Research on The Sustainabillity of Place
Vol. 1, No. 1, Spring & Summer 2024, pp.218-231

Research on The Sustainabillity of Place

Thermal Comfort and Energy Savings Potential of Integrating Phase Change Materials (PCMs) into Building Envelopes

Shirin Anagheh[1], Roza Vakili-Nejad[2], Ahmad Reza Taheri-Asl[3], Lotfali Heshmati[4]

1. Master's graduate, Technical and Engineering Office, Teachers' Housing Cooperative of District 5, Isfahan
2. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University
3. Head of Energy, Materials Standard and Environment Commission, National Construction Engineering Organization
4. Chairman of the Board of Directors, Provincial Housing Cooperatives Union, and CEO, Teachers' Housing Cooperative of District 5, Isfahan

Received: 2024/05/14
Accepted: 2024/07/04

Research Paper

Abstract

Building envelopes, including walls, roofs, and other covering elements, play a crucial role in reducing energy consumption and enhancing thermal comfort for occupants. As the primary interface between the indoor and outdoor environment, these components significantly influence the thermal exchange between a building's interior and exterior. In the ongoing efforts to optimize building envelopes, one innovative technique explored in this study is the use of advanced and effective methods, with a particular focus on phase change materials (PCMs). Due to their unique ability to store and release thermal energy during the phase transition process, PCMs have emerged as a leading technology in the field of building energy optimization. Integrating these materials with traditional construction materials not only enhances the thermal capacity of building envelopes but also facilitates the automatic regulation of indoor temperatures, thereby reducing reliance on mechanical heating and cooling systems.This study provides an in-depth examination of the thermal behavior of various types of phase change materials, with a focus on key components such as roofs and walls. The analysis includes an evaluation of the general and desirable properties of these materials, the identification of their different applications, the key parameters influencing their performance, and an assessment of the techniques and methods for integrating them with other construction materials.Furthermore, through a comprehensive review and analysis of studies conducted in recent years, the research offers an evaluation of the practical potential of phase change materials in different geographical regions worldwide. This assessment highlights the considerable capabilities of these materials in meeting diverse climatic and architectural needs.Finally, the main findings of this study, with an emphasis on the effectiveness of phase change materials in reducing cooling and heating loads, achieving significant energy savings, and improving thermal comfort for occupants, are thoroughly discussed in the conclusion. These results aim to guide and facilitate future research and development in the application of advanced technologies within the construction industry.

Keywords: PCMs, PCM-integrated buildings, Building Envelope, Thermal Comfort, Energy saving, Heating/cooling load reductio

* **Corresponding author's Email**: shirin.anagheh@gmail.com

DOI: 10.30486/RSP.2024.1127427

پژوهش‌های پایداری مکان
دورهٔ اول، شمارهٔ اول، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحهٔ ۲۳۱-۲۱۸

بررسی آسایش حرارتی و میزان صرفه‌جویی در انرژی، هنگام ادغام مواد تغییر فازدهنده (PCM) در جداره‌های ساختمانی

شیرین عناقه[۱]، رزا وکیلی‌نژاد[۲]، احمدرضا طاهری‌اصل[۳]، لطفعلی حشمتی[۴]

۱. کارشناس ارشد دفتر فنی و مهندسی، تعاونی مسکن فرهنگیان ناحیه ۵ اصفهان
۲. دانشیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۳. رئیس کمسیون انرژی، استاندارد مصالح و محیط‌زیست نظام‌مهندسی ساختمان کشور
۴. رئیس هیئت‌مدیره اتحادیه تعاونی‌های مسکن استان و مدیرعامل، تعاونی مسکن فرهنگیان ناحیه ۵ اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

مقاله پژوهشی

چکیده

جداره‌های ساختمان، شامل دیوارها، سقف‌ها و سایر عناصر پوششی، نقشی حیاتی در کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی ساکنان ایفا می‌کنند. این اجزا به‌عنوان نخستین لایه‌های تماس با محیط بیرونی، تأثیر قابل‌توجهی بر تبادل حرارتی بین داخل و خارج ساختمان دارند. در پی تلاش‌های مستمر برای بهینه‌سازی این جداره‌ها، یکی از تکنیک‌های نوین موردبررسی در این پژوهش، بهره‌گیری از روش‌های مدرن و مؤثر با تمرکز ویژه بر مواد تغییر فازدهنده است. مواد تغییر فازدهنده به دلیل قابلیت بی‌نظیر خود در ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی در طول فرآیند انتقال فاز، به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرو در حوزه بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها مطرح‌شده‌اند. ترکیب این مواد با مصالح ساختمانی سنتی، نه‌تنها به افزایش ظرفیت حرارتی جداره‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به تنظیم خودکار دمای داخلی ساختمان و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی گرمایش و سرمایش منجر شود. در این مطالعه، با تمرکز بر روی اجزای کلیدی مانند سقف و دیوارها، به بررسی دقیق رفتار حرارتی انواع مختلف مواد تغییر فازدهنده پرداخته‌شده است. این بررسی شامل تحلیل خواص عمومی و مطلوب این مواد، شناخت حوزه‌های کاربردی مختلف آن‌ها، شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکردشان و ارزیابی تکنیک‌ها و روش‌های ترکیب آن‌ها با سایر مصالح ساختمانی است. علاوه بر این، با مرور و تحلیل مطالعات انجام‌شده در چندین سال اخیر، ارزیابی جامعی از پتانسیل‌های کاربردی مواد تغییر فازدهنده در مناطق جغرافیایی مختلف جهان ارائه‌شده است. این ارزیابی نشان‌دهنده توانمندی‌های بالقوه این مواد در پاسخ به نیازهای متنوع اقلیمی و معماری است. نتایج این تحقیق بیانگر ان است که، با تأکید بر نقش مؤثر مواد تغییر فازدهنده در کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی، صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی ساکنان، به‌منظور هدایت و تسهیل مطالعات آینده در بخش نتیجه‌گیری به‌تفصیل تشریح شده‌اند.

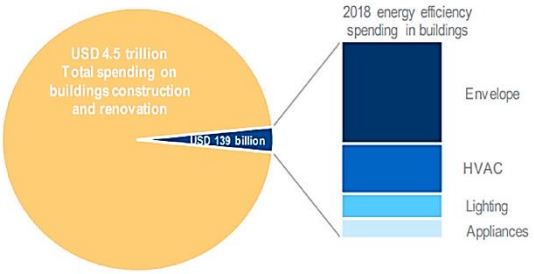
کلمات کلیدی: مواد تغییر فازدهنده، PCM، جدارهای ساختمانی، آسایش حرارتی، کاهش بار گرمایش – سرمایش

* **نویسنده مسئول**: shirin.anagheh@gmail.com

DOI: 10.30486/RSP.2024.1127427

مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی و سوخت، منجر به افزایش آلاینده‌های محیط‌زیست شده است. در همین راستا بررسی و رصد دقیق مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از موارد ضروری تبدیل‌شده است. بررسی این مشکل در اکثر کشورهای جهان نشان می‌دهد، انرژی مصرف‌شده برای گرمایش و سرمایش فضا به ترتیب ۴۰ و ۶۱ درصد از کل انرژی موردنیاز، به‌خصوص در ساختمان‌های تجاری و اقامتی است (Ürge-Vorsatz et al., 2015, 85–98). طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA[1]) بخش اقامتی، بیشترین سهم را از کل مصرف انرژی در سراسر جهان دارد؛ علاوه بر این، این روند ادامه خواهد داشت تا جایی که پیش‌بینی می‌شود انرژی مصرف‌شده برای گرمایش و سرمایش فضا به ترتیب ۱۲ و ۳۷ درصد تا سال ۲۰۵۰ افزایش یابد (IEA, 2020) (شکل ۱).



شکل ۱ : هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری‌های جهانی برای انرژی ساختمان در سال ۲۰۱۸، (IEA, 2020)

جدارهای ساختمان با تنظیم بارهای گرمایشی/سرمایشی بین محیط‌های داخلی و خارجی برای برآوردن نیازهای حرارتی ساختمان، نقش اصلی را در کنترل انرژی ایفا می‌کند. سطوح خارجی سپری است، که از ساختمان محافظت می‌کند و نقش مهمی در تنظیم انرژی حرارتی محیط داخلی دارد؛همچنین یکی از اجزای حیاتی عملکرد ساختمان، در کارآمدی انرژی است که باعث جلوگیری از هدر رفتن ۵۰ درصد، بارهای گرمایش و سرمایش ساختمان می‌شود (Gan et al., 2020, 120). در این راه، راه‌حل‌های مختلفی برای به حداقل رساندن بارهای گرمایش و سرمایش از طریق سطوح و جداره‌ها معرفی‌شده‌اند (Far and far, 2019, 744–760). که در میان استراتژی‌های موفق، ادغام مواد تغییر فازدهنده (PCM[2]) در سطوح ساختمانی، تأثیر مطلوبی را در کنترل بار حرارتی ثابت کرده است، که منتج به صرفه‌جویی قابل‌توجه در انرژی می‌شود (Wang et al., 2020, 52–64).

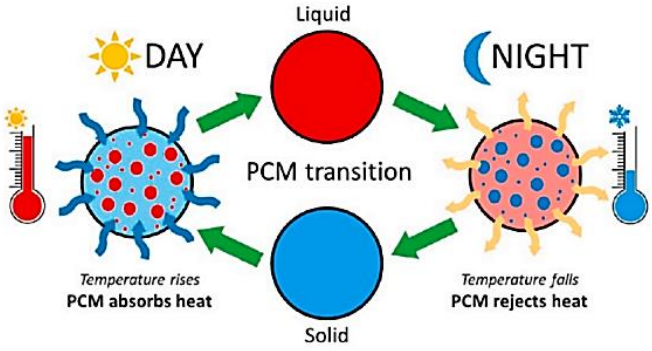
این مواد قابلیت تغییر فاز در دمای ثابت دارند؛ می‌توانند مقدار زیادی انرژی را جذب یا آزاد کنند؛ ازاین‌جهت بنابر آمارها و ارقامی که در ابتدا برای اهمیت صرفه‌جویی در انرژی ذکر شد، مواد تغییر فازدهنده، می‌توانند کاربرد فراوانی در بناها مخصوصاً در اقلیم‌های حاد داشته باشند؛ همچنین می‌توانند جهت افزایش جرم حرارتی در سطوح استفاده شوند و پاسخ مناسبی به اختلاف زیاد درجه حرارت در شبانه‌روز باشند که درنتیجه کاهش مصرف انرژی را به همراه دارد (Nada, 2019, 1175–1190).

معرفی مواد تغییر فازدهنده (PCM)

مواد تغییر فاز دهنده یا به عبارتی (PCM)، موادی با ترکیبات آلی یا معدنی هستند. این ترکیبات قابلیت ذخیره و یا جذب مقدار زیادی انرژی گرمایی را درون خوددارند؛ بنابراین قابلیت تغییر فاز از جامد به مایع یا بالعکس را داشته و

[1]. International Energy Agency
[2]. Phase Change Materials

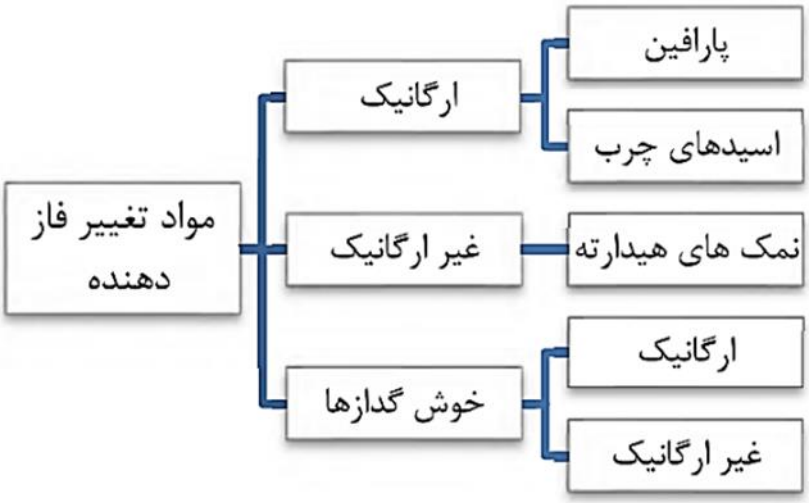
در هنگام این فرآیند می‌توانند گرماگیر یا گرماده باشند (Ye, 2019, 213). این چرخ تغییر فاز می‌تواند چندین هزار بار تکرار شود و هر بار این مواد می‌توانند، همان مقدار اولیه انرژی گرمایی را در خود حفظ نمایند؛ در واقع مواد تغییر فازدهنده می‌توانند، برای به حداقل رساندن بارهای سرمایشی و گرمایشی از طریق جداره‌ها به دلیل پتانسیل عظیم ذخیره انرژی در طول فرایند ذوب و انجماد، آسایش حرارتی قابل‌قبولی را به ارمغان می‌آورند (شکل ۲) (Afolabi, 2019, 464–474).



شکل ۲: چرخه انتقال روزانه، (Faraj, 2020, 109)

طبقه‌بندی و ویژگی‌های PCM ها بر اساس ترکیب شیمیایی آن‌ها

PCM ها عمدتاً به‌عنوان مواد آلی، معدنی و یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند. هر دسته دارای طیف وسیعی از دماهای کاری و خواص ترموفیزیکی است؛ که آن‌ها را برای کاربردهای خاص آماده می‌کند. انتخاب مناسب PCM علاوه بر سایر مشخصات موردنظر، به‌شدت به محدوده دمای عملیاتی کاربرد و دمای ذوب آن بستگی دارد (شکل ۳).



شکل ۳ : دسته‌بندی انواع مواد تغییر فاز دهنده، (نگارندگان)

عملکرد مواد تغییر فازدهنده

مواد در طبیعت در سه فاز مایع، جامد و گاز یافت می‌شوند. هنگامی‌که حالت ماده تغییر کند، واکنشی گرماگیر یا گرماده رخ می‌دهد که طی این واکنش‌ها، گرمای نهان ماده آزاد یا جذب می‌شود (Al-Absi et al., 2018, 73–82). برای مثال

یک ماده جامد، با جذب مقدار زیادی گرما که گرمای نهان ذوب نامیده می‌شود از حالت‌جامد تغییر فاز داده و به حالت مایع درمی‌آید. مزیت مواد تغییر فازدهنده این است که در یک دامنه دمایی مشخص تغییر حالت می‌دهند و در هنگام انجام فرآیند گرماده و گرماگیر دمای خود را حفظ می‌نمایند (Tyagi, 2016, 44–52).

روش عملکرد مواد تغییر فازدهنده به این صورت است که: همگام با بالا رفتن دمای محیط، این مواد گرم می‌شوند، تا زمانی که به نقطه تغییر فاز یا به‌بیان‌دیگر دمای ذوب برسند؛ پس‌ازاین زمان، دمای ماده تغییر فاز دهنده دیگر افزایش نمی‌یابد و صرف تغییر فاز ماده می‌شود. این در حالی است که دمای محیط اطراف همچنان در حال افزایش است؛ در واقع طی فرآیند تغییر فاز که چندین ساعت زمان می‌برد، مواد پس از رسیدن به نقطه ذوب دیگر گرمای جذب‌شده را برای افزایش دمای خود نمی‌خواهند؛ بلکه برای تغییر فاز لازم دارند و این مهم سبب می‌شود طی این فرآیند با جذب مقدار زیادی گرما از محیط، نه‌تنها دمای خود را، بلکه دمای محیط را نیز ثابت نگه‌دارند (همان).

به دلیل تفاوت دما در تغییر حالت مواد، تغییر فازدهنده، کاربردهای متفاوتی هم دارند؛ به‌طور مثال، اگر PCM در دمایی زیر ۱۵ درجه سانتی‌گراد ذوب شود، برای خنک کردن یا تهویه مناسب است. اگر ماده تغییر فازدهندهٔ دمای ذوب بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد داشته، برای جایی مناسب است که ناگهان دما بالا می‌رود؛ مثلاً فضاهایی که امکان آتش‌سوزی دارند. در این حالت ماده تغییر فازدهنده می‌تواند از وقوع آتش‌سوزی جلوگیری کند. PCMهایی که دمای ذوبی بین ۱۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد دارند، برای ذخیره‌سازی انرژی حاصل از تابش اشعه‌های خورشیدی مناسب هستند (جابری،۱۳۹۰).

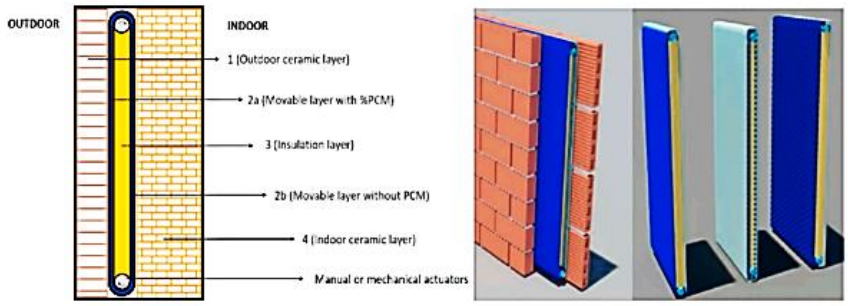
چگونگی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فازدهنده در سه فرم، تولید می‌شوند و مورداستفاده قرار می‌گیرند. ۱. مواد خام ۲. ماکروکپسول ۳. میکروکپسول. کاربرد این مواد در فرم اول، یعنی به‌صورت خام رایج نیست؛ زیرا این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع، جاری می‌شوند و در فاز مایع نیاز به ظرف یا محفظه دارند؛ لذا فرم دوم و سوم پدید آمد که این مواد درون ظرفی قرار دارند که به‌اصطلاح به آن کپسول گفته می‌شود. تفاوت عمده این مواد در فرم ماکرو و میکرو، فقط در ابعاد محفظه کپسول آن‌هاست. میکروکپسول‌ها، کره‌هایی به قطر ۱ تا ۳۰ میکرومتر هستند؛ درحالی‌که ماکروکپسول‌ها، پاکت‌ها یا ظروفی از این ابعاد بزرگ‌تر هستند. مطابق شکل این کپسول‌ها معمولاً پوسته‌هایی از جنس پلاستیک یا پانل‌های سخت شده‌ای از جنس پلی‌اتیلن با چگالی زیاد هستند (حمزه لو، ۱۳۹۴).

چگونگی طراحی با مواد تغییر فازدهنده

برای انتخاب ماده تغییر فازدهنده باید کاربرد و دمای سیستمی که قرار است، در آن قرار بگیرد را مدنظر داشت. دمای تغییر در ماده PCM باید متناسب با دمایی باشد که لازم است تا یک سیستم، گرمایش یا سرمایش فضا را تأمین کند. ابعاد سیستم ذخیره کننده بستگی به گرمای نهان ذوب ماده تغییر فازدهنده دارد؛ به این صورت که هرچه گرمای نهان ذوب ماده تغییر فازدهنده بیشتر باشد، سیستمی که برای ذخیره تعبیه می‌شود، ابعاد کوچک‌تری دارد؛ همچنین شارژ سیستم و تخلیه آن بستگی به ضریب انتقال گرما دارد. هرچه این ضریب بیشتر باشد شارژ و تخلیه سیستم عملکرد بهتری دارد و درنهایت هنگامی می‌توان سیستمی با ابعاد کوچک‌تر طراحی نمود که ماده تغییر فازدهنده، دانسیتهٔ بالایی داشته باشد. در مورد مواد تغییر فازدهنده، این نکته را باید در نظر داشت که، به

هنگام فرآیند تغییر فاز با فشار بخار کم، اگر از موادی با کمترین تغییرات حجم استفاده شود، امکان بروز مشکلات، برای محیط‌زیست به حداقل ممکن می‌رسد (نصرت‌اللهی،۱۳۹۰) (شکل ۴).



شکل ۴: طرحی از سیستم PCM پویا (بر اساس مدل گرسیا)، (Al- Yasiri et al., 2019)

نحوه عملکرد پوسته ساختمان همراه با مواد تغییر فازدهنده

پوشش ساختمان، نمایانگر سپری است که با عناصری مانند سقف، کف، دیوارهای خارجی و پنجره‌ها فضای داخلی را از بیرون جدا می‌کند؛ بنابراین بارهای حرارتی را تنظیم می‌کند، نیاز به گرمایش و سرمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آسایش انسان را مدیریت می‌کند. کاربرد PCM یک رویکرد انقلابی برای افزایش جرم حرارتی پوسته ساختمان و درنتیجه عملکرد ساختمان است. PCM ها در فن‌ها و پیکربندی‌های متعدد در پوشش ساختمان اعمال می‌شوند تا بخشی از مصالح ساختمانی باشند و از حداکثر استفاده از پتانسیل ذخیره‌سازی حرارت آن اطمینان حاصل کنند. ویژگی‌های PCM و فرآیند ادغام طیف پیچیده‌ای از پارامترها را فراهم می‌کند که باید در این حوزه تحقیقاتی، در نظر گرفته شوند.

معیارهای انتخاب PCM

برای طراحی سیستمی با مواد تغییر فازدهنده به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی باید نکات ذیل را مدنظر داشت (جعفری، ۱۳۹۰):

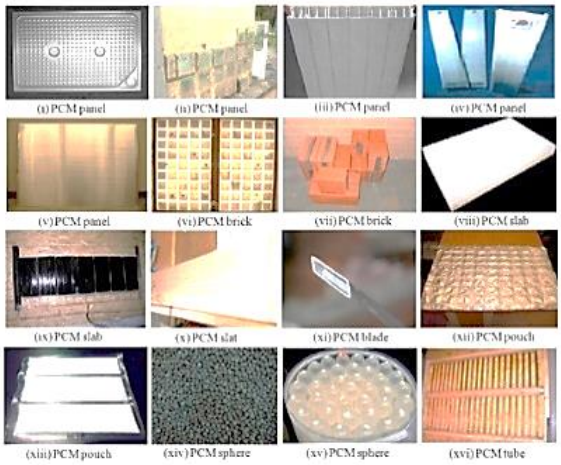
۱- تناسب ماده تغییر فازدهنده و دمای ذوب موردنظر.
۲- تناسب مبدل گرمایی با میزان تبادل گرمایی
۳- توجه به کپسول مواد تغییر فازدهنده، به‌طوری‌که کپسول توان همگام‌شدن با تغییرات حجم را داشته باشد.

روش‌های ادغام

در عمل، PCMها با یکی از روش‌های زیر در عناصر پوششی ساختمان گنجانده می‌شوند:

۱. الحاق مستقیم؛
۲. غوطه‌ورسازی؛
۳. کپسولاسیون (کپسولاسیون به‌صورت میکرو یا ماکرو)؛
۴. PCMهای تثبیت‌شده با شکل؛

۵. PCM کامپوزیت‌های شکل- پایدار (Faraj et al., 2020, 109) (شکل ۵).



شکل ۵: مراحل نصب PCM ماکرو کپسوله شده توسط لوله پیشنهادشده توسط Ref، (Rathore, 2020, 1300–1313)

پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد PCM در پوشش ساختمان

ادغام PCM در پوشش ساختمان می‌تواند دمای اوج را تا ۴ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و درنتیجه شرایط آسایش حرارتی پایدار را در طول روز تابستان حفظ کند (Beemkumar et al., 2020). عملکرد حرارتی PCM تحت تأثیر چندین پارامتر است که بر فعالیت آن تأثیر می‌گذارد. بااین‌حال گاهی اوقات مواد تغییر فازدهنده، عملکرد منفی دارند. پرداختن به چنین پارامترهایی برای اطمینان از بهترین عملکرد *PCM* و بهره‌برداری مؤثر از پتانسیل آن بسیار مهم است. تأثیرگذارترین پارامترها در بخش زیر موردبحث قرار می‌گیرند (Liu et al., 2018, 281–294).

- **دمای ذوب**

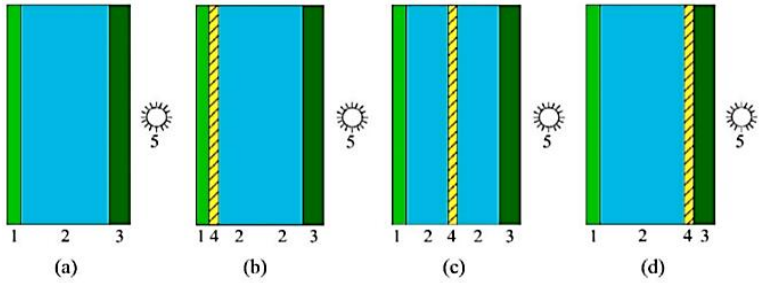
دمای ذوب PCM تعیین‌کننده‌ترین پارامتر در عملکرد آن است؛ زیرا بر فرآیندهای شارژ و دشارژ تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، پتانسیل ذخیره گرما به‌طور کامل یا جزئی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Jelle and Kalnæs, 2017).

- **مقدار/ضخامت PCM**

مقدار PCM گنجانده‌شده در پوشش‌های ساختمان به‌طور قابل‌توجهی، بر میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در طول انتقال فاز تأثیر می‌گذارد.

- **موقعیت PCM**

موقعیت لایه PCM که برای کاهش بارهای گرمایشی یا سرمایشی استفاده می‌شود، بستگی به محل ساختمان موردمطالعه و هدف اجرای PCM دارد. ادغام PCM عملکرد بهتری را برای کاهش بار خنک‌کننده، نسبت به کاهش بار گرمایشی نشان داده است؛ علاوه بر این، PCM می‌تواند به‌طور فعال در دمای بالاتر از نقطه ذوب خودکار کند (Plytaria et al., 2019) (شکل ۶).



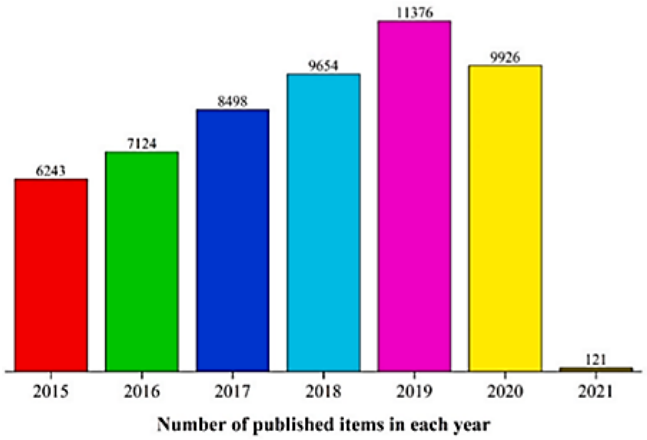
شکل ۶: نزدیک به بیرون. ۱. تخته گچی، ۲. لایه عایق، ۳. تخته رشته‌ای جهت‌دار، ۴. لایه PCM و ۵. در فضای باز، (Jin et al., 2016, 1057–1063)

ارزیابی ساختمان‌های PCM گنجانده‌شده

تکنیک‌های عملی زیادی برای ترکیب PCM ها در عناصر ساختمان وجود دارد که معمولاً یا در فرآیند ساخت‌وساز گنجانده می‌شود یا به‌عنوان یک‌لایه جداگانه در ساختار ساختمان اضافه می‌شود. انواع مختلف PCM، با روش‌ها و مقادیر متفاوت و ویژگی‌های عملیاتی مختلف در عناصر مختلف ساختمان، مانند سقف، دیوارهای خارجی، کف و پنجره‌ها به کار گرفته‌شده‌اند و بیانگر پیشرفت‌های چشمگیر هستند.. مطالعاتی که با PCM شامل کف و پنجره سروکار دارند، کمتر از مطالعات روی دیوارها و سقف‌ها هستند (Al- Yasiri et al., 2019).

پیشینه پژوهش

تحقیقات در این زمینه با در نظر گرفتن انواع جدید PCM و استفاده از تکنیک‌های مختلف برای رسیدن به رفتار حرارتی بهینه و بالاترین عملکرد همچنان ادامه دارد. در این راستا، شکل هفتم افزایش تعداد کار منتشرشده در این حوزه تحقیقاتی را در سال‌های اخیر، یعنی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ به تفکیک سال نشان می‌دهد؛ به دلیل تعداد بسیار زیاد مطالعات در این زمینه، جدول تکمیلی به‌صورت فایل ضمیمه، برای علاقه‌مندان و پیشبرد تحقیقات آتی ارائه می‌گردد (شکل ۷ و جدول ۱).



شکل ۷: آمار انتشارات در مورد ساختمان‌های دارای PCM: موارد منتشرشده از سال ۲۰۱۵ تا به امروز، (نگارندگان بر اساس اطلاعات پایگاه داده Scopus).

جدول ۱: بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه مواد تغییر فازدهنده از سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۰، (نگارندگان)

	نوع ماده تغییر فاز دهنده	دمای ذوب	روش ادغام	کاربرد	موقعیت	نوع مطالعه	کشور یا شهر	رفرنس
۱	`BioPCM	۲۶	فشرده‌سازی	سرمایش	سقف	تجربی	کره شمالی	۲۶
	n-docosane	۴۴						
یافته‌ها و اظهارات: ماده تغییر فازدهنده دوم (n-docosane) مؤثرتر از اولی(BioPCM) بود. و توانست دمای داخلی را ۵.۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد.								
۲	BioPCM	۲۰ تا ۳۲	استفاده از لایه‌های مواد تغییر فاز دهنده	سرمایش	سقف و جداره	بررسی عددی	عربستان سعودی، مصر هند و	۱۸
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد دما حداکثر تا ۲.۰۴ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و صرفه‌جویی در انرژِی ۱۷.۹۷–۳۴.۲۶ درصد افزایش‌یافته است.								
۳	Paraffin Wax	۵۸.۵	بتن پرشده از PCM	جهت سرمایش فضا	دیوارها	تجربی	تایلند	۴
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد بار سرمایش ۹٪ و صرفه‌جویی در انرژی ۳۱٪ کاهش یافت؛ همچنین تأخیر زمانی ۱۸۴ دقیقه به دست آمد.								
۴	Enerciel 22	۱۸ تا ۲۹	استفاده از لایه‌های PCM	جهت سرمایش فضا	دیوارها	بررسی عددی	ایران، شهر اصفهان	۳۹
	CaCl2. 6H2O	۲۸.۹						
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد انتقال حرارت برای Enerciel 22 در محدوده ۱۵.۶-۴۷.۶٪ و در محدوده ۲-۷.۸٪ برای CaCl2.6H2O. کاهش‌یافته است.								
۵	BioPCM	۲۵	PCM برد های	سرمایش و گرمایش	دیوارها و سقف	پژوهش عددی	کره جنوبی، ژاپن و چین	۱
	PCM RUBITHERM	۲۹						
یافته‌ها و اظهارات: طبق نتایج به‌دست‌آمده ،PCM ها به ترتیب برای سئول، توکیو و هنگ‌کنگ صرفه‌جویی انرژی ۴.۴۸-۸.۲۱٪، ۳.۸۱-۹.۶۹٪ و ۱.۹۴-۵.۱۵٪ را نشان دادند.								
۶	PCMنه نوع	۱۹ الی ۲۷	ادغام لایه‌ای از مواد تغییر فاز دهنده	سرمایش و گرمایش	سقف و دیوارها	عددی شبیه‌سازی	کانادا، روسیه فنلاند، سوئد	۲۷
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: PCM23 وPCM24 بالاترین کاهش مصرف انرژی به میزان ۴۰۰۰-۱۰۰۰۰ کیلووات ساعت نشان دادند. دوره بازپرداخت برای همه شهرها بین ۱۶ تا ۳۲ سال بود و PCM ها می‌توانند تا ۴۸۱۷.۴۴ کیلوگرم در سال انتشار CO2 را در این دوره کاهش دهند.								
۷	RT28 (۸۰ درصد وزنی) + گرافیت منبسط‌شده (۲۰ درصد وزنی)	۲۶.۵ تا ۲۸.۵	محصور در لوله	سرمایش	دیوار	بررسی عددی	ووهان کشور چین	۲۹
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد، مقاومت در برابر ۵۵.۶ تا ۸۲.۸ درصد از گرمای خارج بنا، همچنین کاهش ۳۲.۴ تا ۵۵.۵ درصد از گرمای انباشته‌شده داخل.								

۸	Micronal DS 5038	۲۵	بر پایه PCM سیمان (بتن و ملات)	-	دیوارها	عددی و تجربی در	محیط آزمایشگاهی	۲۰
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد، هدایت حرارتی ملات ها ۳۷ درصد و برای بتن حدود ۳۰ درصد کاهش یافت؛ همچنین ظرفیت حرارتی ۱۳ درصد برای ملات در مقابل ۹ درصد برای نمونه‌های بتنی افزایش‌یافته است.								
۹	PCM_Q21	۲۱	استفاده از لایه‌های PCM	سرمایش	سقف و دیوارها	تجربی- عددی	شمال مراکش	۳۴
	PCM_Q23	۲۳						
	PCM_Q25	۲۵						
	PCM_Q27	۲۷						
یافته‌ها و اظهارات: نتایج حاکی از آن است که: PCM_Q23 و PCM_Q25 منجر به عملکرد حرارتی مطلوب می‌شوند، دیوار شرقی بهترین شرایط را نشان داد (کمترین ضریب کاهش = ۰.۰۱۷ و بیشترین زمان تأخیر = ۷ ۱۳ دقیقه)، بدترین وضعیت ارائه‌شده توسط سقف (بیشترین ضریب کاهش = ۰.۰۳۱ و کمترین زمان تأخیر = ۴۶۶ دقیقه)، PCM ضریب کاهش را ۶۰٪ (دیوار رو به شمال) و ۳۵٪ (سقف) کاهش داد.								
۱۰	Bio-PCMTM	۲۷	لایه روکش	سرمایش	سقف و دیوارها	بررسی عددی	کشور استرالیا	۲۸
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: بازسازی PCM می‌تواند به‌طور مؤثر خطرات استرس گرمایی داخل ساختمان را کاهش دهد و سلامت و راحتی حرارتی ساکنین را بهبود بخشد و همچنین دوره‌ای که در منطقه آسایش حرارتی برای انسان قرار ندارد تا ۶۵ درصد در شرایط شدید موج گرما کاهش می‌یابد.								
۱۱	Energain PCM	-	جدا از هم PCM	سرمایش	-	عددی و تجربی	محیط آزمایشگاهی	۲
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد، حداکثر شارژ حرارتی ۱۵ درصد کاهش‌یافته و ۲ ساعت به تأخیر افتاده است.								
۱۲	n-octadecane	۱۸.۸۰- ۳۷.۸۳	گچ/سیمان (G/C) آغشته به PCM	گرمایش و سرمایش	دیوارها	عددی و تجربی	ایالات‌متحده (شیکاگو، لس‌آنجلس، میامی و فینیکس)	۲۵
	Beeswax	۶۱.۰۵ - ۳۳.۴۱						
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: تخته گچ/سیمان آغشته به n-octadecane و Beeswax هدایت حرارتی را ۱۲۹٪ و ۱۵۰٪ در مقایسه با تخته گچی/سیمانی اصلی افزایش داد. در شیکاگو، n-octadecane در طول فصل سرد، ازنظر بار سرمایش و زمان تأخیر بهتر از Beeswax عمل کرد، در میامی، صرفه‌جویی در انرژی ۷.۸٪ و ۶.۴٪ زمانی که n-octadecane و Beeswax در طول فصل گرما اعمال شد، در میامی و فینیکس، کاهش بار خنک‌کننده ۳.۶٪ - ۴.۳٪ با استفاده از تخته گچ / سیمان مبتنی بر نوکتادکان به‌دست آمد.								
۱۳	Eicosane	۳۶ -۳۸	گنجانده‌شده در آجر	سرمایش	دیوارها	بررسی تجربی	کشور هند (دهلی)	۲۳
	OM35	۳۵						
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: دما در ساعات اوج مصرف بین ۴ تا ۷ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت، برای ایکوزان ۸ درصد و برای OM35، ۱۲ درصد کاهش یافت.								
۱۴	PCM24D	۲۱.۹	بتن یکپارچه و PCM24D به‌عنوان RT21 یک‌لایه جدا	گرمایش و سرمایش	دیوارها	بررسی عددی	کشور نروژ (اسلو)	۳۰
	RT21	۲۱						
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: صرفه‌جویی انرژی سالانه به ۲۸ درصد رسید، کاهش انرژی در تابستان ۳۲ درصد در مقابل ۲۳ درصد در طول زمستان اندازه‌گیری شد.								

۱۵	پارافین با تثبیت شکل (Solid state phase change materials (SSPCM) دولایه پلی‌اتیلن با چگالی بالا/ گرافیت منبسط‌شده	دمای ذوب متفاوت	پنل دیواری همراه با مواد تغییر فازدهندهٔ	تابستان و زمستان	سطح داخلی دیوار و سطح بیرونی دیوارها	شبیه‌سازی	در پنج منطقه آب‌وهوایی معتدل چین	۳۶
یافته‌ها و اظهارات: نمونه موردی پژوهش یک ساختمان اداری دارای تهویه مطبوع از ساعت ۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ در نقطه تنظیم ۲۶ درجه سانتی‌گراد برای تابستان و ۱۸ درجه سانتی‌گراد برای زمستان بود. نتایج نشان می‌دهد: مواد تغییر فازدهنده در حالت‌جامد که در جدار خارجی تعبیه‌شده است، باعث کاهش ورود گرمای زیاد خارجی در تابستان شده است. (کاهش بار سرمایش)؛ همچنین مواد تغییر فازدهنده در حالت‌جامد داخلی گرمای اضافی داخلی را در زمستان ذخیره می‌کند (کاهش بار گرمایش). و در آخر دمای داخلی بر دمای ذوب بهینه لایه PCM داخلی تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که دمای محیط بیرون بر دمای ذوب بهینه لایه PCM خارجی تأثیر می‌گذارد.								
۱۶	-	۲۸ و ۲۶	PCMلایه باضخامت ۱۰ میلی‌متر	سرمایش	سقف و دیوار	بررسی عددی	مناطق گرمسیری سنگاپور	۱۶
یافته‌ها و اظهارات: همچنین نقطه تنظیم تهویه مطبوع در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم‌شده بود. نتایج نشان می‌دهد: PCM اعمال‌شده بر روی سطح خارجی منجر به کاهش حرارت انباشته‌شده داخل دیوارها شده است. زمانی که PCM روی سطح داخلی دیوار اعمال شد، حداقل دمای روزانه افزایش یافت.								
۱۷	به‌اختصار Rubitherm RT21	۲۱	-	سرمایش و گرمایش	دیوارها	در اسلو، نروژ	-	۷
یافته‌ها و اظهارات: تلاش بر این بود که تهویه مطبوع، در محدوده راحتی ۱۹-۲۱ درجه سانتی‌گراد نگهداری شود. نتایج نشان می‌دهد: کاهش بیشتر انرژی سالانه با PCM بیشتر حاصل شد (با استفاده از یک‌لایه ضخامت ۵۰ میلی‌متر)؛ همچنین لایه PCM نزدیک‌تر به محیط بیرون منجر به کاهش مصرف انرژی بیشتری می‌شود، درحالی‌که لایه PCM نزدیک‌تر به محیط داخلی تغییرات دما کمتری را دریافت می‌کند که عملکرد آن را به حداقل می‌رساند.								
۱۸	RT26	۲۶	ماکرو کپسوله	سرمایش گرمایش	سقف و دیوارها	عددی و میدانی	شمال چین- تیانجین	
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: لایه PCM داخلی کاهش بهتری در دمای هوای داخلی اعمال کرد و بهترین عملکرد (جذب گرمای داخلی و خارجی) به دست آورد. لایه PCM خارجی در نزدیکی منبع گرمایش، انتقال فاز سریعی را دریافت می‌کرد که منجر به کاهش کمتر دمای هوای داخل خانه شد (فقط گرمای خارجی جذب می‌شود).								
۱۹	DuPont Energain	ثابت	PCMبرد		دیوار	عددی و تجربی	(تست آزمایشگاهی)	۹
یافته‌ها و اظهارات: نتایج نشان می‌دهد: اولاً لایه PCM داخلی به دلیل عایق XPS به‌طور کامل فعال نشد؛ دوماً لایه PCM خارجی باعث تغییرات زیادی در دما شد و نهایتاً اوج کاهش بار حرارتی در موقعیت‌های ۲ و ۳ (داخل دیوار) حاصل شد.								
۲۰	کامپوزیت (۶۰٪ PCM پارافین و ۴۰٪ پلی‌اتیلن)	۳۱-۲۱.۷	بررسی وضعیت ثابت یک‌روزه	سرمایش	بیرون جدارها	تجربی	تست آزمایشگاهی	۱۰
یافته‌ها و اظهارات: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد: • تأخیر زمانی هنگام افزایش دما در دیوارهای دارای PCM مشاهده شد. کاهش بهتر، زمانی حاصل شد که لایه PCM در سطح خارجی نزدیک به منبع گرما، قرار گرفت. قرارداد PCM در لایه خارجی و قبل از لایه داخلی، بهترین عملکرد را به دست آورد.								

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش پتانسیل جدارهای ساختمانی (عمدتاً برای سقف و دیوارهای خارجی) ادغام‌شده با مواد تغییر فازدهنده را موردبررسی قرار داده است، که یکی از بروزترین فناوری‌های رو به رشد برای بهبود عملکرد ساختمان است. مواد تغییر فازدهنده بررسی‌شده به‌وضوح کاهش انرژی مصرفی ساختمان را با کاهش بسزای بار حرارتی نامطلوب یا مدیریت تقاضای حرارتی، نشان داد که منتج به تأثیر مثبت برآسایش حرارتی شد. از پژوهش حاضر نتایج ذیل گرفته شد:

• بررسی مقالات، ادغام PCM ها با سقف کمتر موردتوجه قرارگرفته است نسبت به مطالعات مربوط به دیوارها (مطالعات سقف/دیوار = ۱/۳)؛

• تعداد تحقیقات عددی اخیر بسیار بیشتر از تعداد مطالعات تجربی است (در کار فعلی به نسبت =۱/۲)؛

• کارهای تحقیقاتی محدودی برای شرایط آب و هوایی سرد در مقایسه با بسیاری از تحقیقات در آب‌وهوای گرم انجام‌شده است. مرور ادبیات نشان می‌دهد، پتانسیل مواد تغییر فازدهنده برای گرمایش در اقلیم‌های سرد نتیجه شایان توجهی دارد؛

• شرایط آب و هوایی باید عامل اصلی برای تعیین نوع PCM، کمیت، موقعیت مؤثر و روش به‌کاربرده آن باشد؛

• موقعیت بهینه، کلیدی‌ترین عامل در به‌کاربرده مواد تغییر فازدهنده است. قابل‌قبول‌ترین موقعیت این است که لایه PCM باید نزدیک‌تر به منبع گرما قرار گیرد؛ به‌عنوان‌مثال، PCM باید نزدیک به لایه‌های پوشش بیرونی در شرایط آب و هوایی گرم قرار گیرد. علت اصلی این است که PCM در این شرایط به‌عنوان یک مانع حرارتی (عایق) عمل می‌کند؛ بنابراین، گرمای ذخیره‌شده باید تا حد امکان از فضای داخلی دور باشد تا از انتشار گرمای نامطلوب به داخل خانه جلوگیری شود و از اثر خنک‌کننده شب در طول عصر استفاده شود. در شرایط سرد، لایه PCM به‌عنوان تأمین‌کننده گرما عمل می‌کند (یعنی از گرمای خارج‌شده از داخل به بیرون جلوگیری می‌کند، گرما را ذخیره می‌کند و سپس آن را به دلیل اختلاف دما به داخل بازمی‌گرداند)؛ بنابراین، باید تا حد امکان به فضای داخلی نزدیک باشد؛

• تکنیک ترکیب غیرفعال دارای مسائلی است که عمدتاً برای دستیابی به بهره‌برداری کامل از ظرفیت ذخیره‌سازی PCM، محدودیت ایجاد می‌کند. مخصوصاً برای اقلیم‌هایی با آب‌وهوای گرم. محدودیت ذکرشده، در مکان‌های بسیار گرم نیاز به یک (HTF[1]) تخلیه کننده جایگزین دارد. این سیال انتقال حرارت جایگزین باید در دسترس باشد، به‌راحتی اجرا شود، بتواند گرما را از PCM در زمان کوتاهی تخلیه کند و هزینه عملیاتی قابل‌قبولی داشته باشد. برخی از جایگزین‌های پیشنهادی عبارتند از: سرمایش تبخیری، انرژی زمین‌گرمایی و استفاده از آب زیرزمینی؛

• تکنیک‌های فعال می‌توانند عملکرد حرارتی را به‌طور مؤثر کنترل‌کننده؛ به‌ویژه در مکان‌هایی که پتانسیل PCM محدودیتی برای استفاده غیرفعال دارد.

PCM ها، پتانسیل بالایی برای افزایش انرژی ساختمان در هنگام نصب با مصالح ساختمانی دارند. برای مطالعات آتی، می‌توان مفاهیم زیر را برای بررسی‌ها و بهبودهای بیشتر اتخاذ کرد:

• به رفتار حرارتی و جنبه‌های مفید ساختمان‌های دارای PCM در شرایط آب‌وهوایی سخت، توجه چندانی نشده است. در مناطق شدید گرم، PCM در ساعات اولیه روزبه حالت ذوب کامل می‌رسد؛ بنابراین، تخلیه فوری

[1]. Heat transfer fluid

گرمای حفظ‌شده برای جلوگیری از هرگونه رفتار مخرب موردنیاز است. در چنین حالتی، روش غیرفعال ناکافی است و تکنیک تهویه شبانه بی‌فایده است؛ درنتیجه، ، اتخاذ یک محیط تخلیه جایگزین برای آماده‌سازی PCM برای چرخه روز بعد، مانند انرژی زمین‌گرمایی، ضروری است. در مکان‌های سرد، عنصر ساختمانی که در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد، گرما را در طول روز در PCM ذخیره می‌کند و با کاهش دما آن را آزاد می‌کند؛ باوجوداین، تابش خورشیدی معمولاً در مناطق سرد کم است که نمی‌توانند لایه‌های پوششی، ازجمله PCM را گرم کنند؛ پس، استفاده از انرژی خورشیدی توسط ابزارهای فعال، مانند کلکتورهای خورشیدی ضروری است.

• هدایت حرارتی ضعیف PCM نشان‌دهنده مشکل اصلی منفی گزارش‌شده در کاربردهای ساختمانی است. این مسئله باعث شارژ و دشارژ جزئی در طول انتقال فاز می‌شود و درنتیجه بر ظرفیت ذخیره‌سازی PCM در چرخه بعدی تأثیر می‌گذارد. تعداد کمی از محققان این موضوع را با استفاده از روش‌های مختلف، مانند استفاده از مواد محصورکننده با رسانایی حرارتی بالا، غوطه‌ورسازی نانو ذرات برای تسریع زمان فرآیندهای ذوب و انجماد به‌طور تجربی بررسی کردند.

• استفاده از محصولات پلاستیکی، به‌عنوان ظروف ماکرو کپسوله برای اقلیم‌هایی با آب‌وهوای گرم ایده نوینی است. چنین موادی می‌توانند گرمای خارج از منزل را محدود کنند و درنتیجه، پشتیبانی عایق بیشتری را فراهم کنند. این مواد بر هدایت حرارتی کم PCM تأثیر می‌گذارند؛ ولی برای استفاده مؤثر باید با مراقبت‌های استانداردی پشتیبانی شود. به‌طورکلی تحقیقات طولانی‌مدت که چشم‌انداز روشنی از عملکرد PCM ارائه می‌دهد.

منابع و مآخذ

جعفری، فاطمه. (۱۳۹۰). ذخیره‌سازی انرژی گرمایی با استفاده از PCM . پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، دانشکده شیمی. گروه شیمی.

حمزه لو، سارا. (۱۳۹۴). عملکرد مواد تغییر فازدهنده PCM در ذخیره‌سازی انرژی. کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی. تهران: مرکز همایش‌های بین‌المللی صداوسیما.

Afolabi, L. O., Ariff, Z. M., Megat-Yusoff, P. S. M., Al-Kayiem, H. H., Arogundade, A. I., & Afolabi-Owolabi, O. T. (2019). Red-mud geopolymer composite encapsulated phase change material for thermal comfort in built-sector. Solar Energy, 181, 464–474. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.029.

Al-Absi, Z. A. A. S., Isa, M. H. M., & Ismail, M. (2018). Application of Phase Change Materials (PCMs) in Building Walls: A Review. The Advances in Civil Engineering Materials , 73–82. DOI: 10.1007/978-981-13-2511-3_9.

Al-Yasiri, Q., Al-Furaiji, M. A., & Alshara, A. K. (2019). Comparative Study of Building Envelope Cooling Loads in Al-Amarah City, Iraq. Journal of Engineering and Technological Sciences, 51(5), 632-648. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.5.3.

Beemkumar, N., Devarajan, Y., Maha, A., Subbiah, G., Elangovan, K., & Gnanamani, S. (2019). Experimental investigation and numerical modeling of room temperature control in buildings by the implementation of PCM in the roof. Journal of Solar Energy Engineering, 142, 1-29. http://dx.doi.org/10.1115/1.4044564.

Far, C., Far, H. (2018). Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope. Indoor and Built Environment, 28 (6), 28-36. https://doi.org/10.1177/1420326X18794010.

Faraj, Kh., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. (2020). Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579.

Gan, Vincent J.L., Lo, Irene M.C., Ma, Jun; Tse, K.T., Cheng, Jack C.P., Chan, C.M. (2020). Simulation Optimization towards Energy Efficient Green Buildings. Current Status and Future Trends, Journal of Cleaner Production, 254, . https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012.

Jelle, B.P., Kalnæs. S.E., (2017). Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting Phase Change Materials, Technologies, Optimization and Case Studies. Application in Energy-Efficient Buildings, 57–118. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4

Jin, X., Medina, M. A., Zhang, X. (2016). Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. Applied Thermal Engineering, 103, 1057–1063. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.02.037.

Liu, Zhengxuan., Yu, Zh., Yang, T., Qin, Di., Li, Shuisheng; Zhang, G., Haghighat, F., Joybari, M. M. (2018). A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. Building and Environment, 144, 281-294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.030

Plytaria, M., Tzivanidis, Ch., Bellos, E., Alexopoulos, I., Antonopoulos, K. (2018). Thermal Behavior of a Building with Incorporated Phase Change Materials in the South and the North Wall. Computation, 7(1), 2–11 . https://www.mdpi.com/2079-3197/7/1/2.

Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 85–98. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039.

Wang, Hu., Lu, W., Wu, Zh., Zhang, G. (2019). Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. Renewable Energy, 145, 52- 64. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124.