



## بررسی بحران مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی-تجاری و ارائه راهکاری نو به کمک نانوکامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده

فریبا محمدی<sup>1</sup>، زهرا سعید<sup>1</sup>، مریم بهزادی<sup>1</sup>، حمیده مهدوی<sup>1</sup>، نگین وحیدی‌نیا<sup>1</sup>، عزیز باباپور<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

\* اردبیل، 179، [babapoor@uma.ac.ir](mailto:babapoor@uma.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش، مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به عنوان ابزاری نوین جهت کنترل درجه حرارت در سیستم‌های حرارتی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. این مواد، به صورت هوشمند و بدون نیاز به تجهیزات مکانیکی، اقدام به تغییر فاز می‌نمایند و با تطابق طبیعی با نوسانات محیط، به بهبود کنترل حرارت و بهبود مصرف انرژی در سیستم‌های حرارتی می‌پردازند. این تحقیق به بررسی و طبقه‌بندی خصوصیات این مواد می‌پردازد و کاربردهای آن‌ها در اجزای مختلف ساختمانی اعم از دیواره‌ها، پنجره‌ها، آجر، سنگ مصنوعی، سقف و کف ساختمان مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. نتایج به دست آمده از استفاده این مواد نشانگر این است که می‌توان آن‌ها را به عنوان یک راهکار نوین برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به کار برد. برای مثال، استفاده از PCM در دیواره‌ها منجر به کاهش مصرف انرژی گرمایی می‌شود و به کمک نانو عایق در شیشه پنجره‌ها، نیاز به سیستم‌های گرمایش و سرمایش کاهش یافته و از آنجا کاربران مستقل از نیاز به این امکانات می‌شوند. همچنین، اثر PCM در سنگ‌ها به پایداری حرارتی افزوده و در آجرها اثرات گلخانه‌ای را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. به طور کلی، استفاده از PCM در کف ساختمان باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده امکانات کاربردی واحد PCM به عنوان یک راهکار اثربخش در بهبود کارایی انرژی ساختمان‌ها است.

کلیدواژه‌گان: مواد تغییر فاز دهنده، دیواره ساختمان، پنجره، سقف، کف، لوله

## Investigating the crisis of energy consumption in residential-commercial buildings and presenting a new solution using phase change materials nanocomposites

Fariba Mohammadi<sup>1</sup>, Zahra Saeed<sup>1</sup>, Maryam Behzadi<sup>1</sup>, Hamideh Mahdavi<sup>1</sup>, Negin Vahidinia<sup>1</sup>, Aziz Babapoor<sup>2\*</sup>

1- MSc, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

\* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, [babapoor@uma.ac.ir](mailto:babapoor@uma.ac.ir)

Received: 4 Nov 2023 Accepted: 17 Feb 2024

### Abstract

In this research, phase change materials (PCMs) have been examined as innovative tools for temperature control in thermal systems. These materials, operating intelligently without the need for mechanical equipment, undergo phase transitions naturally, adapting to environmental fluctuations and thereby enhancing energy efficiency in thermal systems. The study delves into the investigation and classification of the characteristics of these materials, along with their applications in various building components such as walls, windows, bricks, artificial stones, ceilings, and floors. The obtained results from the use of these materials indicate their potential as a novel solution for optimizing energy consumption in buildings. For instance, incorporating PCMs in walls leads to a reduction in thermal energy consumption, and utilizing nano-insulation in windows decreases the need for heating and cooling systems, providing users with greater independence from these facilities. Furthermore, the effect of PCMs in stones contributes to thermal stability, and in bricks, it significantly diminishes greenhouse gas emissions. Overall, the integration of PCMs in building floors enhances thermal storage capacity. These findings underscore the practical utility of PCM as an effective solution for improving the energy efficiency of buildings.

**Keyword:** Phase change material, Building wall, Window, Roof, Floor, Tube

۱- مقدمه

بخش ساختمان به دلیل رشد جمعیت و استانداردهای آسایش حرارتی بالای ساکنان در جامعه مدرن، بزرگترین مصرف کننده انرژی است. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱</sup>، بیش از یک سوم مصرف نهایی انرژی در سراسر جهان و نزدیک به 40 درصد از کل انتشار مستقیم و غیرمستقیم CO<sub>2</sub> به بخش ساختمان و ساخت و ساز نسبت داده شده است [2، 1]. در اوج تابستان، سیستم‌های تهویه مطبوع، تهویه و روشنایی حدود 85 درصد از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها و 60 درصد از کل انرژی مصرفی سالانه را مصرف می‌کنند. عوامل موثر در این نقش از جمله گرمای بیش از حد، کارایی پوشش ساختمان، اندازه ساختمان، انواع تجهیزات و رفتار انسانها است. در نتیجه، بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش ردپای محیطی و کاهش مصرف انرژی در صنعت ساختمان بسیار مهم است [3].

در طول دهه‌های گذشته، محققان رویکردهای تجدیدپذیر مختلفی را برای تأمین نیازهای انرژی ساختمان‌های مسکونی یا تجاری برای کنترل آلودگی محیط‌زیست مورد مطالعه قرار داده‌اند. برخی از کاربردهای اصلی سیستم‌های ذخیره‌سازی گرما در ساختمان‌ها، فناوری انرژی خورشیدی و ... می‌باشد. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی می‌تواند به شکل گرمای محسوس، گرمای نهان، یا گرمای شیمیایی ناشی از شکستن و تشکیل پیوند در واکنش‌های شیمیایی باشد. در میان تمام این شکل‌های ذخیره انرژی خورشیدی که ذکر شد، ذخیره انرژی حرارتی گرمای نهان به شدت مورد بررسی قرار گرفته است. زیرا به طور کلی استفاده از آن و توانایی آن برای ذخیره مقدار زیادی گرما در یک حجم نسبتاً کوچک ایمن است. گرمای نهان از طریق رابطه (1) قابل محاسبه می‌باشد:

$$L = \frac{Q}{m} \quad (1)$$

که در آن، Q مقدار انرژی آزاد یا جذب شده در طول تغییر فاز ماده (بر حسب kJ یا BTU) است، m جرم ماده (بر حسب kg یا lb) می‌باشد. L<sub>f</sub>، گرمای نهان ویژه برای یک ماده خاص (بر حسب kJ kg<sup>-1</sup> یا BTU lb<sup>-1</sup>)، برای همجوشی یا L<sub>v</sub> برای تبخیر است.

مواد تغییر فاز دهنده به طور گسترده‌ای به عنوان یک وسیله موثر و اقتصادی برای ذخیره انرژی حرارتی استفاده می‌شود [4]. ترکیب مواد تغییر فاز با عناصر ساختمان، به دلیل پتانسیل بالای آنها برای ذخیره انرژی حرارتی و استفاده منعطف برای اصلاح صرفه‌جویی در انرژی و آسایش حرارتی ساختمان، یکی از فناوری‌های با رشد سریع است [3]. یکی از مشکلاتی که موقع استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پیش می‌آید، رسانایی گرمایی پایین است. نانوذرات در بهبود رسانایی گرمایی مواد تغییر فاز دهنده بسیار مفید شناخته شده‌اند از آنجایی که PCM مکرراً فاز خود را از جامد به مایع و از مایع به جامد تغییر داده است، بنابراین، ترکیب مستقیم آنها در مصالح ساختمانی دشوار است. از تکنیک‌های مختلفی برای ادغام PCM با مصالح ساختمانی استفاده می‌شود، عبارتند از: الف) ترکیب مستقیم (ب) غوطه‌وری

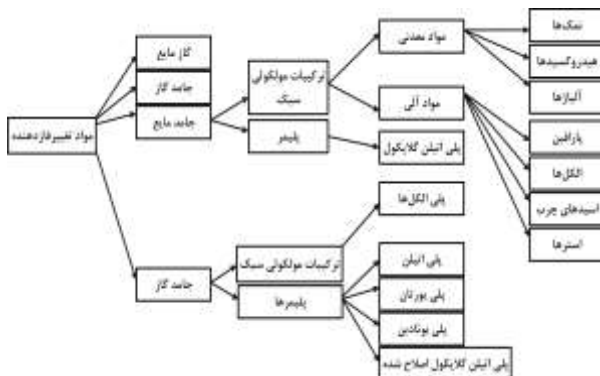
(پ) اشباع (ت) تثبیت شکل (ث) ریزپوشانی (ج) ماکرو کپسوله‌سازی. PCM میکرو کپسوله شده<sup>۲</sup> یکی از مناسب‌ترین تکنیک‌ها برای ذخیره انرژی حرارتی است زیرا دارای مزایای مختلفی مانند استحکام بالا، دوام بالا، پایداری حرارتی بالا است و از نشت PCM در طول تبدیل فاز جلوگیری می‌کند [5، 6].

با وجود کارهای متعدد، خلا اساسی در مدیریت انرژی با استفاده از نانو کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده وجود دارد. در این پژوهش کاربرد این مواد در قسمت‌های مختلف ساختمان، مقایسه شرایط و مواد مختلف، ارزیابی مدیریت انرژی در فصول مختلف و ... مورد بررسی قرار گرفته است که می‌تواند در مدیریت انرژی در ساختمان موثر واقع گردد.

۲- مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از ویژگی گرمای نهان، امکان ذخیره‌سازی انرژی را فراهم می‌کند که در طی تغییر فاز از جامد به مایع این مکانیسم صورت می‌گیرد. مواد تغییر فاز دهنده در موقع لزوم انرژی گرمایی را به واسطه تغییر فاز جذب می‌کنند و در صورت نیاز گرمای جذب شده را آزاد می‌کنند [7].

مواد تغییر فاز دهنده با یک مجموعه خاصیت‌های منحصر به فرد مشخص می‌شوند که برای ذخیره‌سازی انرژی مناسب هستند [7]. شکل ۱ انواع مواد تغییر فاز دهنده را نشان می‌دهد.



شکل 1 تقسیم بندی مواد تغییر فاز دهنده [8].

۲-۱- روش ذخیره سازی حرارتی

در طول دهه‌های گذشته، محققان رویکردهای تجدیدپذیر جدید مختلفی را برای تأمین نیازهای انرژی ساختمان‌های مسکونی یا تجاری برای ایمن نگه داشتن محیط‌زیست مورد مطالعه قرار داده‌اند.

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی روشی است که بسیاری از محققان پیشنهاد کرده‌اند، که می‌تواند به اندازه کافی تقاضای انرژی یک ساختمان را کاهش دهد. این روش کاربرد مفیدی در سیستم‌های حرارتی خورشیدی و همچنین سیستم‌های باز یافت گرما پیدا می‌کند. محیط‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، سیستم‌های سبزی هستند که منجر به انتشار حداقل کربن در اتمسفر می‌شوند. سیستم‌های ذخیره انرژی گرمایی<sup>۳</sup> گرما را جذب و ذخیره

3. Thermal Energy Storage

1. International Energy Agency  
2. Microencapsulated PCM

- خواص فیزیکی: جرم حجمی بالا، تغییر حجم کم هنگام تغییر فاز، فشار بخار پایین در دمای عملیاتی، تعادل فاز مطلوب، تغییر فاز تجدیدپذیر.
- خواص سینتیکی: نرخ تبلور مناسب، نداشتن فرایند فوق خنک‌سازی (تبرید).
- خواص شیمیایی: سازگاری با مصالح ساختمان و نداشتن خاصیت خوردگی، پایداری شیمیایی برای زمان طولانی، برای اهداف ایمنی مواد تغییر فاز دهنده باید غیر قابل اشتعال و انفجار باشد و خطر احتراق و سمیت نداشته باشد.
- خواص اقتصادی: مواد تغییر فاز دهنده باید دارای قیمت پایین، در دسترس و قابل بازیافت باشد.

### ۳- کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان

همانطور که در جدول 1 نشان داده شده است، مواد نانوکامپوزیت در ساختمان بر سه حالت پایه سرامیکی، پلیمری و فلزی تقسیم می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های پایه سرامیکی، مقاومت در برابر سایش و هدایت حرارتی یا الکتریکی را می‌توانند بهبود بخشند و در صنایع مختلف و در ابعاد نانومتری کاربرد دارند. نانوکامپوزیت‌هایی با پایه فلزی مانند آلومینیوم، مس یا آهن و فازهایی با اندازه نانو مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن یا کاربیدهای فلزی هستند که می‌توانند استحکام، سختی، شکل‌پذیری یا مقاومت در برابر خوردگی زمینه‌های فلزی را بهبود بخشند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری که دارای پایه پلیمری مانند اپوکسی، پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن و یک فاز در اندازه نانو مانند خاک‌رس، سیلیس یا نانولوله‌های کربنی هستند که می‌توانند چقرمگی و ویژگی‌های بازدارندگی شعله پایه پلیمری را بهبود دهند [13].

جدول 1 طبقه‌بندی نانوکامپوزیت‌ها در پایه‌های مختلف [13، 14]

انواع نانوکامپوزیت‌ها	ویژگی‌ها	تقویت‌کننده‌ها	ابعاد مواد
نانوکامپوزیت پایه سرامیکی	مقاومت حرارتی بالا، پایداری شیمیایی خوب و استحکام مکانیکی مناسب	نانومتری	نانولوله‌های کربنی، گرافن یا اکسیدهای فلزی
نانوکامپوزیت پایه فلزی	کم‌وزن و سبک، استحکام و سختی بالا	نانومتری	آلومینا، نانولوله‌های کربنی، گرافن یا کاربیدهای فلزی (سیلیکون کاربید)
نانوکامپوزیت پایه پلیمری	استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا.	نانومتری	خاک‌رس، سیلیس یا نانولوله‌های کربنی

می‌کنند و در صورت نیاز برای استفاده آزاد می‌کنند؛ این امر به کاهش بار در ساختمان‌ها کمک می‌کند [9].

صفری<sup>1</sup> و همکارانش با توجه به اینکه مقدار قابل توجهی انرژی توسط بخش ساختمان مصرف می‌شود به بررسی پوشش ساختمان، که به شدت در مصرف انرژی در ساختمان تأثیر گذار است پرداختند. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به دلیل ظرفیت حرارتی بالا، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. انتخاب دمای ذوب PCM در شرایط آب و هوایی مختلف یک عامل کلیدی برای بهبود عملکرد انرژی در ساختمان‌ها است. نتایج نشان می‌دهد که در آب و هوایی که عموماً سرد است، بهترین دمای ذوب PCM حداکثر 26 °C (محدوده ذوب 24-28 °C) است، در حالی که در آب و هوایی که عموماً گرم است بهترین دمای ذوب PCM کم‌تر از 20 °C است (محدوده ذوب 18-22 °C) [10].

جین<sup>2</sup> و همکارانش برای پی بردن به اثرات مکان و دمای ذوب PCM بر عملکرد حرارتی دیوارهای ساختمان، اثرات حالت نوعی ماده تغییر فاز هیدرات نمک (PCM) بر عملکرد تغییر فاز آن توسط آزمون کالری سنج اسکن تفاضلی (DSC) مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های خنک‌کننده که شامل سه حالت مختلف PCM بودند، به ترتیب عبارتند از: حالت ذوب نشده، حالت نیمه ذوب شده و حالت کاملاً ذوب شده. نتایج تجربی نشان داد که حالت PCM تأثیر زیادی بر درجه خنک‌سازی و عملکرد تغییر فاز PCM دارد. زمانی که PCM قبل از خنک شدن در حالت نیمه ذوب باشد، می‌تواند گرمای نهان را به سرعت آزاد کند و عملکرد تغییر فاز بهتری داشته باشد، در حالی که وقتی PCM قبل از سرد شدن در حالت کاملاً ذوب باشد، درجه خنک شدن آن زیاد است. از آنجایی که محدوده دمایی PCM در طول چرخه‌های حرارتی زمانی که PCM در مکان‌های مختلف در دیوار قرار می‌گیرد متفاوت است، مکان PCM تأثیر قابل توجهی بر وضعیت آن و در نتیجه بر عملکرد تغییر فاز و عملکرد حرارتی آن دارد [11].

با توجه به نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده و دمای آسایش حرارتی در ساختمان، می‌توان نتیجه‌گیری کرد بعضی مواقع دمای ذوب برخی مواد، بیشتر از دمای آسایش حرارتی است و در برخی مواقع کمتر. لذا باید با توجه به هدف، از مدیریت گرمایی در ساختمان، و اینکه در کدام فصل بهینه‌سازی انرژی مدنظر است تقسیم‌بندی کرد.

### ۲-۲- کاربردهای مختلف مواد تغییر فاز دهنده

این مواد بسته به دمای تغییر فازشان، کاربردهای متفاوتی دارند به همین علت به یکی از ظرفیت‌های خاص ذخیره انرژی در مصارف گوناگون تبدیل شده‌اند. مانند: ساختمان، باتری موبایل، سلول‌های خورشیدی، سیستم‌های فتوولتائیک، پوشاک، پزشکی، نساجی، گلخانه‌ها [12].

### ۲-۳- خصوصیات مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده خواص مختلفی دارند که از جمله می‌توان اشاره کرد به:

- خواص حرارتی: گرمای نهان بالا طی تغییر فاز، هدایت حرارتی بالا، دمای عملیاتی هر دو فرایند (ذوب و انجماد) باید بر اساس دمای تغییر فاز باشد.

### ۳-۱- دیواره ساختمان

بیشترین منابع مصرفی جهان سوخت‌های فسیلی هستند که منجر به افزایش تولید دی‌اکسید کربن<sup>۱</sup> شده است. باتوجه به سرعت رشد جمعیت در جهان و تغییرات آب و هوایی، افزایش تقاضای انرژی و گرم شدن هوای کره زمین اتحادیه بین‌المللی تغییر اقلیم<sup>۲</sup> برخی از معایب را به شرح زیر اعلام نموده است، اما محدود به موارد زیر نیست:

- 1- افزایش مداوم دمای کره زمین
- 2- افزایش طوفان، خشکسالی بیشتر
- 3- امواج گرما و ...

به همین دلیل است که دانشمندان به دنبال راهکاری برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در جهان هستند که آسایش حرارتی منطقی را حفظ کند. آتینیت<sup>۳</sup> و همکارانش [15] مواد تغییرفازدهنده اشباع شده در صفحه گچی را از نظر عملکرد حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تخته گچ ترکیب شده با مواد تغییرفازدهنده می‌تواند دما را حداکثر تا ۴ °C در طول روز و همچنین بارهای حرارتی را هنگام شب در ساختمان‌های غیرخورشیدی منفعل کاهش دهد. الودی<sup>۴</sup> و همکارانش [16] با استفاده از آجرهای ترکیب شده با مواد تغییرفازدهنده در یک استوانه به روش المان محدود، عملکرد حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مواد تغییرفازدهنده می‌توانند باعث کاهش گرما در ساختمان شوند. این امر زمانی حاصل می‌شود که آجرها به دو لایه مواد تغییرفازدهنده آغشته باشند در نتیجه میزان مصرف انرژی در طول پروسه ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد. ژو و همکارانش [17] مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان‌ها برای ذخیره انرژی گرمایی انجام دادند. آن‌ها ویژگی‌های مواد تغییرفازدهنده را که باید برای افزایش آسایش حرارتی و صرفه‌جویی انرژی در نظر گرفته شود، و روش‌های ترکیب و استفاده در ساخت‌وساز ساختمان را به شرح زیر مورد مطالعه قرار دادند: دیوارهایی که با مواد تغییرفازدهنده [18]، در مصالح ساختمانی مانند بتن و آجر [19, 20]، مخلوط شده و مواد تغییرفازدهنده آمیخته با عایق فیری در دیوارها و آتیک، و مواد تغییرفازدهنده [21, 22]، که نتایج حاکی از آن است که مشارکت مواد تغییرفازدهنده در دیوارها یک کاربرد موثر و نسبتاً کم‌هزینه از جرم حرارتی در ساختمان‌ها است [17]. السعدی و زی [23]، مدل‌سازی مواد تغییرفازدهنده در محوطه‌های ساختمانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. آتینیت و همکارانش از یک مدل انتشار حرارت موقت یک بعدی برای بررسی عملکرد حرارتی یک تخته گچی آغشته شده با مواد تغییرفازدهنده، در یک خانه خورشیدی منفعل استفاده کردند و محاسبات را با تست داده‌ها در بیرون از خانه اعتبارسنجی کردند نتایج نشان داد که تخته گچی مذکور آسایش حرارتی داخلی را در طول روز افزایش می‌دهد و بارهای گرمایش را در زمستان کاهش می‌دهد. با این حال، داده‌های تجربی و محاسبات

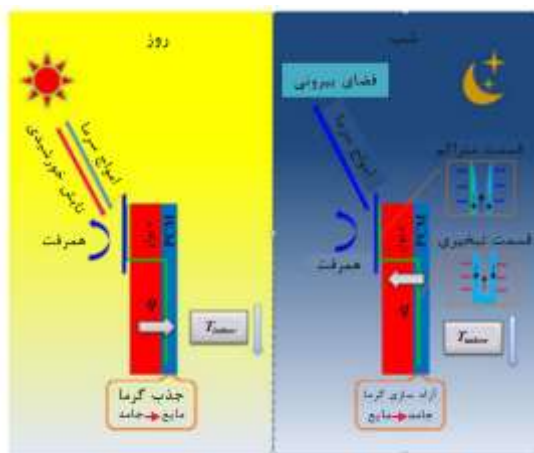
ارائه شده، محدود به یک روز زمستانی بودند. کوسنیک و ویرت [24] دو سلول در مقیاس کوچک را در یک محفظه آب و هوایی تحت شرایط دمایی در یک آب و هوا، طی دوره‌ای مشخص، با و بدون یک لایه دیواره مواد تغییرفازدهنده مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد میزان بارهای گرمایش زمانی که از یک لایه مواد تغییرفازدهنده استفاده شود کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، چایلدز و استووال [21] نتیجه گرفتند که مدل‌سازی دوبعدی، برای به دست آوردن اثر هر گونه پل حرارتی دیوار (مانند قاب چوبی یا فلزی) در ارزیابی مواد تغییرفازدهنده در دیوارها ضروری است. منگ و همکارانش [25] دو نوع مواد تغییرفازدهنده با دمای ذوب متفاوت را در اتاق به طور تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افت دمای هوای داخلی در حدود ۷/۷-۴/۲۸ °C (تابستان) و افزایش ۹/۴۸-۶/۹۳ °C (زمستان)، و نوسان دما به میزان ۶۷/۷-۲۸/۸٪ (تابستان) و ۱۷/۷-۲۵/۴٪ (زمستان) کاهش یافت. با این حال، برخی از مواد تغییرفازدهنده آلی (مانند پلی اتیلن گلاکول<sup>۵</sup> و پارافین‌ها) اغلب به دلیل هدایت حرارتی کم باعث بروز مشکلاتی در ساختمان می‌شوند. این مواد به مرور منجر به آزاد شدن گرما در مواد تغییرفازدهنده می‌شوند [26, 27]. به عنوان مثال، تابش شدید خورشیدی باعث افزایش گرما در مواد تغییر فزدهنده و افزایش دمای هوا می‌شود که در نتیجه باعث انجماد ناکافی مواد تغییرفازدهنده در شب می‌شود، و این قطعاً بر جذب گرما در صورت لزوم تأثیر می‌گذارد. در همین حال، گرمای تجمع یافته ممکن است تا حدی به فضای داخلی نفوذ کند. در حال حاضر، محققان از سایبان آفتابی، تهویه طبیعی و روش‌های دیگر برای رسیدگی به این مشکل استفاده می‌کنند. پابلو آس و همکارانش [28] یک سقف سایبان آفتابی با مساحت 4x4 m<sup>2</sup> را اجرا کردند که آغشته به مواد تغییرفازدهنده می‌باشد. در کنار این اتاق، یک اتاق کوچک به همان اندازه بدون سایبان در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که دمای اوج تا ۶٪ کاهش می‌یابد، که در مقایسه با دمای پیک روزانه ۳۶٪ افزایش می‌یابد. زمان آسایش ساکنان و زمان فعال‌سازی مواد تغییرفازدهنده به ترتیب ۱۰-۲۱٪ و ۴-۱۰٪ افزایش یافت. آلوارو دی گراسی و همکارانش [27, 29, 30] مفهوم جدیدی از کاربرد مواد تغییرفازدهنده در پوشش‌های ساختمان ارائه دادند، که می‌تواند موقعیت لایه مواد تغییرفازدهنده را با توجه به لایه عایق تغییر دهد. و می‌تواند مشکل انجماد ناکافی مواد تغییرفازدهنده و تخلیه پیک بارهای خنک‌کاری در اتاق را حل کند. نتایج نشان داد که سیستم با طراحی و کنترل بهینه، باعث کاهش ۳۷/۹٪ بار سرمایش در مقایسه با سیستم بدون مواد تغییرفازدهنده می‌شود.

شکل 2 ساختار اولیه دیوار خنک‌کننده جدید حاوی مواد تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد که می‌تواند به طور مداوم بارهای خنک‌کننده داخلی را در تمام روز کاهش دهد. به این صورت که گرما را از فضای داخلی به بیرون انتقال می‌دهد. ساختار دیوار مذکور متشکل از مواد تغییرفازدهنده، لوله حرارتی میکروکانال‌ها، دیوار یکپارچه و صفحه آلومینیومی تابشی هستند. مواد تغییرفازدهنده در کپسول آلومینیومی قرار می‌گیرند و سپس در داخل دیوار سمت چپ کار گذاشته می‌شوند. از یک سو سمت تبخیری لوله حرارتی میکروکانال‌ها در مواد تغییرفازدهنده غوطه‌ور هستند، در حالی که

4. Alwadhi  
5. Polyethylene glycol (PEG)

1. CO<sub>2</sub>  
1. Intergovernmental Panel on Climate Change  
3. Athientis

دادند و نتیجه گرفتند که صرفه‌جویی در مصرف برق در طول یک هفته با خنک‌سازی در شب به دست آمده است. با این حال، در صورتی که از تهویه اجباری استفاده شود، مواد تغییرفازدهنده می‌توانند بارهای خنک‌کننده را افزایش دهند. همانطور که سوارس و همکارانش [34] نشان دادند که این یک مزیت بزرگ، از نقطه‌نظر صرفه‌جویی در انرژی، برای ادغام در ساخت سیستم‌های بهینه‌سازی انرژی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است. همانطور که کوسنیک و همکارانش [35] نشان دادند، حجم مواد تغییرفازدهنده باید بهینه‌سازی شود، زیرا اگر خیلی زیاد باشد، زمان مورد نیاز برای نفوذ گرما به مواد تغییرفازدهنده، بزرگ‌تر از تعداد کل ساعات آفتابی موجود می‌شود و فرآیند ذخیره‌سازی نمی‌تواند در طول یک روز کامل شود. به دلیل هدایت گرمایی پایینی مواد تغییرفازدهنده، این سیستم‌ها یک عیب ذاتی در انتقال حرارت آهسته در طول فرآیند شارژ و دشارژ دارند. اگر کسی پتانسیل استفاده از مواد تغییرفازدهنده را به عنوان یک ماده عایق در نظر بگیرد، این می‌تواند یک مزیت باشد.



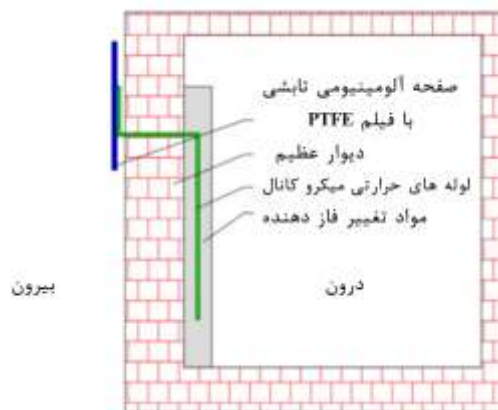
شکل 3 اصول کار دیوار خنک کننده تمام روز [31].

ایزدی<sup>3</sup> و همکارانش، تأثیر ادغام مواد تغییرفازدهنده بر افزایش عملکرد حرارتی دیوار آجری سرپناه و ظرفیت کاهش شار حرارتی آن در شرایط بحرانی با دو نوع آجر ساختمانی معمولی در ایران مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. استفاده از لایه‌های هوا یا مواد تغییرفازدهنده در آجر هر کدام مزایایی را به همراه دارد. در حالی که لایه هوا می‌تواند شار گرما را برای کل فرآیند به عنوان یک عایق کاهش دهد، لایه مواد تغییرفازدهنده می‌تواند به عنوان یک عایق بسیار بهتر از لایه هوا برای مدت زمان قابل توجهی (زمان استقامت) عمل کند. به همین دلیل، ترکیبی از لایه‌های مواد تغییرفازدهنده و هوا می‌تواند جذاب باشد زیرا میزان مواد تغییرفازدهنده مورد نیاز برای دیوار پناهگاه را نیز کاهش می‌دهد [36].

### ۳-۲- پنجره ساختمان

یکی از عوامل انتقال حرارت در ساختمان‌ها پنجره است. از نظر میزان مصرف انرژی، پنجره‌ای که مقاومت حرارتی بالایی داشته باشد بهتر است، در مقابل

قسمت‌های متراکم به بیرون کشیده می‌شوند. صفحه تابشی به طرف‌های متراکم لوله حرارتی میکروکانال‌ها متصل است که با پلی‌تترافلوئورو به ضخامت ۰/۰۵ میلی‌متر پوشانده شده است. فیلم پلی‌تترافلوئور اتیلن<sup>۱</sup> برای خنک‌کردن لوله حرارتی میکروکانال‌ها از طریق خنک‌کننده تابشی استفاده می‌شود [31].



شکل ۲ ساختار اولیه دیوار خنک کننده حاوی مواد تغییرفازدهنده [31].

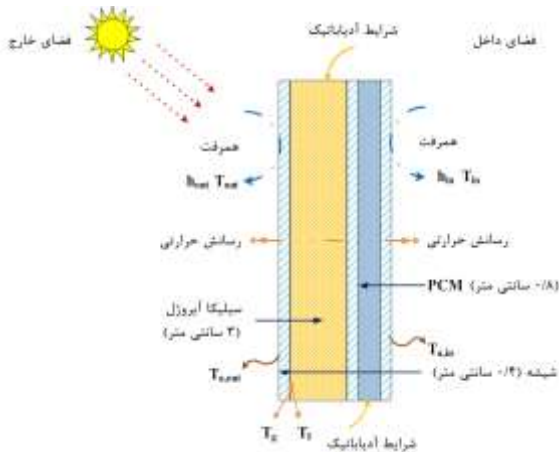
اصلی‌ترین کار دیواره‌های سرمایش در طول ایام سال در شکل 3 نشان داده شده است. در طول روز، زیر تابش خورشید دیواره ترکیبی ابتدا تابش خورشید را جذب کرده و انرژی حرارتی جذب شده را ذخیره می‌کند. در همان زمان، دیوار ترکیبی انرژی حرارتی را به مواد تغییرفازدهنده منتقل می‌کند، بنابراین مواد تغییرفازدهنده جامد درجه‌بندی می‌شوند و معمولاً مایع می‌شوند. در مقایسه با دیوار آجری، مواد تغییرفازدهنده انرژی حرارتی را ذخیره می‌کنند و انتقال حرارت را از قسمت بیرونی به سمت داخلی کاهش می‌دهند، که باعث کاهش بارهای خنک‌کننده داخلی می‌شود. در حالی که در طول شب، انرژی گرمایی انباشته شده از مواد تغییرفازدهنده از طریق صفحه تابشی و دیوار خارجی به فضای باز پراکنده می‌شود، از این رو مواد تغییرفازدهنده مایع به تدریج جامد می‌شوند. صفحه تشعشعی می‌تواند فرآیند تراکم مواد تغییرفازدهنده را توسط بتن مسلح<sup>۲</sup> تسریع کند، لازم به ذکر است که بتن مسلح یک مکانیسم خنک‌کننده غیرفعال است که می‌تواند گرما را بدون هیچ گونه انرژی ورودی اضافی در فضای بیرونی پخش کند [32، 33]. به طور خلاصه، یک چرخه مشابه شامل جذب گرما توسط مواد تغییرفازدهنده در طول روز و انتشار گرما در طول شب مشکل است. همچنین لازم به ذکر است که لوله حرارتی میکروکانال‌های مورد استفاده از نوع لوله حرارتی گرانشی هستند، بنابراین انتقال حرارت زمانی آغاز می‌شود که دمای سمت تبخیری لوله حرارتی میکروکانال‌ها بیشتر از طرف متراکم آن باشد، یعنی در طول روز، گرمای تابشی از خورشید و زمین نمی‌تواند از طریق انتقال فاز لوله حرارتی میکروکانال به مواد تغییرفازدهنده منتقل شوند [32].

بارزین و همکارانش [33] به صورت تجربی استفاده از تهویه در دو دکل با تست یکسان مجهز به سیستم‌های کنترل هوشمند را مورد بررسی قرار

3. Masoud Izadi

1. Polytetrafluoroethylene  
2. Reinforced concrete

حرارتی فوق‌العاده‌ای را ارائه می‌دهد. مواد تغییرفازدهنده انتخاب شده دارای دمای تغییر فاز مناسب با پایداری طولانی مدت هستند [39].



شکل 4 مدل فیزیکی پنجره شیشه‌ای حاوی مواد تغییرفازدهنده و سلیکا ایروزل [39].

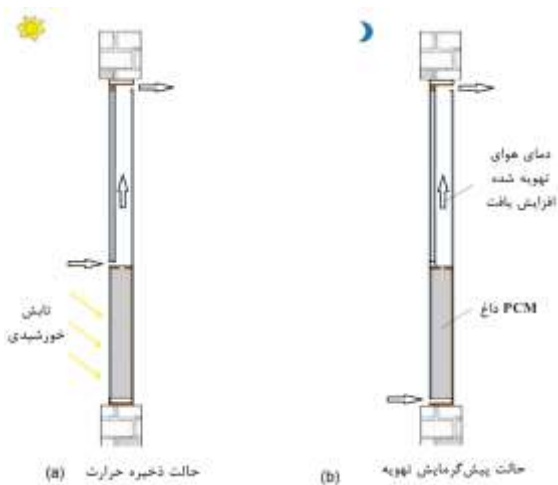
حیدری و همکارانش [40] از بررسی اثرات پیکربندی پنجره‌های مختلف بر مصرف انرژی در ساختمان به این نتایج رسیدند که برای کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی مورد نیاز، می‌توان از شیشه حرارت دیده در پنجره‌های تک جداره و دو جداره استفاده کرد. افزایش ضخامت شیشه برای پنجره‌های تک جداره بار گرمایش را تا حد زیادی کاهش و بار سرمایش را کمی افزایش می‌دهند، در حالی که برای پنجره‌های دو جداره ضخامت شیشه ارتباط مستقیم با بار گرمایش و سرمایش دارد. همچنین حفره بین پنجره‌ها تأثیر مستقیمی بر بار سرمایش وارد می‌کند در حالی که بر بار گرمایش تأثیر معکوس می‌گذارد. بنجامین و همکارانش [41] در بررسی مدل پنجره از روش‌های تجربی و عددی بر اساس تغییر فاز، نتیجه گرفتند در معرض تشعشع با کاهش تغییرات دمای هوای داخلی، افزایش ضخامت حفره تا 24 mm موثر است، اما با کسر حجمی فاز جامد/ مایع محدود می‌شود و همچنین در غیاب تشعشع حفره نباید بیشتر از 19 mm باشد. لی و همکارانش [42] انرژی پنجره‌های لعاب‌دار حاوی نانو مواد تغییرفازدهنده، تأثیر کسر حجمی نانوذرات، قطر ذرات بر اختلاف دمای سطح داخلی شیشه و محیط داخلی را بررسی کردند. نتیجه گرفتند که شدت تأثیر پارامترهای مورد مطالعه در فصل زمستان بیشتر است و هر چه کسر حجمی نانوذرات بیشتر باشد مصرف انرژی بیشتر و قطر ذرات بزرگتر مصرف انرژی کمتر می‌شود. پس مصرف انرژی را می‌توان با انتخاب مناسب کسر حجمی نانوذرات و اندازه نانوذرات تا 4٪ کاهش داد. فرآیند انتقال حرارت یک پنجره لعاب‌دار حاوی نانومواد تغییرفازدهنده در شکل 5 نشان داده شده است. یک قسمت توسط شیشه منعکس می‌شود، قسمت دیگر از طریق واحد پنجره منتقل می‌شود و قسمت باقی‌مانده توسط شیشه و لایه نانومواد تغییرفازدهنده جذب می‌شود. گرمای جذب شده توسط پنجره لعاب‌دار به منبع تابشی در لایه شیشه و لایه نانومواد تغییرفازدهنده تبدیل می‌شود. در طی فرآیند انتقال

پنجره‌های شیشه‌ای معمولی، پنجره‌های شیشه‌ای پر شده با مواد تغییرفازدهنده برای جذب یا انتشار گرما در هوای سرد و گرم مناسب هستند [37]. در این خصوص اسماعیل و همکارانش [38] مقایسه‌ای بین دو نوع پنجره حرارتی پر شده با گازهای جاذب و پر شده با مواد تغییرفازدهنده انجام دادند. در هر مورد از یک مدل ریاضی مناسب استفاده کردند. نتیجه پژوهش آنها به این صورت بود که پنجره‌های دوشیشه‌ای پر شده با مخلوط گاز جاذب و با استفاده از شیشه بازتابنده کارایی بیشتری دارد و فاکتور شیب<sup>1</sup> آن در محدوده 0/55-0/65 هست و پنجره دوشیشه‌ای پر شده با مواد تغییرفازدهنده دارای فاکتور شیب در محدوده 0/65-0/85 است. فاکتور شیب در رابطه (2) قابل مشاهده است.

$$\text{slope factor} = \frac{\text{rise}}{\text{run}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

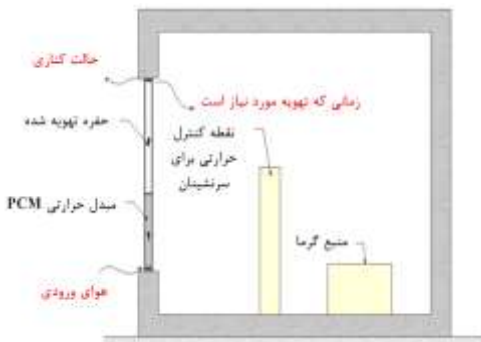
شوهانگ لی و همکارانش [37] عملکرد حرارتی پنجره‌های شیشه‌ای پر شده با مواد تغییرفازدهنده و پنجره‌های شیشه‌ای عایق را در تابستان و زمستان بررسی کردند و نوسانات دمایی سطح داخلی و خارجی هر دو پنجره را توسط نرم‌افزار FLUENT در 48 ساعت شبیه‌سازی کردند. پنجره‌های شیشه‌ای پر شده با  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  در روزهای آفتابی تابستان عملکرد حرارتی بهتری داشتند، و در روزهای بارانی پنجره‌های شیشه‌ای پر شده با  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  عملکرد حرارتی بهتری داشتند. با این حال در زمستان اثرات تنظیم حرارتی مورد انتظار نبود، به دلیل اینکه دمای تغییر فاز  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  بالاتر از دمای محیط بود و هیچ تغییر فازی در مواد تغییرفازدهنده آنها مشاهده نشد. بنابراین آنها به این نتیجه رسیدند که دمای ذوب مواد تغییرفازدهنده، نقش مهمی در عملکرد حرارتی دارد، از این رو باید انواع دیگر مواد تغییرفازدهنده برای استفاده در پنجره‌های دوشیشه‌ای برای دستیابی به عملکرد حرارتی بهتر در زمستان مورد استفاده قرار گیرد. لی و همکارانش [39] عملکرد حرارتی پنجره شیشه‌ای ترکیبی از سلیکا ایروزل و مواد تغییرفازدهنده را در آب و هوای سرد چین بررسی کردند. شبیه‌سازی عملکرد عایق حرارتی پنجره شیشه‌ای، توسط یک مدل عددی انجام شد و اثرات ضخامت ایروزل‌های مختلف، چگالی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی را بر روی خواص عایق حرارتی پنجره شیشه‌ای مطالعه کردند و نتایج آنها نشان داد که پنجره‌ای ترکیبی مذکور نمی‌تواند به طور موثر از گرمای نهان در آب و هوای سرد شدید استفاده کند. افزایش ضخامت و کاهش هدایت حرارتی، آسایش حرارتی پنجره شیشه‌ای را تضمین می‌کند و مواد تغییرفازدهنده می‌توانند در طول روز و شب چرخه داشته باشند و آسایش حرارتی را فراهم کنند. در حالی که چگالی ایروزل سلیکا و گرمای ویژه تأثیر ناچیزی بر آسایش حرارتی و چرخه مواد تغییرفازدهنده دارند. مدل فیزیکی پنجره شیشه‌ای حاوی سلیکا ایروزل و مواد تغییرفازدهنده (پارافین) در شکل 4 نشان داده شده است. واحد پنجره یک سیستم شیشه سه جداره است. با صرفه‌جویی در مصرف انرژی پنجره شیشه‌ای، حفره اول با ایروزل و حفره دوم با مواد تغییرفازدهنده پر شده و توسط شیشه‌هایی به ضخامت 0/4 سانتی متر قاب شده است. ایروزل سلیکا به دلیل رسانایی حرارتی کم 0/18 W/(m·K) که کمتر از هوا، 0/26 W/(m·K) است، عملکرد عایق

1. Slope factor



شکل ۶ اصل کار سیستم مواد تغییرفازدهنده پنجره تهویه شده در کاربرد پیش‌خنک‌کننده تهویه [44].

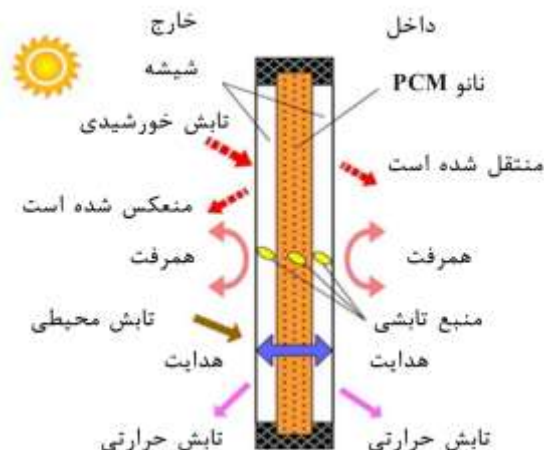
هو و همکارش [45] یک پنجره جدید برای پیش‌خنک کردن هوای تهویه با استفاده از مبدل حرارتی مواد تغییرفازدهنده ارائه دادند. در تابستان، مبدل حرارتی مواد تغییرفازدهنده با تهویه شبانه تخلیه می‌شود و با دمای بالا هوای محیط در حالت پیش‌خنک‌کننده شارژ می‌شود. فرایندهای طراحی و بهینه‌سازی مبدل حرارتی با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام می‌شود که با آزمایش‌های مقیاس کامل تأیید می‌شود نتایج نشان می‌دهد که در حالت تهویه شبانه، افزایش ضخامت صفحه مواد تغییرفازدهنده تأثیر زیادی بر دمای هوای خروجی و گرمای تخلیه‌شده در ساعات اولیه فرآیند تخلیه ندارد. در شکل ۷ یک اتاق معمولی با یک پنجره تهویه را نشان می‌دهد. یک مبدل حرارتی ساخته شده از صفحات مواد تغییرفازدهنده با پنجره تهویه یکپارچه شده تا هوای تهویه‌شده را از قبل خنک کند [45].



شکل ۷ پنجره تهویه با مبدل حرارتی مواد تغییرفازدهنده [46].

سان و همکارانش [46] یک سیستم دو جداره بین صفحات شیشه‌ای (شامل نوارهای پالستیکی موزی شفاف و نیمه‌شفاف) به نام مواد عایق شفاف تخت موزی<sup>۲</sup> را پیشنهاد کردند. این سیستم، انتقال حرارت بین شیشه‌ها را کاهش می‌دهد و در عین حال دسترسی به نور خورشید را حفظ می‌کند. رفتار حرارتی و نور، مواد عایق شفاف تخت موزی تحت شرایط آب و هوایی

حرارت گذرا، تمام حالت‌های انتقال حرارت، یعنی انتقال حرارت جابه‌جایی، هدایتی و تشعشعی انجام می‌شود [43].



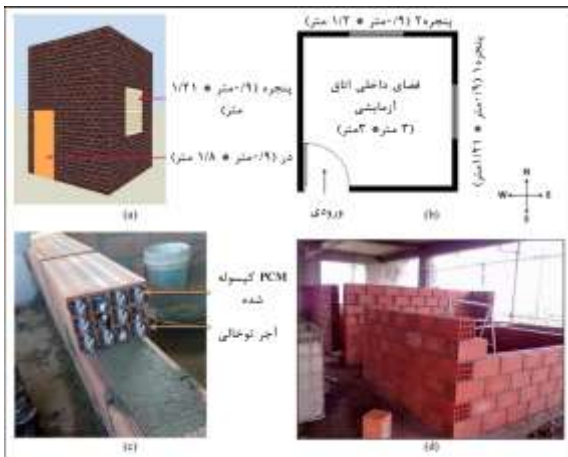
شکل ۵ نمایش شماتیک فرآیند انتقال حرارت در یک پنجره لعابدار حاوی نانومواد تغییرفازدهنده [43].

هو و همکارانش [44] به طور تجربی یک پنجره تهویه ارتقاء یافته با مواد تغییرفازدهنده، انرژی و عملکرد حرارتی آن را در هر دو کاربرد خنک‌کننده تهویه و کاربرد پیش‌گرمایش تهویه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش خنک‌سازی شبانه نشان می‌دهد که تفاوت دمای روزانه‌ی هوای بیرون، بیشترین تأثیر را بر عملکرد حرارتی و انرژی دارد. ساختمان‌هایی که اختلاف دمای روزانه آن‌ها زیاد هستند، می‌توانند از سیستم پنجره تهویه با مواد تغییرفازدهنده در کاربردهای پیش‌خنک‌کننده تهویه بهره بیشتری ببرند. با این حال، اثر پیش‌خنک‌کننده پنجره تهویه با مواد تغییرفازدهنده محدود است. نتایج آزمایش ذخیره انرژی خورشیدی این است که سطح تابش خورشیدی بر میزان ذخیره گرما، میزان صرفه‌جویی در انرژی تهویه و دمای هوای ورودی بیشترین تأثیر را دارد. ساختمان‌های با سطوح تابش خورشیدی زیاد می‌توانند از سیستم پنجره تهویه با مواد تغییرفازدهنده در کاربرد پیش‌گرمایش تهویه بهره بیشتری ببرند. علاوه بر این، آزمایش خود خنک‌کننده پنجره تهویه برای کاهش گرمای بیش از حد اتاق موثرتر از پنجره تهویه بدون خنک‌کننده خودکار است. همانطور که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، مواد تغییرفازدهنده هوای از پیش‌خنک‌شده را برای سیستم‌های گرمایش، تهویه، تهویه مطبوع<sup>۱</sup> داخلی فراهم می‌کند و همانطور که در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است، مواد تغییرفازدهنده نسبتاً داغ توسط هوای سرد بیرون در حالت انتقال حرارت خنک می‌شود. و در حالت پیش‌خنک‌کننده تهویه، که بیشتر در طول روز است، هوای گرم بیرون از طریق مواد تغییرفازدهنده سرد تهویه می‌شود [44].

الف) حالت پیش‌خنک‌کننده (ب) حالت حذف گرما

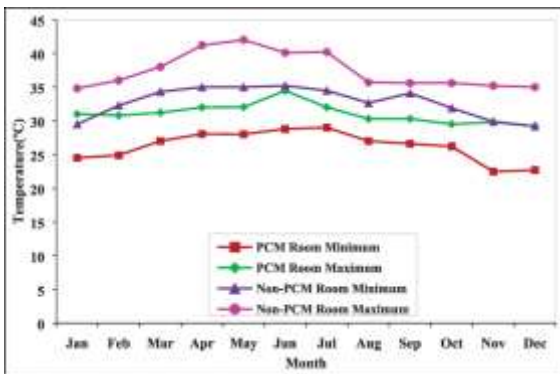
2. Parallel Slat Transparent Insulation Material

1. Heating, Ventilation, and Air Conditioning



شکل 8 (الف) مدل ساختمان مواد تغییرفازدهنده، (ب) نمای پلان اتاق آزمایش، (ت) مواد تغییرفازدهنده محصور شده در آجر (اتاق مواد تغییرفازدهنده)، و (د) اتاق بدون مواد تغییرفازدهنده در طول ساخت [48].

در شکل 9 تغییرات ماهانه دما در اتاق‌های دارای مواد تغییرفازدهنده و بدون مواد تغییرفازدهنده نشان داده شده است. دمای اتاق بدون مواد تغییرفازدهنده در ظهر به دلیل شدت تابش خورشیدی به حداکثر می‌رسد. از شکل 9 چنین استنباط می‌شود که دمای اتاق بدون مواد تغییرفازدهنده در تمام ماه‌ها بیشتر از دمای اتاق دارای مواد تغییرفازدهنده است. مواد تغییرفازدهنده محصور شده در دیوار دمای  $63/27^{\circ}\text{C}$  را در طول روز در ماه ژانویه حفظ می‌کند، اما در اتاق بدون مواد تغییرفازدهنده دمای بالاتری مشاهده می‌شود. این به دلیل جرم حرارتی بالا در مواد تغییرفازدهنده و ذخیره‌سازی گرمای خورشیدی به عنوان گرمای نهان بود، در حالی که در اتاق بدون مواد تغییرفازدهنده جریان گرمای محسوس باعث افزایش دمای اتاق می‌شود [48].



شکل 9 تغییرات ماهانه حداقل و حداکثر دمای آزمایشی اتاق‌های مواد تغییرفازدهنده و غیر مواد تغییر فاز دهنده [48].

مختلف با توجه به عملکرد روزانه و مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مواد عایق شفاف تخت موازی در مقایسه با سیستم شیشه دوجداره معمولی، یک محیط حرارتی یکنواخت را فراهم می‌کند. همچنین کاهش مصرف انرژی بین  $28/1$  و  $35/8\%$  متغیر است.

توکل<sup>1</sup> و همکارانش [47] از یک رویکرد CFD برای ارزیابی تأثیر برخی ویژگی‌های سقف‌های شیشه‌ای چند لایه بر عملکرد حرارتی و مصرف انرژی استفاده کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که با افزودن شیشه‌های بیشتر یا کاهش گسیل سطح، بهبود تدریجی حاصل می‌شود. با این حال، افزایش ضخامت لایه هوا ممکن بود انتقال حرارت را به طور قابل توجهی افزایش دهد که این هدف را شکست می‌دهد. بهترین عملکرد عایق حرارتی با عرض شکاف هوا 9 mm برای همه موارد در نظر گرفته می‌شود در حالی که ضعیف‌ترین عملکرد با عرض شکاف 6 mm یا 15 mm بسته به تعداد شیشه‌ها به دست می‌آید که با بهینه‌سازی تا  $7/1\%$  صرفه‌جویی در انرژی را به دست آوردند. علاوه بر این، دمای سطح داخلی پنجره به دمای داخل نزدیک می‌شود که آسایش حرارتی را افزایش می‌دهد.

### 3-3- آجر

کومار و همکارانش برای کاهش نوسانات دمای اتاق و بارهای سرمایش و گرمایشی، از کامپوزیت آجر توخالی رسی مواد تغییرفازدهنده جدید استفاده کردند. شکل 8 نشان می‌دهد که این آزمایش در دو ساختمان با ابعاد و مصالح ساختمانی یکسان، یکی دارای ادغام مواد تغییرفازدهنده و دیگری بدون ادغام انجام شد. مواد تغییرفازدهنده انتخاب شده در طول ماه‌های زمستان به خوبی عمل کرد اما در طول ماه‌های تابستان افت دمای کمتری ایجاد نمود. که این به دلیل دمای ذوب پایین مواد تغییرفازدهنده است. پس در طول ماه‌های تابستان مواد تغییرفازدهنده با دمای ذوب بالاتر عملکرد بهتری دارند. انتخاب یک ماده تغییرفازدهنده دولایه با دو دمای ذوب، در طول سال می‌تواند باعث کاهش دمای ساختمان شود برای ساختمان‌های دارای مواد تغییرفازدهنده و بدون مواد تغییرفازدهنده، شبیه ساز DESIGN BUILDER انجام شد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه‌ای شد. به کمک رابطه (3) نتایج به دست آمد:

$$C_p \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left[ k_{int} \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_{ext} \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right] \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی ماده  $(\text{kg}/\text{m}^3)$ ،  $\Delta x$  ضخامت لایه PCM (m)،  $\Delta t$  مرحله زمان محاسبه (s)،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه  $(\text{kJ}/(\text{kg K}))$ ،  $T$  دمای گره (K) است.  $z+1 =$  گام زمانی جدید،  $z =$  گام زمانی قبلی،  $i =$  گره در حال مدل‌سازی،  $i+1 =$  گره مجاور به داخل ساختمان،  $i-1 =$  گره مجاور به بیرون ساختمان، و  $k =$  هدایت حرارتی  $(\text{W}/(\text{m K}))$ . مقادیر شبیه‌سازی شده از نتایج تجربی تقریباً  $2^{\circ}\text{C}$  کمتر بود. از این رو، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساختمان برای سرمایش غیرفعال، موجب جلوگیری از مصرف زیاد برق و کاهش اثر گلخانه‌ای می‌شود [48].

1. Mert Tükel

### ۳-۴- لوله

یکی از موارد مورد استفاده در ساختمان‌ها، لوله‌های تعبیه شده در ساختمان‌ها است. در این زمینه یک بررسی تجربی برای توصیف حرارتی تجهیزات ساختمان‌های حاوی لوله مسی پر شده با مواد تغییرفازدهنده ترکیب شده در گچ انجام شد [51]. نتایج تحقیقات تجربی با داده‌های تجربی به دست آمده توسط تریگی و همکارانش مقایسه شد [52]. مطالعه‌ی مقایسه کامپوزیت بر اساس رزین اپوکسی یا گچ بارگذاری شده با لوله‌های توخالی فلزی پر شده با پارافین انجام شد. نتایج حاصل از هر دو مواد نشان داد که اضافه نمودن مواد تغییرفازدهنده موجب کاهش هدایت حرارتی موثر نمونه‌ها می‌شود. مقادیر تجربی نشان دهنده‌ی ایجاد روند زیر در هدایت حرارتی است: لوله‌های گچی/مسی با مواد تغییرفازدهنده هگزا دکان بیشتر از رزین اپوکسی/لوله مسی با مواد تغییرفازدهنده بیشتر از رزین اپوکسی/لوله برنجی با مواد تغییرفازدهنده.

### ۳-۵- سنگ مصنوعی

سنگ مصنوعی که با بازیافت آجرهای قدیمی و شکسته تولید می‌شود، برای تکمیل ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد اما اخیراً به صورت کاشی آجری ساخته شده است. برای مصالح تکمیلی سنگ مصنوعی، از چسب، سیمان، گچ، اپوکسی و سرامیک استفاده می‌شود [53]. در ساختمان‌های مدرن سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌توانند انرژی و آسایش حرارتی را تامین کنند [54]. کیم و همکارانش روی خواص مکانیکی و حرارتی مصالح تکمیلی مخلوط سنگ مصنوعی با سنگ‌دانه‌ی سبک آغشته به مواد تغییرفازدهنده و مواد کربنی مطالعه کردند. در این مطالعه شن و ماسه سبک آغشته به مواد تغییرفازدهنده<sup>۶</sup> روی ملات پایه سیمانی استفاده شد. تقریباً 45٪ از فضای خالی به ماسه‌ی سبک مصنوعی<sup>۷</sup> با مواد تغییرفازدهنده آغشته شده بود. با بررسی آزمایش جریان، نمونه‌های شن و ماسه سبک آغشته به مواد تغییرفازدهنده نسبت به نمونه ماسه‌های سبک مصنوعی، مقادیر جریان بالاتری را نشان دادند، که تاثیر کاهش نرخ جذب سنگدانه‌های سبک وزن را هنگام آغشته شدن به مواد تغییرفازدهنده نشان می‌دهد. در نمونه‌ی شن و ماسه سبک آغشته به مواد تغییرفازدهنده مقاومت فشاری نسبتاً کم مشاهده شد. اعتقاد بر این است که مواد تغییرفازدهنده باقیمانده، بر چسبندگی بین خمیر و سنگدانه اثر می‌گذارد. از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها، مشخص شد که هدایت حرارتی در نمونه‌های با شن و ماسه سبک آغشته به مواد تغییرفازدهنده کمی بیشتر از نمونه‌های با ماسه سبک مصنوعی بود. نتایج نشان داد که عملکرد ذخیره‌سازی گرما هنگامی که به‌عنوان ماده تکمیل‌کننده اعمال می‌شد بهتر بود [55]. شکل 10 سیمان مورد استفاده در ساخت سنگ مصنوعی برای مصالح تکمیلی ساختمان را نشان می‌دهد. سنگدانه ریز ساده شن و ماسه طبیعی<sup>۸</sup> و سنگدانه سبک وزن<sup>۹</sup> از ماسه سبک مصنوعی، تولید شده از خاکستر زغال سنگ بازیافت شده و خاک لایروبی ساخته شده است. ماسه سبک مصنوعی در نیروگاه حرارتی KOEN کره تولید شد. اندازه ذرات ماسه سبک مصنوعی به طور

گائو<sup>۱</sup> و منگ<sup>۲</sup>، یک بررسی جامع در مورد ادغام مواد تغییر فازدهنده در آجرهای ساختمانی ارائه دادند. نتیجه‌گیری نشان داد که در مقایسه با دیوارهای آجری معمولی و دیوارهای آجری ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده، تاخیر حرارتی آجرهای ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده که با سیستم‌های یکپارچه تهویه یا مواد عایق ترکیب می‌شوند حدود 4 ساعت افزایش می‌یابد. آجرهای ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده را تقویت کنید تا با سیستم‌های تهویه یا مواد عایق ترکیب شوند تا گردش هوا را افزایش دهند و در نتیجه آلودگی هوای داخل خانه را کاهش دهند. همچنین می‌توان آن را با استراتژی‌های سنتی صرفه‌جویی در انرژی، مانند تغییر پوشش دیوار بیرونی، ترکیب کرد. در دیوار آجری ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده، محل لایه عایق نیز باید با توجه به مناطق مختلف آب و هوایی مورد بحث قرار گیرد. آجرهای ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده قادر به افزایش قابل توجه عملکرد حرارتی دیوار و بهبود محیط حرارتی داخل ساختمان هستند. استفاده از آجرهای ادغام شده با مواد تغییرفازدهنده می‌تواند دمای دیواره سطح داخلی را  $5-1/5$  °C کاهش دهد و زمان تاخیر را 4-0/5 ساعت افزایش دهد. شار حرارتی دیوار آجری PCM را می‌توان تا 97٪ کاهش داد، دمای داخلی را می‌توان 6-2/4 درجه سانتیگراد کاهش داد، و در مصرف انرژی می‌توان 3/12-56٪ صرفه‌جویی کرد [49].

مکرم<sup>۳</sup> و دنیل<sup>۴</sup>، عملکرد یک آجر سیمانی جدید پر شده با میکرو مواد تغییرفازدهنده را که به عنوان یک سیستم ذخیره انرژی حرارتی در دیوارهای ساختمان استفاده می‌شود را ارزیابی نمودند. تغییرات دما برای دیواره داخلی، دیواره بیرونی و مواد تغییرفازدهنده به صورت عددی در مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده در وسط دیوار برای ساختمان‌های تجاری و در موقعیت افست برای ساختمان‌های خانگی برای عملکرد بهتر توصیه می‌شود. محصور کردن مستقیم میکرو مواد تغییرفازدهنده در سوراخ آجری، استفاده از ظروف یا کیسه‌ها را برای محصور کردن مواد تغییرفازدهنده رد می‌کند. این به بهبود عملکرد همراه با خواص فیزیکی همگن برای آجر کمک کرد.

محمدی<sup>۵</sup> و همکارانش، یک پوشش ساختمانی متشکل از آجر توخالی پر شده با مواد تغییرفازدهنده را با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، از نظر عملکرد و پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی تجزیه و تحلیل کردند. تجزیه و تحلیل نسبت انتقال حرارت هر دیوار در طول سال نشان می‌دهد که سرعت انتقال حرارت با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در زمستان کاهش می‌یابد و در تابستان افزایش می‌یابد. در تابستان، مواد تغییرفازدهنده می‌توانند گرما را برای تنظیم دمای داخلی جذب کنند و به طور بالقوه انتقال حرارت را افزایش دهند. در زمستان، آنها می‌توانند گرما را ذخیره و آزاد کنند تا تلفات گرما را کاهش دهند و به طور بالقوه انتقال حرارت را کاهش دهند [50].

6. PCM-impregnated lightweight sand  
7. lightweight sand  
8. Natural sand  
9. Lightweight aggregate

1. Yi Gao  
2. Xi Meng  
3. T. Anfas Mukram  
4. Joseph Daniel  
5. Youstra M'hamdi

کلی ۵-۱/۲ mm بود. اندازه ذرات ریز در مقایسه با ماسه طبیعی تا حدودی ناکافی است [55].



شکل 10 مقطع ماسه سبک (ماسه سبک مصنوعی) [55].

### 3-6- سق

افزودن مواد تغییرفازدهنده به عنوان یک لایه روی سق، آسایش حرارتی ساکنین را بهبود می‌بخشد و باعث کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان می‌شود. در این باره جایلات<sup>1</sup> و همکارانش اثر بخشی مواد تغییرفازدهنده را برای بهبود عملکرد حرارتی و آسایش حرارتی یک ساختمان مسکونی ارزیابی می‌کنند. ادغام مواد تغییرفازدهنده در ساختمان‌ها با ظرفیت ذخیره گرمای قابل توجه می‌تواند انتقال حرارت را به تاخیر بیندازد و بارهای سرمایش و گرمایش را کاهش دهد. برای این منظور شبیه‌سازی عددی انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. کاهش 39 درصدی بار سرمایشی سالانه در مقایسه با کاهش 12 درصدی بار گرمایشی شرایط آب و هوایی سق ساختمان با مقدار جذب خورشیدی ۰/۶ مشاهده شد، نتایج نشان داد مواد تغییرفازدهنده در کاهش بارهای خنک‌کننده در مقایسه با بارهای گرمایش موثرتر هستند. علاوه بر این، مواد تغییرفازدهنده در آب و هوایی که می‌توان با نوسانات دمایی روزانه بالاتر شارژ و تخلیه کرد، به بهترین وجه قابل درک است [56].

منگا و همکارانش به منظور کاهش یا افزایش حرارت ساختمان از طریق سق، نوع جدیدی از سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا را بررسی کردند. برای مقایسه عملکرد حفاظت حرارتی سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا با سق حاوی مواد تغییرفازدهنده، سق با بازتاب بالا و سق مشترک، سه اتاق با اندازه واقعی ساخته شد. سه اتاق ابتدا با سق حاوی مواد تغییرفازدهنده، سق بازتابی و سق مشترک نصب شدند. عملکرد حفاظت حرارتی سه سق به مدت هشت روز مقایسه شد. سپس سق حاوی مواد تغییرفازدهنده و سق انعکاس بالا با هم ترکیب شدند تا سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با انعکاس بالا را تشکیل دهند و عملکرد حفاظت حرارتی سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا نیز برای هشت روز دیگر با سق معمولی مقایسه شد. نتایج نشان داد که سق حاوی مواد

تغییرفازدهنده با بازتاب بالا در کاهش دمای هوای داخل ساختمان، دمای سطح داخلی و شار حرارتی سطح داخلی عالی تر عمل می‌کند. نتایج تعادل حرارتی نشان داد که نوع جدید سق می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش گرمای تابش خورشیدی را کاهش دهد و قسمت اعظم گرمای عبوری از لایه بازتابی بالا را ذخیره کند. سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا عملکرد حفاظت حرارتی بهتری نسبت به سه سق دیگر داشت. نتایج مورد توجهی که به آن دست یافتند شامل موارد زیر می‌شود:

۱- سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا می‌تواند نوسانات دمای هوای داخلی را ۸/۵٪ در روز ابری و ۱۷/۰٪ در روز آفتابی کاهش دهد.

۲- شار حرارتی سطح داخلی سق با بازتاب بالا- مواد تغییرفازدهنده با عوامل آب و هوا همبستگی منفی داشت در حالی که همه پارامترهای دیگر همه با عوامل آب و هوا همبستگی مثبت داشتند.

۳- فیلم بازتابی بالا می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش گرمای تابش خورشیدی را کاهش دهد و لایه مواد تغییرفازدهنده می‌تواند قسمت اعظم گرمای عبوری از فیلم با بازتاب بالا را ذخیره کند.

بطور کلی عملکرد حفاظت حرارتی سق حاوی مواد تغییرفازدهنده با بازتاب بالا به وضوح بهتر از سق حاوی مواد تغییرفازدهنده، سق با بازتاب بالا و سق معمولی است. این یک سق توصیه شده برای حفاظت حرارتی در تابستان است [57].

سیمون<sup>۲</sup> و همکارانش، عملکرد حرارتی یک ماده تغییرفازدهنده یوتکتیک معدنی ادغام شده در دال پشت بام را از نظر تجربی و عددی تجزیه و تحلیل کردند. نتایج بیان داشتند که عناصر ساختمانی حاوی مواد تغییر فازدهنده می‌توانند برای بهبود آسایش حرارتی داخلی و بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها مناسب باشند. در آنتوفاگاستا، می‌تواند نوسانات دمایی روزانه داخل ساختمان را صاف کند، بنابراین تقاضای انرژی برای گرمایش و سرمایش فضا را کاهش می‌دهد. در مورد شبیه‌سازی در سایر اقلیم‌ها، مطالعه نشان می‌دهد که پانل مواد تغییرفازدهنده عملکرد حرارتی بهتری در طول دوره زمستان دارد، زیرا به حفظ یا افزایش دمای اتاق تا حدودی برای رسیدن به دمای راحت کمک می‌کند [58].

### 3-7- کف

ناگانو و همکارانش [59] یک سیستم تهویه مطبوع کف جدید را بررسی کردند که از مواد تغییرفازدهنده برای افزایش ذخیره‌سازی حرارتی ساختمان استفاده می‌کند. گرانول‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده با دمای تغییرفازدهنده حدود ۲۰۸ °C، از دانه‌های شیشه‌ای فوم‌دار و موم‌های پارافین ساخته شده‌اند [60]. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های شبیه‌سازی برنامه تهویه مطبوع در ساختمان‌های اداری نشان می‌دهد که ۸۹٪ از بار خنک‌کننده روزانه را می‌توان هر شب در سیستمی ذخیره کرد که از یک بستر بسته‌بندی شده ۳۰ mm مواد تغییرفازدهنده دانه‌ای استفاده می‌کند. در نهایت نتیجه گرفتند:

۱- با آغشته کردن دانه‌های شیشه‌ای کف شده به موم پارافین و سپس اعمال سه پوشش یورتان، یک ماده ذخیره گرمای نهان دانه‌ای ایجاد شد. تغییر در آنتالپی خاص این مواد تغییرفازدهنده دانه‌ای در محدوده

2. SIMON François

1. Jayalath

قرار گرفت و قابلیت انتقال حرارت، توزیع میدان دما و راحتی حرارتی گرمایش کف تابشی سبک وزن توسط آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [64]. تلاش برای استفاده از مواد تغییردهنده فاز میکروکپسوله شده در کف بتنی برای گرمایش فضا در خانه‌های هلندی مورد بررسی قرار گرفته است. چهار جعبه را مطابق شکل 11 قرار دادند که دارای یک پنجره به سمت جنوب است و آن را برای آزمایش آماده کردند هر جعبه از یک قاب مصنوعی با ابعاد ۱۱۳۰ mm در ۷۲۵ mm در ۶۹۰ mm (۱۱۳۰ × ۷۲۵ × ۶۹۰) mm تشکیل شده است. کف هر جعبه از حدود ۱۰۴/۷-۱۰۴/۲ kg بتن برای ذخیره انرژی حرارتی تشکیل شده است. جعبه ۱ و جعبه ۳ از چهار جعبه حاوی ۵٪ پارافین به عنوان مواد تغییرفازدهنده ریز کپسوله شده در کف بتنی با نقطه ذوب ۲۳ °C است [65].



شکل 11 مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله شده در کف بتنی برای گرمایش فضا در خانه‌های هلندی [65].

جعبه‌های ۳ و ۴ با عایق سبک ۲۰ mm ارائه می‌شوند و جعبه‌های ۱ و ۲ با عایق سنگین مبتنی بر شیشه سلولی به ضخامت ۱۶۰ mm ارائه می‌شوند که در جدول 2 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده‌ها در کف بتنی دما را به‌طور قابل توجهی تا ۱۶٪ افزایش و به صورت حداقلی تا ۷٪ کاهش می‌دهد [65].

انتقال حرارت از کف اتاق به سطح سقف اتاق زیر با عبور آب گرم از لوله آغاز می‌شود. طبق رابطه (4) بدست می‌آید.

$$\Delta q = \rho \cdot A \cdot dx \cdot C_p \cdot T_x \quad (4)$$

$\rho$  چگالی آب،  $A$  سطح مقطع لوله،  $C_p$  گرمای ویژه آب گرم،  $T_x$  دمای آب گرم می‌باشند. آب گرم در حجم بسیار کم پس از مدت بسیار کوتاهی طبق رابطه (5) افت انتقال حرارت دارد:

$$d\Delta q = -\rho \cdot A \cdot dx \cdot C_p \cdot T_x \quad (5)$$

این مقدار مجموع مقدار گرمای آزاد شده به کف اتاق ( $d\Delta q_b$ ) و سقف اتاق ( $d\Delta q_c$ ) است. این امر به این دلیل رخ می‌دهد که مقداری از گرمای آب گرم شده به سطوح کف و سقف زیرین منتقل می‌شود. همچنین معادله انرژی هر نقطه طبق رابطه (6) است:

$$C_p \frac{dT_p}{dt} \sum q_{in} - \sum q_{out} - q_{rk} \quad (6)$$

دمایی بین ۱۷ °C تا ۲۲ °C، که شامل محدوده دمای تغییرفازدهنده می‌شود،  $1 \text{ kJ kg}^{-1}$  بود.

۲- آنالیز حرارتی نشان داد که اثر تثبیت دما در طول زمانی که تغییر فاز رخ می‌دهد، ثابت زمانی دمای اتاق را با ضریب ۱/۵-۲/۱ افزایش می‌دهد که یک بستر پر شده مواد تغییر دهنده فاز نصب شده بود.

۳- نتایج پژوهش نشان داد که در شرایطی که هوا در طول شب به اتاق جریان می‌یابد، کل گرمای ذخیره‌شده در پایان هر شب  $1/79 \text{ MJ/m}^2$  بود. در این مورد، عملکرد تهویه هوا در روز از ساعت ۱۳:۰۰ به ۳ ساعت محدود شد که معادل نسبت شیفت شب ۸۹٪ بود. در آینده، استفاده از مواد تغییر دهنده فاز دانه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بزرگ‌تر، ممکن است اجازه دهد کل بار کولر گازی در طول روز با ذخیره‌سازی شبانه تامین شود [61].

ژانگا و همکارانش به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم‌های گرمایش از کف تابشی<sup>۱</sup> برای دستیابی به دمای مطلوب در ساختمان‌هایی با نیازهای کم انرژی به شدت افزایش یافته است. دو نوع اصلی از سیستم های هیدرونیک گرمایش از کف تابشی وجود دارد: سیستم‌های سنگین و سبک. در سیستم‌های سنگین، لوله‌های اعمال شده بر روی سیستم‌های گرمایش از کف معمولاً در لایه بتنی ساختمان کف قرار می‌گیرند [62]. سیستم گرمایش کف تابشی سبک وزن<sup>۲</sup> به دلیل ساختار کف خاص خود با گرمایش سریعتر، کاهش ارتفاع کف و بار کف کمتر و غیره مشخص می‌شود. یک مدل دینامیکی دو بعدی برای شبیه‌سازی سیستم‌های گرمایش از کف ایجاد کرد. آنها با استفاده از این مدل مقدار تلفات حرارتی و دمای یک دال را در یک طبقه درجه یک با سیستم گرمایش از کف محاسبه کردند. جین یک روش محاسبه برای دمای سطح کف در سیستم گرمایش و سرمایش کف تابشی پیشنهاد کرد. همچنین شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های کامپیوتری را برای تحقیق در مورد ویژگی‌های کنترل و عملکرد گرمایش برای یک سیستم گرمایش دال تابشی با دریچه‌های ترموستاتیک خودکار در آپارتمان‌های مسکونی انجام شد. یک بحث جامع در مورد سیستم‌های گرمایش از کف تابشی ارائه کرد و اصول اساسی آنها را بررسی کرد. هو و همکارانش کاربردهای عملی را در چهار پروژه بزرگ بررسی کردند و ملاحظات مرتبط در طراحی سیستم را ارائه کرد. طرح جدیدی را در ترکیب واحدهای کف توخالی بتنی پیش تنیده با ساختار کف خشک جدید بدون لایه پرکننده بتن ارائه کرد [63]. روشی را برای محاسبه خواص حرارتی پانل‌های گرمایش کف تابشی سبک وزن بر اساس یک راه اندازی آزمایشی توسعه داد. تاکنون به ندرت تحقیقاتی در مورد خواص حرارتی و آسایش حرارتی سیستم گرمایش کف تابشی سبک وزن انجام شده است. در این مقاله، اثرات پارامترهای طراحی مانند فاصله بین لوله‌ها در کنار یکدیگر و دمای آبرسانی و پساب بر عملکرد سیستم گرمایش کف تابشی سبک وزن با یک مدل ریاضی ساخته‌شده برای یک اتاق با سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. هدایت حرارتی پایدار، هدایتی و تشعشعی در نظر گرفته شده است. و در نهایت تأثیر پارامترهای طراحی سیستم گرمایش کف تابشی سبک وزن بر دمای هوای داخلی و دمای متوسط سطح طبقه بالایی با برنامه محاسبه مورد تجزیه و تحلیل

29/4 – 29/6 می باشد بنابراین شرایط ذکر شده در فرضیات را ارضا می کند و همچنین می توان فرض نمود که این دما تقریباً ثابت می باشد و فاقد ناحیه ی خمیری هستیم (زیرا بازه ی تغییرات آن بسیار ناچیز است) [66].

**جدول 3** خواص مواد تغییر فاز دهنده برای حالت های مختلف شبیه سازی [66].

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	خواص
			نسبت وزن ماده ی تغییر فاز دهنده به وزن کل دیوار
56	33	34	برای دیوار (kJ/kg) گرمای ویژه ی معادل
	29/4 – 29/6		بازه ی دمای ذوب (°C)
0/16	0/23	0/0337	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
850	1000	29	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
2500	1400	960	گرمای ویژه (J/Kg K)
0/005	0/020	0/105	ضخامت (m)
0/005	0/005	0/015	فاصله ی گره های در نظر گرفته شده در شبیه سازی (m)

باتوجه به نتایج به دست آمده تاثیر اندازه ی فاصله ی مش بندی بر روی نتایج عددی مورد بررسی قرار گرفت. که با توجه به افزایش بیش از حد فاصله ی مش ها هر چند که حجم محاسبات کاهش می یابد اما جواب نهایی از دقت لازم برخوردار نخواهد بود. همچنین با کاهش بیش از حد فاصله ی مش ها نیز گرچه دقت جواب نهایی افزایش می یابد اما به شدت حجم محاسبات و هزینه های محاسباتی افزایش می یابد. لذا پیشنهاد شد که از فاصله ی مش بندی نه بسیار زیاد و نه بسیار کم استفاده شود تا در عین کاهش حجم محاسبات، جواب نهایی دقت لازم را داشته باشد.

این شبیه سازی ها برای سه بازه ی زمانی یک دقیقه، دو دقیقه و چهار دقیقه صورت گرفت. در این حالت نیز داده های تجربی با داده های عددی مقایسه شد که برای بازه ی زمانی یک دقیقه، بیشترین دقت حاصل می شود اما در این حالت حجم محاسبات به شدت بالا می رود و در نتیجه هزینه های محاسباتی افزایش می یابد. همچنین نشان داده شد که برای بازه ی زمانی چهار دقیقه حجم محاسبات به شدت کاهش یافته ولی در عوض خطاهای نسبتاً چشمگیری در جواب ساله ایجاد می شود. نهایتاً نشان داده شد که بازه ی زمانی دو دقیقه ای در عین حال که دارای تعداد محاسبات کمی باشد، دقت مورد نیاز را نیز برآورد می کند در نتیجه استفاده از بازه ی زمانی دو دقیقه ای به عنوان بهترین حالت پیشنهاد گردید [66].

#### ۵- مقایسه اقتصادی

سفاری<sup>1</sup> و همکارانش با ادغام مواد تغییر فاز دهنده در زیر 24 ساعت و خطوط برنامه ریزی عملیاتی مسکونی باعث صرفه جویی در انرژی در هر دو فصل زمستان و تابستان شدند. در منطقه اقلیمی مادرید، مواد تغییر فاز دهنده با دمای 27°C در تابستان (دوره سرمایش) صرفه جویی بیشتری در مصرف انرژی

C<sub>p</sub> ظرفیت حرارتی هر قطعه، T<sub>p</sub> دمای هر قسمت، q<sub>in</sub> و q<sub>out</sub> انتقال حرارت توسط همرفت یا هدایت می باشد.

#### جدول 2 نتایج آزمایشگاهی برای ۱ هفته [65]

تاریخ	باکس 1 (دمای مینیموم- ماکسیموم)	باکس 2 (دمای مینیموم- ماکسیموم)	باکس 3 (دمای مینیموم- ماکسیموم)	باکس 4 (دمای مینیموم- ماکسیموم)	باکس 5 (دمای مینیموم- ماکسیموم)
					حداکثر و حداقل دما (±0/5 درصد) در هر روز
-6	۲۰/۹-۲۴/۴	۲۳/۰-۲۹/۲	۱۹/۹-252	202-۲۸/۹	202-۲۸/۹
24					
-6	۲۳/۲-۲۵/۲	۲۵/۱-۲۹/۸	۲۲/۴-۲۵/۷	۲۲/۱-۲۸/۸	۲۲/۱-۲۸/۸
25					
-6	۲۳/۱-۲۵/۶	۲۳/۸-۳۰/۳	۲۱/۱-۲۶/۲	۲۰/۱-۲۹/۴	۲۰/۱-۲۹/۴
26					
-6	۲۳/۷-۲۷/۷	24/8-32/2	22/1-28/6	21/3-31/7	21/3-31/7
27					
-6	24/7-30/0	27/0-33/9	23/9-31/0	23/7-33/5	23/7-33/5
28					
-6	26/3-30/3	28/3-33/9	24/4-30/6	24/4-32/5	24/4-32/5
29					
-6	25/7-30/2	27/3-33/4	24/0-29/2	23/1-30/7	23/1-30/7
30					
1-7	24/4-28/5	25/4-31/4	23/2-283	22/0-30/7	22/0-30/7

#### ۴- تحلیل عددی

عبداللهی و همکارانش به بررسی شبیه سازی یک دیواره خورشیدی که دارای ماده ی تغییر فاز دهنده می باشد، پرداخته اند. شبیه سازی با حالت های مختلف صورت گرفته است و سعی شده در هر حالت نتایج عددی حاصل با داده های تحلیلی و یا تجربی موجود اعتبار سنجی گردد.

ماده ی تغییر فاز دهنده دارای دمای ذوب ثابت و معینی می باشد (در نتیجه بازه ی خمیری یا بازه ی بین دمای ذوب و انجماد برای آن تعریف نمی شود). به عبارت دیگر ذوب و انجماد ماده ی تغییر فاز دهنده هر دو در یک دما رخ می دهد.

سیس به شبیه سازی سه نوع ماده موجود در جدول (3) پرداخته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در این حالت تنها یک دیواره خورشیدی دارای ماده ی تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است و همچنین فرض بر این است که دمای اولیه دیواره به صورت یکنواخت معادل ۵۰°C بوده است. با توجه به این که بازه ی دمای ذوب هر ماده ی تغییر فاز دهنده در محدوده ی °C

به دست آورد، در حالی که PCM با دمای  $23^{\circ}\text{C}$  در زمستان (دوره گرمایش) موثرتر بود. دوره‌های بازپرداخت کوتاه در سال‌های به دست آمده برای پروفایل‌های 24 ساعته و مسکونی به ترتیب کمتر از 2 و 3 سال و حدود 6 سال برای پروفایل اداری است [67].

می و همکارانش به تحلیل‌های انرژی و اقتصادی کاربرد PCM در ساختمان‌هایی واقع در پنج شهر مختلف (شنیانگ، ژنگزو، چانگشا، کونمینگ و هنگ کنگ) که مناطق مختلف آب و هوایی چین را نشان می‌دهند برای یک سال تمام مورد ارزیابی قرار دادند. از تجزیه و تحلیل صرفه‌جویی در انرژی در تابستان و زمستان، پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی شنیانگ واقع در آب و هوای بسیار سرد، ژنگزو (واقع در منطقه سرد) و چانگشا (واقع در تابستان گرم و زمستان سرد) به بهترین شکل انجام شد. از تجزیه و تحلیل اقتصادی، مشخص شد که صرفه‌جویی در انرژی در طول دوره تابستان برای ساختمان اداری واقع در شهرهای مختلف چین برای بازایی سرمایه کافی نیست. هنگام در نظر گرفتن صرفه‌جویی در انرژی در دوره تابستان و زمستان، مشخص شد که کاربرد PCM در صرفه‌جویی در انرژی در شنیانگ، ژنگزو و چانگشا ارزش اقتصادی بالایی دارد و سرمایه‌گذاری جذاب به نظر می‌رسد. با این حال، با قیمت‌های فعلی، سرمایه‌گذاری PCM در کونمینگ و هنگ کنگ قابل بازایی نیست و مزایای اقتصادی ارائه نمی‌دهد. از آنجایی که دماهای مختلف آسایش داخلی می‌تواند بر مصرف انرژی یک ساختمان تأثیر بگذارد از این رو، تأثیر دماهای تغییر فاز مختلف بر صرفه‌جویی انرژی ساختمان‌ها باید در نظر گرفته شود [68].

یول یون<sup>1</sup> و همکارانش پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی PCM برای ترکیب‌های مختلف از نظر منطقه-ساخت مورد بررسی قرار دادند. این مناطق مطابق با استانداردهای طراحی حفظ انرژی کره به چهار منطقه تقسیم شدند. یک ساختمان آپارتمان مسکونی با توجه به استاندارد نرخ جداسازی حرارتی برای هر منطقه انتخاب شد. در اینجا مواد تغییرفازدهنده آلی پارافینی نسبتاً ارزان با ارزش حرارتی بالا و اثر فوق خنک کننده کم به عنوان یک عنصر تزئینی استفاده شد که این PCM با دمای تغییر فاز  $20-28^{\circ}\text{C}$  انتخاب شد. در نتیجه، تقریباً 300 دلار در سال می‌تواند در کل هزینه‌های آپارتمان مسکونی پس‌انداز شود که حداقل دوره بازپرداخت 6 ساله را نشان می‌دهد، بنابراین ثابت می‌کند که PCM از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است [69].

کنزخانف<sup>2</sup> عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان مسکونی ادغام شده با PCM واقع در منطقه آب و هوایی Dfc که شامل شهرهای آنکورجیج<sup>3</sup>، فورتمک موری<sup>4</sup> و والدور<sup>5</sup> در آمریکای شمالی؛ و آرخانگلسک<sup>6</sup>، براتسک<sup>7</sup>، اولو<sup>8</sup>، سورگوت<sup>9</sup> و اوما<sup>10</sup> در اوراسیا مورد بررسی قرار داد. عملکرد حرارتی از طریق میانگین کاهش نوسان دما و حداکثر کاهش دما ارزیابی شد. بر اساس نتایج حداکثر کاهش دما، در طول فصل تابستان، PCM‌ها با محدوده دمای ذوب بالاتر به طور موثر کار کردند، در حالی که در طول فصل نوسان PCM

با دمای ذوب پایین‌تر عملکرد بهتری را نشان دادند. PCM 21 در طول فصل نوسان و PCM 23 در دوره تابستان عملکرد بهتری داشت. مصرف انرژی سالانه، PCM 23 و PCM 24 بیشترین صرفه‌جویی در انرژی را از  $\text{kW}\cdot\text{h}$  4000 تا  $\text{kW}\cdot\text{h}$  10000 نشان دادند و به عنوان محدوده PCM بهینه برای کل منطقه آب و هوایی Dfc انتخاب شدند. در نهایت، تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که دوره بازپرداخت برای شهرهای منتخب از 16 تا 32 سال متغیر است، در حالی که تجزیه و تحلیل زیست محیطی نشان داد که استفاده از PCM می‌تواند تا  $4817/44$  کیلوگرم در سال انتشار  $\text{CO}_2$  را کاهش دهد [70].

#### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش کاربرد این مواد در قسمت‌های مختلف ساختمان، مقایسه شرایط و مواد مختلف، ارزیابی مدیریت انرژی در فصول مختلف و... مورد بررسی قرار گرفته است که می‌تواند در مدیریت انرژی در ساختمان موثر واقع گردد. سطح تابش خورشیدی بر میزان ذخیره گرما، میزان بهینه‌سازی انرژی و دمای هوای ورودی بیشترین تأثیر را دارد. دمای ذوب مواد تغییرفازدهنده نقش مهمی در عملکرد حرارتی دارد که در طول ماه‌های تابستان مواد تغییرفازدهنده با دمای ذوب بالاتر عملکرد بهتری دارند. از معایب مواد تغییرفازدهنده این است که در یکی از موارد سرمایه‌گذاری و یا گرمایش کاربرد موثرتری دارند تا نسبت به اجرای هم زمان دو مکانیسم سرمایه‌گذاری و گرمایش، از این رو دانشمندان به طور جدی پیگیر رفع آن هستند. با توجه به آنالیز شکل‌ها در تمامی مصالح ادغام شده با مواد تغییر فازدهنده در ساختمان، مواد تغییرفازدهنده نسبتاً داغ توسط هوای سرد بیرون در حالت انتقال حرارت خنک می‌شود و در حالت پیش خنک کننده تهویه، که بیشتر در طول روز است، هوای گرم بیرون از طریق مواد تغییرفازدهنده سرد تهویه می‌شوند. از این رو استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساختمان باعث کاهش هدایت حرارتی می‌شود که آسایش حرارتی فضای داخلی را تضمین می‌کند. با وجود اینکه ارزیابی اقتصادی مواد تغییرفازدهنده، در برخی موارد مقرون به صرفه بودن این مواد را نشان می‌دهد، اما مواردی نیز وجود دارد که در آن استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مزایای اقتصادی ارائه نمی‌دهد. با بررسی مطالعه مواد تغییرفازدهنده در قسمت‌های مختلف ساختمان نشان داده شد که در بخش دیواره مواد نانوذره  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و در بخش پنجره برای شیشه پنجره از HSNPs استفاده شده که عملکرد بهتری داشته است. استفاده از  $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$  در قسمت لوله و از موم پارافین در قسمت کف نتیجه مطلوبی داشته است.

#### ۷- مراجع

- [1] M. Salihi, M. El Fiti, Y. Harmen, Y. Chhiti, A. Chebak, F. E. M. h. Alaoui, M. Achak, F. Bentiss, C. Jama, Evaluation of global energy performance of building walls integrating PCM: Numerical study in semi-arid climate in Morocco, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 16, pp. e00979, 2022.
- [2] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, Experimental study of PCM-enhanced building envelope towards energy-saving and decarbonisation in

6. Arkhangelsk  
7. Bratsk  
8. Oulu  
9. Surgut  
10. Umea

1. Yeol Yun  
2. Kenzhekhanov  
3. Anchorage  
4. Fort McMurray  
5. Val-d'Or

- controlled field data, in *Proceedings of building simulation*, 2011, pp. 800-807.
- [22] K. W. Childs and T. K. Stovall, Use of phase change material in a building wall assembly: a case study of technical potential in two climates, 2012.
- [23] S. N. Al-Saadi and Z. J. Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 659-673, 2013.
- [24] F. Kuznik and J. Virgone, Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No. 5, pp. 561-570, 2009.
- [25] W. He, C. Yu, J. Yang, B. Yu, Z. Hu, D. Shen, X. Liu, M. Qin, H. Chen, Experimental study on the performance of a novel RC-PCM-wall, *Energy and Buildings*, Vol. 199, pp. 297-310, 2019.
- [26] A. Kasaeian, F. Pourfayaz, E. Khodabandeh, and W.-M. Yan, Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review, *Energy and Buildings*, Vol. 154, pp. 96-112, 2017.
- [27] X. Zhang, R. Wen, C. Tang, B. Wu, Z. Huang, X. Min, Y. Huang, Y. Liu, M. Fang, X. Wu, Thermal conductivity enhancement of polyethylene glycol/expanded perlite with carbon layer for heat storage application, *Energy and Buildings*, Vol. 130, pp. 113-121, 2016.
- [28] P. Arce, C. Castellón, A. Castell, and L. F. Cabeza, Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings, *Energy and Buildings*, Vol. 44, pp. 88-93, 2012.
- [29] X. Kong, S. Lu, J. Huang, Z. Cai, and S. Wei, Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage, *Energy and buildings*, Vol. 62, pp. 597-604, 2013.
- [30] Q. Xing, X. Hao, Y. Lin, H. Tan, and K. Yang, Experimental investigation on the thermal performance of a vertical greening system with green roof in wet and cold climates during winter, *Energy and Buildings*, Vol. 183, pp. 105-117, 2019.
- [31] W. He, C. Yu, J. Yang, B. Yu, Z. Hu, D. Shen, X. Liu, M. Qin, H. Chen, Experimental study on the performance of a novel RC-PCM-wall, *Energy and Buildings*, Vol. 199, pp. 297-310, 2019.
- [32] M. Hu, G. Pei, Q. Wang, J. Li, Y. Wang, and J. Ji, Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system, *Applied energy*, Vol. 179, pp. 899-908, 2016.
- [33] R. Barzin, J. J. Chen, B. R. Young, and M. Farid, Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling, in *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials*, ed: CRC Press, 2021, pp. 259-276.
- [34] F. Fiorito, Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement, *Energy Procedia*, Vol. 30, pp. 1110-1119, 2012.
- [35] F. Ye, Z. Ge, Y. Ding, and J. Yang, Multi-walled carbon nanotubes added to Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/MgO composites for thermal energy storage, *Particuology*, Vol. 15, pp. 56-60, 2014.
- [36] M. Izadi, S. F. Taghavi, S. H. N. Safavi, F. Afsharpanah, and W. Ya'ici, Thermal management of shelter building walls by PCM macro-encapsulation in commercial hollow bricks, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 47, p. 103081, 2023.
- [37] S. Li, Y. Zhou, K. Zhong, X. Zhang, and X. Jin, Thermal analysis of PCM-filled glass windows in hot summer and cold winter area, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 11, No. 2, pp. 275-282, 2016.
- [38] K. A. Ismail, C. T. Salinas, and J. R. Henriquez, Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 5, pp. 710-719, 2008.
- [39] D. Li, C. Zhang, Q. Li, C. Liu, M. Arıcı, and Y. Wu, Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 165, p. 114547, 2020.
- [40] K. Aliakbari, A. Ebrahimi-Moghadam, and P. Ildarabadi, Investigating the impact of a novel transparent nano-insulation in building windows on thermal comfort conditions and energy a severe hot climate, *Energy and Buildings*, Vol. 279, p. 112680, 2023.
- [3] B. Alshuraiaan, Efficient utilization of PCM in building envelope in a hot environment condition, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 16, pp. 100205, 2022.
- [4] A. Haghighi, A. Babapoor, M. Azizi, Z. Javanshir, and H. Ghasemzade, Optimization of the thermal performance of PCM nanocomposites, *Journal of Energy Management and Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 14-19, 2020.
- [5] P. K. S. Rathore and S. K. Shukla, Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, Vol. 225, pp. 723-744, 2019.
- [6] C. K. Oluah, E. T. Akinlabi, and H. O. Njoku, CFD study on the thermal performance of n-Octadecane (PCM) doped with graphene nanoparticles as a potential thermal energy storage medium for trombe walls, in *Advances in Manufacturing Engineering: Selected articles from ICMPE 2019*, pp. 539-553, 2020.
- [7] A. Babapoor, M. AhmadiMezjin, A. Hoseinasadi, S. Jokar, M. Paar, and S. Golestaneh, Simulation and Optimization of Thermal Management in L-Shaped Tubes Coated with Phase Change Material Nanofibers, *Iranian Chemical Engineering Journal*, Vol. 18, No. 107, pp. 15-27, 2020.
- [8] C. V. Podara, I. A. Kartsonakis, and C. A. Charitidis, Towards phase change materials for thermal energy storage: classification, improvements and applications in the building sector, *applied sciences*, Vol. 11, No. 4, p. 1490, 2021.
- [9] D. Lencer, M. Salinga, B. Grabowski, T. Hickel, J. Neugebauer, and M. Wuttig, A map for phase-change materials, *Nature materials*, Vol. 7, No. 12, pp. 972-977, 2008.
- [10] M. Saffari, A. De Gracia, C. Fernández, and L. F. Cabeza, "Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings," *Applied Energy*, Vol. 202, pp. 420-434, 2017.
- [11] X. Jin, S. Zhang, X. Xu, and X. Zhang, Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls, *Building and Environment*, Vol. 81, pp. 334-339, 2014.
- [12] A. Babapoor, Z. Dehghan Khaje Bolagh, M. Ganjkhani, and M. Paar, "An Insight into the Energy Optimization in New Generation Clothes Using Phase Change Materials," *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 70-77, 2021. (in Persian)
- [13] F. Nahidi Azar, S. Karimi, Examining the achievements of nanocomposite in the construction industry, in *International Conference on Modern Research in Civil Engineering, Architectural & Urban development*,: Berlin, 2016.
- [14] M. Sen, Nanocomposite materials, *Nanotechnology and the Environment*, pp. 1-12, 2020.
- [15] V. Butala and U. Stritih, Experimental investigation of PCM cold storage, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No. 3, pp. 354-359, 2009.
- [16] E. M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 351-357, 2008.
- [17] D. Zhou, C.-Y. Zhao, and Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied energy*, Vol. 92, pp. 593-605, 2012.
- [18] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, and J. Cheng, Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 8, pp. 2666-2672, 2010.
- [19] D. Hawes and D. Feldman, Absorption of phase change materials in concrete, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 27, No. 2, pp. 91-101, 1992.
- [20] L. F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and buildings*, Vol. 39, No. 2, pp. 113-119, 2007.
- [21] S. Shrestha, W. Miller, T. Stovall, A. Desjarlais, K. Childs, W. Porter, M. Bhandari, S. Coley, Modeling PCM-enhanced insulation system and benchmarking EnergyPlus against

- [58] F. Simon, L. Ruiz-Valero, A. Girard, and H. Galleguillos, Experimental and Numerical Analysis of a PCM-Integrated Roof for Higher Thermal Performance of Buildings, *Journal of Thermal Science*, Vol. 33, No. 2, pp. 522-536, 2024.
- [59] M. Izadi, S. F. Taghavi, S. H. N. Safavi, F. Afsharpanah, and W. Yaïci, Thermal management of shelter building walls by PCM macro-encapsulation in commercial hollow bricks, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 47, p. 103081, 2023.
- [60] A. Jayalath, L. Aye, P. Mendis, and T. Ngo, Effects of phase change material roof for year round thermal management of a residential building in Melbourne and Sydney, *Energy and Buildings*, Vol. 121, pp. 152-158, 2016.
- [61] A. Pasupathy and R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 193-203, 2008.
- [62] E. Meng, J. Wang, H. Yu, R. Cai, Y. Chen, and B. Zhou, Experimental study of the thermal protection performance of the high reflectivity-phase change material (PCM) roof in summer, *Building and Environment*, Vol. 164, p. 106381, 2019.
- [63] F. Simon, L. Ruiz-Valero, A. Girard, and H. Galleguillos, Experimental and Numerical Analysis of a PCM-Integrated Roof for Higher Thermal Performance of Buildings, *Journal of Thermal Science*, Vol. 33, No. 2, pp. 522-536, 2024.
- [64] M. Abdelahi, Sh. M. Rahimi, Sh. Mirhakimi. Numerical modeling of solar wall using phase change materials. *4 international conference 1395,06,16*. (in persian)
- [65] K. Nagano, T. Mochida, S. Takeda, R. Domański, and M. Rebow, Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems, *Applied thermal engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 229-241, 2003.
- [66] I. O. Salyer and A. Sircar, Development of PCM wallboard for heating and cooling of residential buildings, *USDOE Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy*, Washington ... 1989.
- [67] M. Saffari, A. De Gracia, S. Ushak, and L. F. Cabeza, Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model, *Energy and Buildings*, Vol. 112, pp. 159-172, 2016.
- [68] X. Mi, R. Liu, H. Cui, S. A. Memon, F. Xing, and Y. Lo, Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China, *Applied Energy*, Vol. 175, pp. 324-336, 2016.
- [69] B. Y. Yun, J. H. Park, S. Yang, S. Wi, and S. Kim, Integrated analysis of the energy and economic efficiency of PCM as an indoor decoration element: Application to an apartment building, *Solar Energy*, Vol. 196, pp. 437-447, 2020.
- [70] S. Kenzhekhanov, S. A. Memon, and I. Adilkhanova, Quantitative evaluation of thermal performance and energy saving potential of the building integrated with PCM in a subarctic climate, *Energy*, Vol. 192, p. 116607, 2020.
- consumptions in different climates of Iran, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 25, p. 101009, 2021.
- [41] A. Heydari, S. E. Sadati, and M. R. Gharib, Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis, *Journal of Building Engineering*, Vol. 35, p. 102099, 2021.
- [42] B. Durakovic and M. Torlak, Experimental and numerical study of a PCM window model as a thermal energy storage unit, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 12, No. 3, pp. 272-280, 2017.
- [43] D. Li, Y. Wu, C. Liu, G. Zhang, and M. Arıcı, Energy investigation of glazed windows containing Nano-PCM in different seasons, *Energy conversion and management*, Vol. 172, pp. 119-128, 2018.
- [44] Y. Hu, P. K. Heiselberg, and R. Guo, Ventilation cooling/heating performance of a PCM enhanced ventilated window—an experimental study, *Energy and Buildings*, Vol. 214, p. 109903, 2020.
- [45] Y. Hu and P. K. Heiselberg, A new ventilated window with PCM heat exchanger—Performance analysis and design optimization, *Energy and Buildings*, Vol. 169, pp. 185-194, 2018.
- [46] Y. Sun, R. Liang, Y. Wu, R. Wilson, and P. Rutherford, Glazing systems with Parallel Slats Transparent Insulation Material (PS-TIM): Evaluation of building energy and daylight performance, *Energy and buildings*, Vol. 159, pp. 213-227, 2018.
- [47] M. Tükel, K. Mumcuoğlu, M. Arıcı, and H. Karabay, Analysis of fluid flow and heat transfer characteristics in multiple glazing roofs with a special emphasis on the thermal performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 148, pp. 694-703, 2019.
- [48] S. Kumar, S. Arun Prakash, V. Pandiyarajan, N. Geetha, V. Antony Aroul Raj, and R. Velraj, Effect of phase change material integration in clay hollow brick composite in building envelope for thermal management of energy efficient buildings, *Journal of Building physics*, Vol. 43, No. 4, pp. 351-364, 2020.
- [49] Y. Gao and X. Meng, A comprehensive review of integrating phase change materials in building bricks: Methods, performance and applications, *Journal of Energy storage*, Vol. 62, p. 106913, 2023.
- [50] Y. M'hamdi, K. Baba, and M. Tajayouti, Analysis of Energy Efficiency Potential of Hollow Brick Building Envelope Filled with PCM, *Journal of Sustainability Research*, Vol. 5, No. 3, 2023.
- [51] C. Moulahi, A. Trigui, M. Karkri, and C. Boudaya, Thermal performance of latent heat storage: Phase change material melting in horizontal tube applied to lightweight building envelopes, *Composite Structures*, Vol. 149, pp. 69-78, 2016.
- [52] A. Trigui, M. Karkri, C. Boudaya, Y. Candau, and L. Ibos, Development and characterization of composite phase change material: thermal conductivity and latent heat thermal energy storage, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 49, pp. 22-35, 2013.
- [53] M. L. P. Gomes, E. A. Carvalho, L. N. Sobrinho, S. N. Monteiro, R. J. Rodriguez, and C. M. F. Vieira, Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix, *Journal of materials research and technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 492-498, 2018.
- [54] M. Ahangari and M. Maerefat, An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 44, pp. 120-129, 2019.
- [55] Y. U. Kim, J. H. Park, B. Y. Yun, S. Yang, S. Wi, and S. Kim, Mechanical and thermal properties of artificial stone finishing materials mixed with PCM impregnated lightweight aggregate and carbon material, *Construction and Building Materials*, Vol. 272, p. 121882, 2021.
- [56] Y. Gao and X. Meng, A comprehensive review of integrating phase change materials in building bricks: Methods, performance and applications, *Journal of Energy storage*, Vol. 62, p. 106913, 2023.
- [57] Y. M'hamdi, K. Baba, and M. Tajayouti, Analysis of Energy Efficiency Potential of Hollow Brick Building Envelope Filled with PCM, *Journal of Sustainability Research*, Vol. 5, No. 3, 2023.