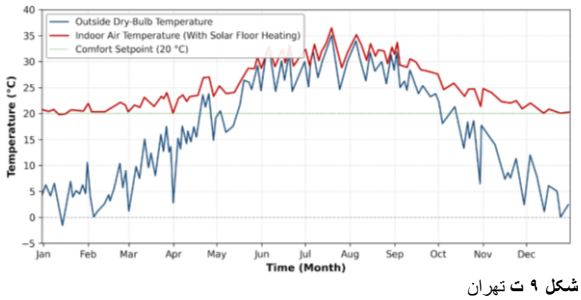
شکل ۹ ب تبریز

Fig. 9 b



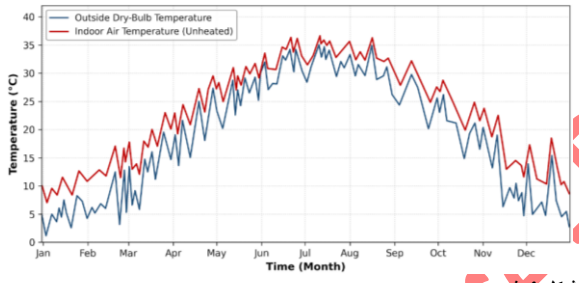
شکل ۹ پ تهران

Fig. 9 c



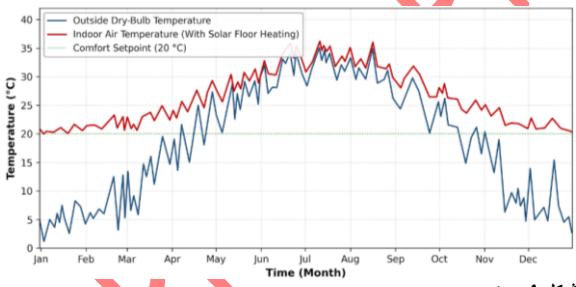
شکل ۹ ت تهران

Fig. 9 d



شکل ۹ ث یزد

Fig. 9 e



شکل ۹ ج یزد

Fig. 9 f

شکل ۹ مقایسه تغییرات دمای داخل واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در حالت بدون سیستم گرمایش از کف برای الف) تبریز پ) تهران ث) یزد، با سیستم گرمایش از کف برای ب) تبریز ت) تهران ج) یزد

Fig. 9 Comparison of indoor temperature variations in the shelter without underfloor heating for (a) Tabriz, (c) Tehran, and (e) Yazd, and with underfloor heating for (b) Tabriz, (d) Tehran, and (f) Yazd.

۳-۳- ارزیابی و مقایسه مصرف سوخت سالانه

پیش از مقایسه عملکرد سامانه‌های گرمایشی، رفتار حرارتی ذاتی سازه اسکان موقت و تقاضای انرژی گرمایشی خالص آن برای تثبیت دمای داخل روی نقطه تنظیم آسایش (۲۰ درجه سلسیوس) در طول یک سال کامل مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۰ پروفایل بار گرمایشی ماهانه و مجموع تقاضای سالانه سازه را در سه اقلیم نشان می‌دهد. بر اساس شبیه‌سازی دینامیکی، تقاضای گرمایشی کل سالانه برای واحد پیش‌ساخته اسکان موقت مورد نظر در تبریز، تهران و یزد به ترتیب برابر با ۲۹۲۰، ۱۵۹۵ و ۱۴۲۵ کیلووات‌ساعت (معادل ۱۳۶.۷، ۷۴.۷ و ۶۶.۷ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال) است. تفاوت چشمگیر بار حرارتی

Pre-Proof Version

تبریز ناشی از زمستان‌های سرد، دمای حباب خشک منفی در فصول سرد و افت شدید دمای محیطی است. اوج تقاضای حرارتی در هر سه شهر در ماه‌های دی و بهمن (ژانویه و فوریه) مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در ماه ژانویه، تقاضای گرمایشی ماهانه تبریز به حدود ۶۶۵ کیلووات‌ساعت می‌رسد، در حالی که این رقم برای تهران و یزد به ترتیب برابر ۳۸۰ و ۳۴۵ کیلووات‌ساعت است. این بارهای حرارتی سپس به عنوان مبنای بار سیستم‌های تهویه مطبوع جهت تعیین مصرف سوخت فسیلی قرار گرفتند.

تأثیر بکارگیری سیستم ترکیبی گرمایش از کف خورشیدی بر کاهش تقاضای انرژی فسیلی، مهم‌ترین شاخص در تعیین توجیه فنی و کاربردی این طرح است. برای این منظور، میزان مصرف سوخت سالانه (گاز طبیعی) واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در حالت مجهز به سیستم پیشنهادی با حالت سنتی (بویلر و رادیاتور بدون کلکتور خورشیدی) مقایسه شده است. شکل ۱۱ میزان مصرف گاز طبیعی سالانه را برای دو سیستم متداول و خورشیدی در سه شهر تبریز، تهران و یزد نشان می‌دهد.

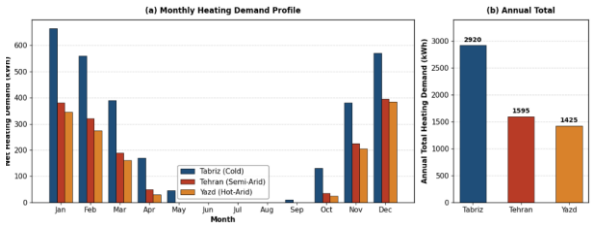
تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیکی یک‌ساله نشان می‌دهد که مجهزسازی سازه اسکان موقت به سیستم گرمایش از کف خورشیدی، در هر سه اقلیم منجر به صرفه‌جویی چشمگیری در مصرف سوخت شده است. برای تعیین میزان اثربخشی سامانه پیشنهادی، درصد صرفه‌جویی سالانه در مصرف سوخت طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{\text{saving}} = \frac{Q_{\text{conv}} - Q_{\text{solar-floor}}}{Q_{\text{conv}}} \times 100 \qquad (۹)$$

که در آن، Q_{conv} انرژی گاز مصرفی در سامانه متداول بویلر و رادیاتور و $Q_{\text{solar-floor}}$ مصرف گاز بویلر کمکی در سامانه ترکیبی خورشیدی-کف است. بالاترین میزان صرفه‌جویی مطلق و درصدی متعلق به شهر تبریز با کاهش ۱۱۶۳ کیلووات ساعتی (۳۲.۳ درصد) نسبت به سیستم سنتی است که ناشی از تقاضای حرارتی بالای این اقلیم سردسیر و بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت کلکتورها در فصل سرما می‌باشد. در شهر تهران با اقلیم معتدل و نیمه‌خشک، مصرف گاز طبیعی سالانه از ۱۹۷۱ کیلووات ساعت در سیستم سنتی به ۱۴۲۳ کیلووات ساعت کاهش یافته که بیانگر صرفه‌جویی ۲۷.۸ درصدی (۵۴۸ کیلووات ساعت) در مصرف سوخت فسیلی است. همچنین در شهر یزد، به دلیل پتانسیل تابش خورشیدی بسیار بالا و در عین حال بار گرمایشی کمتر سازه، مصرف سوخت با کاهش ۵۲۱ کیلووات ساعتی به ۲۹.۵ درصد صرفه‌جویی دست یافته است.

۳-۴- تحلیل زیست‌محیطی و میزان کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن

امروزه بخش ساختمان عامل تولید بیش از یک‌سوم گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان است و سهم عمده‌ای در فرآیند گرمایش جهانی دارد .از این رو، ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی و تعیین میزان کاهش آلاینده‌های اتمسفری، نقشی تعیین‌کننده در پذیرش



شکل ۱۰ بار گرمایشی ماهانه و مجموع تقاضای سالانه

Fig. 10 Monthly heating load and total annual demand

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر دارد .در این بخش، میزان انتشار سالانه گاز دی‌اکسید کربن حاصل از احتراق گاز طبیعی در بویلر پشتیبان برای هر دو سیستم رادیاتوری سنتی و سیستم پیشنهادی گرمایش از کف خورشیدی مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای انتشار سالانه گاز دی‌اکسید کربن را برای سه شهر تبریز، تهران و یزد نشان می‌دهد.

میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن (m_{CO_2}) بر اساس موازنه احتراق گاز طبیعی در بویلر و با بهره‌گیری از ضرایب استاندارد زیست‌محیطی کتابخانه EnergyPlusمحاسبه شده است. فرمول حاکم بر تعیین کل جرم دی‌اکسید کربن سالانه آزادشده به اتمسفر طبق رابطه زیر تعریف می‌شود :

$$m_{CO_2} = Q_{\text{gas}} \times EF_{\text{gas}} \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه، Q_{gas} میزان کل مصرف سالانه سوخت گاز طبیعی ورودی به بویلر بر حسب کیلووات‌ساعت (kWh) و EF_{gas} ضریب انتشار آلایندگی گاز طبیعی است. بر مبنای ترکیب شیمیایی استاندارد گاز طبیعی و ارزش حرارتی ناخالص، مقدار این ضریب در شبیه‌سازی دینامیکی برابر با $0.25 - 0.3\ \text{kg CO}_2/\text{kWh}$ لحاظ گردیده است. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی دینامیکی یک‌ساله نشان می‌دهد که بکارگیری سیستم گرمایش از کف خورشیدی به دلیل کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی، منجر به کاهش ملموس انتشار آلاینده‌ها در هر سه اقلیم شده است. بر اساس نتایج، بیشترین میزان کاهش در انتشار گاز دی‌اکسید کربن در شهر تبریز با ۲۰ درصد کاهش نسبت به سیستم سنتی محقق شده است. این شاخص برای شهرهای تهران و یزد به ترتیب به میزان ۱۵ درصد و ۱۴ درصد کاهش یافته است.

بالاتر بودن درصد کاهش انتشار آلاینده‌ها در تبریز نسبت به دو شهر دیگر، به دلیل بالاتر بودن حجم مطلق بار حرارتی سالانه در این اقلیم سرد است. از آنجا که در سیستم سنتی رادیاتوری، بویلر باید حجم عظیمی از گاز طبیعی را برای جبران اتلاف حرارتی شدید واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در تبریز بسوزاند، ورود سیستم خورشیدی به مدار و پوشش بخشی از این بار سنگین، حجم بسیار بزرگی از انتشار دی‌اکسید کربن را مهار می‌کند. این نتایج اثبات می‌کند که استفاده از فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های پاک در سازه‌های اسکان موقت، علاوه بر تأمین شرایط آسایش حرارتی پناه‌جویان، ابزاری کارآمد در جهت کاهش آلودگی محیط زیست و حرکت به سمت اهداف توسعه پایدار کلان‌شهرهای کشور است.

۳-۵- ارزیابی فنی اقتصادی و دوره بازگشت سرمایه

به‌منظور بررسی توجیه‌پذیری سرمایه‌گذاری طرح پیشنهادی، تحلیل اقتصادی برای افق کاری ۲۰ ساله سامانه انجام گرفت. در این تحلیل، شاخص دوره بازگشت سرمایه ساده (SPB) و دوره بازگشت سرمایه تنزیل‌شده (DPB) بر اساس معادلات زیر محاسبه شده‌اند:

$$SPB = \frac{I_0}{\Delta C_{annual}} \qquad (۱۱)$$

$$DPB = \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{I_0 \cdot i}{\Delta C_{annual}}}\right)}{\ln(1+i)} \qquad (۱۲)$$

که در آن، I_0 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کل سیستم، ΔC_{annual} صرفه‌جویی ناخالص سالانه ناشی از کاهش مصرف سوخت و انرژی، و i نرخ تنزیل است.

با در نظر گرفتن سناریوی محتمل در اسکان‌های موقت پس از بلایای طبیعی که در آن‌ها شبکه گاز شهری قطع بوده و گرمایش کمکی وابسته به برق اضطراری یا کپسول‌های گاز مایع است، صرفه‌جویی حاصل از ۱۱۶۳ کیلووات‌ساعت در تبریز، ۵۴۸ کیلووات‌ساعت در تهران و ۵۲۱ کیلووات‌ساعت در یزد، ارقام مالی قابل‌توجهی را به همراه دارد. جدول ۴ ریز هزینه‌های اولیه تجهیزات و اجرای طرح را نشان می‌دهد.

با کسر هزینه‌های سیستم رادیاتوری (حدود ۳۰۰ میلیون ریال)، هزینه سرمایه‌گذاری اضافی خالص برای اجرای سامانه خورشیدی برابر با ۳۹۵ میلیون ریال خواهد بود. با در نظر گرفتن هزینه تأمین انرژی کمکی در شرایط اسکان اضطراری، نتایج نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه ساده برای شهرهای تبریز، تهران و یزد به ترتیب ۶.۸ سال، ۸.۹ سال و ۹.۴ سال است. با توجه به طول عمر مفید تجهیزات خورشیدی و لوله‌های کف‌پوش (حداقل ۲۰ تا ۲۵ سال)، این شاخص‌ها اثبات می‌کنند که نه تنها جنبه‌های اقتصادی مانعی در برابر طرح نیستند، بلکه کاهش هزینه‌های سوخت‌رسانی مداوم به کمپ‌های بحران‌زده، به‌کارگیری این فناوری را از نظر اقتصادی نیز کاملاً توجیه‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه می‌سازد.

۴- جمع‌بندی و پیشنهادها

در این پژوهش، یک سیستم نوین گرمایش از کف کوپل‌شده با کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت به منظور تأمین آسایش حرارتی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در سازه‌های اسکان موقت طراحی و در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به صورت دینامیکی شبیه‌سازی شد. جهت ارزیابی جامع عملکرد ترمودینامیکی این ساختار، سه شهر تبریز، تهران و یزد با ویژگی‌های اقلیمی کاملاً متمایز مبنای تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک‌ساله نشان داد که پیاده‌سازی این سیستم هیدرونیک، رفتار حرارتی سازه اسکان موقت را به طور ملموسی ارتقا می‌دهد؛ به‌طوری که در حالت پایه و بدون سیستم گرمایشی، دمای داخل واحد پیش‌ساخته اسکان موقت در فصول سرد (به‌ویژه در اقلیم تبریز) به نزدیکی صفر درجه سلسیوس افت می‌کرد، اما فعال‌سازی سیستم خورشیدی-تابشی پیشنهادی توانست دمای داخلی را در تمام طول شبانه‌روز در محدوده بهینه ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس کاملاً تثبیت کند.

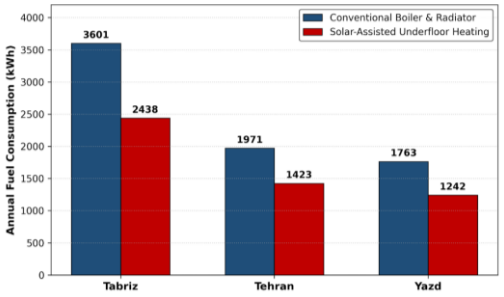
جدول ۴ برآورد تفصیلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه سامانه گرمایش از کف خورشیدی

Table 4 Detailed Breakdown of Initial Capital Expenditure (CAPEX) for the Solar-Assisted Radiant Floor Heating System

No.	System Component	Technical Specifications	Estimated Cost (Million Rials)
1	Flat-plate solar collectors	4 m² with aluminum mounting structure	240

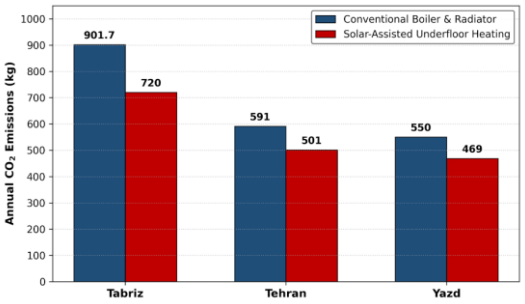
In Press, Pre-Proof Version

2	Insulated dual-jacket storage tank	36 L capacity with internal heat exchanger and fittings	85
3	Hydronic five-layer piping & floor insulation	107 m of PEX-AL-PEX tubing with 25 mm expanded polystyrene (EPS) insulation	160
4	Distribution manifold, flow meters, mixing valve & circulating pump	High-efficiency hydronic pump with central temperature control unit	120
5	Installation, pressure testing & commissioning	Underfloor layout execution and 6-hour hydrostatic pressure/leak test	90
Total	Total Initial Capital Cost	-	695



شکل ۱۱ مقایسه مصرف سوخت سالانه (گاز طبیعی) سیستم گرمایش از کف خورشیدی و سیستم رادیاتوری سنتی

Fig. 11 Comparison of annual fuel consumption (natural gas) of solar floor heating system and traditional radiator system



شکل ۱۲ نمودار مقایسه میزان انتشار سالانه گاز دی‌اکسید کربن در دو سیستم گرمایشی متفاوت

Fig. 12 Chart comparing annual carbon dioxide emissions in two different heating systems

از منظر مدیریت مصرف انرژی و شاخص‌های زیست‌محیطی نیز بکارگیری این فناوری پاک، دستاوردهای چشمگیری را به همراه داشت. محاسبات دینامیکی انجام‌شده مشخص کرد که بکارگیری سیستم گرمایش از کف خورشیدی منجر به کاهش مصرف گاز طبیعی سالانه در شهرهای تبریز، یزد و تهران به ترتیب به میزان ۳۲ درصد، ۲۹ درصد و ۲۷ درصد در مقایسه با سیستم رادیاتوری سنتی می‌شود. این کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی مستقیماً بر بهبود عملکرد زیست‌محیطی طرح اثرگذار بوده و میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن را در شهرهای تبریز، تهران و یزد به ترتیب به میزان ۲۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۴ درصد کاهش داده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اتکای صرف به سیستم‌های گرمایشی سنتی یا گرمکن‌های برقی پرمصرف در سازه‌های سبک اسکان موقت، نه تنها آسایش حرارتی مطلوبی فراهم نمی‌کند، بلکه بار شبکه برق آسیب‌دیده را افزایش داده و ریسک حوادث ثانویه را بالا می‌برد. از این رو، در طراحی و ساخت کانکس‌های امدادی، الگوهای پیش‌ساخته مجهز به لوله‌کشی‌های هیدرونیک کف به عنوان یک زیرساخت استاندارد قابل‌استفاده است و استفاده از سیستم‌های کلکتور خورشیدی صفحه تخت بر روی سقف این سازه‌ها امکان بهره‌برداری از انرژی پاک و کاهش هزینه‌های سوخت پشتیبان را فراهم می‌نماید.

حامی مالی: این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس های تأمین مالی در بخش های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است

نقش نویسندگان :محسن فلاحی (نویسنده اول): ایده پردازی، مفهومی‌سازی، انجام شبیه‌سازی‌های عددی، تحلیل و تفسیر نتایج، و نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله. دکتر مجید سیاوشی (نویسنده دوم/استاد راهنما): هدایت و نظارت بر روند پژوهش، بازبینی علمی و اصلاح نهایی متن مقاله. سپهر موسوی (نویسنده سوم): راهنمایی فنی و نظارت بر توسعه مدل عددی و اعتبارسنجی داده‌ها.

تعارض منافع: در این مقاله از نتایج حاصل از پایان‌نامه کارشناسی نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] Y. Wang, E. Long, and S. Deng, “Applying passive cooling measures to a temporary disaster-relief prefabricated house to improve its indoor thermal environment in summer in the subtropics,” Energy Build., vol. 139, pp. 456–464, 2017.

[2] H. Ghasemi Mobtaker, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, M. Matloobi, and M. Taki, “Estimation of Monthly Mean Daily Global Solar Radiation in Tabriz Using Empirical Models and Artificial Neural Networks,” J. Renew. Energy Environ., vol. 3, no. 3, pp. 21–30, Aug. 2016, doi: 10.30501/jree.2016.70089.

[3] A. A. Márquez, J. M. C. López, F. F. Hernández, F. D. Muñoz, and A. C. Andrés, “A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both,” Energy Build., vol. 138, pp. 621–629, 2017.

[4] M. Dongellini, S. Falcioni, and G. L. Morini, “Dynamic simulation of solar thermal collectors for domestic hot water production,” Energy Procedia, vol. 82, pp. 630–636, 2015.

[5] C. E. C. Nogueira, M. L. Vidotto, F. Toniazzo, and G. Debastiani, “Software for designing solar water heating systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 58, pp. 361–375, 2016.

[6] L. M. Ayompe and A. Duffy, “Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate, ,” vol. 58, no. 1–2. Elsevier, 2013, pp. 447–454.

[7] D. G. Gunjo, P. Mahanta, and P. S. Robi, “CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition, ,” vol. 106. Elsevier, 2017, pp. 24–36.

[8] I. Attar and A. Farhat, “Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate,” Sol. Energy, vol. 119, pp. 212–224, 2015.

[9] A. Al-Ugla, M. El-Shaarawi, S. Said, and A. Al-Qutub, “Techno-economic analysis of solar-assisted air-conditioning systems for commercial buildings in Saudi Arabia,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 54, pp. 1301–1310, 2016.

[10] R. Araya, F. Bustos, J. Contreras, and A. Fuentes, “Life-cycle savings for a flat-plate solar water collector plant in Chile,” Renew. Energy, vol. 112, pp. 365–377, 2017.

[11] R. Gao, A. Li, O. Zhang, and H. Zhang, “Comparison of indoor air temperatures of different under-floor heating pipe layouts,” Energy Convers. Manag., vol. 52, no. 2, pp. 1295–1304, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.027.

[12] A. Atienza Márquez, J. M. Cejudo López, F. Fernández Hernández, F. Domínguez Muñoz, and A. Carrillo Andrés, “A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both,” Energy Build., vol. 138, pp. 621–629, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.092.

In Press, Pre-Proof

[13] P. Feliński and R. Sekret, “Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system, ” vol. 152. Elsevier, 2017, pp. 558–567.
[14] A. Malekpour, R. Ahmadi, and S. Sadeghzadeh, “In situ latent thermal energy storage in underfloor heating system of building connected to the parabolic trough solar collector-an experimental study, ” vol. 44. Elsevier, 2021, p. 103489.
[15] E. Bellos, C. Tzivanidis, A. Prassas, and K. A. Antonopoulos, “Modelling of a Solar Assisted Floor Heating System with TRNSYS,” in Energy, Transportation and Global Warming, P. Grammelis, Ed., in Green Energy and Technology. , Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 355–369. doi: 10.1007/978-3-319-30127-3_28.
[16] S. Lu, Y. Zhao, K. Fang, Y. Li, and P. Sun, “Establishment and experimental verification of TRNSYS model for PCM floor coupled with solar water heating system,” vol. 140. Elsevier, 2017, pp. 245–260.
[17] M. T. Plytaria, E. Bellos, C. Tzivanidis, and K. A. “Antonopoulos, Financial and energetic evaluation of solar-assisted heat pump underfloor heating systems with phase change materials,” vol. 149. Elsevier, 2019, pp. 548–564.
[18] M. S. Karimi, F. Fazelpour, M. A. Rosen, and M. Shams, “Comparative study of solar-powered underfloor heating system performance in distinctive climates,” vol. 130. Elsevier, 2019, pp. 524–535.
[19] M. Rashad, A. Żabnieńska-Góra, L. Norman, and H. Jouhara, Analysis of energy demand in a residential building using TRNSYS, vol. 254. Elsevier, 2022, p. 124357.
[20] J. Li, G. W. Foden, S. K. W. Chow, and L. S. To, “Integrating sustainable and energy-resilient strategies into emergency shelter design,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 191, p. 113968, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113968
[21] R. Sarmento, M. Posani, P. Fernandes, A. M. Rodrigues, and M. G. Gomes, “Energy efficiency in modular emergency shelters: Impact of envelope finishings and shadowing,” Journal of Building Engineering, vol. 94, p. 110029, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110029
[22] M. Hosseini, S. H. Tasnim, and S. Mahmud, “Techno-economic assessment of a solar–ground source hybrid heat pump for radiant floor conditioning in a PCM-enhanced residential building,” Journal of Building Engineering, vol. 110, p. 114951, 2026. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114951
[23] R. Ramesh and H. Rehman, “Energy resilience in the built environment under disruptive events: hazard-, climate- and equity-informed systematic scoping review,” Energy and Buildings, vol. 370, p. 118111, 2026. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.118111

In Press, Pre-Proof Version