

Numerical Analysis of the Impact of Phase Change Materials on the Optimization of Building Cooling Load

Mina Alafzadeh,¹ Mehran Rabani^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran, m.alafzadeh@ardakan.ac.ir

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran, m.rabani@ardakan.ac.ir

Keywords:

ceiling cooling,
phase change material (PCM),
Design Builder software,
energy consumption savings,
insulation

Original Research Article

Paper History:

Received: 29/07/2025
Revise: 30/08/2025
Accepted: 24/09/2025

Abstract: This study investigates the impact of incorporating phase change materials (PCMs) on the performance enhancement of ceiling cooling systems (chilled ceilings) and on the reduction in energy consumption in residential buildings. Considering the hot and dry climate of Yazd, Iran, a representative residential space was modeled using Design Builder software (based on Energy Plus), and the thermal behavior of five PCMs with different melting temperatures (ranging from 21°C to 29°C) was analyzed at various thicknesses. The results indicated that the PCM with a melting point of 25°C and a thickness of 74.2 mm (Q25M182) achieved the highest energy savings. Moreover, under free-running conditions with night ventilation, this PCM significantly improved indoor temperature distribution and reduced the dependence on active cooling systems. Subsequently, using ANSYS software, the thermal performance of a chilled ceiling panel integrated with PCM was compared to that of a conventional polyurethane insulation layer. The findings showed despite the fact that the PCM slightly reduced the panel's instantaneous cooling capacity, it led to a considerable reduction in the overall cooling load, chiller power demand, and electricity consumption. Therefore, PCMs can be recommended as an effective alternative to the conventional insulation materials in hot climate zones.

How to cite this article: Alafzadeh, M., Rabani, M., "Numerical Analysis of the Impact of Phase Change Materials on the Optimization of Building Cooling Load", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 4, PP. 52-65, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.257317.1135>

© 2023 University of Kashan Press.

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



Extended Abstract

Introduction

In recent years, the growing demand for building construction and an increase in the reliance on fossil fuels have significantly highlighted the importance of energy conservation. Among the various strategies to minimize energy losses in buildings, thermal insulation has proven to be highly effective. Insulation materials are widely used in heating systems to reduce heat loss, prevent moisture infiltration, and limit sound transmission. Although the integration of insulation systems may increase initial construction costs, they result in long-term energy efficiency and economic benefits. One promising class of the materials used in building insulation is phase change materials (PCMs), which store and release latent heat during phase transitions. PCMs absorb solar energy during the day through melting and release it at night during solidification, helping stabilize indoor temperatures. Compared to the conventional materials with high thermal mass, PCMs function at nearly constant temperatures, storing from 5 to 14 times more energy. Their effectiveness depends heavily on their melting point, making them suitable for various applications such as thermal regulation, fire protection, or solar energy storage. The proper selection of PCM type, according to the climate and operational temperature range, is crucial for maximizing the performance. PCMs can be integrated into construction materials like gypsum boards, concrete, or wall coatings even in lightweight structures to enhance effective thermal mass and reduce thermal fluctuations. Experimental and numerical studies demonstrate that PCMs contribute significantly to energy savings, thermal comfort, and load shifting in cooling systems. For example, the application of PCMs in radiant cooling ceilings has shown potential in reducing peak indoor temperatures and energy consumption, while economic assessments reveal favorable payback periods. The combination of PCMs with radiant cooling systems, particularly in hot and dry climates, has emerged as an innovative and low-energy solution to meet increasing cooling demands. Furthermore, recent studies have emphasized the role of intelligent control strategies and optimized design in improving the performance of the PCM system and market adoption. Given the ongoing global warming trend and the need for sustainable cooling solutions, this study aims to model and compare the cooling performance of different PCMs in radiant ceiling systems against conventional insulation materials, offering insights into energy-saving potential and thermal efficiency in modern buildings.

Materials and Methods

In this study, to investigate the effect of phase change materials (PCMs) on building cooling performance, a residential room located in Yazd, Iran (32.10°N, 54.43°E) was modeled using Design Builder software.

The software, based on Energy Plus and compliant with ANSI/ASHRAE 140 standards, enabled dynamic simulation of heating and cooling loads throughout the year. The building geometry was drawn within the software environment, with defined wall materials (U-value: 1.4 W/m²K), indoor thermal and ventilation settings, and occupancy and equipment schedules. A PCM layer was added to the roof to evaluate its thermal impact. The simulation employed an enthalpy-based model to represent PCM behavior, using energy balance equations that account for convective, conductive, radiative, and internal heat gains. The software calculated the cooling load based on heat flux interactions with the PCM and its stored thermal energy. Thermal capacity during phase transition was derived from the latent heat and temperature range. For a more detailed analysis of ceiling cooling systems, ANSYS was used to simulate a copper radiant panel (12 mm inner diameter, 1 mm thickness, 150 mm pipe spacing) covered with a 20 mm PCM insulation layer. With inlet and outlet water temperatures of 15°C and 17°C respectively and an inlet velocity of 0.2 m/s, the model evaluated panel cooling capacity under realistic boundary conditions.

Results

In order to identify the most efficient phase change material (PCM) for reducing cooling loads in buildings, a comparative simulation using Energy Plus was conducted without active cooling systems. Five PCMs with different melting temperatures (Q21–Q29) and four different thicknesses were applied to the roof, while polyurethane insulation was used on the walls. Results showed that PCM Q25 with a thickness of 74.2 mm (M182) provided the highest energy-saving potential (2.3%) due to its ability to store more enthalpy near indoor comfort temperatures. Q25 had favorable thermo-physical properties, including a melting point of 25 °C, latent heat of 210–250 J/g, and organic components. In the passive scenarios without mechanical cooling, the incorporation of Q25 along with nighttime natural ventilation significantly reduced indoor temperatures compared to polyurethane insulation, especially during hot summer periods. When implemented in a radiant ceiling cooling system, Q25 further enhanced energy efficiency by reducing the required cooling power from 80 W/m² (polyurethane) to 62 W/m², and consequently decreasing chiller energy consumption. Smart control strategies enabled Q25 to store energy during days and to release it at nights, further minimizing electricity usage. Additionally, Q25 improved indoor thermal comfort, lowering the average operative temperature and reducing the predicted percentage of dissatisfied occupants (PPD) from 50.3% (polyurethane) to 35.44%. These benefits were also reflected in the reduced CO₂ emissions associated with the lower electricity demand. Altogether, the application of Q25 not only optimized energy consumption but also contributed to

environmental sustainability while improving occupant satisfaction during peak summer conditions.

Discussion and Conclusion

In this study, the thermal performance of various PCMs with different melting points and thicknesses was analyzed for building roofs. Simulations using Energy Plus revealed that PCM Q25, with a melting temperature of 25 °C and thickness of 74.2 mm, offered the most effective cooling load reduction due to its high thermal capacity near comfort temperatures and its capability to store and release heat across day-night cycles. When applied without mechanical cooling, Q25 became combined with nighttime natural ventilation, effectively moderating indoor temperature fluctuations and maintaining thermal

comfort, unlike conventional insulations such as polyurethane. In radiant ceiling cooling systems, despite the slightly reduced instantaneous cooling power of Q25, it significantly decreased chiller energy consumption by acting as a thermal buffer. Comparative analysis under Yazd's summer conditions confirmed that Q25 reduced electricity usage, lowered indoor temperatures, and improved occupant satisfaction with a 15% decrease in predicted thermal dissatisfaction. Moreover, electricity savings translated into notable CO₂ emission reductions, highlighting the environmental benefits. Overall, Q25 demonstrates strong potential as a sustainable energy optimization solution for hot and arid climates.

تحلیل عددی تأثیر به کارگیری مواد تغییر فازدهنده بر بهینه سازی بار سرمایشی ساختمان

مینا علاف زاده^۱، مهران ربانی^{۲*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران، m.alafzadeh@ardakan.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران، m.rabani@ardakan.ac.ir

واژه های کلیدی:

سرمایش سقفی،
ماده تغییر فازدهنده،
نرم افزار دیزاین بیلدر،
صرفه جویی در مصرف انرژی،
عایق کاری.

چکیده: در این مقاله، تأثیر به کارگیری مواد تغییر فازدهنده در بهبود عملکرد سیستم سرمایش سقفی (سقف سرد) و کاهش مصرف انرژی در ساختمان های مسکونی بررسی شده است. با توجه به موقعیت جغرافیایی شهر یزد (اقلیم گرم و خشک)، یک فضای مسکونی نمونه در نرم افزار دیزاین بیلدر (مبتنی بر انرژی پلاس) مدل سازی شده و رفتار حرارتی پنج نوع ماده تغییر فازدهنده با دماهای ذوب مختلف (۲۱ تا ۲۹ درجه سانتی گراد) در ضخامت های گوناگون تحلیل شده است. نتایج نشان می دهد که ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۵ درجه سانتی گراد و ضخامت ۷۴/۲ میلی متر (Q25M182) بیشترین صرفه جویی را در مصرف انرژی دارد. همچنین، در شرایط بدون سیستم سرمایشی و با بهره گیری از تهویه شبانه، این ماده موجب بهبود محسوس در توزیع دما و کاهش وابستگی به تجهیزات سرمایشی می شود. در ادامه، با استفاده از نرم افزار انسیس، عملکرد حرارتی یک پنل سقف سرد در حضور ماده تغییر فازدهنده و مقایسه با عایق پلی یورتان بررسی شده است. یافته ها نشان می دهد استفاده از ماده تغییر فازدهنده با وجود کاهش توان سرمایشی لحظه ای پنل، منجر به کاهش قابل توجه در بار سرمایشی کلی، توان مصرفی چیلر و مصرف برق می شود. بنابراین، ماده تغییر فازدهنده به عنوان جایگزینی مؤثر برای عایق های مرسوم در اقلیم های گرم قابل پیشنهاد است.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، همگام با گسترش صنعت ساخت‌وساز و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، موضوع صرفه‌جویی و مدیریت بهینه انرژی در ساختمان‌ها به یکی از دغدغه‌های اصلی مبدل شده است. یکی از روش‌های کارآمد برای کاهش تلفات انرژی، استفاده از عایق‌ها در بخش‌های مختلف ساختمان است. هرچند اجرای عایق‌کاری موجب بالا رفتن هزینه اولیه ساخت می‌شود، در طول زمان با کاهش مصرف انرژی، این هزینه جبران شده و علاوه بر فراهم کردن آسایش حرارتی، منافع اقتصادی نیز به همراه خواهد داشت. تحقیقات نشان داده‌اند که عایق‌کاری مناسب در بخش‌هایی نظیر سقف، کف و دیوارها قادر است حدود ۴۵ تا ۵۵ درصد در مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی صرفه‌جویی ایجاد کند. یکی از دسته عایق‌های نوین که کاربرد چشمگیری در حوزه ساختمان یافته‌اند، مواد تغییر فازدهنده (PCM) هستند [۱].

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با استفاده از گرمای نهان در مواد تغییر فاز، به عنوان یکی از راهکارهای سرمایش غیرفعال شناخته می‌شود. این مواد در طول روز انرژی خورشیدی را هنگام ذوب شدن جذب و در زمان کاهش دما (معمولاً شب) با انجماد، آن را آزاد می‌کنند. ویژگی مهم PCM ها نسبت به مصالح رایج با ظرفیت حرارتی بالا این است که فرایند جذب و آزادسازی حرارت در دمای تقریباً ثابت انجام می‌شود. همچنین میزان گرمای ذخیره‌شده در این مواد حدود ۵ تا ۱۴ برابر بیشتر از مواد متداولی مانند سنگ یا آب است. از این رو، به کارگیری PCM ها می‌تواند به شکل قابل توجهی در کاهش انرژی مصرفی ساختمان نقش آفرینی کند [۲].

کارایی مواد تغییر فازدهنده در سیستم‌های ذخیره انرژی به دو جنبه اصلی فیزیکی و اقتصادی بستگی دارد. ظرفیت گرمای نهان بالا، رسانایی حرارتی مناسب، دمای ذوب سازگار با شرایط عملکردی و پایداری چرخه‌های ذوب و انجماد از جمله شاخص‌های کلیدی فیزیکی محسوب می‌شوند. در کنار این عوامل، تغییر حجم در زمان فازگذاری، پدیده فوق‌خنک‌شدن و سازگاری شیمیایی با مواد دیگر می‌تواند عملکرد واقعی را تحت تأثیر قرار دهد. از دیدگاه اقتصادی نیز هزینه تولید یا استخراج، دسترسی به منابع، نیاز به خالص‌سازی و هزینه‌های نگهداری در طول دوره بهره‌برداری اهمیت دارد. بررسی نسبت هزینه به ظرفیت ذخیره حرارتی و نیز جنبه‌های زیست‌محیطی همچون قابلیت بازیافت، معیارهای مهمی در انتخاب PCM ها برای کاربردهای واقعی هستند [۳].

از PCM ها زمانی استفاده می‌شود که میان زمان موجود بودن انرژی و زمان نیاز به آن اختلاف وجود داشته باشد. به دلیل تنوع گسترده دماهای ذوب، محدوده کاربرد آن‌ها نیز وسیع است. مواد با دمای ذوب کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد برای تهویه و سرمایش هوا قابل استفاده‌اند، درحالی‌که مواد با دمای ذوب بالاتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد در کاهش دما و ایمنی در برابر آتش‌سوزی کاربرد دارند. سایر PCM ها که دمای ذوبی بین این دو بازه دارند، بیشتر در ذخیره انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. برای دستیابی به بیشترین بازده، دمای ذوب PCM باید با شرایط کاری سیستم هم‌خوانی داشته باشد. اگرچه استفاده از این مواد در طراحی ساختمان هنوز چالش‌های متعددی دارد، ارزیابی اقتصادی و زمان بازگشت سرمایه از مهم‌ترین ملاحظات در کاربرد آن‌هاست.

به کارگیری PCM ها به عنوان ذخیره‌کننده‌های انرژی در ساختمان از طریق ترکیب با مصالحی مانند گچ، بتن یا پوشش‌های داخلی می‌تواند ظرفیت حرارتی مؤثر ساختمان را افزایش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که این رویکرد موجب بهبود عملکرد حرارتی دیوارها و سقف‌ها، کاهش نوسانات دمایی و جابه‌جایی بار اوج انرژی می‌شود. در برخی آزمایش‌ها، استفاده از این مواد تا حدود ۱۹٪ صرفه‌جویی انرژی و افزایش دمای مطلوب داخلی را به همراه داشته است [۵].

پژوهش‌های مختلف کارایی PCM ها را در کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها و بهبود شرایط آسایش حرارتی تأیید کرده‌اند. انتخاب نوع مناسب ماده متناسب با اقلیم و شرایط فصلی می‌تواند موجب کاهش محسوس نیاز به انرژی مکانیکی برای تهویه و گرمایش شود [۶]. نتایج یک تحقیق بر روی سقف‌های مجهز به PCM نشان داد که این سامانه می‌تواند دمای اوج فضای داخلی را حدود ۳/۲ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و نزدیک به ۲۷٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی نماید. اگرچه رسانایی حرارتی این مواد پایین است، بهبود آسایش حرارتی و کاهش بار سرمایشی از مزایای اصلی آن‌ها به شمار می‌رود. ارزیابی اقتصادی این سیستم دوره بازگشت سرمایه‌ای در حدود ۱۷/۵ سال را گزارش کرده است [۷].

با توجه به افزایش دمای جهانی و تقاضای روزافزون برای سامانه‌های سرمایشی پایدار، استفاده از ترکیب PCM ها با سقف‌های تابشی به عنوان رویکردی نوین در مدیریت انرژی مطرح شده است. نتایج مطالعات میدانی نشان می‌دهد که این سامانه‌ها با بهره‌گیری از کنترل هوشمند قادرند بار مصرفی را به ساعات غیرپیک منتقل کرده و دمای داخلی را در محدوده استاندارد حفظ نمایند؛ هرچند چالش‌های طراحی و بهینه‌سازی همچنان وجود دارد [۸]. سایر بررسی‌ها نشان

داده اند که این سامانه ها با شارژ شبانه ۴ تا ۵ ساعته می توانند بیش از ۸۰٪ ساعات بهره برداری را در محدوده آسایش حرارتی استاندارد ISO 7730 قرار دهند [۹].

همچنین ترکیب PCM ها با طراحی لایه های هوای میانی در سقف ها، باعث کاهش انتقال حرارت و بهبود عملکرد سالیانه سرمایشی می شود. کارایی این روش وابسته به راهبردهای انجماد شبانه مانند استفاده از مبدل های حرارتی زمینی یا آب خنک است. در اقلیم های گرم و خشک، این فناوری علاوه بر کاهش بار سرمایشی، می تواند صرفه جویی اقتصادی و زیست محیطی نیز به همراه داشته باشد [۱۰].

مطالعات دیگر، پنل های سقفی مجهز به PCM را بررسی کرده اند. این پنل ها توانسته اند در بیش از ۸۰٪ زمان بهره برداری شرایط آسایش حرارتی را مطابق استاندارد EN16798 حفظ کنند. علاوه بر این، ظرفیت ذخیره حرارتی بالای آن ها موجب انتقال بار سرمایشی به ساعات غیر اوج مصرف شده و گزینه ای مناسب برای نوسازی ساختمان ها محسوب می شوند [۱۱]. در پژوهش های شبیه سازی نیز استفاده از پارامتر C13 به عنوان PCM در شرایط اقلیمی مختلف، کاهش نوسانات دمای داخلی و صرفه جویی انرژی به ویژه در مناطق معتدل را نشان داده است [۱۲].

ارزیابی های اقتصادی نیز حاکی از آن است که سامانه های تابشی فعال شونده با جرم حرارتی، در مقایسه با سیستم های تمام هوا و پنل های حاوی PCM، از نظر هزینه کل در بلندمدت مقرون به صرفه تر هستند. با این حال، پنل های حاوی PCM در پروژه های نوسازی و در بارهای سرمایشی بالا می توانند عملکردی رقابتی ارائه دهند [۱۳]. سایر تحقیقات نیز نشان داده اند که استفاده از PCM های کپسوله شده در مصالح ساختمانی، موجب کاهش دمای داخلی و افزایش بازده انرژی می شود و روش های تقویت انتقال حرارت می تواند اثربخشی آن ها را بهبود دهند [۱۴-۱۶].

مطالعه دیگری عملکرد بازتولید دو نوع سقف سرمایشی دارای ماده تغییر فاز را با تحلیل دما و شار حرارتی بررسی کرده است. نتایج نشان می دهد که موقعیت مواد تغییر فازدهنده نسبت به لوله های آب تأثیر زیادی بر وضعیت فازی آن پس از بازتولید دارد. مواد تغییر فازدهنده زیر لوله ها بیشتر در حالت مایع قرار دارند، در حالی که مواد تغییر فازدهنده بالای لوله ها کمتر ذوب می شوند. با این حال، هر دو سیستم، بازتولید مؤثری دارند و برای سرمایش فضاهای اداری مناسب می باشند. همچنین امکان بازتولید کامل مواد تغییر فازدهنده در شب با شرایط دمایی مناسب تأیید شده است [۱۷].

در پژوهشی دیگر به بررسی استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سامانه های سرمایش منازل مسکونی در مناطق کویری ایران پرداخته شده است. با استفاده از یک مدل سازی ریاضی و شبیه سازی حرارتی، کارایی این مواد در ذخیره و جذب گرمای هوا بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از این روش می تواند حدود سه برابر انرژی مصرفی دستگاه تهویه را جبران کرده و همچنین موجب جابه جایی بار اوج مصرف برق به ساعات شب شود. این امر نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی در روزهای گرم تابستان و بهینه سازی پیک بار الکتریکی دارد. در نهایت، پژوهش ثابت می کند که ادغام مواد تغییر فاز در سامانه های سرمایش می تواند راهکاری پایدار برای مدیریت انرژی و ارتقای آسایش حرارتی باشد [۱۸].

با توجه به تحقیقات انجام شده، اگرچه کارایی مواد تغییر فازدهنده در سیستم های سرمایش و گرمایش به خصوص سقف سرد مورد توجه دانشمندان در چند دهه اخیر قرار گرفته، ولی تاکنون تأثیر نوع ماده تغییر فازدهنده در سیستم سقف سرد در مقایسه با عایق های مرسوم در سیستم سقف سرد مورد بررسی قرار نگرفته است؛ لذا هدف اصلی از این مقاله، مدل سازی اثر نوع ماده تغییر فازدهنده در سرمایش ساختمان و کاهش مصرف انرژی در حضور و عدم حضور پنل های سرمایش سقفی است. لازم به توضیح است که اصول سقف سرد مانند صفحات تابشی گرم است، که انتقال حرارت بین فضا و صفحات، طبق مکانیزم اختلاف میزان حرارت اتفاق می افتد. در اصل برخلاف سیستم گرم کننده تابشی، سقف سرد انرژی گرمایی متصاعد شده از انسان ها و وسایل را جذب می کند. یک سیستم سقف سرد، از یک سری پانل های مسی بر روی صفحات آلومینیوم ساخته شده و در سقف کاذب تعبیه می شوند. نکته قابل اهمیت در ساخت این پانل ها، استفاده از ماده ای با ضریب هدایت حرارتی بالاست که موجب پاسخ سریع سیستم به تغییرات دمایی می شود.

در کار حاضر، ابتدا با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس، مؤثرترین نوع ماده تغییر فازدهنده در سرمایش ساختمان تعیین گردیده و در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده و با به کار بردن نرم افزار انسیس، میزان توان سرمایشی یک سیستم سقف سرد در حضور ماده تغییر فازدهنده در مقایسه با عایق پلی یورتان به تصویر کشیده شده است.

۲. مدل سازی

در راستای مدل سازی کار حاضر، برای بررسی مواد تغییر فازدهنده در سرمایش ساختمان، یک اتاق مسکونی با ابعاد $1m \times 0.75m \times 0.75m$ مانند شکل (۱) در شهر یزد ($32.10^\circ N$, $54.43^\circ E$) در نظر گرفته

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{int} \quad (2)$$

در این معادله، H آنتالپی وابسته به دماست که به طور مستقیم اثر مواد تغییر فازدهنده را محاسبه می‌کند.

بار سرمایش ساختمان با توجه به حضور مواد تغییر فازدهنده با استفاده از رابطه موازنه انرژی که شامل شار ورودی و خروجی به ماده تغییر فازدهنده و میزان حرارت ذخیره‌شده در آن است به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{total} = Q_{conv.} + Q_{cond.} + Q_{rad.} + Q_{int.} + \frac{d}{dt}(mH) \quad (3)$$

در این معادله، Q_{total} بار حرارتی کل، $Q_{conv.}$ بار حرارتی جابه‌جایی، $Q_{cond.}$ بار حرارتی هدایت، $Q_{rad.}$ بار حرارتی تابشی، $Q_{int.}$ بار حرارتی داخلی، m جرم ماده تغییر فازدهنده و H آنتالپی ماده تغییر فازدهنده است.

ظرفیت حرارتی ماده تغییر فازدهنده در حالت جامد و مایع ثابت است ولی در زمان تغییر فاز، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_p^{eff} = C_{p,solid} + \left(\frac{L}{\Delta T} \right) \quad (4)$$

$C_{p,solid}$ ظرفیت حرارتی ماده تغییر فازدهنده در حالت جامد، L گرمای نهان و ΔT رنج دما در مدت تغییر فاز است. نرم‌افزار دیزاین بیلدر از این روابط در الگوریتم‌های حل برای شبیه‌سازی انرژی در ساختمان استفاده می‌کند. برای تبدیل بار سرمایش به میزان مصرف برق از رابطه زیر استفاده می‌شود:

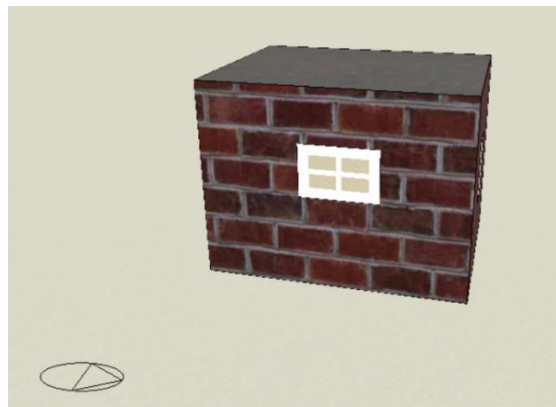
$$Electricity \text{ consumption (cooling)} = COP_{cool} \times \frac{Q_{cool}}{\eta_{electric}} \quad (5)$$

در این رابطه، COP ضریب عملکرد سیستم، Q_{cool} بار سرمایش و $\eta_{electric}$ راندمان الکتریکی است.

۲.۲. شرایط مرزی

لازم به توضیح است که در کار حاضر، علاوه بر نرم‌افزار انرژی پلاس از نرم‌افزار انسیس نیز برای محاسبه توان سرمایشی پنل‌های سرمایشی تابشی (شکل ۲) استفاده شده است. در این راستا یک پنل تشعشعی سقفی (شکل ۳) در زمان استفاده از ماده تغییر فازدهنده در مقایسه با عایق پلی‌یورتان، در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده که هندسه مورد استفاده و نحوه مش‌بندی در شکل (۴) نشان داده شده است.

شده و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر^۱ تأثیر نوع مواد تغییر فازدهنده مورد بررسی قرار گرفته است. این نرم‌افزار مبتنی بر انرژی پلاس براساس استاندارد ANSI/ASHRAE 140-200 امکان ارزیابی دینامیکی بار گرمایش و سرمایش و همچنین مصرف انرژی در تمام فصول سال را فراهم می‌کند [۱۹].



شکل (۱): مدل ساخته‌شده برای بررسی تأثیر مواد تغییر فازدهنده

در راستای شبیه‌سازی تأثیر مواد تغییر فازدهنده بر بار سرمایش ساختمان، ابتدا موقعیت جغرافیایی و تنظیمات آب‌وهوا (گرم و خشک) وارد شده است. برای ترسیم هندسه اتاق و ایجاد پلان از ابزارهای طراحی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است. مصالح و لایه‌های دیوار مشخص شده (ضریب انتقال حرارت $1/4 \text{ W/m}^2\text{K}$) و تنظیمات دما و تهویه برای فضای مورد بررسی تعیین شده است. برنامه زمان‌بندی استفاده از وسیله سرمایشی و تجهیزات الکتریکی تعریف شده است. برای اضافه کردن مواد تغییر فازدهنده به سقف، یک لایه به سقف اضافه شده است.

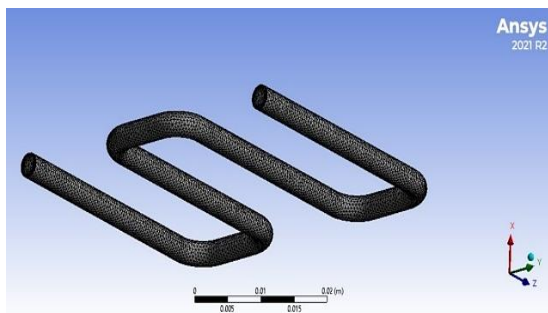
۱.۲. روابط حاکم

در این قسمت فرمول‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی مواد تغییر فازدهنده در ساختمان و محاسبات بار سرمایشی ارائه شده است. ابتدا برای مدل‌سازی مواد تغییر فازدهنده از مدل مبتنی بر آنتالپی استفاده شده است [۲۰]:

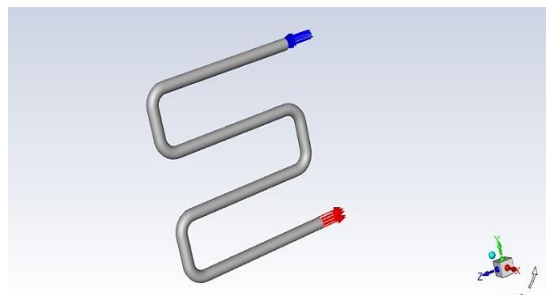
$$H(T) = H_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p(T') dT' \quad (1)$$

در این معادله، H نشان‌دهنده آنتالپی در دمای T ، H_{ref} آنتالپی مینا و T_{ref} دمای میناست.

معادله موازنه انرژی برای مواد تغییر فازدهنده عبارت است از [۲۰]:



شکل (۴): مدل سازی پتل سقفی تشعشعی در انسیس



شکل (۵): آب ۱۵ درجه وارد و ۱۷ درجه خارج می شود.

۳. نتایج

۱.۳. تعیین ماده تغییر فازدهنده با بازده بالا

در ابتدا برای تعیین بهترین نوع ماده تغییر فازدهنده، ۵ نوع ماده تغییر فازدهنده در سقف ساختمان و عایق پلی یورتان در دیوارها مورد استفاده قرار گرفته و بدون در نظر گرفتن سیستم سرمایشی، تأثیر این مواد بر بار سرمایش ساختمان و کاهش مصرف انرژی توسط نرم افزار انرژی پلاس شبیه سازی شده است. مواد مورد استفاده دارای دمای ذوب متفاوت (Q21، Q23، Q25، Q27، Q29) با دمای ذوب به ترتیب ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷ و ۲۹ درجه سانتی گراد هستند که برای هر کدام چهار ضخامت متفاوت (M182 ضخامت ۷۴/۲ میلی متر، M91 ضخامت ۳۷/۱ میلی متر، M51 ضخامت ۲۰/۸ میلی متر و M27 ضخامت ۱۱/۲ میلی متر) در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) تأثیر نوع ماده و ضخامت آن بر بار سرمایش ساختمان بررسی شده است. برای محاسبه درصد بهینه سازی انرژی از فرمول زیر استفاده شده است:

$$(۶) \quad \text{بار سرمایش در زمان حضور PCM} - \text{بار سرمایش}$$

همان طور که مشاهده می شود ماده تغییر فازدهنده از نوع Q25 با ضخامت ۷۴/۲ میلی متر بیشترین میزان بهینه سازی مصرف انرژی را دارد. در اصل، ماده تغییر فازدهنده از نوع Q25 می تواند آنتالپی بیشتر در دمای متوسط برای تغییر فاز در خود ذخیره کند و این مطلب باعث افزایش بازدهی یک ماده می شود.

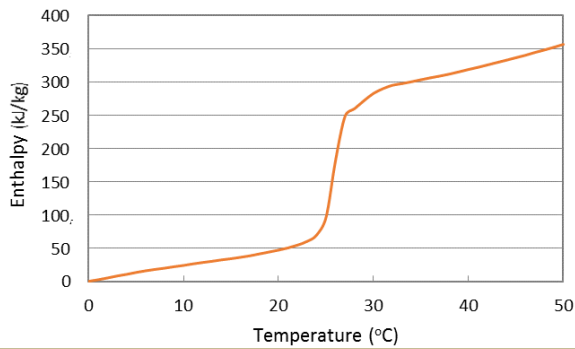


شکل (۲): طرح واره نحوه عملکرد پتل های سقفی تابشی در سرمایش ساختمان



شکل (۳): پتل تشعشعی در سیستم سقف سرد

این پتل با قطر داخلی ۱۲ میلی متر و ضخامت یک میلی متر از جنس مس مدل سازی شده است و فاصله بین لوله ها ۱۵۰ میلی متر انتخاب شده است. قسمت بالای این پتل توسط ماده تغییر فازدهنده به عنوان عایق با ضخامت ۲۰ میلی متر پوشیده شده است و قسمت پایین این مدل، با محیط اطراف که در دمای ۲۵ درجه است تبادل حرارت جابه جایی دارد. همچنین سرعت آب در ورودی ۰/۲ متر بر ثانیه و دمای آب در ورودی و خروجی این پتل به ترتیب ۱۵ درجه و ۱۷ درجه در نظر گرفته شده است (شکل ۵). لازم به توضیح است که علت انتخاب ضخامت ۲۰ میلی متر برای عایق پشت سیستم سقف سرد با توجه به پژوهش انجام شده توسط احمد و لیم [۲۱] قابل توجیه است. آن ها تأثیر عایق حرارتی بر ظرفیت پتل های تابشی سقفی را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها ثابت کردند که لایه نازک عایق علاوه بر حفظ رطوبت باعث حفظ ظرفیت سرمایشی بیشتر در دستگاه می شود. البته باید توجه داشت که افزایش ضخامت لایه عایق می تواند باعث کاهش ظرفیت سرمایشی شود، بنابراین در این مطالعه، ضخامت ۲۰ میلی متر به عنوان ضخامت مناسب در نظر گرفته شده است.

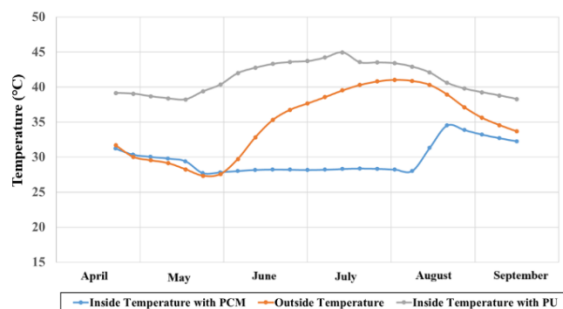


شکل (۶): تغییرات آنتالپی ماده تغییر فازدهنده براساس دما [۲۲]

۲.۳. تأثیر ماده تغییر فازدهنده در شرایط عدم حضور وسیله سرمایش

میزان صرفه جویی در کاهش میزان انرژی اگرچه اندک است، با انجام راهبردهای خاصی می‌توان این مقدار را افزایش داد. یکی از راهکارهای مؤثر در افزایش بازدهی ماده تغییر فازدهنده، استفاده از وزش طبیعی هوا با باز گذاشتن پنجره‌ها در شب است. در این راستا، با قرار دادن مواد تغییر فازدهنده در سقف به صورت آزاد (نبود وسیله سرمایش) در مقایسه با یک عایق معمولی و استفاده از وزش طبیعی هوا در شب، تأثیر این مواد بر توزیع دما در تابستان مورد بررسی قرار گرفته است.

در صورت استفاده از این ماده تغییر فازدهنده می‌توان توزیع دما را در طول روز بدون استفاده کردن از وسیله سرمایشی و با باز گذاشتن پنجره‌ها در شب و استفاده از وزش باد در شب، کاهش داد (شکل ۷). البته باید توجه داشت که این توزیع به شدت وابسته به دمای محیط است. درحالی‌که عایق‌های معمولی مانند پلی‌یورتان که ذخیره انرژی را انجام نمی‌دهند، نمی‌توانند توزیع دمای مناسب در داخل ساختمان در تابستان داشته باشند.



شکل (۷): توزیع دمای متوسط داخلی در مقایسه با دمای محیط در ماه‌های مختلف با وجود PCM و عایق PU

با توجه به نتایج به دست آمده ماده تغییر فازدهنده از نوع Q25، در ترکیب با تهویه شبانه به صورت تهویه آزاد می‌تواند مصرف انرژی

جدول (۱): تأثیر نوع ماده تغییر فازدهنده بر بار سرمایش

نوع ماده	میزان بهینه سازی انرژی (درصد)	بار سرمایش	جرم (گرم)
بدون مواد تغییر فازدهنده	۰	۱۰۰/۹	-
M182Q21	۱/۷	۹۹/۱۷	۴۴/۵
M182Q23	۱/۸	۹۹/۰۶	۴۴/۵
M182Q25	۲/۳	۹۸/۶	۴۴/۵
M182Q27	۱/۷	۹۹/۱۴	۴۴/۵
M182Q29	۱/۳	۹۹/۶	۴۴/۵
M91Q21	۱/۲	۹۹/۶۷	۲۲/۲۶
M91Q23	۱/۳	۹۹/۶۱	۲۲/۲۶
M91Q25	۱/۵	۹۹/۳۴	۲۲/۲۶
M91Q27	۱/۲	۹۹/۶۷	۲۲/۲۶
M91Q29	۰/۸۲	۱۰۰/۰۷	۲۲/۲۶
M51Q21	۰/۸۳	۱۰۰/۰۶	۱۲/۴۸
M51Q23	۰/۸۶	۱۰۰/۰۳	۱۲/۴۸
M51Q25	۱/۰۵	۹۹/۸۴	۱۲/۴۸
M51Q27	۰/۸۳	۱۰۰/۰۶	۱۲/۴۸
M51Q29	۰/۴۸	۱۰۰/۴۱	۱۲/۴۸
M27Q21	۰/۵	۱۰۰/۳۹	۶/۷۲
M27Q23	۰/۵۲	۱۰۰/۳۷	۶/۷۲
M27Q25	۰/۶۴	۱۰۰/۲۵	۶/۷۲
M27Q27	۰/۵۳	۱۰۰/۳۶	۶/۷۲
M27Q29	۰/۳۱	۱۰۰/۵۹	۶/۷۲

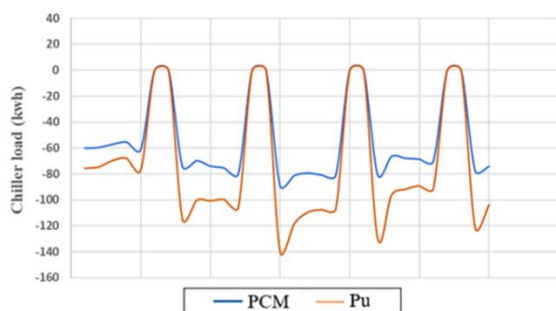
ویژگی‌های ماده تغییر فازدهنده Q25 در جدول (۲) و نمودار تغییرات آنتالپی براساس دمای این ماده در شکل (۶) نشان داده شده است. این ماده در شرایط نزدیک به شرایط آسایش، می‌تواند تغییر فاز دهد و در نهایت در شب که دمای آن به دمای ذوب این ماده نزدیک است، حرارت محیط را بگیرد و باعث کاهش مصرف انرژی شود.

جدول (۲): خصوصیات ترموفیزیکی مواد تغییر فازدهنده

نوع ماده	نام تجاری	چگالی نسبی (g/cm^3)	ضریب انتقال حرارت (W/m k)	گرمای ویژه (J/g)	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	گرمای نهان (J/g)
Q21	Bio PCM Q21	۰/۸۵-۱/۴	۰/۱۵-۲/۵	۲/۲-۴/۵	۲۱	۲۲۵/۶
Q23	Bio PCM Q23	۰/۸۵-۱/۴	۰/۱۵-۲/۵	۲/۲-۴/۵	۲۳	۲۴۵/۵
Q25	Bio PCM Q25	۰/۸۵-۰/۹۵	۰/۱۵-۲/۵	۲/۵	۲۵	۲۳۶/۹
Q27	Bio PCM Q27	۰/۸۵-۱/۴	۰/۱۵-۲/۵	۲/۲-۴/۵	۲۷	۲۵۱/۳
Q29	Bio PCM Q29	۰/۸۵-۱/۴	۰/۱۵-۲/۵	۲/۲-۴/۵	۲۹	۲۶۰/۷

ذخیره شده در شب می تواند آزاد شود و نیاز به مصرف برق زیاد در شب نیست. با توجه به کاهش توان سرمایشی پنل سقفی، استفاده از ماده تغییر فازدهنده می تواند باعث کاهش بار چیلر و همچنین میزان مصرف برق در طول فصول گرم سال شود که در ادامه بررسی خواهد شد.

توان سرمایشی مورد نیاز چیلر (تأمین کننده آب سرد داخل لوله های مسی پانل های تشعشعی) برای ایجاد شرایط آسایش در ساختمان، در دو حالت در شکل (۹) مقایسه شده است. همان طور که در شکل (۹) مشاهده می شود، میزان بار سرمایش در هنگام استفاده از مواد تغییر فازدهنده کمتر از بار سرمایش در زمان استفاده از پلی یورتان است. البته باید توجه داشت که این مراحل به صورت هوشمند انجام شده است که در صورت کاهش دمای داخل ساختمان (کمتر از ۲۵ درجه)، چیلر از مدار خارج می شود و در صورت افزایش دما، چیلر دوباره وارد مدار می شود. با توجه به اینکه مواد تغییر فازدهنده، انرژی را در خود ذخیره کرده و به مرور آزاد می کنند، در کاهش توان مصرفی چیلر تأثیر بسزایی دارد.



شکل (۹): تأثیر نوع عایق بر توان سرمایشی چیلر

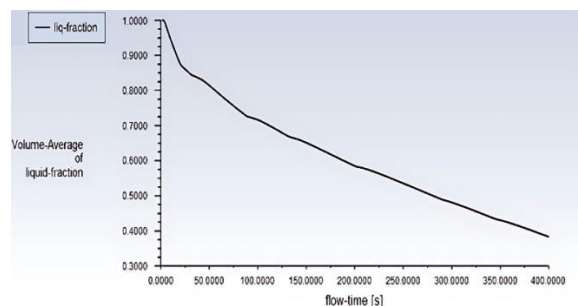
با توجه به اینکه مصرف برق در تابستان در یزد به اوج خود می رسد و گاهی اوقات کشور را دچار بحران می کند، راه های کاهش مصرف برق در ایران بسیار ارزشمند است. میزان مصرف برق ساختمان در زمان استفاده از ماده تغییر فازدهنده در مقایسه با عایق پلی یورتان به خوبی می تواند مصرف برق را کاهش دهد که این موضوع در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. با توجه به اینکه با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، در طول روز انرژی ذخیره شده و در شب آزاد می شود، انرژی کمتری برای سرمایش مصرف شده و مسلماً در کاهش مصرف الکتریسیته هم بسیار مؤثر است؛ که این مطلب باعث بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه های سالانه خواهد شد.

را به میزان زیاد در تابستان کاهش دهد و با افزایش ضخامت می توان این تأثیر را بیشتر کرد؛ البته تا جایی که امکان اجرایی وجود داشته باشد و از طرف دیگر باعث کاهش میزان توان سرمایشی نشود.

۳.۳. تأثیر ماده تغییر فازدهنده در سیستم سرمایش از سقف

در این قسمت، تأثیر مواد تغییر فازدهنده در کاهش بار سرمایش ساختمان و در نتیجه افزایش بازدهی سیستم سقف سرد مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، یک مدل ساختمان مانند شکل (۱) در نظر گرفته شده است که توسط یک پنل سقفی تشعشعی به عنوان وسیله سرمایشی (شکل ۳) خنک می شود. تمام شرایط مرزی و مدل در قسمت مدل سازی توضیح داده شده است.

ماده تغییر فازدهنده از نوع Q25 (که در نتایج به دست آمده به عنوان بهترین نوع عایق شناخته شد) در مقایسه با پلی یورتان به عنوان عایق در پشت پنل سقفی به کار رفته است. مواد تغییر فازدهنده در قسمت فوقانی پنل تشعشعی، سرمایش را در خود ذخیره می کنند و به این صورت ماده تغییر فازدهنده Q25 به صورت جامد تبدیل می شود. برای مشاهده این تغییر فاز، شکل (۸)، درصد جامد شدن ماده تغییر فازدهنده را با گذشت زمان به تصویر کشیده است.



شکل (۸): درصد جامد شدن ماده تغییر فازدهنده

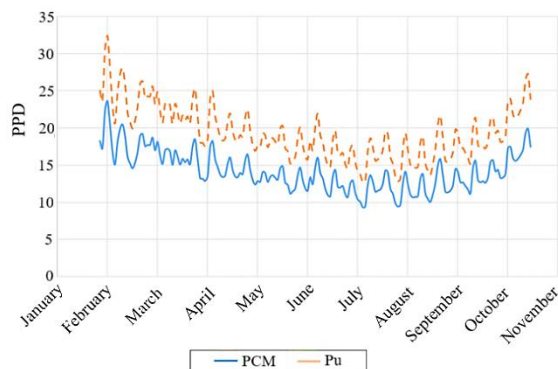
میزان توان سرمایشی تولیدی توسط پنل سقفی در زمان استفاده از عایق پلی یورتان و استفاده از مواد تغییر فازدهنده به عنوان عایق، در جدول (۳) مقایسه شده است.

جدول (۳): تأثیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده بر توان سرمایشی

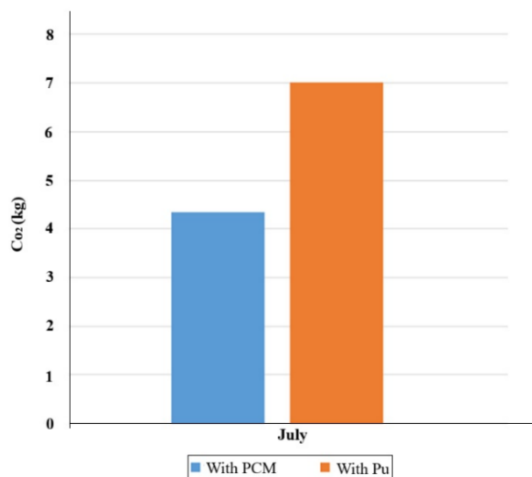
عایق مورد استفاده	توان سرمایشی (وات بر متر مربع)
پلی یورتان	۸۰
مواد تغییر فازدهنده	۶۲

همان طور که مشاهده می شود، مواد تغییر فازدهنده به خوبی می توانند انرژی را در خود ذخیره کنند و از این رو باعث کاهش مصرف انرژی و توان تولیدی (با در نظر گرفتن دمای آسایش یکسان برای دو عایق) در درازمدت شوند. باید توجه داشت که این انرژی

(۱۲) بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هنگام استفاده از مواد تغییر فازدهنده می‌توان میزان آلودگی هوا ناشی از تولید گاز دی‌اکسید کربن را به میزان قابل توجهی کاهش داد.



شکل (۱۱): تأثیر نوع عایق بر عدم نارضایتی افراد در ماه‌های مختلف



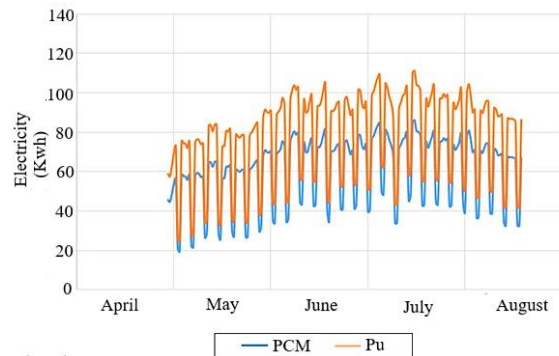
شکل (۱۲): تأثیر نوع عایق بر متوسط گاز دی‌اکسید کربن روزانه در زمان اوج مصرف

به‌منظور برآورد دوره بازگشت سرمایه، می‌توان با استفاده از روابط محاسباتی ارائه‌شده، مقدار آن را برای یک واحد مسکونی با زیربنای ۱۰۰ متر مربع تعیین نمود. مطابق داده‌های ارائه‌شده در جدول (۳)، برای محاسبه میزان مصرف انرژی الکتریکی برای یک واحد مسکونی با مساحت ۱۰۰ متر مربع، محاسبات زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\text{میزان مصرف برق در صورت استفاده از PCM} = 62 \text{ W/M}^2\text{h} \times 100 \text{ M}^2 = 62 \text{ KW/h}$$

$$\text{میزان مصرف برق در صورت استفاده از پلی‌یورتان} = 80 \text{ W/M}^2\text{h} \times 100 \text{ M}^2 = 8 \text{ KW/h}$$

با در نظر گرفتن میانگین بهای هر کیلووات‌ساعت برق مصرفی خانگی در سال ۱۴۰۴ که معادل ۴۴۲۵ ریال است و در صورت



شکل (۱۰): تأثیر نوع عایق بر میزان مصرف الکتریسته در ماه‌های مختلف

برای نمایش بهتر تأثیر نوع عایق بر میزان مصرف انرژی، میزان دمای متوسط و میزان رضایت افراد در روز پیک مصرف با استفاده از دو نوع عایق در جدول (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت عدم استفاده از پنل سقفی، میزان دمای متوسط در زمان پیک مصرف در هنگام استفاده از مواد تغییر فازدهنده کمتر از زمان استفاده از عایق پلی‌یورتان است و بدین سبب، میزان رضایتمندی افراد نیز تغییر می‌کند. لازم به توضیح است که بنابر اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی، هیچ‌گاه تحت شرایط یکسان نمی‌توان ۱۰۰٪ رضایت افراد را جلب نمود؛ بنابراین همواره درصدی از افراد ابراز نارضایتی می‌کنند. باید توجه داشت که میزان محدوده آسایش^۱ و درصد عدم رضایت افراد^۲ در خلاف جهت یکدیگر عمل می‌کنند. در بهترین حالت که $PMV=0$ است، $PPD=5\%$ است. هنگامی که مقدار PMV بین +۱ و -۱ قرار می‌گیرد، مقدار PPD برابر ۲۷ درصد است. در شکل (۱۱) مقدار عدم رضایت افراد در هنگام استفاده از دو نوع عایق نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدم نارضایتی در هنگام استفاده از مواد تغییر فازدهنده به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

جدول (۴): تأثیر نوع عایق بر میزان رضایت و محدوده آسایش افراد در روز ۱۵ جولای

Material	Operative Temperature	PMV	PPD
پلی‌یورتان	۳۱/۰۷	۱/۵۸	٪۵۰/۳۰
ماده تغییر فازدهنده (Q25)	۲۹/۷۶	۱/۱۳	٪۳۵/۴۴

با توجه به اینکه برای تولید برق مصرفی نیاز به استفاده از سوخت فسیلی در نیروگاه است، کاهش مصرف برق تأثیر بسیار زیادی بر میزان آلودگی هوا خواهد داشت که این موضوع در شکل

1. PMV
2. PPD

ساختمان را در محدوده آسایش حفظ کند. این درحالی است که عایق های معمولی مانند پلی یورتان فاقد این قابلیت ذخیره و بازیافت انرژی حرارتی هستند و در تأمین شرایط آسایش تابستانی ضعیف تر عمل می کنند.

در مرحله بعد، تأثیر استفاده از ماده تغییر فازدهنده در سیستم های سرمایش از سقف بررسی شد. نتایج نشان داد که اگرچه استفاده از ماده تغییر فازدهنده باعث کاهش توان سرمایشی لحظه ای پنل سقفی می شود (از ۸۰ به ۶۲ وات بر متر مربع)، در عوض با ذخیره انرژی در روز و آزادسازی آن در شب، موجب کاهش مصرف برق چیلر و افزایش بازدهی سیستم در درازمدت می شود. در واقع ماده تغییر فازدهنده نقش یک بافر حرارتی را ایفا می کند که مصرف انرژی را در زمان اوج بار کاهش می دهد.

همچنین با مقایسه دو نوع عایق در شرایط واقعی تابستان یزد، مشخص شد که استفاده از Q25 نه تنها مصرف الکتریسیته را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد، بلکه دمای متوسط داخلی را پایین تر نگه داشته و درصد رضایت حرارتی ساکنان را نیز افزایش می دهد. براساس شاخص های PMV و PPD، میزان عدم رضایت در حالت استفاده از ماده تغییر فازدهنده حدود ۱۵ درصد کمتر از پلی یورتان بود، که این نشان دهنده بهبود ملموس شرایط آسایش حرارتی است.

در نهایت، کاهش مصرف برق منجر به کاهش قابل توجهی در انتشار گاز دی اکسید کربن شده و تأثیر مثبتی بر محیط زیست دارد. از آنجاکه بخش قابل توجهی از برق کشور از منابع فسیلی تأمین می شود، استفاده گسترده از مواد تغییر فازدهنده در ساختمان ها می تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش مصرف انرژی، بهبود آسایش حرارتی و کاهش آلودگی هوا به کار گرفته شود. این نتایج نشان می دهد که مواد تغییر فازدهنده، به ویژه Q25، گزینه ای بسیار مؤثر برای بهینه سازی انرژی در اقلیم های گرم و خشک به شمار می آید. علاوه بر این، دوره بازگشت سرمایه سیستم مورد نظر، در صورت تأمین شرایط اقتصادی مناسب برای قیمت ماده تغییر فازدهنده، کوتاه مدت بوده و حدود ۴ سال برآورد می شود؛ در غیر این صورت، این دوره می تواند تا حدود ۱۲ سال افزایش یابد.

استفاده ۱۵ ساعته از وسایل سرمایشی می توان در مصرف هزینه ها به صورت زیر صرفه جویی کرد:

$$\begin{aligned} & 30 \times 15h \times 6.2 \text{ KW/h} = 2850 \text{ Rial/KW} \\ & 2850 \text{ Rial/KW} \times 12 = 34200 \text{ Rials} \\ & 30 \times 15h \times 8 \text{ KW/h} = 3600 \text{ Rial/KW} \\ & 3600 \text{ Rial/KW} \times 12 = 43200 \text{ Rials} \end{aligned}$$

براساس نتایج به دست آمده، استفاده از مواد تغییر فازدهنده می تواند سالانه حدود ۳۳،۰۱۱،۰۰۰ ریال صرفه جویی در هزینه برق ایجاد کند. در یک واحد ساختمانی با زیربنای ۱۰۰ متر مربع، میزان PCM مورد نیاز حدود ۵۰ کیلوگرم برآورد می شود که با قیمت پایه هر کیلوگرم ۱۰ میلیون ریال، هزینه معادل ۵۰۰ میلیون ریال خواهد بود. بنابراین، دوره بازگشت سرمایه در شرایط فعلی تقریباً ۱۲ سال است. باین حال، در صورت کاهش قیمت خرید PCM به صورت عمده در حدود ۳۰۰ هزار تومان برای هر کیلوگرم، دوره بازگشت سرمایه به طور قابل توجهی کاهش یافته و به حدود ۴ سال خواهد رسید.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد حرارتی مواد تغییر فازدهنده با دماهای ذوب متفاوت و ضخامت های گوناگون در سقف ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس نشان داد که ماده تغییر فازدهنده Q25 با دمای ذوب ۲۵ درجه سانتی گراد و ضخامت ۷۴/۲ میلی متر بهترین عملکرد را در کاهش بار سرمایشی ساختمان دارد. دلیل این عملکرد مطلوب، ظرفیت حرارتی بالای Q25 در دمای نزدیک به شرایط آسایش و توانایی آن در ذخیره آنتالپی طی روز و آزادسازی آن در شب است.

استفاده از ماده تغییر فازدهنده در حالت نبود سیستم سرمایشی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته ها نشان دادند که در صورت استفاده از تهویه طبیعی شبانه (مانند باز گذاشتن پنجره ها)، ماده Q25 می تواند به طور مؤثری نوسانات دمایی روزانه را کاهش دهد و دمای داخل

مراجع

[1] Frank, B., "Using phase change materials (PCM) for space heating and cooling in buildings", Proceedings of AIRAH Performance Enhanced Buildings Environmentally Sustainable Design Conference, Australia, 2004.

[2] Pasupathy, A., Athanasius, L., Velraj, R., Seeniraj, R. V., "Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management",

- Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 5-6, pp. 556-565, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.016>.
- [3] Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C., "A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard", Energy and Buildings, Vol. 40, No. 5, pp. 882-890, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.002>.
- [4] Huang, M.J., Eames, P.C., Hewitt, N.J., "The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 90, No. 12, pp. 1951-1960, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.02.002>.
- [5] Nagano, K., Takeda, S., Mochida, T., Shimakura, K., Nakdamura, T., "Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage – heat response in small scale experiment", Energy and Buildings, Vol. 36, No. 4, pp. 436-446, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.07.010>.
- [6] Farid, M.M., Chen, X.D., "Domestic electric space heating with heat storage", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 213, No. 2, pp. 83-92, 1999, <https://doi.org/10.1243/0957650991537455>.
- [7] Aryal, A., Chaiwiwatworakul, P., Chirarattananon, S., "An experimental study of thermal performance of the radiant ceiling cooling in office building in Thailand", Energy and Buildings, Vol. 283, p. 112849, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112849>.
- [8] Nong, R., Zhang, L., Tang, X., Su, X., Tang, X., "Thermal performance study of PCM embedded radiant cooling ceiling assisted by infrared-transparent silicon wafers", Energy and Buildings, Vol. 321, pp. 114644, 2024.
- [9] Shin, M.S., Kim, S.Y., Rhee, K.N., "Cooling capacity evaluation of ceiling radiant cooling panels using thermoelectric module", Energy and Buildings, Vol. 323, p. 114760, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114760>.
- [10] Skovajsa, J., Drabek, P., Sehnalek, S., "Solution of the modular PCM-based cooling ceiling and ventilation system," Applied Thermal Engineering, Vol. 257, p. 124169, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124169>.
- [11] Bogatu, D.I., Shinoda, J., Olesen, B.W., Kazanci, O.B., "Cooling performance evaluation of novel radiant ceiling panel containing phase change material (PCM)", Journal of Building Engineering, Vol. 103, p. 112051, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112051>.
- [12] Yang, S., Zhang, Y., Zhao, Y., Torres, J.F., Wang, X., "PCM-based ceiling panels for passive cooling in buildings: A CFD modelling", Energy and Buildings, Vol. 285, p. 112898, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112898>.
- [13] Shi, W., Yang, H., Ma, X., Liu, X., "Techno-economic evaluation and environmental benefit of hybrid evaporative cooling system in hot-humid regions", Sustainable Cities and Society, Vol. 97, p. 104735, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104735>.
- [14] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P., "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency", Energy and Buildings, Vol. 59, pp. 82-103, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>.
- [15] Ho, C.J., Gao, Y.W., Yang, T.F., Rashidi, S., Yan, W.M., "Numerical study on forced convection of water-based suspensions of nanoencapsulated PCM particles/ Al_2O_3 nanoparticles in a mini-channel heat sink", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 157, pp. 119965, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119965>.
- [16] Daly, D., Roth, J., Kokogiannakis, G., McDowell, C., Tibbs, M., Cooper, P., "Energy consumption in Australian primary schools: Influences and metrics", Energy and Buildings, Vol. 277, p. 112549, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112549>.
- [17] Sinacka, J., Szczechowiak, E., "An experimental study of a thermally activated ceiling containing phase change material for different cooling load profiles", Energies, Vol. 14, p. 7363, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14217363>.
- [18] Mirahmad, A., Sadreameli S.M., "Numerical study and simulation of the performance of a phase change material-filled heat exchanger for an air-conditioning system in a residential building located in hot and arid regions of Iran", Scientific Journal of Energy Engineering and Management, Vol. 5, No. 2, pp. 42-51, 2015.
- [19] Center, F. S. E., Gu, L., "ASHRAE standard 140-2004 standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs: Test results for the DOE-2.1E (v120) that is incorporated in energy gauge summit 3.14", 2007.
- [20] Taheri, M., Pourfayaz, F., Habibi, R., Maleki, A., "Exergy analysis of charge and discharge processes of thermal energy storage system with various phase change materials: A comprehensive comparison", Journal of Thermal Science, Vol. 33, No. 2, pp. 509-521, 2024, <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1859-y>.
- [21] Ahmad, N.A., Lim, C.W., "Simplified model and performance analysis for radiant cooling panel with serpentine tube arrangement and thin

insulation layer for moisture control in tropical climate", Journal of Physics: Conference series, Conf. Ser. 1630, p. 012002, 2020, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1630/1/012002>.

[22] Sleiti, A.K., Naimaster, E.J., "Energy consumption in office buildings with phase change materials", Eleven International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, Doha, Qatar, February 25-28, 2018.