مطالعه عددی تأثیر دمای ذوب بر کارایی مواد تغییر فازدهنده در کاهش مصرف انرژی ساختمان

بهرنگ سجادی [۱*]، محمد یوسفی‌پور [۲]، محمدعلی اخوان بهابادی [۳]، صادق خداویسی [۴]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
۴- کارشناس ارشد، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران
*پست الکترونیک نویسنده مسئول: bsajadi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۲۰

چکیده

در این تحقیق تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر کاهش مصرف سالانه انرژی سیستم تهویه مطبوع برای اتاقی واقع در یک ساختمان چندطبقه با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس بررسی شده است. از آنجا که نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده اهمیت زیادی در میزان اثربخشی آن‌ها دارد، به‌عنوان بخشی از تحقیق حاضر، تأثیر شرایط اقلیمی ایران بر روی دمای ذوب مناسب برای ماده تغییر فاز دهنده در ۴ شهر تبریز در اقلیم سرد، تهران در اقلیم معتدل، یزد در اقلیم گرم و خشک و بندرعباس در اقلیم گرم و مرطوب مطالعه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، دمای مناسب بین ۲۱ تا ۲۷ درجه سلسیوس و میزان صرفه‌جویی بین ٪۱/۶ تا ٪۱۳/۲ متغیر است. نتایج حاصل از این تحقیق در درک بهتر تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر کاهش مصرف انرژی سیستم تهویه مطبوع و شرایط مناسب به‌کارگیری آن‌ها مفید است.

واژگان کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، کاهش مصرف انرژی، انرژی‌پلاس، دمای ذوب، مطالعه اقلیمی

Numerical Study of The Melting Temperature Effect on The Performance of Phase Change Materials (PCM) to Reduce Buildings Energy Consumption

Behrang Sajadi[1*], Mohammad Yousefipour[2], Mohammad Ali Akhavan-Behabadi[3], Sadegh Khodaveisi[4]

1- Assistant Professor, University of Tehran, Tehran, Iran
2- M.Sc. South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3- Professor, University of Tehran, Tehran, Iran
4- M.Sc. Iranian Gas Engineering and Development Company, Tehran, Iran
*Corresponding author, E-mail address: bsajadi@ut.ac.ir

Received: 30.06.2016 Accepted: 10.05.2017

Abstract

In this study, the effect of using phase change materials on the air-conditioning system energy consumption of a typical room in a multi-floor building has been studied using EnergyPlus software. As the melting point of PCMs has an important impact on their effectiveness, as a part of this research, the effect of Iran climatic conditions on the appropriate melting point of the PCM has been investigated in 4 cities: Tabriz as a cold, Tehran as a moderate, Yazd a dry-hot and Bandar-e-Abbas a humid-hot climate. Based on the results, the proper temperature of PCM melting temperature is between 21 to 27°C and the saving varies from 1.6 to 13.2%. The results of this incestigation are useful in getting better understanding of the effect of PCMs on reducing the HVAC system energy consumption and in determining the PCM appropriate specifications.

Keywords:Phase change material (PCM), Energy saving, EnergyPlus, Melting temperature, Climatic stud

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

هم‌اکنون مصرف حامل‌های انرژی به‌منظور تأمین سرمایش و گرمایش در بخش خانگی یکی از مصارف عمده انرژی در ایران و سایر کشورهای دنیا است. به‌منظور جلوگیری از هدر رفت انرژی در این حوزه از روش‌های فعال و غیرفعال استفاده می‌گردد. تفاوت اصلی این دو روش، استفاده از تجهیزات مصرف‌کننده انرژی برای کاهش مصرف انرژی در روش فعال و عدم استفاده از این تجهیزات در روش غیرفعال است [۱]. یکی از روش‌های غیرفعال برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام)[1] در جداره ساختمان است. خصوصیات ترموفیزیکی پی‌سی‌ام در هنگام تغییر فاز از جامد به مایع (جذب انرژی حرارتی) و تبدیل از مایع به جامد (دفع انرژی)، امکان استفاده از این ماده در ساختمان به‌عنوان ذخیره کننده انرژی را فراهم می‌آورد. مطالعات انجام شده توسط فیوستل [۲] در مورد تخته‌های دیواری اشباع شده با پی‌سی‌ام نشان‌دهنده کاهش ظرفیت تبرید سیستم‌های سرمایشی با استفاده از پی‌سی‌ام بود. این مطالعه که بر اساس روش تفاضل محدود هدایت[2] انجام گرفت، نشان‌دهنده اوج توان موردنیاز پایین‌تر در صورت استفاده از پی‌سی‌ام در دیواره بود که این امر بر انتخاب تجهیزات با ظرفیت و مصرف انرژی کمتر تأثیرگذار است. آتنیتیس [۳] تحقیقی بر روی یک اتاقک آزمایش در یک فضای باز که دیواره داخلی آن با گچ‌اندود شده بود، انجام داد. گچ بکار رفته در این دیواره شامل ٪۲۵ وزنی پی‌سی‌ام بود. در این تحقیق برای بررسی آزمایش مدلی یک‌بعدی مورداستفاده قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده آن بود که استفاده از پی‌سی‌ام در جدار ساختمان، حدود ۴ درجه دمای داخل را در طول روز کاهش می‌دهد و در هنگام شب نیز موجب کاهش بار گرمایشی موردنیاز می‌گردد. کیسوک [۴] نیز با استفاده از ٪۳۰ وزنی پارافین به‌عنوان پی‌سی‌ام در تخته دیواری، آزمایشی تجربی به مدت ۱۴ روز انجام داد. طی این تحقیق اختلاف دمای ۱۰ درجه سلسیوس هوای داخل با هوای بیرون، ثبت شد. در تحقیقی مشابه توسط فرید [۵] استفاده از گچ اشباع شده با پی‌سی‌ام بر روی دیوار بدون تابش مستقیم نور خورشید، آزمایش گردید. همچنین سه عامل نقطه ذوب، دامنه دمای ذوب و ظرفیت گرمای نهان ذوب پی‌سی‌ام نیز مورد مطالعه قرار گرفت. طی این تحقیق مشخص شد که انتخاب دمای ذوب پی‌سی‌ام در محدوده دمای آسایش اتاق موجب بیشترین میزان ذخیره‌سازی و کاهش مصرف انرژی ساختمان می‌شود. علاوه بر این مشخص گردید که تغییر حالت پی‌سی‌ام در چند محدوده دمایی بر کارایی ذخیره‌سازی گرمایی تأثیرگذار است و باعث کاهش این مقدار می‌شود. کابزا و همکاران [۶] در تحقیقی تجربی تأثیر استفاده از یک نوع آجر بهبودیافته که در آن از پی‌سی‌ام به‌صورت میکروکپسولی استفاده شده بود را در مقایسه با دیوار بتونی عادی بررسی کردند. طبق نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی، رفتار دیوار دارای پی‌سی‌ام در مقایسه با دیوار دارای بتون معمولی نشان‌دهنده نوسان کمتر دمای داخل در طول روز بود. طبق تحقیقات ژانگ و همکاران [۷] در انتخاب پی‌سی‌ام باید تمام مشخصات فیزیکی، شیمیایی، ترموفیزیکی و ترمودینامیکی ماده انتخابی مورد ارزیابی قرار گیرد زیرا هر کدام از این مؤلفه‌ها بر نحوه کارکرد پی‌سی‌ام در ساختمان تأثیرگذار است. در این تحقیق تأثیر شاخصه‌های مؤثر بر عملکرد پی‌سی‌ام شامل چگالی و ضریب هدایت حرارتی (چه در حالت مایع و چه در حالت جامد) بررسی گردید. به‌علاوه اثر کم بودن تغییر دما به هنگام تغییر فاز (نزدیک بودن به حالت هم‌دما) و کم بودن اثرات هیسترزیس در تعداد چرخه‌های زیاد به‌عنوان شاخصه‌های انتخاب پی‌سی‌ام مناسب، مورد بررسی قرار گرفتند. در پژوهشی که توسط دیاکونو [۸] انجام شد، مشخص گردید که استفاده از پی‌سی‌ام باعث کاهش مصرف انرژی سالیانه می‌شود. در این مطالعه از یک مدل عددی بر اساس حل معادله جریان گذرا با استفاده از روش آنتالپی برای به دست آوردن مشخصات ترموفیزیکی تخته دیواری کامپوزیتی مخلوط با پی‌سی‌ام، استفاده شد. بر اساس نتایج این مطالعه با استفاده از پی‌سی‌ام در دیواره مذکور، اوج بار سرمایشی و گرمایشی حدود ٪۳۵ کاهش پیدا کرد. علاوه بر این مصرف انرژی سالیانه برای سرمایش و گرمایش نیز به ترتیب ٪۱ و ٪۱۲/۵ کم شد. در تحقیق مشابه که توسط آلبرت [۹] به‌صورت تجربی انجام گرفت، شاخص‌های آسایش حرارتی در سه ساختمان کاملاً متفاوت که در جداره آن‌ها از پی‌سی‌ام استفاده شده بود، بررسی گردید. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از پی‌سی‌ام در کاهش شدت عدم آسایش در ساختمان‌های دارای اینرسی حرارتی کم بود. با این وجود، طبق نتایج این تحقیق استفاده از پی‌سی‌ام در ساختمان‌های دارای اینرسی حرارتی بالا و بدون تابش نور خورشید موجب بهبود شاخص آسایش حرارتی نمی‌شود. در مقاله دیگری که توسط بیسواس و همکاران [۱۰] نوشته شده است، در یک تحقیق تجربی- عددی، تأثیر استفاده از نانو پی‌سی‌ام در یک

[1] Phase change material (PCM)
[2] Conduction finite difference (CFD)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

دیوار نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا مدل عددی با استفاده از نتایج تجربی اعتبارسنجی و سپس با مدل ارائه شده نحوه کارکرد این نوع پی‌سی‌ام در دیواره بررسی گردید. به‌منظور بررسی مناسب، در این تحقیق از سه نمونه محدوده دمای آسایش بهره گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده حساسیت مدل ارائه شده به دمای سرمایش بود. در سه دمای سرمایش بررسی شده، دمای ۲۳/۳ درجه سلسیوس در بالای محدوده تغییر فاز، دمای ۲۱ درجه در انتهای محدوده تغییر فاز و دمای ۲۲ درجه سلسیوس در میانه محدوده تغییر فاز پی‌سی‌ام قرار می‌گرفت. نتایج مدل‌سازی انجام شده بر روی یک دیواره جنوبی نشان‌دهنده بیشترین کاهش مصرف انرژی سالیانه در دمای ۲۲ درجه سلسیوس بود.

نرم‌افزار انرژی‌پلاس[1] یکی از نرم‌افزارهایی است که امکان شبیه‌سازی پی‌سی‌ام در جداره ساختمان را مهیا می‌سازد [۱۱]. تتلو [۱۲] تحقیقی در مورد نحوه کارکرد پی‌سی‌ام به‌صورت میکروکپسول در دیوارهای داخلی ساختمان، با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس، انجام داد. در این مقاله با در نظر گرفتن سه دمای ذوب متفاوت برای پی‌سی‌ام به بررسی رفتار آن در ترکیب با دیوار داخلی پرداخته شد. در این شبیه‌سازی از سه دمای ذوب ۱۸، ۲۳ و ۲۶ درجه سلسیوس برای پی‌سی‌ام استفاده شد و دیوار نیز در سه حالت استفاده از پی‌سی‌ام در لایه داخلی، لایه خارجی و بدون وجود پی‌سی‌ام مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، در دمای ۲۳ درجه سلسیوس بیشترین کارایی پی‌سی‌ام در کاهش نوسان‌های دمای داخل به دست آمد. همچنین طبق نتایج موجود، استفاده از پی‌سی‌ام در لایه خارجی به نسبت لایه داخلی در کاهش نوسان دمای داخل در فصل تابستان مؤثرتر است. مصلحی و همکاران [۱۳] با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس ساختار بهینه دیوار و نحوه قرارگیری مواد تغییر فازدهنده در آن را بررسی نموده‌اند، در این تحقیق بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی دیوار در حدود ٪۳۴ برآورد گردیده است؛ همچنین حق‌شناس [۱۴] نیز نحوه عملکرد دیوارهای دارای آجر مجهز به مواد تغییر فازدهنده را مورد بررسی قرار داده است، طبق این تحقیقات با استفاده از این آجرها شار حرارتی ورودی به ساختمان ٪۳۸ دچار کاهش می‌گردد. در تحقیقی توسط آهنگری [۱۵] استفاده از دولایه پی‌سی‌ام با نرم‌افزار انرژی‌پلاس در دو فصل سرد و گرم سال و تأثیر مثبت آن بر شاخص‌های حرارتی بررسی گردیده است. اولاً [۱۶] با رویکرد بررسی میزان انرژی حرارتی ذخیره و دفع شده توسط دیوار و میزان و مدت زمان آسایش ساکنان، از شاخص‌های شدت عدم آسایش حرارتی، میزان آسایش حرارتی و کارایی ذخیره‌سازی برای بررسی رفتار و کارکرد پی‌سی‌ام بکار رفته در دیوار داخلی اتاق استفاده نمود. در این تحقیق شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار انرژی‌پلاس انجام گرفت که طبق نتایج، شاخص‌های آسایش حرارتی در ساختمان دارای پی‌سی‌ام نسبت به ساختمان بدون پی‌سی‌ام بهبود می‌یابد.

در مقاله حاضر با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس به بررسی استفاده از پی‌سی‌ام در یک اتاق واقع در یک ساختمان چندطبقه پرداخته و تأثیر این ماده بر کاهش مصرف انرژی سالیانه این اتاق بررسی می‌شود. با توجه به آنکه پی‌سی‌ام در هنگام تغییر فاز طی چرخه کار مقدار زیادی انرژی جذب و دفع می‌کند، دمای تغییر فاز در کارکرد این ماده بسیار تأثیرگذار است؛ بنابراین به‌عنوان بخشی از این تحقیق، پارامتر مهم دمای تغییر فاز (دمای ذوب) با توجه به اقلیم‌های مختلف آب و هوایی موجود در کشور ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به هر اقلیم، دمای مناسب تغییر فاز برای پی‌سی‌ام بکار رفته در جدارهای اتاق و میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی سالانه ساختمان تعیین می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق به درک بهتر تأثیر استفاده از پی‌سی‌ام و شرایط مناسب برای انتخاب آن در اقلیم‌های آب و هوایی ایران کمک می‌کند.

۲- مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار انرژی‌پلاس در سال‌های اخیر برای تحلیل بار گرمایشی و سرمایشی و انجام شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی انتقال حرارت در ساختمان و محاسبات تحلیل بار و مصرف انرژی در این نرم‌افزار بر اساس الگوریتم تعادل حرارتی انجمن مهندسان سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع آمریکا انجام می‌شود [۱۷]. برای مدل‌سازی انتقال حرارت در پوسته ساختمان و محاسبه تأثیر ظرفیت حرارتی بر آن، به‌طور معمول از تابع انتقال هدایت[2] استفاده می‌شود. این روش برای محاسبه انتقال حرارت در مواد با خواص ترموفیزیکی ثابت دارای دقت مناسبی است و علاوه بر آن در زمان کوتاهی انجام محاسبات را امکان‌پذیر می‌سازد. مواد

[1] EnergyPlus

[2] Conduction transfer function (CTF)

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

تغییر فاز دهنده به علت ماهیت فعال، دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند. در نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی این مواد از الگوریتم تفاضل محدود هدایت استفاده می‌شود [۱۷]. در این روش اجزای مختلف ساختمان مانند دیوار، کف و پنجره به چند نقطه تفکیک و صورت تفاضل محدود معادلات انتقال حرارت به‌صورت ضمنی برای تمام نقاط حل می‌شود. با استفاده از معادله انتقال حرارت گذرای یک‌بعدی در جدار می‌توان نوشت:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (۱)$$

که صورت تفاضل محدود آن در نرم‌افزار انرژی‌پلاس عبارت است از:

$$\rho c_p \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = k \left(\frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (۲)$$

که در آن Δx فاصله گره‌ها در جدار بوده و بر اساس ثابت فاصله (c)، ضریب پخش حرارتی ماده (α) و بازه زمانی حل (Δt) تعیین می‌گردد:

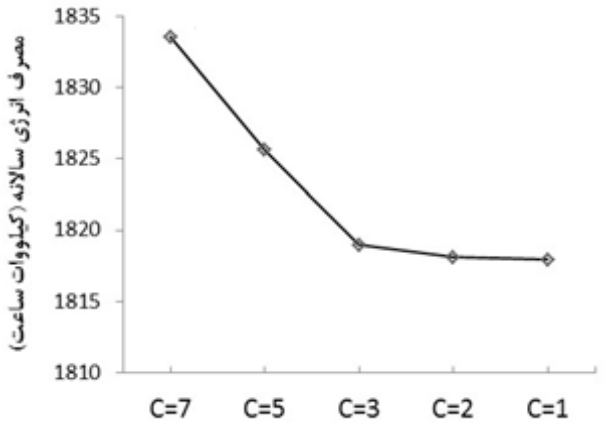
$$\Delta x = \sqrt{c \alpha \Delta t} \quad (۳)$$

برای شبیه‌سازی رفتار مواد تغییر فازدهنده معادله تفاضل محدود هدایت با معادله آنتالپی- دما (معادله ۴) ترکیب می‌شود تا تغییرات آنتالپی مواد تغییر فاز دهنده در مدل‌سازی وارد گردد. معادله دما- آنتالپی برای ایجاد و محاسبه گرمای ویژه معادل در هر بازه زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$c_p = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{T_i^{j+1} - T_i^j} \quad (۴)$$

۲-۱- اعتبار سنجی نرم‌افزار

به‌منظور اطمینان از دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، در این قسمت نرم‌افزار انرژی‌پلاس مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. به این منظور رساله تجربی انجام گرفته توسط مورونگانانتام [۱۸]در مورد تأثیر استفاده از پی‌سی‌ام در جدار ساختمان مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق میزان انرژی مصرفی سالانه دو اتاقک دارای پی‌سی‌ام و بدون پی‌سی‌ام بررسی شده است. ثابت فاصله (c) در معادله (۲) در دقت مکانی و در نتیجه پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان مؤثر است. شکل ۱۰ تأثیر این ثابت بر نتایج مدل‌سازی را



شکل ۱- تأثیر ثابت فاصله (c) بر دقت نتایج

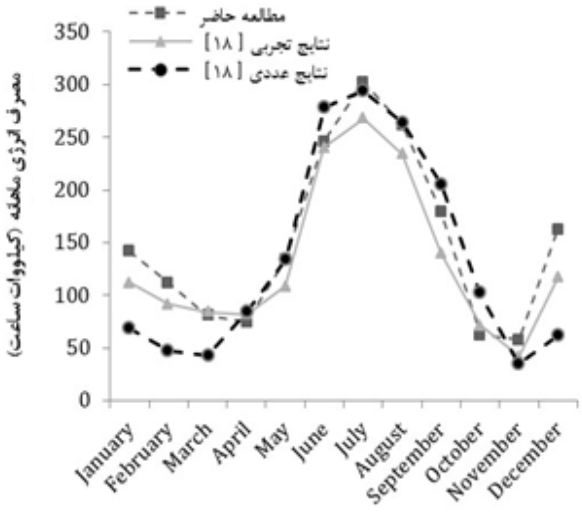
نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، با استفاده از مقدار ۳ تغییر مصرف انرژی سالانه ساختمان کمتر از ۱٪ است و استقلال نتایج تضمین می‌شود. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نتایج میزان مصرف ماهانه انرژی در مطالعه حاضر برای دو اتاقک دارای پی‌سی‌ام و بدون پی‌سی‌ام با نتایج تجربی و عددی مورونگانانتام [۱۸] مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، علیرغم وجود عدم قطعیت در تطابق داده‌های آب و هوایی و مشخصات سیستم تهویه مطبوع مورد استفاده در انجام شبیه‌سازی با مقادیر تجربی، نتایج به دست آمده از تطابق مناسبی با داده‌های تجربی برخوردار است. به‌علاوه پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به نتایج عددی مورونگانانتام [۱۸] به دست می‌دهد. مطابقت نتایج مطالعه حاضر و نتایج مورونگانانتام، نشان‌دهنده صحت کارایی و دقت خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار است.

۲-۲- مطالعه موردی

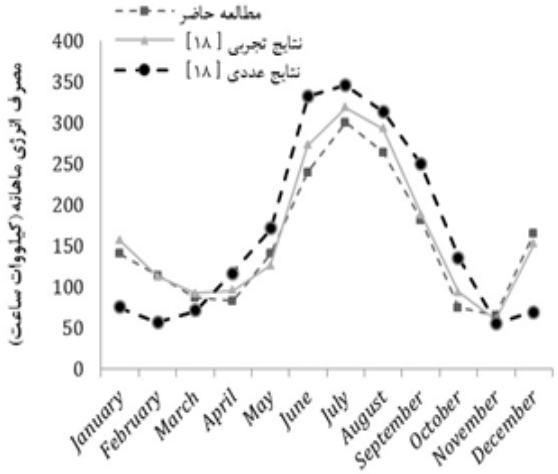
برای بررسی تأثیر استفاده از پی‌سی‌ام در جدار ساختمان، شبیه‌سازی بر روی اتاقی واقع در یک ساختمان چندطبقه انجام شده است. اتاق در یکی از طبقات میانی قرار گرفته است. شکل ۴ نمایی از محل و ابعاد اتاق را نشان می‌دهد.

همه فضاهای اطراف این اتاق، تهویه شده و هم‌دما با آن هستند. به همین دلیل تمام جدارهای داخلی، سقف و کف اتاق به‌صورت آدیاباتیک و بدون انتقال حرارت با دیوارهای فضاهای مجاور در نظر گرفته شده است. یکی از دیوارهای اتاق در معرض تابش نور خورشید و هوای خارج قرار دارد و دارای یک پنجره ۲×۲ است. در شبیه‌سازی‌ها منظور از پنجره جنوبی، جهت قرارگیری این دیوار در حالت پنجره رو به

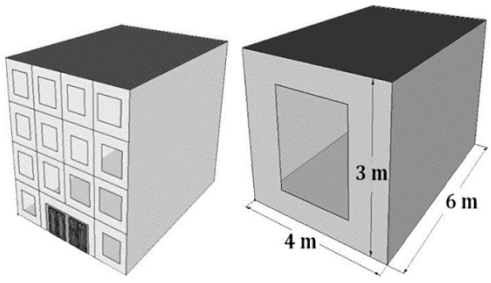
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۲- نتایج مصرف انرژی سالانه در اتاقک دارای پی‌سی‌ام



شکل ۳- نتایج مصرف انرژی سالانه در اتاقک بدون پی‌سی‌ام



شکل ۴- نمایی از ساختمان و محل قرارگیری اتاق در ساختمان

جنوب و منظور از پنجره شمالی، جهت قرارگیری این دیوار در حالت پنجره رو به شمال است. در اتاق مورد مطالعه از مصالح مورد تأیید در مبحث ۱۹ سازمان مقررات ملی ساختمان ایران استفاده گردیده است به نحوی که ضرایب انتقال حرارت کل جدارها با مقادیر ضریب انتقال حرارت مرجع برای ساختمان‌های گروه ۱ تطابق داشته باشد [۱۹].

مشخصات مصالح به کار رفته در جداره اتاق موردنظر در جدول (۱) آورده شده است.

در شبیه‌سازی‌ها به‌منظور بررسی کاهش مصرف انرژی از پی‌سی‌ام در جدارهای اتاق موردنظر استفاده گردیده است. نوع مواد تغییر فاز دهنده به کار رفته در این اتاق از نوع بایو پی‌سی‌ام است [۱۸] و مشخصات ترمودینامیکی مواد تغییر فاز دهنده به کار رفته در جدول (۲) آورده شده است. ضخامت پی‌سی‌ام مورد استفاده ۴ سانتی‌متر [۲۰] و محل آن در دیوار خارجی و کف اتاق است.

در اتاق موردنظر به‌منظور تأمین شرایط آسایش از یک سیستم تهویه مطبوع ایده‌آل [۱۸] استفاده شده است تا دمای اتاق را در شرایط تابستانی ۲۷ درجه سلسیوس و در شرایط زمستانی ۲۰ درجه سلسیوس تثبیت نماید. از آنجا که هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پی‌سی‌ام بر کاهش بار ناشی از تشعشع خورشید و انتقال حرارت از جداره‌ها است، از بارهای داخلی و هوای تازه صرف‌نظر شده است. اقلیم‌های آب و هوایی از نظر تغییرات دمایی، میزان رطوبت، اختلاف حداکثر و حداقل دما و نحوه اثر تابش خورشید متفاوت هستند. شرایط متفاوت آب و هوایی موجب تأثیر در نحوه ورود و خروج انرژی به ساختمان می‌گردد. با توجه به آنکه رفتار پی‌سی‌ام متأثر از وضعیت آب و هوایی و اقلیمی محیط است، بنابراین یکی از شاخص‌های اصلی که با تغییر اقلیم دستخوش تغییر می‌شود، نقطه ذوب مناسب برای پی‌سی‌ام می‌باشد. در تحقیقی که توسط باقری و همکاران [۲۱] انجام شده است، اقلیم‌های مختلف کشور ایران بررسی گردیده است. در تحقیق آن‌ها ایران به اقلیم‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است.

جدول ۱- مشخصات پوسته اتاق

جدار	ضریب انتقال حرارت کل (W/m^2K)	گرمای ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m^3)
سقف و کف	۰/۳	۱۰۰۰	۱۵۰۰
دیوار داخلی	۰/۶	۱۰۰۰	۱۵۰۰
دیوار خارجی	۰/۶	۱۰۰۰	۱۵۰۰
پنجره	۲/۶	-	-

جدول ۲- مشخصات پی‌سی‌ام به کار رفته در ساختمان [۱۸]

ضریب هدایت (W/mK)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	چگالی (kg/m^3)
۰/۲	۲۱۹	۸۶۰

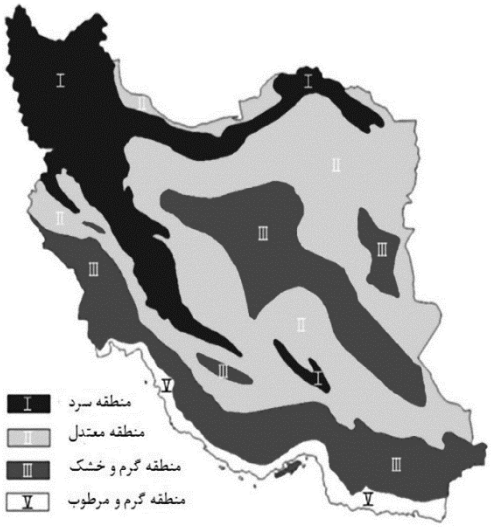
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

در ادامه و در شکل ۵ اقلیم‌های مختلف موجود در کشور ایران نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، اقلیم‌های موجود در ایران شامل اقلیم سرد، اقلیم معتدل، اقلیم گرم و خشک و اقلیم گرم و مرطوب است. در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی نحوه عملکرد مواد تغییر فازدهنده، شبیه‌سازی‌ها در ۴ اقلیم مذکور انجام گرفته است. در ۴ اقلیم موردنظر، از داده‌های ۴ شهر به‌عنوان نمونه در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. در منطقه سرد شهر تبریز، در منطقه معتدل شهر تهران، در منطقه گرم و خشک شهر یزد و در منطقه گرم و مرطوب شهر بندرعباس به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۳) مشخصات جغرافیایی هر یک از شهرها آورده شده است.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- تأثیر استفاده از پی‌سی‌ام

استفاده از پی‌سی‌ام در جدار ساختمان به دلیل جذب و دفع انرژی قابل‌ملاحظه در هنگام تغییر فاز، می‌تواند موجب یکنواختی توزیع بار سرمایشی و گرمایشی در طول شبانه‌روز و در نتیجه کاهش مصرف انرژی سالیانه سیستم تهویه مطبوع ساختمان شود. به این منظور در اتاق مورد مطالعه و در شهر



شکل ۵- نقشه تقسیم‌بندی اقلیمی ایران [۲۱]

جدول ۳- مشخصات آب و هوایی شهرهای مورد بررسی

شهر	اقلیم	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
تبریز	سرد	۳۷/۸ N	۱۳۶۵
تهران	معتدل	۳۵/۷N	۱۲۱۹
یزد	گرم و خشک	۳۱/۹N	۱۲۱۹
بندرعباس	گرم و مرطوب	۲۷/۲N	۱۰

تهران تأثیر استفاده از این ماده بر میزان کاهش مصرف انرژی با توجه به دمای ذوب ۲۵ درجه سلسیوس و در اتاق با پنجره شمالی بررسی شده است. برای مشاهده تأثیر استفاده از پی‌سی‌ام در جدار اتاق ابتدا مصرف انرژی اتاق موردنظر بدون وجود پی‌سی‌ام محاسبه و در مرحله بعد میزان انرژی مصرفی با توجه به وجود پی‌سی‌ام بررسی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴) به‌طور خلاصه آورده شده است.

طبق نتایج موجود، به‌کارگیری این ماده در دیوار و کف اتاق مصرف انرژی سالانه را به میزان ٪۷/۸ کاهش می‌دهد. این مقدار کاهش نشان‌دهنده تأثیر قابل‌ملاحظه استفاده از پی‌سی‌ام در کاهش مصرف انرژی سیستم سرمایشی و گرمایشی اتاق مورد مطالعه است. نتایج شبیه‌سازی‌های بیشتر نشان می‌دهد که در سایر شرایط نیز همین اثر قابل مشاهده است، هر چند میزان کاهش مصرف انرژی سالانه کاملاً به اقلیم و دمای ذوب پی‌سی‌ام بستگی دارد. در بخش سوم نتایج تأثیر اقلیم و دمای ذوب پی‌سی‌ام به‌تفصیل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۲- محل قرارگیری پی‌سی‌ام

با توجه به آنکه پی‌سی‌ام یک ماده فعال با خصوصیات منحصر به فرد است، محل قرارگیری آن در جدار می‌تواند در میزان کاهش مصرف انرژی توسط آن در ساختمان مؤثر باشد. عملکرد پی‌سی‌ام در سه حالت قرارگیری در لایه داخلی، لایه میانی و لایه خارجی دیوار قابل بررسی است.

با توجه به محل قرارگیری پی‌سی‌ام در دیوار، در نمودار شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی در شهر تهران برای دیوار دارای پی‌سی‌ام در سه حالت و دمای ذوب ۲۵ درجه سلسیوس برای پی‌سی‌ام در حالت پنجره شمالی نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، میزان کاهش مصرف انرژی در لایه‌های داخلی، میانی و خارجی به ترتیب برابر ٪۷/۸، ٪۳/۹ و ٪۱/۲ است. این نتایج مبین آن است که میزان کاهش مصرف انرژی با توجه به محل قرارگیری پی‌سی‌ام در لایه داخلی نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. علت این امر نزدیکی پی‌سی‌ام به

جدول ۴- تأثیر وجود پی‌سی‌ام بر مصرف انرژی سالانه

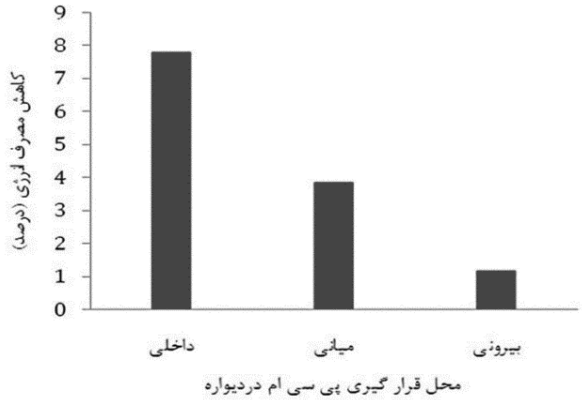
مصرف سالانه انرژی بدون پی‌سی‌ام (MJ)	مصرف سالانه انرژی با پی‌سی‌ام (MJ)	کاهش مصرف سالانه انرژی (٪)
۳۹۷۶	۳۶۶۵	۷/۸

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

فضای داخلی است که موجب تأثیرگذاری بیشتر این ماده بر کاهش نوسان دمای داخل اتاق می‌گردد. با توجه به نتایج سایر شبیه‌سازی‌های انجام شده، در تمام شرایط قرار گرفتن پی‌سی‌ام در لایه داخلی جدار دارای بیشترین تأثیر بر کاهش مصرف انرژی سالانه است.

۳-۳- تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام در اقلیم‌های مختلف

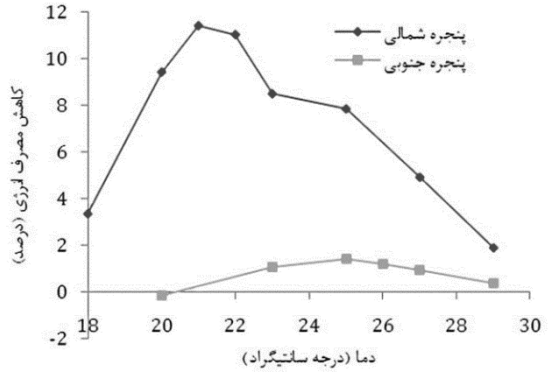
همان‌طور که پیش از این ذکر شد، ایران را می‌توان به ۴ اقلیم آب و هوایی مختلف تقسیم‌بندی نمود. در این تحقیق در هر یک از اقلیم‌ها یک شهر به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در هر یک از شهرها شبیه‌سازی‌ها بر روی دو اتاق یکی با پنجره جنوبی و دیگری با پنجره شمالی انجام شده است. در ادامه به‌منظور بررسی تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر کارایی آن در کاهش مصرف سالانه انرژی ساختمان، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ برای شهرهای مختلف ارائه گردیده است.



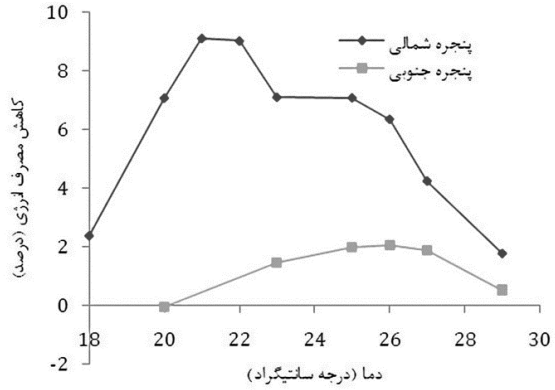
شکل ۶- تأثیر محل قرارگیری لایه پی‌سی‌ام بر کاهش مصرف انرژی



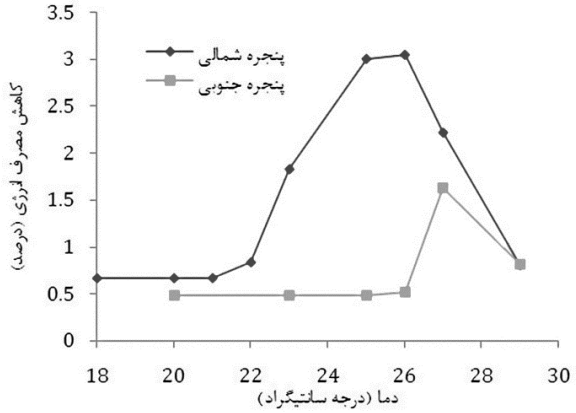
شکل ۷- تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر کاهش مصرف سالانه انرژی در تبریز



شکل ۸- تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر کاهش مصرف سالانه انرژی در تهران



شکل ۹- تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر کاهش مصرف سالانه انرژی در یزد



شکل ۱۰- تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر کاهش مصرف سالانه انرژی در بندرعباس

در نمودار شکل ۷ تأثیر دمای ذوب پی‌سی‌ام بر میزان کاهش مصرف انرژی اتاق در شهر تبریز به‌عنوان یکی از شهرهای اقلیم سرد ارزیابی شده است. همان‌طور که مشخص است در دو حالت پنجره جنوبی و پنجره شمالی مناسب‌ترین دمای ذوب پی‌سی‌ام به ترتیب ۲۶ و ۲۱ درجه سلسیوس است. در این شهر بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی سالانه در

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

حالت پنجره جنوبی ٪۴/۴ و در حالت پنجره شمالی ٪۱۳/۲ است. همان‌طور که در نقشه شکل ۵ نشان داده شد، شهر تهران در قسمت معتدل کشور ایران واقع گردیده است. در شکل ۸ عملکرد پی‌سی‌ام در جدار اتاق موردنظر در شهر تهران بررسی شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بهترین دمای ذوب برای اتاق دارای پنجره جنوبی ۲۵ درجه سلسیوس و برای اتاق دارای پنجره شمالی ۲۱ درجه سلسیوس است. مطابق این نتایج برای بهترین دمای ذوب، در اتاق دارای پنجره جنوبی ٪۱/۴ کاهش مصرف انرژی سالانه و در اتاق دارای پنجره شمالی، ٪۱۱/۴ کاهش مصرف انرژی سالانه به دست آمده است. اقلیم بعدی که مورد ارزیابی قرار گرفته است اقلیم گرم و خشک است. در این اقلیم برای شبیه‌سازی‌ها از داده‌های مربوط به شهر یزد استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۹ قابل مشاهده است، در این شهر برای اتاق دارای پنجره جنوبی، بهترین دمای ذوب ۲۶ درجه سلسیوس است. همچنین در اتاق دارای پنجره شمالی، مناسب‌ترین دمای ذوب به دست آمده ۲۱ درجه سلسیوس است. مطابق نتایج در اتاق دارای پنجره جنوبی، برای مناسب‌ترین دمای ذوب ٪۲/۱ کاهش مصرف انرژی سالانه و در صورتی که اتاق موردنظر دارای پنجره شمالی باشد، در بهترین دمای ذوب پی‌سی‌ام کاهش مصرف انرژی سالانه معادل ٪۹/۱ حاصل گردیده است. آخرین اقلیم مورد ارزیابی در این تحقیق اقلیم گرم و مرطوب است. برای این اقلیم که در نوار جنوبی کشور واقع است، شهر بندرعباس به‌عنوان نمونه در شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها که در نمودار شکل ۱۰ آورده شده است، در شهر بندرعباس بهترین دمای ذوب برای پی‌سی‌ام در اتاق دارای پنجره جنوبی ۲۷ درجه سلسیوس و برای اتاق دارای پنجره شمالی ۲۶ درجه سلسیوس است. در این دماهای ذوب، برای حالت اتاق دارای پنجره جنوبی ٪۱/۶ کاهش مصرف انرژی سالانه و در اتاق دارای پنجره شمالی ٪۳/۱ کاهش مصرف انرژی سالانه حاصل گردیده است. طبق نتایج، در اقلیم گرم و مرطوب تأثیر پی‌سی‌ام به نسبت اقلیم‌های دیگر کمتر است. هر چند مقدار صرفه‌جویی در بندرعباس نیز قابل توجه است، اما با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص است که کاربرد پی‌سی‌ام در سایر اقلیم‌های آب و هوایی دارای اثربخشی بیشتری است. در جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج ارائه شده است.

دمای ذوب بهینه‌ای که در هر یک از شهرها به دست آمده است، در واقع دمایی است که در آن بیشترین چرخه جذب و دفع انرژی در طول سال صورت می‌پذیرد. افزایش تعداد چرخه

جدول ۵- خلاصه نتایج بررسی تأثیر نقطه ذوب پی‌سی‌ام

شهر	جهت دیوار	دمای ذوب مناسب (°C)	کاهش مصرف سالانه انرژی (٪)
تبریز	جنوبی	۲۶	۴/۴
	شمالی	۲۱	۱۳/۲
تهران	جنوبی	۲۵	۱/۴
	شمالی	۲۱	۱۱/۴
یزد	جنوبی	۲۶	۲/۱
	شمالی	۲۱	۹/۱
بندرعباس	جنوبی	۲۷	۱/۶
	شمالی	۲۶	۳/۱

جذب و دفع انرژی موجب افزایش میزان کاهش مصرف انرژی و کارکرد بهتر پی‌سی‌ام در اتاق می‌شود. در صورت پایین‌تر بودن نقطه ذوب نسبت به مقدار بهینه، پی‌سی‌ام مدت زمان بیشتری به‌صورت مایع است و در مواردی که نقطه ذوب بالاتر از نقطه ذوب بهینه باشد، پی‌سی‌ام در زمان بیشتری در فاز جامد قرار می‌گیرد. به‌طور کلی با تغییر دمای ذوب به نسبت دمای ذوب بهینه (کاهش و یا افزایش آن) تعداد چرخه‌های دفع و جذب انرژی نسبت به حالت بهینه کاهش پیدا می‌کند؛ که این مسئله موجب کاهش میزان تأثیرگذاری پی‌سی‌ام مورد استفاده است. با دقت در نمودارهای به دست آمده در تمام شهرها، بهترین مقدار دمای ذوب به دست آمده در اتاق دارای پنجره جنوبی، بالاتر از بهترین مقدار دمای ذوب به دست آمده در اتاق دارای پنجره شمالی و میزان کاهش مصرف نیز در اتاق دارای پنجره شمالی به نسبت اتاق دارای پنجره جنوبی بیشتر است. علت اصلی این امر بالاتر بودن دمای دیواره جنوبی و تابش بیشتر بر روی این دیواره است. بالاتر بودن دمای دیواره دارای پنجره جنوبی باعث می‌شود تا پی‌سی‌ام مورد استفاده در این دیواره به‌صورت معمول در فاز مایع قرار داشته باشد و تعداد دفعات طی نمودن چرخه جذب و دفع انرژی در طول سال در آن دیواره کاهش یابد. در اتاق با پنجره رو به شمال به علت پایین‌تر بودن متوسط دمای دیوار، تعداد دفعات طی شدن سیکل جذب و دفع انرژی در طول سال نسبت به اتاق دارای پنجره جنوبی بیشتر است که این مسئله موجب افزایش کاهش مصرف انرژی می‌گردد. به همین دلیل با دقت در تمام نمودارها این نکته قابل نتیجه‌گیری است که در اتاق با پنجره شمالی مقدار کاهش مصرف انرژی نسبت به اتاق دارای پنجره جنوبی بیشتر است.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر با توجه به ویژگی‌های پی‌سی‌ام، تأثیر استفاده از این مواد در جدار اتاقی واقع در یک ساختمان چندطبقه بر کاهش مصرف انرژی سالانه سیستم تهویه مطبوع با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس بررسی شد. در ابتدا تأثیر مثبت استفاده از این مواد مورد تأیید قرار گرفت و لایه داخلی جدار به‌عنوان محل مناسب برای قرارگیری پی‌سی‌ام تعیین گردید. در ادامه این تحقیق با توجه به اقلیم‌های مختلف آب و هوایی موجود در کشور ایران، نحوه عملکرد پی‌سی‌ام در هر یک از اقلیم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. دمای ذوب پی‌سی‌ام یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار بر عملکرد این مواد برای کاهش مصرف انرژی ساختمان است؛ بنابراین با توجه به اقلیم‌های مختلف آب و هوایی، مقدار مناسب دمای ذوب پی‌سی‌ام و مقدار کاهش مصرف انرژی حاصل از آن در هر یک از اقلیم‌ها بررسی شد. شهرهای تبریز، تهران، یزد و بندرعباس به‌عنوان نمونه به ترتیب در اقلیم‌های سرد، معتدل، گرم و خشک و گرم و مرطوب مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با توجه به اقلیم و جهت پنجره، دمای ذوب مناسب بین ۲۱ تا ۲۷ متغیر است. در دمای ذوب بهینه تعداد چرخه تغییر فاز پی‌سی‌ام در سال به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین بیشترین میزان کاهش مصرف انرژی سالانه در شهر تبریز ٪۱۳/۲، در شهر تهران ٪۱۱/۴، در شهر یزد ٪۹/۱ و در شهر بندرعباس ٪۳/۱ به دست آمد. لازم به ذکر است که در تمام موارد بیشترین کاهش مصرف در حالت پنجره شمالی بود. با توجه به مقادیر کاهش مصرف انرژی سالانه و مقایسه این نتایج مشخص شد که پی‌سی‌ام در اقلیم آب و هوایی گرم و مرطوب به نسبت سایر اقلیم‌ها دارای کارایی کمتری است. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که مواد تغییر فاز دهنده دارای پتانسیل بالایی برای صرفه‌جویی مصرف انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع هستند؛ بنابراین از جدارهای دارای پی‌سی‌ام می‌توان به‌عنوان یک روش غیرفعال بالقوه در کاهش مصرف انرژی ساختمان در اقلیم‌های مختلف آب و هوایی ایران استفاده نمود.

تقدیر و تشکر

این تحقیق به موجب قرارداد شماره ۱۳۴ پ تحت حمایت فنی و مالی شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران قرار گرفته است. نویسندگان بدین‌وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از این شرکت به عمل می‌آورند.

فهرست علائم

c_p	گرمای ویژه (kJ/kgK)
h	آنتالپی (kJ/kg)
k	ضریب هدایت (W/mK)
T	دما (K)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
Δt	پله زمانی حل (s)
Δx	فاصله گره‌ها (m)

بالانویس‌ها

j	زمان قبلی
j+1	زمان جدید

زیرنویس‌ها

i	گره حل‌شده
i+1	گره داخلی
i-1	گره خارجی

منابع

[1] K. Peippo, P. Kauranen, P.D. Lund, A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, *Energy and Buildings,* Vol. 17, No. 4, pp. 259-270, 1991.

[2] H. E. Feustel, *Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.

[3] A. K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermalperformance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, *Building and Environment,* Vol. 32, No. 5, pp. 405-410, 1997.

[4] J. K. Kissock, J. M. Hannig, T. I. Whitney, M. Drake, *Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings*, in The International Solar Engineering Conference, New York, USA, 1998.

[5] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management,* Vol. 45, No. 9–10, pp. 1597-1615, 2004.

[6] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]

microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings,* Vol. 39, No. 2, pp. 113-119, 2007.

[7] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment,* Vol. 42, No. 6, pp. 2197-2209, 2007.

[8] B. M. Diaconu, M. Cruceru, Novel conceptof composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy and Buildings,* Vol. 42, No. 10, pp. 1759-1772, 2010.

[9] A. Castell, M. M. Farid, Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness incooling building envelopes passively, *Energy and Buildings,* Vol. 81, No. 0, pp. 59-71, 2014.

[10] K. Biswas, J. Lu, P. Soroushian, S. Shrestha, Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard, *Applied Energy*, Vol. 131, pp. 517-529, 2014.

[11] EnergyPlus 8.0.0, Energy Simulation Software, 2013, availableonline athttp://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/.

[12] D. Tetlow, Y. Su, S.B. Riffat, *EnergyPlus simulation analysis of incorporating microencapsulated PCMs (Phase Change Materials) with internal wall insulation (IWI) for hard-to-treat (HTT) houses in the UK*, in Proceeding of 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies. Istanbul: Turkey, 2011.

[13] H. Moslehi, H. Niazmand, M. Saadati, E. NorooziJajarm, *The effect of using phase change material in the building external envelope on reducing the annual energy consumption using EnergyPlus simulation software*, in Proceeding of 3rd International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation, Tehran, Iran, 2013 (in Persian).

[14] S. Haghshenas Kashani, *Reducing the building energy consumption by energy storage in phase change materials*, in Proceeding of 1st International Conference on Heating, Cooling and Air Conditioning, Tehran, Iran, 2009 (in Persian).

[15] M. Ahangari, *Investigation of the two-layer phase change material system performance in buildings by energy consumption and thermal comform analysis in Iran climates*, M.Sc. thesis, TarbiatModares University, Iran, 2012 (in Persian).

[16] G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella, A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Building and Environment*, Vol. 59, pp. 517-527, 2013.

*[*17*]* *EnergyPlus Input/Output Reference*, US Department of Energy (DOE), 2012.

[18] K. Muruganantham, *Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs. EnergyPlus Simulation*, M.Sc. Thesis, Arizona State University, USA, 2010.

[19] Iranian National Building Code, Part 19: Energy Conservation, Ministry of Housing and Urban Development, 2010 (In Persian).

[20] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, J. J. Costa, Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates, *Energy and Buildings,* Vol. 70, No. 0, pp. 411-421, 2014.

[21] F. Bagheri, V. Mokarizadeh, M. Jabbar, Developing energy performance label for office buildings in Iran, *Energy and Buildings,* Vol. 61, pp. 116-124, 2013.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-31]