Cult Islam Archit Urban, 2024; 9 (2): 45-66

Tabriz Islamic Art University 1999

CULTURE OF ISLAMIC ARCHITECTURE AND URBANISM

DOI : https://dx.doi.org/10.61186/ciauj.9.2.45

The Culture of Islamic Architecture & Urbanism

Original Paper **Open Access**

Investigating the Effect of Phase Change Materials on Energy Consumption of Residential Buildings in Cold Climate

Soheila Abdizadeh[1] , Taha Sabaghian[2], Ahad Shah Hosseini[3*]

1. M.SC Architecture-Energy student, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
2. Ph.D. Candidate of Architecture, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assistant professor, Faculty of Design, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Received: 2024/09/3 **Accepted: 2024/10/24**

Abstract

The external wall of the building has always been discussed and investigated as one of the effective parameters for heat exchange and energy consumption. This study was conducted with the aim of investigating the energy consumption and the effect of phase change materials as insulation on the thermal behavior of the external walls of a residential building and determining the optimal melting temperature in the cold climate of Tabriz. To this end, three different melting temperatures of 18, 24 and 28 °C were selected. The research method employed was quantitative with a positivist approach. A five-story residential building in Tabriz was selected because of its availability. Analyzes and simulations were conducted with Grasshopper, Honeybee and Ladybug plugins. The results of the research showed that melting temperatures of 24 and 28 degrees in hot months reduced energy consumption by 31.93 and 20.48%, respectively. The reduction in energy consumption in cold months for melting temperatures of 24 and 28 degrees respectively was equal to 36.08 and 15%. The biggest reduction in energy consumption in all months of the year was related to the southern front. Thus, at a melting temperature of 18°C this decrease was 61.65% and 61.80% in hot and cold months respectively, at a temperature of 24°C it was 65.83% and 74.5% and at a temperature of 28 °C it was 62.53% and 61.94% compared to the base state. Therefore, considering the cold climate of Tabriz, the use of PCM with a melting temperature of 24°C is appropriate and economically viable.

Keywords: Phase Change Material (PCM), Residential Building, Energy Usage Reduction, Computer Based Simulation, Cold Climate.

*- Corresponding Author: ahad.shahhoseini@tabriziau.ac.ir

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

Introduction

Among the various energy storage technologies, thermal energy storage utilizing phase change materials (PCMs) has gained increasing attention due to its role in promoting energy conservation in buildings with thermal comfort (Li and Chen, 2019). Systematic reviews on latent heat storage in building components indicate that PCMs can not only ensure indoor comfort but also contribute to reducing thermal loads and achieving energy savings in buildings (Mavrigiannaki and Ampatzi, 2016). Research has shown that the placement of PCMs within building walls and the orientation of these walls significantly impact their thermal performance (Kim, Mae, and Choi, 2017; Jin et al., 2017; Saikia, Azad, and Rakshit, 2018).

This study examines the effect of phase change materials on energy consumption in various orientations of a residential building situated in a cold climate with three different melting temperatures over the course of the entire year.

Methodology

The present study, employs a quantitative methodology and follows a positivist approach. The statistical population consists of residential buildings located in Tabriz. The selected case study is a typical five-story residential building, randomly selected based on available resources. In the present study, the documents and maps of the studied building were analyzed and modeled using Rhino and Grasshopper software. In these simulations, the climatic data of Tabriz city were utilized, and the process of analyzing and evaluating energy consumption was conducted through Honeybee and Ladybug plugins.

The research process is as follows: initially, a thermal analysis of the building was conducted in its base state. Subsequently, analyses were conducted by considering PCMs with different melting temperatures of 18, 24, and 28°C in the building's exterior walls. Finally, a comparison and analysis were performed between two scenarios: the presence and absence of PCM, as well as the different melting temperatures. The geometric and thermal characteristics of the studied building, along with the details of its exterior envelope, are sequentially illustrated in Figures 1 to 3.

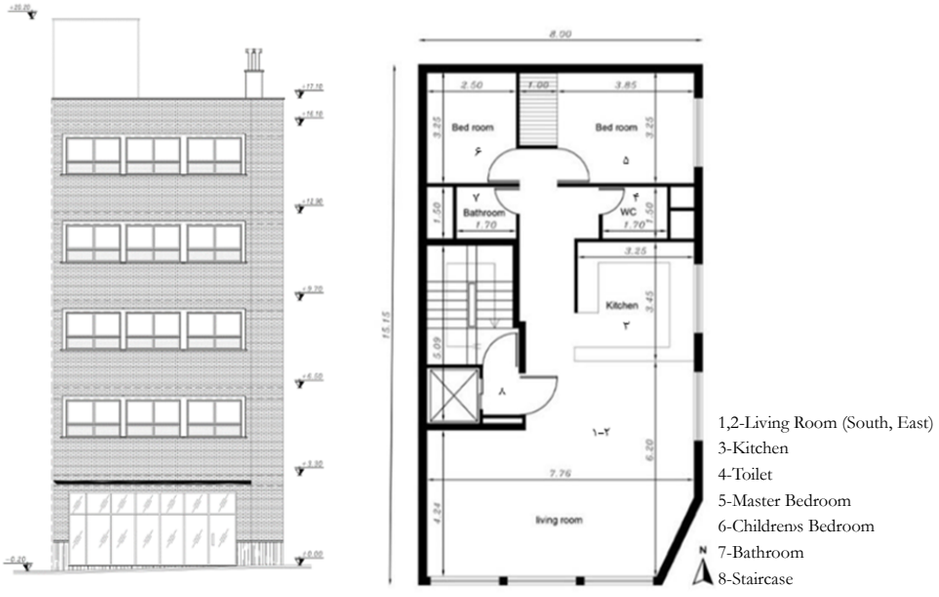


Fig 1: Right: The fifth floor plan and features of the spaces under study, Left: the building facade.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

Materials	Thermal conductivity (W/m°K)	Density (Kg/m³)	Specific heat (J/Kg°K)
Brick	1	1900	840
Cement	0.29	1442	840
Brick	0.8	1600	840
PCM	0.21	760	1200
Brick	0.8	1600	840
Mortar (Gypsum soil)	1.15	1000	840
Gypsum	0.7	1300	1000

Fig 2: Thermal specifications of the external wall layers.

Materials	thickness (meters)	
	Base	PCM
Brick	0.03	0.03
Cement	0.03	0.03
Brick	–	0.1
PCM	-	0.05
Brick	0.2	0.1
Mortar (Gypsum soil)	0.025	0.025
Gypsum	0.015	0.015

Fig 3: The thickness of the wall layers in the basic state and with PCM.

Results

Based on Figure 4, which illustrates the energy consumption during warm and cold months of the year for both the base and PCM scenarios with different melting temperatures, it was observed that PCM with a melting temperature of 18°C, despite its negative performance during the cold months (increasing energy consumption by 1.44% compared to the base), reduced energy consumption by 23.16% during the warm months. This finding indicates that its use in this climate is not economically viable. PCM with a melting temperature of 24°C performed better in both warm and cold months, reducing energy consumption by 31.93% in warm months and 36.08% in cold months. Although PCM with a melting temperature of 28°C performed better than the 18°C PCM during cold months, reducing energy consumption by 15% compared to the base, the reduction during warm months was only 20.48%. Therefore, PCM with a melting temperature of 24°C demonstrated the most favorable performance compared to PCMs with melting temperatures of 18°C and 28°C.

Figure 5 provides a comparative analysis of energy consumption variations across the scenarios under study. The results indicate that the most significant reduction in energy consumption occurred during the cold months of the year. Therefore, considering the cold climate of Tabriz, the use of PCM with melting temperatures of 24°C and 28°C can be both energy-efficient and economically viable. However, their application during the warm months of the year, especially in May and September, is not economically advantageous due to minimal changes in energy consumption compared to the base. Overall, it can be concluded that in the examined climate, the impact of PCM is more pronounced during the cold months than during the warm months.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

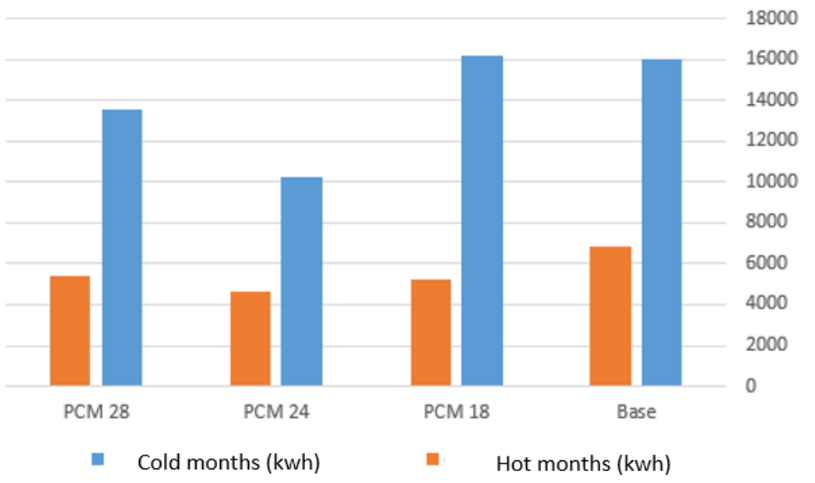


Fig 4: The amount of energy consumption in hot and cold months in both basic and PCM conditions in external walls on an annual basis.

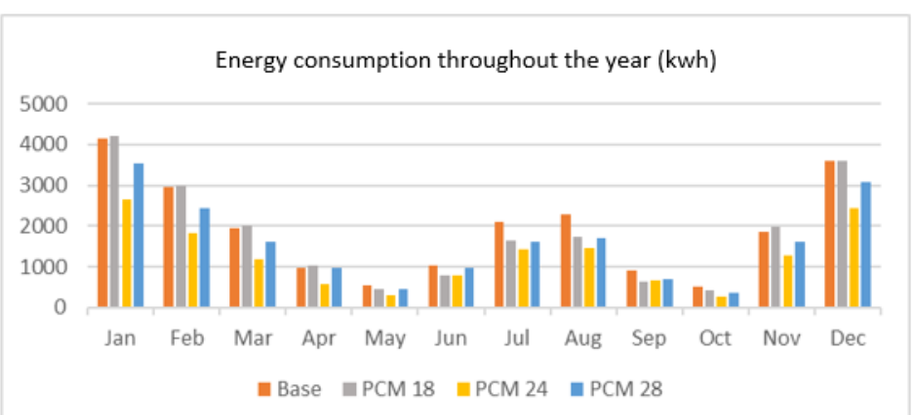


Fig 5: General comparison of energy consumption changes in the basic state and considering PCM with melting temperatures of 18, 24 and 28°C during the year.

Figure 6 examines the impact of PCM on the external walls of the building across all spaces uniformly, with the average energy consumption compared. It can be stated that PCM with a melting temperature of 24°C emerged as the most favorable option among the melting temperatures analyzed in this study, aligning well with the cold climate of this region.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

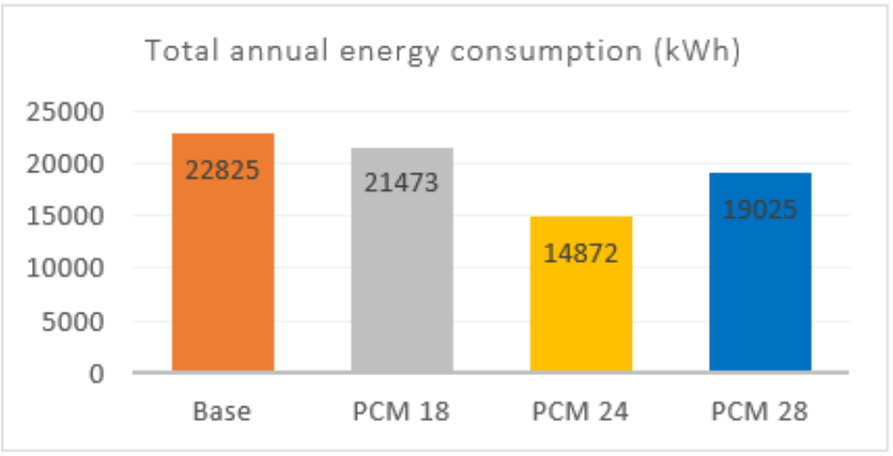


Fig 6: General comparison of the average energy consumption in all the investigated spaces.

Figures 7 and 8 respectively illustrate the energy consumption for both scenarios with different melting temperatures throughout the year and broken down by spaces.

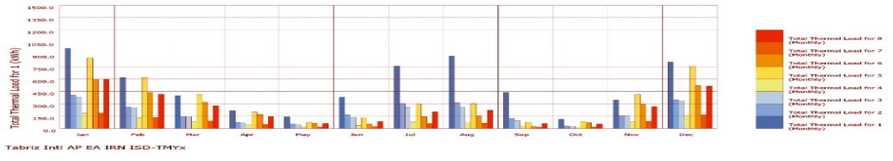


Fig 7: The amount of energy consumption by different spaces in the basic state during the year.

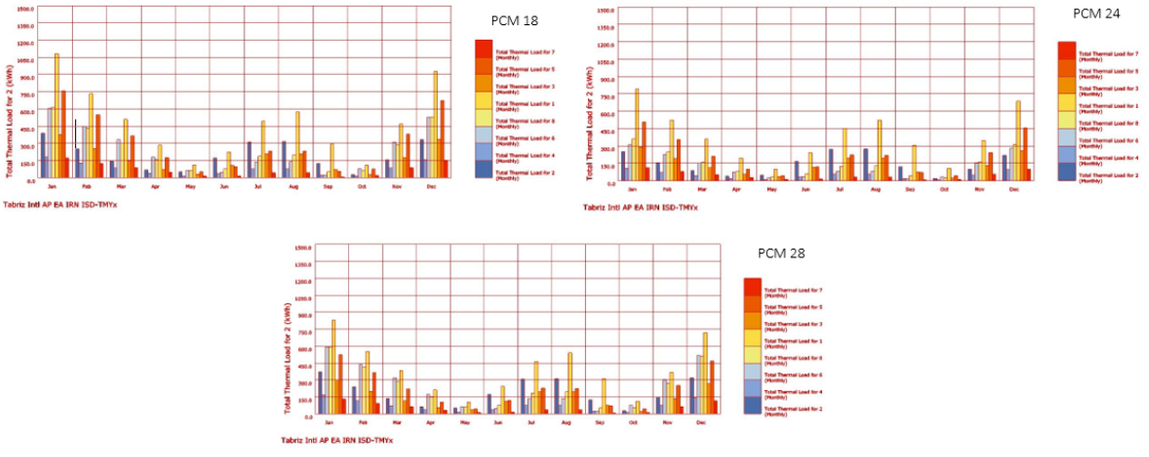


Fig 8: The amount of energy consumption by different spaces and considering PCM with different melting temperatures during the year.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

Among the melting temperatures examined, the greatest reduction in energy consumption throughout the year occurred on the southern façade. Even with a melting temperature of 18°C, the energy reduction for this façade was 61.65% during the warm months and 61.8% during the cold months. For a melting temperature of 24°C, the reduction was 65.83% during the warm months and 74.5% during the cold months. With a melting temperature of 28°C, the reduction was 62.53% during the warm months and 61.94% during the cold months, compared to the base. Therefore, the findings suggest that using PCM on the southern façade can contribute to energy savings and promote a more sustainable built environment. In Figure 9, the energy consumption for both the base and PCM scenarios is presented over the course of a year, broken down by the analyzed orientations.



Fig 9: Comparison of energy consumption in the basic state and with PCM in the investigated directions during the year.

Discussion

Results showed that PCM with a melting temperature of 18°C, despite a 23.16% reduction in energy consumption during the warm months, led to a 1.44% increase in energy consumption during the cold months compared to the base form. This part of the findings is consistent with the study by Xie and colleagues, who highlighted the unfavorable thermal performance of PCM across different seasons. Furthermore, the present study demonstrated that melting temperatures of 24°C and 28°C resulted in energy consumption reductions of 31.93% and 20.48%, respectively, during the warm months, and 36.08% and 15% during the cold months, which aligns with the studies by Sharma et al. and Jin et al. Considering the findings in the Results section, from the perspective of building façade efficiency, this study is in agreement with the research by Wang et al. and also with the study by Zhu et al. In support of these studies, the results of the present research indicated that the greatest reduction in energy consumption across all months of the year occurred on the southern façade. Specifically, with a melting temperature of 18°C, the reduction was 61.65% in the warm months and 61.80% in the cold months. For 24°C, it was 65.83% and 74.5%, and for 28°C, it was 62.53% and 61.94% compared to the base form. Therefore, given the cold climate of Tabriz, the use of PCM with a melting temperature of 24°C is appropriate and economically viable.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

فرهنگ معماری و شهرسازی اسلامی، ۱۴۰۳؛ ۹ (۲) :۶۶-۴۵

فرهنگ معماری و شهرسازی اسلامی

DOI : https://dx.doi.org/10.61186/ciauj.9.2.45

مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

بررسی تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد

سهیلا عبدی‌زاده[۱]، طاها صباغیان[۲]، احد شاه‌حسینی[۳]*

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
۲. دانشجوی دکتری معماری، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده طراحی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

دریافت : ۱۴۰۳/۶/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۳

چکیده

جدار خارجی ساختمان به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر تبادل حرارتی و میزان مصرف انرژی، همواره مورد بحث و بررسی بوده است. این پژوهش، باهدف بررسی مصرف انرژی و تأثیر مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان عایق بر رفتار حرارتی جدارهای خارجی یک ساختمان مسکونی و تعیین دمای ذوب بهینه در اقلیم سرد تبریز انجام شد. بدین‌منظور، سه دمای ذوب ۱۸، ۲۴ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. روش انجام پژوهش، کمّی با رویکرد اثبات‌گرایانه است. یک ساختمان مسکونی پنج طبقه در تبریز باتوجه‌به در دسترس بودن آن انتخاب شد. آنالیزها و شبیه‌سازی‌ها با افزونه‌های گرس‌هاپر، هانی‌بی و لیدی‌باگ صورت گرفت. نتایج نشان داد که PCM با دمای ذوب ۱۸ درجه باوجود کاهش مصرف انرژی ۲۳/۱۶ درصدی در ماه‌های گرم، منجر به افزایش ۱/۴۴ درصدی مصرف انرژی نسبت به حالت پایه در ماه‌های سرد شد. PCM با دماهای ذوب ۲۴ و ۲۸ درجه در ماه‌های گرم به‌ترتیب به میزان ۳۱/۹۳ و ۲۰/۴۸ درصد مصرف انرژی را کاهش دادند. کاهش مصرف انرژی در ماه‌های سرد برای PCM با دماهای ذوب ۲۴ و ۲۸ درجه به‌ترتیب برابر با ۳۶/۰۸ و ۱۵درصد بود. بیشترین کاهش مصرف انرژی در کل ماه‌های سال مربوط به جبهۀ جنوبی بود. به‌طوری‌که در PCM با دمای ذوب ۱۸ درجه این کاهش به‌ترتیب در ماه‌های گرم و سرد به‌ترتیب به میزان ۶۱/۶۵ و ۶۱/۸۰ درصد، در PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه به میزان ۶۵/۸۳ و ۷۴/۵ درصد و در PCM با دمای ذوب ۲۸ درجه به میزان ۶۲/۵۳ و ۶۱/۹۴ درصد نسبت به حالت پایه بود. ازاین‌رو، باتوجه‌به اقلیم سرد تبریز، استفاده از PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه مناسب و به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است.

واژگان کلیدی

مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، ساختمان مسکونی، کاهش مصرف انرژی، شبیه‌سازی کامپیوتری، اقلیم سرد.

* – نویسنده مسئول مکاتبات: ahad.shahhoseini@tabriziau.ac.ir

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

۱. مقدمه

همواره انرژی قابل توجهی در ساختمان برای گرمایش و سرمایش فضا مصرف می‌شود. دراین میان، پوسته ساختمان می‌تواند به شدت بر مصرف انرژی اثرگذار باشد (Wang et al., 2020). بدین منظور، توسعه و ارتقای فناوری‌ها، سیستم‌ها و شیوه‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه ضرورت دارد (Berardi and Soudian ,2019). در میان فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی، ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCMs)[۱] توجه فزاینده‌ای را به دلیل نقش آن در دستیابی به حفظ انرژی در ساختمان‌هایی با آسایش حرارتی به خود جلب کرده است (Li and Chen, 2019). این مواد، انرژی را به‌صورت گرمای نهان ذوب ذخیره می‌کنند که در طی فرایند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد (Jiang et al. ,2021). PCM ها در طول دوره کاربرد خود در دو فاز مایع و جامد هستند، ازاین‌رو باید در محفظه‌هایی قرار گیرند که مانع از هدررفت و جاری شدن فاز مایع آن‌ها شود. این مواد باید دارای خواص فیزیکی (چگالی بالا، تغییر حجم کم، تغییر فاز تجدیدپذیر)، شیمیایی (سازگار با مواد ساختاری سیستم موردنظر، پایداری شیمیایی، عدم سمی بودن، عدم خطر احتراق)، حرارتی (انتقال حرارت خوب، دمای تغییر فاز مناسب)، سینتیکی (عدم فوق تبرید، نرخ تبلور کافی) و اقتصادی (قابلیت بازیافت، قیمت مناسب، دسترسی آسان) باشند (Yang et al., 2018). رفتار حرارتی PCM ها در یک فصل، توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است (Li, Yu, and Liu, 2017; Zhou and Eames, 2019). بررسی‌های سیستماتیک درباره ذخیره‌سازی گرمای نهان در عناصر ساختمانی نشان می‌دهند که PCM می‌تواند علاوه‌بر تأمین آسایش فضای داخلی، در کاهش بارهای حرارتی و دستیابی به صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها نقش داشته باشد (Mavrigiannaki and Ampatzi,2016). از فاکتورهای کلیدی اثرگذار در طراحی برای این منظور، اقلیم و فصل است (Kenisarin and Mahkamov, 2016). برپایهٔ مطالعات انجام گرفته، کاربرد PCM در پوسته ساختمان فقط بر عملکرد حرارتی آن‌ها در یک فصل خاص متمرکز شده است و روشی برای تجزیه و تحلیل حرارتی PCM در طول سال ارائه نشده است؛ بنابراین، عملکرد آن در کل سال نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد. همچنین، عملکرد حرارتی این مواد ممکن است در فصول مختلف نامطلوب باشد (Xie et al., 2018). بر پایهٔ تحقیقات، محل PCM در جدارهای ساختمان و جهت دیوار تأثیرات زیادی بر بهبود عملکرد حرارتی آن‌ها دارد (Kim, Mae, and Choi, 2017; Jin et al., 2017; Saikia, Azad, and Rakshit, 2018). باتوجه‌به آنچه گفته شد، اثربخشی کاربرد PCM در زمینه‌های مختلف باید ارزیابی شود که این امر می‌تواند راهگشای مناسبی برای محققان و طراحان باشد تا منطقه و دوره مناسب برای ادغام PCM با ساختمان را بیابند.

پژوهش حاضر به مطالعهٔ تأثیر مواد تغییر فازدهنده بر میزان مصرف انرژی در تمامی جهت‌های یک ساختمان مسکونی واقع در اقلیم سرد با سه دمای ذوب مختلف و در کل سال پرداخته است. سئوال اصلی نگارندگان این بوده که استفاده از PCM در چه ماه‌هایی از سال در این اقلیم بر میزان مصرف انرژی تأثیرگذار است؛ دمای ذوب بهینه چند درجه است و عملکرد آن در کدام جهت مناسب‌تر است؟ موضوع بعدی، تعمق بیشتر درباره این سیستم نوین است که راه حلی مناسب برای عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی ارائه می‌دهد و منجر به بهبود عملکرد و افزایش اعتبار این سیستم‌ها می‌شود. باتوجه‌به ضرورت، می‌توان موضوع ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان‌ها را با رویکرد و شیوه‌های مختلف و کارآمدی مورد بررسی قرار داد، اما هدف نگارندگان، بررسی این موضوع در اقلیم سرد شهر تبریز، در فصول و دماهای ذوب مختلف و نیز بررسی عملکرد PCM در جهت‌های مختلف است. مقصود از بررسی دماهای ذوب مختلف، تعیین دمای ذوب بهینه PCMs برای ساختمان‌های مسکونی است تا میزان مصرف انرژی در این اقلیم کاهش یابد. با مطالعه تعدادی از اسناد و نقشه‌های ساختمان‌های مسکونی تبریز و برداشت داده‌های عددی آن‌ها، محققان، یک ساختمان مسکونی معمول پنج طبقه را به طور تصادفی و به روش در دسترس انتخاب کردند؛ سپس با روش کمّی – تحلیلی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار گرس‌هاپر[۲] به بررسی تأثیرگذاری این مواد پرداختند.

۲. پیشینه پژوهش

محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش مصرف انرژی

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

از جمله نگرانی‌های جوامع امروزی است؛ به‌طوری‌که افزایش مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش، توجه بسیاری از پژوهشگران را دررابطه‌با کاهش مصرف انرژی ساختمان، تأمین آسایش حرارتی افراد و نیز سیستم‌های ذخیره انرژی در سراسر جهان به خود جلب کرده است (Qu et al. ,2021). ازآنجاکه ساختمان‌های مسکونی بخش قابل‌توجهی از مصرف انرژی را به جهت تأمین آسایش حرارتی به‌خود اختصاص داده‌اند، بنابراین، تلاش‌های زیادی برای بهبود شرایط آسایش فضای داخلی و با مصرف انرژی کمتر صورت گرفته است. از موضوعات مورد بررسی در این خصوص، تأثیر جرم حرارتی در کاهش مصرف انرژی ساختمان و افزایش آسایش حرارتی است. جرم حرارتی به‌عنوان توانایی یک ماده برای جذب و ذخیره گرما از هوای محیط تعریف می‌شود. موادی با چگالی بالا مانند بتن و آجر برای تغییر دما به حرارت بیشتری نیاز دارند؛ بنابراین، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان موادی با جرم حرارتی بالا در نظر گرفت. در مقابل، چوب ماده‌ای با جرم حرارتی کمتر است زیرا توانایی نسبتاً کمی برای ذخیرهٔ گرما دارد. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که جرم حرارتی می‌تواند در برخی اقلیم‌ها انرژی گرمایشی و سرمایشی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (Albayyaa, Hagare, and Saha, 2019). طبق مطالعهٔ بگز و همکاران، کف‌پوش‌هایی مانند دال بتنی به‌دلیل جرم حرارتی بیشتر در اکثر اقلیم‌هایی که نیاز به گرمایش زمستانی دارند، ترجیح داده می‌شوند (Baggz and Mortensen ,2006). هرچند دیوارهای خارجی سهم عمده‌ای در عملکرد جرم حرارتی کلی یک ساختمان در طول زمستان و تابستان دارند اما بیشتر مطالعات، تأثیر جرم حرارتی در دیوارهای خارجی را بر میزان کل انرژی مصرفی در نظر نگرفته‌اند و توجه آن‌ها معطوف به سازه ساختمان بوده‌است. در این راستا، بامبروک و همکاران، با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، سناریوهای مختلفی را برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان بررسی کرده‌اند. هدف آن‌ها اندازه‌گیری عملکرد انرژی گرمایشی و سرمایشی بین خانه‌هایی با پوشش آجری استاندارد و پوشش آجری معکوس بوده است. این محققان دریافته‌اند که خانه‌هایی با پوشش آجری معکوس، انرژی کمتری نسبت به خانه‌هایی با پوشش آجری استاندارد مصرف می‌کنند. دلیل این امر عمل کردن لایه داخلی دیوار به‌عنوان جرم حرارتی بوده که دمای اتاق را تعدیل می‌کرده است (Bambrook, Sproul, and Jacob ,2009). در مطالعهٔ دیگری، آلبایا و همکاران، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی، دو نوع خانهٔ مسکونی مجزا را در سیدنی استرالیا، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه، سناریوهایی بر اساس پارامترهای مختلف مثل راهبردهای طراحی غیرفعال خورشیدی و بهره‌وری انرژی (PSEEDS)[۳]، دیوارهای خارجی و کف‌پوش‌های مختلف ساخته شد تا تأثیر آن‌ها بر میزان انرژی مصرفی کل، تعیین شود. نتایج این مطالعه به ترتیب بیانگر کاهش ۳۷ و ۳۶ درصدی میزان انرژی کل مصرفی در خانه‌هایی با استفاده از پوشش استاندارد فیبرو و آجری بود؛ بنابراین، از نتایج، اینگونه استنتاج می‌شود که ترکیب PSEEDS و جرم حرارتی بالاتر در ساختمان‌های مسکونی می‌تواند صرفه‌جویی قابل‌توجهی (به میزان ۵۸ درصد) در هزینه‌های انرژی داشته باشد (Albayyaa, Hagare, and Saha, 2019). دو گونه جرم حرارتی قابل شناسایی است: مواد سنتی و PCM. در این بین، PCM ها به‌عنوان جرم حرارتی نوین در ساخت‌وسازهای امروزی (به‌ویژه سبک‌سازی و بلندمرتبه‌سازی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات انجام شده در رابطه با PCM ها به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی به سال ۱۹۴۰میلادی برمی‌گردد که این موضوع در آن زمان از طرف محققان مورد توجه زیادی واقع نشد. از اوایل دههٔ ۱۹۷۰ میلادی و با مطرح شدن بحران انرژی، پژوهش‌های بسیاری دررابطه‌با این مواد و بهینه‌سازی خواص و کاربردهای مختلف در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی انجام گرفته‌اند. مطالعه فنگ و همکاران به عنوان یکی از پژوهش‌های برجسته در این حوزه، نشان می‌دهد که استفاده از دیوارهای حاوی PCM می‌تواند منجر به کاهش دمای داخلی تا ۲-۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دیوارهای معمولی شود (Feng et al., 2011). دمای ذوب یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در عملکرد PCM در ساختمان است. به‌طوری‌که دمای ذوب ایده‌آل آن باید در حدود ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از متوسط دمای اتاق حاوی PCM باشد (Zhang et al., 2006). با مروری بر تحقیقات انجام یافته، مشخص شد که PCM ها با دمای ذوب ۳۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد، پتانسیل لازم را برای تأمین آسایش حرارتی دارند (Sharma et al.,2013). استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

سطوح داخلی اتاق می‌تواند باعث ایجاد اختلاف زمانی بین بیشینه مصرف انرژی و بیشینه بار گرمایی در طول شبانه‌روز شود. در این راستا و به‌منظور افزایش جرم حرارتی و به‌طبع آن کاهش اوج نوسانات، عملکرد حرارتی جدارهای ساختمانی و موقعیت جرم حرارتی در جداره مهم است. برای مثال، Meng و همکاران، رفتار حرارتی یک اتاق با دو PCM و دارای دماهای ذوب مختلف را با یک اتاق بدون PCM در هر دو فصل تابستان و زمستان مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در تابستان و در طی روز، اتاق دارای PCM با افت دمایی در حدود ۴/۲۸ تا ۷/۷ درجه سانتی‌گراد مواجه شد. نوسان دمای هوای داخل نیز به میزان ۶۷/۸–۲۸/۸ درصد کاهش یافت. در زمستان و در طی شب، افزایش دما برای اتاق با PCM برابر با ۶/۹۳ تا ۹/۴۸ درجه سانتی‌گراد بود؛ بنابراین، اتاق با PCM رفتار حرارتی بهتری را در تابستان و زمستان داشت (Meng, Yu, and Zhou ,2017). Zhu و همکاران، در مطالعه‌ای عملکرد حرارتی ساختمان ترکیب شده با مواد تغییرفازدهنده تثبیت شده با دولایه[۴] را در فصول تابستان و زمستان مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، دو اتاق آزمایشی با ویژگی‌های ساختاری یکسان در ووهان انتخاب شدند که یکی از این اتاق‌ها دارای SSPCM در دیوار جنوبی بود. نتایج آزمایش نشان داد که اتاق دارای PCM می‌تواند از بیش‌گرمایی در تابستان و بیش‌سرمایی در زمستان در مقایسه با اتاق مرجع جلوگیری کند (Zhu et al. ,2019). Xie و همکاران، در مطالعهٔ دیگری، عملکرد حرارتی پنج دیوار نمونه دارای PCM را بر اساس شبیه‌سازی عددی در جدار خارجی یک اتاق با تهویه مطبوع در پکن موردمطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مصرف انرژی ساختمان در صورت استفاده از PCM با محدوده تغییر فاز بالاتر، ۱۰۳ کیلوژول کمتر از دیوار مرجع در ماه ژوئن بود، درحالی‌که در ماه دسامبر، مصرف انرژی ۷۲ کیلوژول بیشتر بود؛ بنابراین، عملکرد حرارتی دیوار PCM ممکن است در فصول مختلف نامطلوب باشد. در این مطالعه، با استفاده از نسبت حرارتی، ماه‌های مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی دیوار PCM در مناطق مختلف چین تعیین شد. نتایج نشان داد که ماه‌های مؤثر برای بهینه‌سازی در پکن، ژوئن و سپتامبر، در هاربین، جولای و آگوست، در شانگهای، ژوئن، جولای و سپتامبر و در گوانگژو و هایکو، به ترتیب مِی و آوریل هستند (Xie et al., 2018). Kim و همکاران، از طریق شبیه‌سازی بار گرمایش سالانه با نصب یک مادهٔ تغییرفازدهندهٔ تثبیت شده روی کف، دیوارها و سقف ساختمان‌های مختلف، اثرات اعمال آن را بر تثبیت دمای داخلی اتاق و کاهش بار گرمایشی در هفت‌اقلیم مختلف ژاپن موردمطالعه قرار دادند. ساختمان‌های هدف، با استفاده از یک‌خانهٔ استاندارد در ژاپن، به‌عنوان نوع A (بدون PCM، مرجع) نوع B (فقط کف دارای PCM) و نوع C (کف، دیوارها و سقف دارای PCM) طبقه‌بندی شدند. نوع B و C دارای مقدار یکسانی از PCM بودند. نتایج نشان داد که با گسترش منطقهٔ نصب PCM، ناحیهٔ جذب تابش خورشیدی افزایش یافت. در نتیجه با کاهش زمان ذوب و انجماد PCM ذخیرهٔ حرارتی آن افزایش یافت و منجر به کاهش نوسان دمای روزانه و افزایش بازده PCM شد. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که حتی با وجود PCM یکسان در ساختمان، عملکرد ذخیره‌سازی گرما بسته به منطقه و موقعیت نصب تغییر می‌کند (Kim, Mae, and Choi ,2017). Jin و همکاران یک مدل عددی را برای تخمین مکان‌های بهینه PCM در دیوارهای ساختمان، در طی فصول مختلف، اقلیم نانجینگ چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در دمای ذوب ۲۸–۲۶ درجه سانتی‌گراد، مکان‌های بهینه برای بهار، تابستان، پاییز، زمستان و یک سال کامل به ترتیب در موقعیت‌های ۸/۱۶، ۲/۱۶، ۵/۱۶، ۸/۱۶ و ۴/۱۶ در دیوار بودند. بااین‌حال،PCM تنها در تابستان به دلیل دمای بالای تغییر فاز آن، اثرات بسیار خوبی داشت. همچنین مشخص شد که محدودهٔ دمایی تغییر فاز بهینه برای بهار، تابستان، پاییز، زمستان و یک سال کامل ۲۶–۲۴، ۲۸–۲۶، ۲۶–۲۴، ۲۲–۲۰ و ۲۶–۲۴ درجه سانتی‌گراد است. براین‌اساس، مکان‌های بهینه PCM در موقعیت‌های ۰,۱۶، ۲,۱۶، ۱,۱۶، ۳,۱۶ و ۳,۱۶ دیوار بودند (Jin et al. ,2017). Wang و همکاران، عملکرد تخته‌های دیوارنمونه به صورت صفحه‌ای دارای PCM که به عنوان تخته‌های دیوار شناخته می‌شود را در ساختمان‌های سبک‌وزن با تهویهٔ مطبوع در شانگ‌های چین با تابستان‌های خیلی گرم و زمستان‌های سرد با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی پلاس در اتاق‌های مختلف طبقهٔ میانی موردمطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تخته‌های دیوار PCM با کاهش

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

نوسانات دما، آسایش داخلی را در هر دو فصل تابستان و زمستان بهبود می‌بخشند. با این‌حال، PCM در زمستان به دلیل اثرات خورشیدی متفاوت در هر فصل، کارایی بالاتری نسبت به تابستان داشت. همچنین، دمای ذوب بهینه برای اتاق‌های مختلف بین ۲۶-۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که دمای آسایش انسان است و گنجاندن آن در دیوار جنوبی به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است (Wang et al. ,2020). بر اساس مطالعات، با تغییر جهت دیوار، میزان تابش خورشیدی بر روی دیوار متفاوت می‌شود و بر عملکرد حرارتی PCM تأثیر می‌گذارد. در این راستا، تأثیر PCM های تعبیه شده در یک دیوار بتنی در اقلیم گرم و خشک واقع در جنوب شرق آسیا توسط Saikia و همکاران، با جهت‌گیری‌های مختلف دیوار PCM موردمطالعه قرار گرفت. جهت‌گیری بهینه دیوار PCM برای هر یک از دو PCM موردمطالعه (ZNH و اسید کاپریک) در شرایط جغرافیایی معین بدین صورت بود. ZNH، عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به اسید کاپریک نشان داد و در جهت‌های شمال شرقی، جنوب شرقی و جنوب غربی مؤثرترین عملکرد را داشت؛ درحالی‌که برای اسید کاپریک، جهت‌های جنوبی، شمالی و جنوب شرق مناسب‌ترین جهت‌ها بود. همچنین، این مطالعه نشان داد که علاوه بر ویژگی‌های ترموفیزیکی PCM و پارامترهای اقلیمی، باید بر جهت‌گیری دیوار PCM برای عملکرد مؤثر آن در هر اقلیم خاص تأکید شود (Saikia, Azad, and Rakshit, 2018). Pirasaci و همکاران، نیز مطالعه‌ای را با هدف بررسی وضعیت فازی و نحوهٔ ذخیرهٔ حرارت یک لایهٔ PCM ادغام شده در دیوارهای خارجی یک آپارتمان مسکونی در طی فصل گرما انجام دادند که پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی در طی فصل زمستان نیز مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیاز به انرژی گرمایشی سالیانه، با افزودن یک لایه PCM در قسمت بیرونی حدود ۶ درصد کاهش یافت اما PCM مورد استفاده در بیشتر فصول گرم در فاز جامد بود. در نتیجه، این مطالعه مشخص کرد که هرچند نیاز به انرژی گرمایشی در زمستان با ادغام یک لایه PCM به جدار خارجی دیوار، کاهش می‌یابد اما ادغام آن به دلیل عدم تغییر فاز PCM مناسب نیست و استفاده از آن به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد (Pirasaci, 2020).

۳. روش پژوهش

تحقیق حاضر، به لحاظ روش‌شناسی، از نوع کمّی و با رویکردی اثبات‌گرایانه است. در پژوهش کمّی که هدف آن تعمیم‌پذیری، پیش‌بینی و تبیین علت است، به شمارش و اندازه‌گیری موارد و خصیصه‌های موردمطالعه پرداخته می‌شود. روند کار، شروع با فرضیه یا نظریه است که نمونه‌گیری، دستکاری و کنترل آزمودنی‌ها در آن صورت می‌گیرد و از ابزارهای کمّی برای اندازه‌گیری و انجام آزمایش استفاده می‌شود و نوع داده‌ها، عدد و آمار است. مدل اصلی تحقیق در رویکرد اثبات گرایی، مدل فرضیه‌ای – قیاسی است که هدف اصلی این مدل، کشف روابط علّی بین پدیده‌های قابل‌مشاهده است (Mirmoghtadai, GanjiZadeh, and Abadi, 2018). جامعهٔ آماری، ساختمان‌های مسکونی واقع در منطقهٔ ده شهر تبریز است. این شهر در شمال‌غرب ایران، با وسعتی معادل ۳۲۴ کیلومتر مربع در ۵۰ کیلومتری قلهٔ سهند واقع شده است. از ویژگی‌های اقلیمی تبریز، زمستان‌های طولانی و به طور کلی تابستان‌های معتدل آن است و دمای حداقل، میانگین و حداکثر هوا در طول سال در آن به ترتیب ۱۵-، ۱۳ و ۳۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداقل ساعات آفتابی به میزان ۱۱۴/۳ساعت در آبان ماه و حداکثر آن ۳۵۳/۸ ساعت در مرداد ماه اتفاق می‌افتد. مقدار بارندگی در تابستان‌ها کم و در زمستان‌ها اکثراً به‌صورت برف است و به‌طورکلی بهار در این منطقه، کوتاه است و به عنوان فصل گذرا، تنها زمستان و تابستان را از هم جدا می‌سازد. با بررسی اطلاعات دما در شهر تبریز مشخص می‌شود که ۶۲ درصد از اوقات، در طی سال هوا سرد و بسیار سرد، ۱۷ درصد از اوقات، هوا گرم و ۲۱ درصد از مواقع، هوا معتدل است (Ardestani and Ayatollahi, 2017). نمونهٔ موردی انتخابی، یک ساختمان مسکونی معمول پنج طبقه است که به طور تصادفی و بر اساس منابع در دسترس انتخاب شد. با توجه به سادگی حجم و تطابق با معماری رایج شهر از لحاظ فرم و مصالح ساخت ، این ساختمان انتخاب شد همچنین، نمونه مورد بررسی به دلیل دسترسی به اطلاعات کامل درباره برنامه زمانی و ساعات استفاده از فضای ساختمان و تعداد ساکنان، انتخاب شد؛ زیرا این عوامل جزء پارامترهای اساسی در فرآیند شبیه‌سازی هستند. در این پژوهش، گردآوری اطلاعات در چند بخش صورت پذیرفت. در راستای هدف

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

پژوهش، نخست مروری بر منابع علمی موجود در خصوص PCM ها و نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی انجام گرفت. در پژوهش حاضر و باتوجه‌به مطالعات انجام شده در این حیطه (Fadaee and Ildarabadi, 2019)، از افزونهٔ الگوریتمیک گرس‌هاپر و افزونه‌های تحلیل انرژی هانی‌بی و لیدی‌باگ استفاده شد. گرس‌هاپر یک زبان برنامه‌نویسی بصری است که در برنامه راینو[۵] اجرا می‌شود. از عمده دلایل انتخاب این نرم‌افزار در پژوهش حاضر، قدرتمند بودن موتور تحلیل، در دسترس بودن اطلاعات معتبر آب‌وهوایی و همچنین قابلیت شبیه‌سازی PCMs در نرم‌افزار است. شایان ذکر است که پلاگین‌های لیدی‌باگ[۶] و هانی‌بی[۷] بر روی افزونهٔ گرس‌هاپر اجرا می‌شوند که در مطالعه حاضر، مورد استفاده قرار گرفتند. بنابر تحقیقات انجام یافته، لیدی‌باگ نوعی طراحی همساز با اقلیم ارائه می‌دهد که در ابتدا اطلاعات آب‌وهوایی اقلیم تبریز وارد این افزونه شد. با استفاده از این پلاگین، گرس‌هاپر به موتورهای شبیه‌سازی چون انرژی پلاس[۸]، رادیانس[۹] و دی‌سیم[۱۰] متصل می‌شود و امکان تحلیل انرژی و شبیه‌سازی نور روز فراهم می‌شود. همچنین، هانی‌بی، پلاگینی است که با اتصال به انرژی‌پلاس، دی‌سیم و اوپن استودیو[۱۱] امکان انجام طیف گسترده‌ای از تحلیل‌ها از جمله روشنایی و نور روز، مدل‌سازی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، شبیه‌سازی حرارتی و بارهای ساختمان، ارزیابی هزینه‌ها را فراهم می‌کند. همچنین این پلاگین در طراحی جزئیات اجرایی جداره‌ها، نوع سیستم مکانیکی، برنامه زمان‌بندی و نوع فعالیت نیز استفاده می‌شود (Roudsari, Pak, and Smith,2013). باتوجه‌به آنچه گفته شد، در پژوهش حاضر، اسناد و نقشه‌های ساختمان موردمطالعه برداشت شد و در نرم‌افزار راینو و گرس‌هاپر مدل‌سازی گردید. در این پژوهش، از داده‌های آب‌وهوایی شهر تبریز برای شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان با استفاده از پلاگین‌های هانی‌بی و لیدی‌باگ بهره گرفته شد. در این شبیه‌سازی‌ها، پارامترهایی مانند تعداد ساکنین (خانواده‌ای ۴ نفره) و الگوی مصرف انرژی در طول سال در نظر گرفته شدند. ابتدا، تحلیل حرارتی ساختمان در حالت پایه انجام شد. سپس، تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) با دمای ذوب متفاوت (۱۸، ۲۴ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد) در جداره‌های خارجی ساختمان بر عملکرد انرژی بررسی شد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه شدند تا تأثیر PCM بر کاهش مصرف انرژی مشخص شود.

۳-۱. محدوده و ویژگی‌های هندسی ساختمان مورد مطالعه

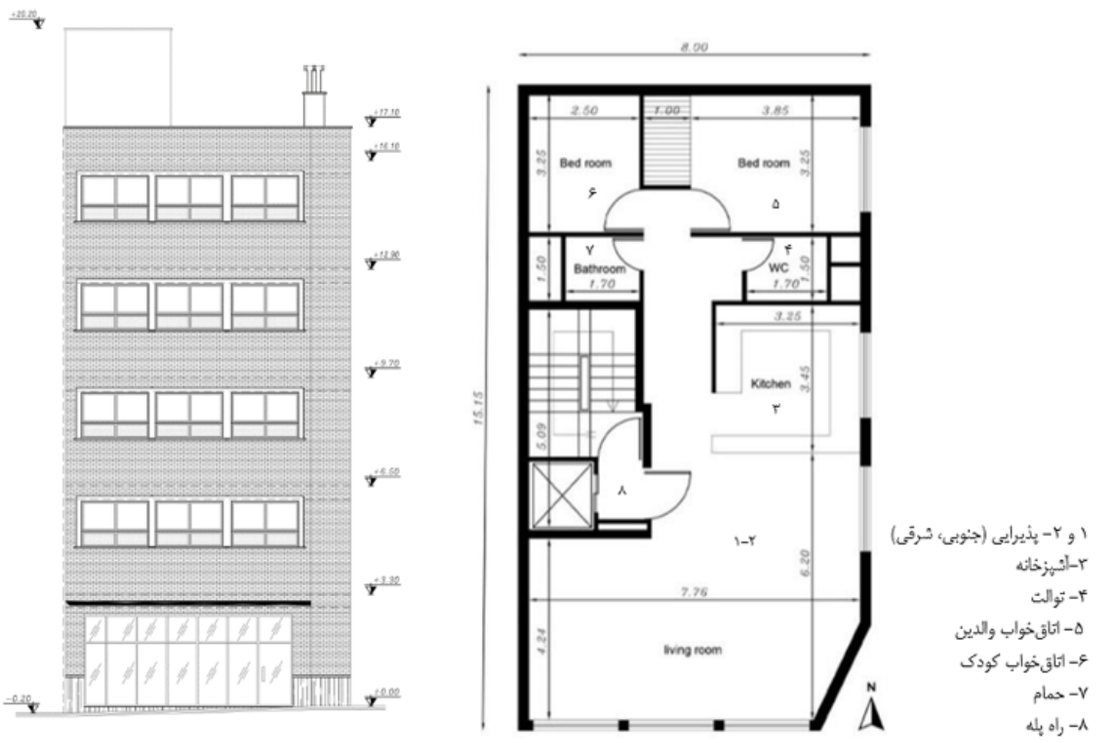
نمونه مورد بررسی در این پژوهش، یک ساختمان مسکونی پنج طبقه (چهارطبقه و یک طبقه پارکینگ) در شهر تبریز است که نمایندهٔ معماری مسکونی رایج در این شهر می‌باشد. کلیهٔ بررسی و تحلیل‌ها بر روی طبقه پنجم ساختمان انجام شده است.

ساختمان موردنظر از دو طرف دارای ورودی بوده و ورودی اصلی آن از جبههٔ شرقی است. مساحت مفید بنا ۱۰۰ مترمربع و ارتفاع کلی ساختمان تا سقف طبقهٔ پنجم ۱۶/۱۰ متر است. ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر و ضخامت سقف ۰/۴۰ متر است. شکل ۱، پلان طبقه پنجم ساختمان و مشخصات فضاهای مورد بررسی را به همراه نمای اصلی ساختمان مذکور، نشان می‌دهد.

۳-۲. ویـــژگی‌های حرارتی ساختمان و جزئیات جدار خارجی آن

با توجه به تفاوت خواص ترموفیزیکی مصالح ساختمانی، در این پژوهش، تأثیر سه خاصیت ترموفیزیکی مصالح یعنی چگالی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی بر عملکرد انرژی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. جدار خارجی ساختمان که از چندین لایه تشکیل شده است به ترتیب از خارج به داخل شامل آجرنما، سیمان، آجر، خاک-گچ و گچ است. لایه‌های این جداره در صورت وجود PCM از خارج به داخل به ترتیب آجرنما، سیمان، آجر، PCM، آجر، خاک-گچ و گچ را شامل می‌شود. لازم به ذکر است که سیستم گرمایشی ساختمان، پکیج است و از کولر آبی به عنوان سیستم سرمایشی و همچنین تهویهٔ طبیعی در فصول گرم سال استفاده می‌شود. مشخصات حرارتی جدار خارجی ساختمانِ مورد بررسی، در جدول ۱ و ضخامت لایه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]



شکل ۱: سمت راست: پلان طبقه پنجم و مشخصات فضاهای مورد بررسی، سمت چپ: نمای اصلی ساختمان (منبع: نگارندگان)
Fig 1: Right: the plan of the fifth floor and the characteristics of the investigated spaces, Left: the main view of the building

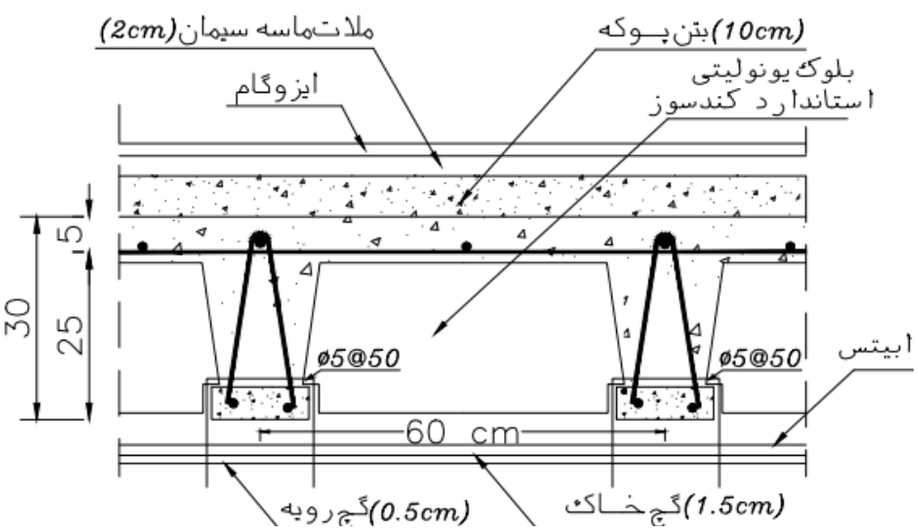
جدول ۱: ویژگی‌های حرارتی لایه‌های جدارهای بیرونی (Lee et al. 2018; Fonseca, Mayor, and Campos, 2018).
Table 1: Thermal specifications of the external wall layers

مصالح	ضریب هدایت حرارتی (W/m°K)	چگالی (Kg/m^3)	گرمای ویژه (J/Kg°K)
آجرنما	۱	۱۹۰۰	۸۴۰
سیمان	۰/۲۹	۱۴۴۲	۸۴۰
آجر	۰/۸	۱۶۰۰	۸۴۰
PCM	۰/۲۱	۷۶۰	۱۲۰۰
آجر	۰/۸	۱۶۰۰	۸۴۰
خاک- گچ	۱/۱۵	۱۰۰۰	۸۴۰
گچ	۰/۷	۱۳۰۰	۱۰۰۰

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

جدول ۲: ضخامت لایه‌های جدار در حالت پایه و دارای PCM
The thickness of the wall layers in the basic state and with PCM :Table 2

مصالح	ضخامت (متر)	
	پایه	PCM
آجرنما	۰/۰۳	۰/۰۳
سیمان	۰/۰۳	۰/۰۳
آجر	–	۰/۱
PCM	-	۰/۰۵
آجر	۰/۲	۰/۱
خاک- گچ	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵
گچ	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵



شکل ۲: جزئیات سقف طبقهٔ پنجم
Fig 2: Roof details of the fifth floor

۳-۳. تعداد افراد ساکن در ساختمان

در این مطالعه، تعداد افراد ساکن در فضا در طی ساعت‌های مختلف روز با در نظر گرفتن فعالیت‌های مختلف ساکنان آن مدنظر قرار گرفت. تعداد افراد خانوار در طبقهٔ مورد بررسی، ۴ نفر بود. فرض بر این شد که حضور هر نفر، به صورت تقریبی معادل ۲۵ درصد از فضا را اشغال می‌کند. بنابراین، در صورت حضور تمام افراد خانوار، درصد اشغال فضا معادل با ۱۰۰ درصد می‌شود. شایان ذکر است که این درصد برای پژوهش حاضر در طی سال، ثابت فرض شد که جزئیات آن در جدول شماره ۳ ارائه شده است. همچنین، در برنامهٔ زمان‌بندی مورد مطالعه، روزهای تعطیل و فصل تابستان نیز مورد بررسی قرار گرفت و در فرایند آنالیز گنجانده شد.

جدول ۳: درصد حضور افراد در فضا در طی سال و به‌صورت ساعتی
Table 3: The percentage of people in space during the year and hourly

زمان	درصد اشغال
۹:۰۰–۲۰:۰۰	۱۰۰ درصد
۱۰:۰۰–۹:۰۰	۷۵ درصد
۱۸:۰۰–۱۰:۰۰	۵۰ درصد
۲۰:۰۰–۱۸:۰۰	۷۵ درصد

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

٤. یافته‌های پژوهش

دو عامل اصلی که به طور مستقیم بر روی بهره‌وری انرژی در ساختمان تأثیر می‌گذارند عبارت هستند از: اتلاف حرارت از طریق جداره‌های خارجی ساختمان و ورود گرمای ناخواسته به آن. ساختمان مورد بررسی، ابتدا در وضعیت پایه و سپس با درنظرگرفتن PCM با دماهای ذوب ۱۸، ۲۴ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در پژوهش حاضر، به‌منظور تأمین آسایش حرارتی افراد و کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان، باید میزان نیاز افراد به سرمایش و گرمایش مکانیکی کاهش پیدا کند.

در جدول شماره ۴، ماه‌های گرم سال با رنگ قرمز و ماه‌های سرد، به رنگ آبی مشخص شده‌اند. همچنین، میزان کل مصرف انرژی (سرمایش، گرمایش) در تمام طول سال برای فضاهای مختلف ساختمان مورد بررسی قرار گرفته‌است. فضاها به ترتیب شماره‌گذاری شامل ۱ و ۲- پذیرایی (جنوبی، شرقی)، ۳-آشپزخانه، ۴- توالت، ۵- اتاق‌خواب والدین، ۶- اتاق‌خواب کودک، ۷- حمام و ۸- راه‌پله، هستند.

شکل ۳ بیانگر میزان مصرف انرژی در ماه‌های گرم و سرد سال، در هر دو وضعیت پایه و PCM با دماهای ذوب مختلف است. باتوجه‌به آن، مشاهده می‌شود که PCM با دمای ذوب ۱۸ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش ۲۳/۱۶ درصدی مصرف انرژی در مقایسه با حالت پایه در ماه‌های گرم، شده است. با این حال، این PCM در ماه‌های سرد سال، عملکرد منفی داشته و مصرف انرژی را نسبت به حالت پایه به میزان ۱/۴۴ درصد افزایش داده است. نتایج این یافته نشان می‌دهند استفاده از این نوع PCM در اقلیم مورد مطالعه مقرون به صرفه نیست. PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه سانتی‌گراد، در ماه‌های گرم و سرد عملکرد بهتری داشته؛ به‌طوری‌که مصرف انرژی را در ماه‌های گرم به میزان ۳۱/۹۳ درصد و در ماه‌های سرد به میزان ۳۶/۰۸ درصد کاهش داده است. هرچند PCM با دمای ذوب ۲۸ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با PCM با دمای ذوب ۱۸ درجه سانتی‌گراد در ماه‌های سرد دارای عملکرد مطلوب‌تری بوده و منجر به کاهش ۱۵ درصدی میزان مصرف انرژی نسبت به حالت پایه شده است؛ بااین‌حال، در ماه‌های گرم این کاهش ۲۰/۴۸ درصد بوده است. از این‌رو، PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به PCM با دماهای ذوب ۱۸ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد مطلوب‌ترین عملکرد را داشته‌است. باتوجه‌به نتایج حاصل از پژوهش، می‌توان اینگونه استنتاج کرد که در مجموع و بدون تفکیک ماه‌های گرم و سرد سال، میزان مصرف انرژی برای PCM با دمای ذوب ۱۸ درجه سانتی‌گراد برابر با ۵/۹۲ درصد، PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه سانتی‌گراد برابر با ۳۴/۸۴ درصد و PCM با دمای ذوب ۲۸ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۶/۶۴ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. طبق مطالعه Xie و همکاران، عملکرد حرارتی PCM در فصول مختلف می‌تواند نامطلوب باشد (Xie et al., 2018). شکل ۴، مقایسه‌ای از میزان تغییرات مصرف انرژی را در وضعیت‌های مورد بررسی، ارائه می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از این شکل نشانگر این است که بیش‌ترین کاهش مصرف انرژی در ماه‌های سرد سال به‌ویژه دسامبر (۱۰ آذر الی ۱۰ دی)، ژانویه (۱۱ دی الی ۱۱ بهمن)، فوریه (۱۲ بهمن الی ۹ اسفند) و مارس (۱۰ اسفند الی ۱۱ فروردین) اتفاق افتاد؛ بنابراین با درنظرگرفتن اقلیم سرد تبریز، استفاده از PCM با دماهای ذوب ۲۴ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌تواند هم به لحاظ مصرف انرژی و هم به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد؛ بااین‌حال، استفاده از آن در ماه‌های گرم سال به‌ویژه می (۱۱ اردیبهشت الی ۱۰ خرداد) و سپتامبر (۱۰ شهریور الی ۸ مهر) از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست؛ زیرا در این ماه‌ها کم‌ترین تغییر در میزان مصرف انرژی در مقایسه با وضعیت پایه وجود دارد. به‌طور کلی، می‌توان اذعان داشت که در اقلیم مورد بررسی تأثیر PCM در ماه‌های سرد سال نسبت به ماه‌های گرم بیشتر است.

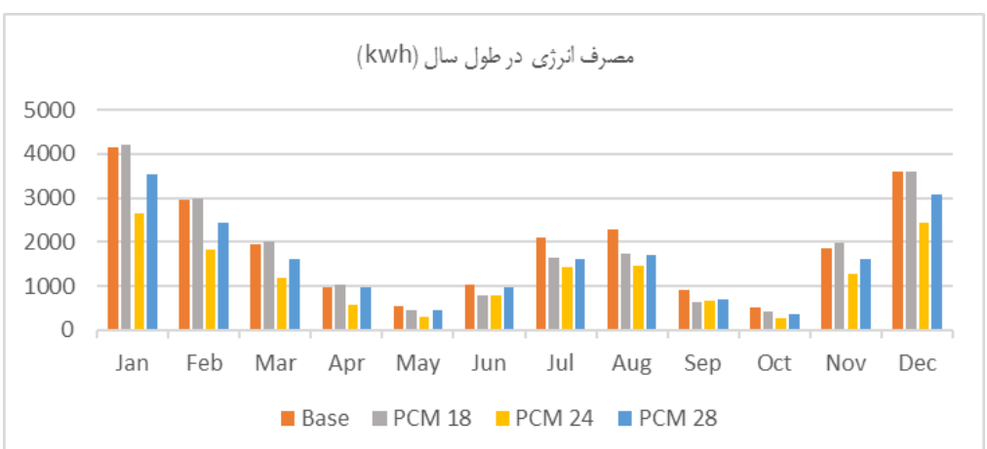
جدول ۴: ماه‌های گرم و سرد سال
Table 4: Hot and cold months of the year

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec

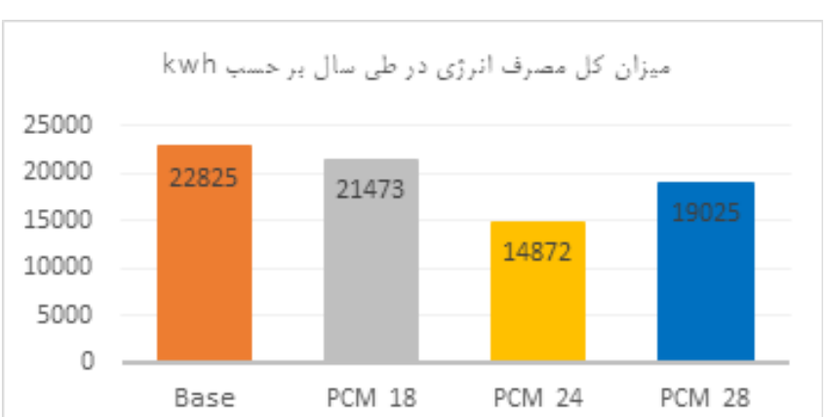
[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]



شکل ۳: میزان مصرف انرژی در ماه‌های گرم و ماه‌های سرد در هر دو وضعیت پایه و PCMدر جدارهای خارجی – سالانه
Fig 3: The amount of energy consumption in hot and cold months in both basic and PCM conditions in external walls on an annual basis



شکل ۴: مقایسه کلی میزان تغییرات مصرف انرژی در وضعیت پایه و با درنظرگرفتن PCM با دماهای ذوب ۱۸، ۲۴ و ۲۸ درجه سانتی‌گراد در طی سال
Fig 4: General comparison of energy consumption changes in the basic state and considering PCM with melting temperatures of 18, 24 and 28°C during the year

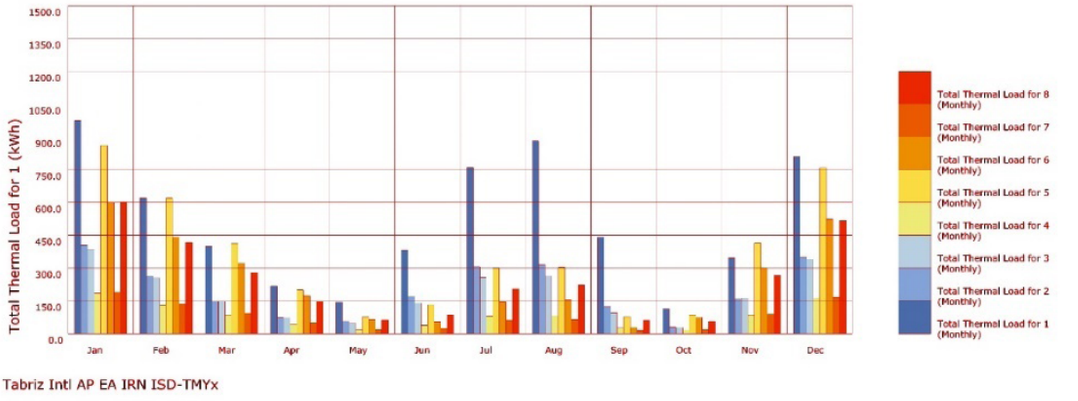


شکل ۵: مقایسه کلی میانگین انرژی مصرفی در کل فضاهای مورد بررسی
Fig 5: General comparison of the average energy consumption in all the investigated spaces

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

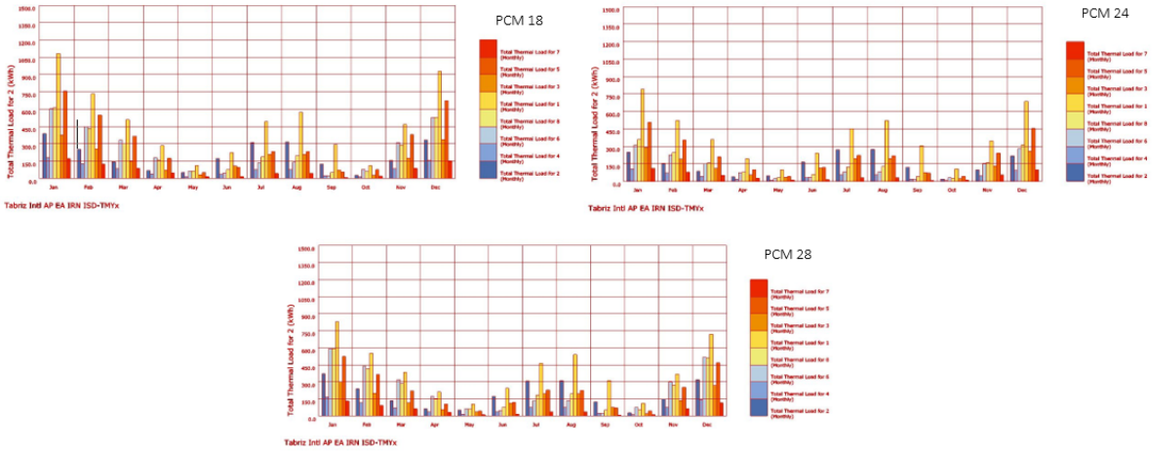
در شکل ۵، تأثیر PCM در جدارهای خارجی ساختمان در کل فضاها به طور واحد مورد بررسی قرار گرفته است و میزان مصرف انرژی به طور میانگین مقایسه شده است. باتوجه‌به این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که PCM در صورت داشتن دمای ذوب متناسب با اقلیم می‌تواند اثرات مثبتی در عملکرد حرارتی ساختمان داشته باشد. همچنین، مقاومت حرارتی جدارهای خارجی را افزایش و مصرف انرژی را کاهش دهد. در نهایت، می‌توان گفت که PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه در بین دماهای ذوب مورد بررسی در پژوهش حاضر، به‌عنوان دماهای مطلوب شناخته شده است که متناسب با اقلیم سرد این ناحیه است.

شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب میزان مصرف انرژی در هر دو وضعیت را با دماهای ذوب مختلف در طی سال و به تفکیک فضاها نشان می‌دهند. باتوجه به مطالعات انجام شده، Sharma و همکاران، گزارش دادند که PCM با دمای ذوب ۳۰–۲۰ درجه قابلیت تأمین آسایش حرارتی را دارد (Sharma et al.,2013). همچنین، Jin و همکاران، دماهای ذوب ۲۸–۲۲ درجه را در طی فصول مختلف برای اقلیم نانجینگ چین پیشنهاد دادند (Jin et al.,2017) که با مطالعه حاضر هم‌راستا است.



شکل ۶: میزان مصرف انرژی به تفکیک فضاها در وضعیت پایه در طی سال

Fig 6: The amount of energy consumption by different spaces in the basic state during the year



شکل ۷: میزان مصرف انرژی به تفکیک فضاها و با درنظرگرفتن PCM با دماهای ذوب مختلف در طی سال

Fig 7: The amount of energy consumption by different spaces and considering PCM with different melting temperatures during the year

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]



شکل ۸: مقایسه میزان مصرف انرژی در حالت پایه و دارای PCM در جهت‌های مورد بررسی در طی سال
Fig 8: Comparison of the amount of energy consumption in the basic state and with PCM in the investigated directions during the year

در بین دماهای ذوب مورد بررسی در مطالعهٔ حاضر، بیشترین کاهش مصرف انرژی در کل ماه‌های سال مربوط به جبهه جنوبی بود. به‌طوری‌که حتی در دمای ذوب ۱۸ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش مصرف انرژی در این جبهه به ترتیب در ماه‌های گرم و سرد برابر با ۶۱/۶۵ و ۶۱/۸ درصد، در دمای ذوب ۲۴ درجه سانتی‌گراد این میزان کاهش به ترتیب برابر با ۶۵/۸۳ و ۷۴/۵ درصد و در دمای ذوب ۲۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۶۲/۵۳ و ۶۱/۹۴ درصد نسبت به حالت پایه بود. بنابراین، از نتایج می‌توان این‌گونه برداشت کرد که استفاده از PCM در جبهه جنوبی می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و ارتقای محیط ساخته شده پایدار کمک کند. طبق مطالعات انجام شده، Kim و همکاران، نشان دادند که عملکرد PCM، وابسته به منطقه و موقعیتِ نصب، می‌تواند تغییر یابد (Kim, Mae, and Choi ,2017). در این راستا، نتایج Wang و همکاران نشان داد که PCM با دمای ذوب ۲۶- ۲۲ درجه، برای اقلیم شانگهای چین در دیوار جنوبی بهترین عملکرد را دارد (Wang et al., 2020). همچنین، نتایج مطالعه Zhu و همکاران نشان داد که وجود PCM در جبهه جنوبی ساختمان عملکرد مطلوب‌تری در فصول زمستان و تابستان دارد (Zhu et al., 2019) که با نتایج مطالعهٔ حاضر هم‌راستا است. همچنین، در شکل ۸، میزان مصرف انرژی در هر دو حالت پایه و دارای PCM در طی یک سال و در جهت‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، آورده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده (PCM) یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد آن‌هاست. مطالعات نشان می‌دهند که دمای ذوب ایده‌آل PCM باید به دمای آسایش حرارتی مطلوب در محیط نزدیک باشد تا بیشترین بهره‌وری را داشته باشد. در واقع، دمای ذوب بهینه PCM برای هر منطقه آب و هوایی متفاوت بوده و به شرایط اقلیمی آن وابسته است. در صورتی که دمای ذوب PCM بالاتر از دمای محیط باشد، مقدار کمی از انرژی خورشیدی قابل ذخیره خواهد بود؛ زیرا PCM به دمای ذوب خود نرسیده و نمی‌تواند انرژی را به

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

صورت گرمای نهان ذخیره کند. از سوی دیگر، اگر دمای ذوب PCM بسیار پایین‌تر از دمای محیط باشد، ممکن است در شب باعث کاهش بیش از حد دمای محیط نسبت به شرایط بدون استفاده از PCM شود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که PCM با دمای ۱۸ درجه باوجود کاهش مصرف انرژی ۲۳/۱۶ درصدی در ماه‌های گرم، منجر به افزایش ۱/۴۴ درصدی مصرف انرژی نسبت به حالت پایه در ماه‌های سرد شد. این بخش از نتایج هم‌راستا با مطالعه Xie و همکاران بود که به نامطلوب بودن عملکرد حرارتی PCM در فصول مختلف اشاره کرده بودند. همچنین، پژوهش حاضر نشان داد که دماهای ذوب ۲۴ و ۲۸ درجه با کاهش مصرف انرژی در ماه‌های گرم به‌ترتیب به میزان ۳۱/۹۳ و ۲۰/۴۸ درصد و در ماه‌های سرد به‌ترتیب به میزان ۳۶/۰۸ و ۱۵درصد همراه هستند که این نتیجه با نتایج مطالعات Sharma و همکاران و Jin و همکاران هم‌سو است. باتوجه به مطالعات ارائه شده در بخش یافته‌های پژوهش، از منظر کارآمدی جبهه ساختمان، پژوهش حاضر با پژوهش Wang و همکاران و نیز با مطالعه Zhu و همکاران هم‌راستا است. در تأیید این مطالعات، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشترین کاهش مصرف انرژی در کل ماه‌های سال مربوط به جبهۀ جنوبی بود. به‌طوری‌که در دمای ذوب ۱۸ درجه این کاهش در ماه‌های گرم و سرد به‌ترتیب به میزان ۶۱/۶۵ و ۶۱/۸۰ درصد، در دمای ذوب ۲۴ درجه به میزان ۶۵/۸۳ و ۷۴/۵ درصد و در دمای ذوب ۲۸ درجه به میزان ۶۲/۵۳ و ۶۱/۹۴ درصد نسبت به حالت پایه بود. ازاین‌رو، باتوجه‌به اقلیم سرد تبریز، استفاده از PCM با دمای ذوب ۲۴ درجه مناسب و به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. از محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌توان به عدم دسترسی به تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های تجربی اشاره کرد که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی این محدودیت رفع گردد. همچنین، باتوجه‌به نوین بودن مواد PCM، پیشنهاد می‌شود یک مطالعه‌ای مقایسه‌ای در رابطه با صرفه اقتصادی PCM و سایر مصالح با جرم حرارتی بالا در این اقلیم انجام شود. این مطالعه به ما کمک می‌کند تا کارایی و توجیه اقتصادی استفاده از PCM را در مقایسه با سایر گزینه‌ها به طور دقیق ارزیابی کنیم.

پی نوشت

1 - Phase Change Material
2 - Grasshopper
3 - Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies(PSEEDS)
4 - shape-stabilized phase change material (SSPCM)
5 - Rhino
6 - Ladybug
7 - Honeybee
8 - EnergyPlus
9 - Radiance
10 - Daysim
11 - Openstudio

مشارکت نویسندگان

- سهیلا عبدی‌زاده: تحلیل رسمی، تحقیق و بررسی، منابع، نرم‌افزار، نوشتن پیش‌نویس اصلی
- طاها صباغیان: مفهوم سازی، مدیریت داده‌ها، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، بررسی و ویرایش، اعتبار سنجی
- احد شاه‌حسینی: روش شناسی، اعتبار سنجی، نظارت، بررسی و ویرایش

تضاد منافع،حمایت مالی

در این پژوهش نویسندگان با یکدیگر هیچگونه تضاد منافعی نداشته و در راستای انجام این تحقیق از هیچ سازمانی حمایت مالی دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها و مواد

تمام داده‌های تولید شده یا تحلیل شده در طول این پژوهش در این مقاله منتشر شده و فایل‌های اطلاعات تکمیلی آن از طریق ارتباط با نوسینده‌ی مسئول در دسترس خواهند بود.

منابع

References

Albayyaa, H., D. Hagare, and S. Saha. (2019). Energy conservation in residential buildings by incorporating Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies and higher thermal mass. Energy and Buildings, 182: 205-213.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

Kim, H. B. M. Mae, and Y. Choi. (2017). Application of shape-stabilized phase-change material sheets as thermal energy storage to reduce heating load in Japanese climate. Building and Environment, 125: 1-14.

Lee, A. D. P. Shepherd, M. C. Evernden, and D. Metcalfe. (2018). Optimizing the architectural layouts and technical specifications of curtain walls to minimize use of aluminium. Structures, 13: 8-25.

Li, L. H. Yu, and R. Liu. (2017). Research on composite-phase change materials (PCMs)-bricks in the west wall of room-scale cubicle: Mid-season and summer day cases. Building and Environment, 123: 494-503.

Li, W., and W. Chen. (2019). Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage Trombe-wall system. Solar Energy, 188: 706-719.

Mavrigiannaki, A., and E Ampatzi. (2016). Latent heat storage in building elements: a systematic review on properties and contextual performance factors. Renew Sustain, 52: 171–178.

Meng, E. H. Yu, and B. Zhou. (2017). Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. Applied Thermal Engineering, 126: 212-225.

Mirmoghtadai, M. N. GanjiZadeh, and S. Hossein Abadi. (2018). The nature of research methods in architecture and urban design research. Architecture and Environment Research, 1(1): 1-12 [In Persian].

Pirasaci, Tolga. (2020). Investigation of phase state and heat storage form of the phase change material (PCM) layer integrated into the exterior walls of the residential-apartment during heating season. Energy, 207, 118176.

Qu, Y. D. Zhou, F. Xue, and L. Cui. (2021). Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer. Energy and Buildings, 241, 110966.

Sadeghipour Roudsari, Mostapha, Michelle Pak, Adrian Smith, and Gordon Gill Arcitecture. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In Proceedings of the 13th international IBPSA conference, Lyon, France, Augest 2013: 3128-3135.

Baggs, D., and N. Mortensen. 2006. Thermal mass in building design BDP environment design guide. Royal Aust Inst Architects, 4: 1-8.

Bai, L. J. Xie, M. M. Farid, W. Wang, and J. Liu. (2020). Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. Building and Environment, 169, 106531.

Bambrook, S., A. Sproul, and D. Jacob. (2009). Exploring the zero energy house concept for Sydney. In Solar09: 47th Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society, Townsville, James Cook University.

Berardi, U., and S. Soudian. (2019). Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. Energy and Buildings, 185: 180-195.

Fadaee, F., and P. Ildarabadi. (2019). The use of PCM material on the walls of educational buildings to increase the quality of space and reduce energy consumption (Case study: 9 classes in Mashhad). Journal of Environmental Science Studies, 4(2): 1469-1479 [In Persian].

Feng, L. W. Zhao, J. Zheng, S. Frisco, P. Song, and X. Li. (2011). The shape-stabilized phase change materials composed of polyethylene glycol and various mesoporous matrices (AC, SBA-15 and MCM-41). Solar energy materials and solar cells, 95(12), 3550-3556.

Fonseca, A. T. S. Mayor, and J. B. L. M. Campos .(2018). Guidelines for the specification of a PCM layer in firefighting protective clothing ensembles. Applied Thermal Engineering, 133: 81-96.
Jiang, W. B. Liu, X. Zhang, T. Zhang, D. Li, and L. Ma. (2021). Energy performance of window with PCM frame. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 45, 101109.

Jin, X. D. Shi, M.A. Medina, X. Shi, X. Zhou, and X. Zhang. (2017). Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 129(3): 1767-1778.

Kenisarin, M., and K. Mahkamov. (2016). Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. Renew Sustain Energy Rev, 55: 371–398.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

Saikia, P. A. S. Azad, and D. Rakshit. (2018). Thermodynamic analysis of directionally influenced phase change material embedded building walls. International journal of thermal sciences, 126: 105-117.

Sharma, A. A. Shukla, C. R. Chen, and S. Dwivedi .(2013). Development of phase change materials for building applications. Energy and Buildings, 64: 403-407.

Wang, H. W. Lu, Z. Wu, and G. Zhang. (2020). Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. Renewable Energy, 145: 52-64.

Xie, J. W. Wang, J. Liu, and S. Pan. (2018). Thermal performance analysis of PCM wallboards for building application based on numerical simulation. Solar Energy, 162: 533-540.

Yang, L. Y. Qiao, Y. Liu, X. Zhang, C. Zhang, and J. Liu. (2018). A kind of PCMs-based lightweight wallboards: Artificial controlled condition experiments and thermal design method investigation. Building and environment, 144: 194-207.

Zhang, Y. P. K. P. Lin, R. Yang, H. F. Di, and Y. Jiang. (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. Energy and buildings, 38(10): 1262-1269.

Zhou, D., and P. Eames. (2019). Phase Change Material Wallboard (PCMW) melting temperature optimisation for passive indoor temperature control. Renewable Energy, 139: 507-514.

Zhu, N. N. Hu, P. Hu, F. Lei, and S. Li. 2019. Experiment study on thermal performance of building integrated with double layers shape-stabilized phase change material wallboard. Energy, 167: 1164-1180.

فـدایی، فرامـرز. ایلدرآبـادی، پریـا. (۱۳۹۸). اسـتفاده از مـاده PCM در جـدار خـارجی سـاختمان‌های آمـوزشی به‌منظـور افزایـش کیفیـت فضـا و کاهـش مصـرف انـرژی (مطالعـه مـوردی: دبسـتان ۹ کلاسـه در شـهر مشـهد). مطالعـات علـوم محیـط زیسـت،۴(۲): ۱۴۷۹-۱۴۶۹.

میرمقتـدایی، مهتـا. گنـجی‌زاده، نازنیـن. حسین‌آبـادی، سـمانه. (۱۳۹۷). ماهیـت روش‌هـای تحقیـق در پژوهش‌هـای معمـاری و طـراحی شـهری. پژوهش‌هـای معمـاری و محیـط. ۱(۱): ۱۲-۱.

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]

This page is intentionally rendered without text

این صفحه آگاهانه بدون متن ارائه شده است

[DOI: 10.61186/ciauj.9.2.45]