سال دوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۴، ص ص ۴۵- ۵۴
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۸

استفاده از مواد تغییرفازدهنده به منظور کاهش بار حرارتی و برودتی ساختمان

محمد ناصریان[۱*]، امیر ودیعی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز
*شیراز، ۳۸۳۷۳-۷۱۸۳۹، mohammadnaserian۲۰@gmail.com

چکیده

صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها با توجه به این نکته که بیش از ۴۰ درصد از انرژی اولیه در هر کشور به این بخش اختصاص یافته، از کلیدی‌ترین مسایل پیش رو در زمینه توسعه پایدار انرژی به‌حساب می‌آید. در این خصوص بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی از موثرترین راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان به‌شمار می‌رود. در این مقاله به معرفی مواد تغییرفازدهنده و کاربرد آن در ساختمان به منظور ذخیره‌سازی و مصرف بهینه انرژی پرداخته شده‌است. وجود طیف گسترده‌ی دمای ذوب مواد تغییرفازدهنده (بین ۱۰۰°C− تا بالاتر از ۸۰۰°C)، تمایل به استفاده از این مواد در کاربردهای مختلف را بسیار وسیع کرده است. استفاده از مواد تغییرفازدهنده به عنوان یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی به دلیل ایجاد تاخیر زمانی در انتقال حرارت از منبع حرارتی/برودتی به ساختمان، می‌تواند منجر به کاهش نیاز بار حرارتی/برودتی ساختمان گردد. می‌توان مواد تغییرفازدهنده را معمولا به صورت میکروکپسول‌ها و یا پانل، در فواصل بین جداره‌ها و یا بین شیشه‌های دوجداره به کار برد. بر اساس نتایج بدست‌آمده، استفاده از این مواد به شکل پانل در کاربرد ساختمانی مقرون به صرفه تر از میکروکپسول‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیقات صورت گرفته، با انتخاب مناسب ماده تغییر فاز دهنده و بر اساس پیکره‌بندی سیستم انرژی، می‌توان تا ۳۰ درصد در انرژی مصرفی ساختمان صرفه‌جویی کرد.

کلید واژگان: ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مواد تغییرفازدهنده، بارحرارتی و برودتی ساختمان، بهره‌وری پایدار انرژی

Application of phase change material in building’s heating and cooling load reduction

Mohammad Naserian[۱], Amir Vadiee[۲]

۱-School of Mechanical And Aerospace Engineering, Shiraz University Of Technology, Shiraz, Iran
۲- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University Of Technology, Shiraz, Iran
۳- P.O.B. ۷۱۸۳۹-۳۸۳۷۳ Shiraz, Iran, mohammadnaserian۲۰@gmail.com
Received: ۱۲ January ۲۰۱۶ Accepted: ۷ February ۲۰۱۶

Abstract

Energy saving in building is one of the key issues in the sustainable energy development since in terms of primary energy consumption, buildings represent for more than ٤٠٪ in most countries. Energy storage system is considered as an effective energy utilization method for buildings. In this paper, the phase change materials (PCMs) and their application in buildings have been introduced as a promising latent heat thermal energy storage method. The extensive melting temperature range in PCMs (from -۱۰۰°C to ۸۰۰°C and more) causes a strong inclination toward utilizing it for various applications. Using PCMs as a thermal energy storage system reduce the thermal energy demand of the building due to the time shifting in heat transfer phenomena from the heating and cooling energy source to the building. The PCMs can be usually used in form of microcapsule or flexible and rigid panels through the building envelope or double glazing windows. Based on the obtained results, the flexible and rigid panels are more cost effective than microcapsule PCMs. by selecting a proper PCM based on the corresponding thermal energy storage configuration, up to ۳۰% energy saving can be achieved on the thermal energy utilization in the building.

Keywords: thermal energy storage, phase change materials, building heating and cooling loads, sustainable energy utilization

۱-مقدمه

مواد تغییرفازدهنده[۱] دارای قابلیت تغییر فاز و عمدتاً به صورت تغییر فاز از جامد به مایع و بلعکس در یک دامنه دمایی تقریبا ثابت هستند. این مواد به هنگام تغییر فاز، گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. مواد تغییرفازدهنده در صورت استفاده در ساختمان، از طریق چرخه‌های متوالی ذوب و انجماد در تغییرات شدید دمای هوا (مثلا بین شب و روز)، مقادیر زیادی گرما را با محیط تبادل نموده و از این طریق دمای هوای متعادل‌تری را برای فضای داخل ساختمان تامین می‌نمایند. با توجه به ویژگی‌های عنوان شده، این مواد به یکی از ظرفیت‌های خاص ذخیره انرژی در مصارف گوناگون از جمله ساختمان‌ها تبدیل شده‌اند [۱-۲].

مواد تغییرفازدهنده در صنایع گوناگون شامل مخابرات، حمل ونقل، خودروها، ماهواره‌ها، پزشکی، نساجی، گلخانه‌ها و دیگر موارد به کار می‌روند. اولین گزارشها مبنی بر کاربرد این مواد در ساختمان در سال ۱۹۴۰ مطرح شد[۳-۴]. سپس استفاده از این مواد در ساختمان از دهه ۱۹۸۰ به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و امروزه استفاده از آنها در صنعت ساختمان از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است. این مواد را می‌توان در ساختمان و در اجزایی مجزا برای کاربردهای گرمایش و سرمایش از جمله کرکره دیوار رو به خورشید، تخته گچ، سیستم‌های گرمایش از کف و تخته‌های سقفی و یا دیوار ترومب به کار برد.

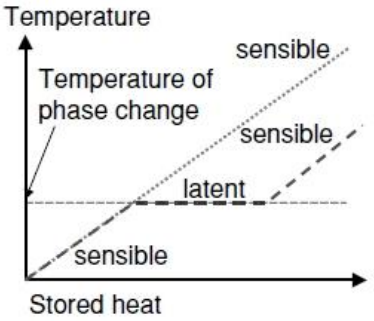
طبق نتایج حاصل از یک مطالعه، استفاده از ماده تغییرفازدهنده منجر به افزایش دمای اتاق و ذخیره‌سازی حدود ۱۹ درصد انرژی می‌گردد. همچنین بکارگیری این ماده به سبب کاهش اندازه نوسانات دمای هوای داخل و باقی ماندن دمای هوای اتاق برای مدت زمان طولانی‌تر نزدیک به دمای مطلوب اتاق، باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی نیز می‌شود[۵]. در این مقاله به بررسی عملکرد این مواد در سیستم های حرارتی و برودتی در ساختمان پرداخته شده است.

بدین منظور در ابتدا نحوه کارکرد انواع مواد تغییرفازدهنده و معایب و مزایای این مواد به اختصار تشریح گردیده است.

۲-مواد تغییرفازدهنده و ویژگی‌های آن

ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده همانطور که از اسم آن بر می‌آید بر اساس ظرفیت حرارتی گرمای نهان آن بوده و در طی فرآیند ذخیره‌سازی انرژی، تغییرات دما در این مواد بسیار کم و در برخی موارد بدون تغییر می‌باشد. در این روش دمای مواد تغییرفازدهنده با افزایش دمای محیط پیرامون خود و البته در صورت مطابقت این بازه دمایی با دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده، بدون تغییر باقی خواهد ماند و انرژی دریافتی به صورت گرمای نهان در ماده ذخیره شده که باعث تغییر فاز ماده (بطور مثال از جامد به مایع) می‌شود[۶].

چگونگی عملکرد ذخیره‌سازی حرارت در مواد تغییرفازدهنده در شکل۱ آورده شده است.



شکل ۱ چگونگی عملکرد ذخیره‌سازی حرارت در مواد تغییرفازدهنده[۷]

مقدار انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود[۷]:

$$Q = m \cdot \Delta H \qquad (۱)$$

که در آن Q مقدار گرمای ذخیره شده در مواد بر حسب (J) است، m جرم مواد ذخیره‌سازی بر حسب (Kg) است، و ΔH آنتالپی تغییر فاز بر حسب $(\frac{J}{Kg})$ است.

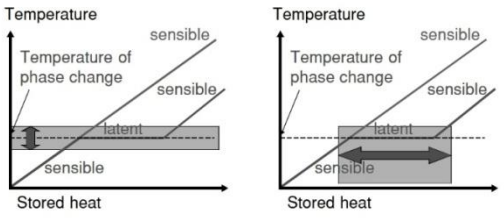
از اصلی‌ترین مزیت‌های استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی می‌توان به تثبیت دما و همچنین چگالی ذخیره‌سازی انرژی بالا نسبت به روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گرمای محسوس اشاره کرد[۷].

۱-تثبیت دما

همانطور که در شکل۲- چپ دیده می‌شود، گرما بدون تغییر دمای قابل توجهی می‌تواند از منبع ذخیره‌سازی گرمای نهان استخراج شود. بنابراین مواد تغییرفازدهنده می‌تواند در مصارفی که به دمای ثابت نیاز است (به عنوان مثال برای هوای مطلوب مورد نیاز درون یک ساختمان) مورد استفاده واقع شود[۷].

۲-ذخیره سازی گرما یا سرما با چگالی ذخیره سازی بالا

همانطور که در شکل۲-راست دیده می‌شود، مواد تغییر فاز دهنده معمولا قادر هستند که مقدار زیادی از گرما و یا سرما را در یک تغییر بازه دمایی کوچک ذخیره کنند یا به عبارت دیگر چگالی ذخیره‌سازی بالایی دارند که می‌توان از آنها برای مثال در گرمایش و یا سرمایش ساختمان استفاده کرد[۷].



شکل ۲ ثبات درجه حرارت (سمت چپ) و ذخیره‌سازی گرما یا سرما با چگالی بالا در تغییر دما کوچک (سمت راست) [۷].

۲-۱-دسته بندی مواد تغییرفازدهنده

۱) Phase Change Material (PCM)

بطور کلی در هر بازه دمایی می‌توان تعداد زیادی از مواد تغییرفازدهنده جهت کاربرد مورد نظر با توجه به خواص مورد نیاز پیدا نمود. این مواد به سه گروه آلی، معدنی و آلیاژی تقسیم می‌شوند که هر گروه دارای معایب و مزایایی می باشند. از آنجا که با وجود تلاشهای فراوان برای بهبود خواص هر گروه، هنوز هم محدودیت‌هایی در خواص هر کدام وجود دارند، بایستی تلاش شود که مناسب‌ترین انتخاب در هر کاربرد صورت گیرد[۸].

۲-۱-۱-مواد تغییرفازدهنده آلی

به دو دسته پارافین‌ها و غیر پارافین‌ها تقسیم می‌شوند. از مهمترین مزایای استفاده از پارافین‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می توان به موارد زیر اشاره کرد[۸]:

گرمای نهان ذوب بالا، تغییر حجم کوچک هنگام ذوب، فشار بخار پایین در حالت مذاب، غیر خورنده و نسبتا ارزان.

معایب این گروه از مواد عبارتند از:

هدایت حرارتی پایین، عدم سازگاری با مخزن پلاستیکی، نسبتاً قابل اشتعال.

اما غیر پارافین‌های آلی که بیشتر به اسیدهای چرب شناخته می‌شوند، فراوان ترین مواد تغییرفازدهنده با خواص بسیار متغیر هستند. بر خلاف پارافین‌ها که دارای تشابه خواص هستند، هر کدام از این مواد دارای ویژگی‌های منحصر به خود می‌باشد. از جمله:

گرمای نهان ذوب بالا، قابلیت اشتعال، هدایت گرمایی پایین، نقطه اشتعال پایین، سطح سمی بودن متغیر، عدم تعادل در دماهای بالا.

مشکل اصلی این مواد هزینه آنهاست که دو تا دو و نیم برابر پارافین‌های تجاری است. ضمنا این اسیدها دارای خورندگی نسبی هستند.

۲-۱-۲- مواد تغییرفازدهنده معدنی

مواد معدنی تحت دو گروه نمک‌های هیدرات و فلزیها دسته‌بندی می‌شوند[۸]. جذاب ترین خواص نمک‌های‌هیدرات عبارتند از:

گرمای نهان ذوب در واحد حجم بالا، هدایت گرمایی نسبتاً بالا (تقریباً دو برابر پارافین‌ها)، تغییر حجم کم در هنگام ذوب.

این نمک‌ها چندان خورنده نیستند و با پلاستیک سازگارند، تنها اندکی سمی هستند . بسیاری از نمک‌های هیدرات به اندازه کافی برای استفاده در ذخیره‌سازی ارزان هستند. عمده‌ترین مشکلات نمک‌های هیدرات ذوب غیریکنواخت، مادون سرد شدن، مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان کاهش خودبخود تعداد مولهای آب نمکهای هیدرات در طول فرایند تخلیه می‌باشند.

مواد تغییرفازدهنده فلزی شامل فلزات و آلیاژهای فلزی با نقطه ذوب پایین هستند. این گروه از مواد فلزی به خاطر سنگین بودن، هنوز بطور جدی به‌عنوان مواد تغییرفازدهنده به حساب نمی‌آیند. اگرچه هنگامی که حجم مطرح است این مواد به سبب دارا بودن گرمای نهان در واحد حجم بالا مناسب هستند.

از جمله خواص مواد تغییرفازدهنده فلزی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

گرمای ذوب در واحد وزن پایین، گرمای ذوب در واحد حجم بالا، هدایت گرمایی بالا، گرمای ویژه پایین، فشار بخار نسبتاً پایین. بکارگیری مواد فلزی شامل یکسری مشکلات غیر معمول مهندسی است.

۲-۱-۳ مواد تغییرفازدهنده آلیاژی

یک آلیاژ ترکیب دو یا چند جزء با حداقل تفاوت در نقطه ذوب است که هر کدام بطور یکپارچه ذوب و منجمد می‌شود و تشکیل مخلوطی از کریستال‌های جزئی در طول کریستاله شدن می‌دهد[۸].

از آنجا که آلیاژها به صورت یک مخلوطی از کریستال‌های بسیار نزدیک به هم منجمد می‌شوند، تقریباً همیشه ذوب و انجماد آنها بدون جدایش صورت می‌گیرد. به‌عبارتی در هنگام انجماد یا ذوب، هر دو جزء هم زمان جامد یا مایع می‌شوند. مواد آلیاژی دارای چگالی ذخیره‌سازی حجمی بالاتر از ترکیبات آلی هستند.

۲-۲- الزامات فیزیکی، فنی و اقتصادی مواد تغییرفازدهنده

دمای تغییرفاز مناسب و همچنین داشتن آنتالپی ذوب بزرگ از جمله خواص مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده در سیستم ذخیره‌سازی می‌باشد. این دو خاصیت تنها بخشی از ویژگی‌های مواد تغییرفازدهنده می‌باشد. سایر الزامات به شرح زیر است[۷]:

الزامات فیزیکی که شامل موارد زیر می‌باشد:

- دمای تغییرفاز مناسب برای حصول اطمینان از ذخیره‌سازی و استخراج گرما در کاربردهایی که نیاز به یک محدوده دمایی ثابت دارند.
- آنتالپی تغییرفاز بزرگ برای داشتن ظرفیت گرمایی بزرگ در مقایسه با ذخیره‌سازی گرمای محسوس.
- هدایت گرمایی بزرگ که قادر به استخراج گرما یا سرما ذخیره شده با شار حرارتی به اندازه کافی بزرگ باشد.
- تغییر فاز مجدد برای استفاده متعدد از موادتغییرفاز. (معمولا به آن پایداری سیکل گفته می‌شود)

الزامات فنی شامل موارد زیر می‌باشد:

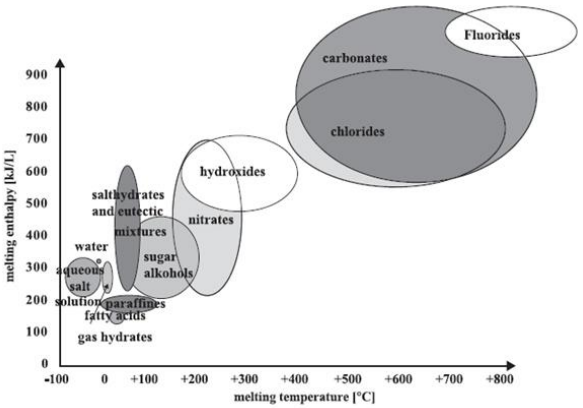
- فشار بخار کم، به منظور کاهش نیاز به پایداری مکانیکی مخزن شامل مواد تغییرفازدهنده
- تغییر حجم کوچک، به منظور کاهش نیاز به پایداری مکانیکی مخزن شامل مواد تغییر فاز دهنده
- پایداری فیزیکی و شیمیایی، برای اطمینان از طول عمر زیاد مواد تغییرفازدهنده

الزامات اقتصادی شامل موارد زیر می‌باشد:

- هزینه کم، قابل رقابت از لحاظ هزینه با سایر منابع ذخیره‌سازی انرژی حرارتی
- غیر سمی بودن، به دلایل ایمنی و زیست محیطی

- قابلیت بازیافت، به دلایل زیست محیطی و اقتصادی

آنتالپی ذوب برخی مواد تغییرفازدهنده بر حسب دمای ذوب آنها مطابق شکل۳ می‌باشد[۱۱].



شکل۳ آنتالپی ذوب برخی مواد بر حسب دمای ذوب آنها[۱۱]

۳-کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان

تحقیق و پژوهش در مورد استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختمان‌ها در سال‌های اخیر در سه زمینه متمرکز شده است[۱۱].

ثابت نگه داشتن دمای ساختمان با افزایش بار جرم حرارتی آنها ازاصلی‌ترین کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان‌هاست. در این کاربرد، مواد تغییرفازدهنده به جنس و مواد اولیه ساختمان‌ها افزوده می‌شود. به عنوان مثال، مواد تغییرفازدهنده را می‌توان به مواد تشکیل دهنده دیواره‌های مورد نظر در ساختمان اضافه کرد [۱۱].

ذخیره‌سازی انرژی برودتی به کمک مواد تغییرفازدهنده با استفاده از سرما در هنگام شب و یا سایر منابع برودتی ارزان قیمت و بهره‌گیری از آن در طول روز از دیگر کاربردهای این مواد در تامین نیاز بار حرارتی و برودتی ساختمانها به شمار می‌آید[۱۱].

کاربرد دیگر مواد تغییر فازدهنده در ساختمان‌ها، بکارگیری این مواد در سیستم‌های تولید حرارت، بطور مثال سیستم‌های گرمایش از کف، به منظور افزایش بازده و بهره‌وری بهتر از این سیستم‌ها می‌باشد[۱۱].

درکل، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساختمان می‌تواند با دو هدف متفاوت صورت بگیرد[۹]:

- استفاده از منابع طبیعی و رایگان حرارتی و برودتی همچون انرژی خورشیدی به منظور استفاده در سیستمهای گرمایشی و یا استفاده ازهوای سرد در هنگام شب به منظور تامین نیاز سرمایشی ساختمان.
- استفاده از منابع حرارتی و برودتی سایر سیستمهای انرژی همانند انرژی حرارتی موجود در گازهای خروجی از یک سیستم مولد نیرو و حرارت و یا استفاده از سیال سرد برگشتی از یک چرخه برودتی.

اساساً سه روش متداول برای استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای گرمایش و سرمایش ساختمان عبارتند از[۹]:

۱. مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای ساختمان،
۲. مواد تغییرفازدهنده در دیگر اجزای ساختمان بجز دیوارها
۳. مواد تغییرفازدهنده در واحدها و منابع ذخیره سازی گرما و سرما مثل سایه‌بان‌ها

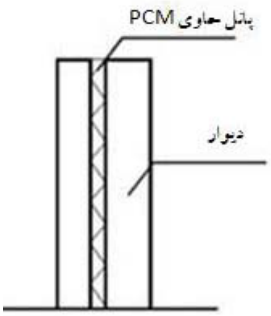
با توجه به اینکه مواد تغییرفازدهنده در طول دوره کاربرد خود در دو فاز مایع و جامد وجود دارند، لذا این مواد بایستی درون محفظه‌هایی قرار گرفته و مورد استفاده قرار گیرند تا از جاری شدن و هدررفت آنها در فاز مایع جلوگیری شود. مواد تغییرفازدهنده تجاری موجود برای استفاده در ساختمان در سه حالت میکروکپسول‌های حاوی این مواد، پاکتهای پلاستیکی و همچنین پانلهای سخت ساخته شده از پلی اتیلن با دانسیته بالا وجود دارند. (شکل ۴)

شکل۴ انواع مختلف مواد تغییرفازدهنده موجود در بازار

با توجه به قابلیت جاری شدن مواد تغییرفازدهنده در فاز مایع، نیاز به محفظه‌های خواهد بود که در فاز مایع به عنوان ظرف حاوی این مواد عمل نماید، لذا معمولاً به صورت بسته‌های حاوی این مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به صورت میکروکپسول‌هایی هستند که در واقع کره‌های بسیار ریزی با قطر بین ۱ تا ۳۰ میکرومتر می‌باشند[۷-۱۰]. جنس میکروکپسول‌ها جهت استفاده در مواد ساختمانی باید به گونهای انتخاب شود که در مقابل نیروهای مکانیکی، گرما و بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم باشد. با توجه به اندازه بسیار ریز میکروکپسول‌ها، می‌توان این مواد را در انواع مواد ساختمانی دارای خلل و فرج در حین تولید ملات و به عنوان مواد افزودنی استفاده نمود. از جمله موارد کاربرد به این صورت، می‌توان به استفاده در بتن دیوارها و سقف و یا تخته های گچ حاوی این مواد اشاره نمود. از مزایای این روش، سهولت استفاده و از جمله معایب آن هزینه بالای تولید میکروکپسول‌هاست[۷-۱۰].

با توجه به هزینه بالای تولید میکروکپسول‌ها و با هدف کم کردن هزینه اولیه، می‌توان مواد تغییرفازدهنده را به صورت پاکت‌های با ابعاد بزرگتر به کار برد. در صورت استفاده از این مواد به صورت پاکتی و یا غیرمیکروکپسول، امکان استفاده از آنها در فضاهای کوچک همچون خلل و فرج مصالح از بین رفته و لذا به فضاهای بزرگتری برای جادادن این مواد نیاز خواهیم داشت. از جمله موارد کاربرد این روش، می‌توان به

پانل‌های مهارشده با فرم‌های فلزی بین جداره‌ها اشاره نمود[۷-۱۰]. (شکل ۵ و ۶)



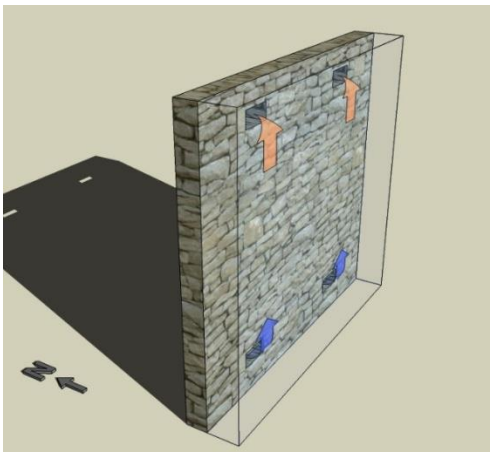
شکل ۵ قرارگیری پاکتهای حاوی ماده تغییرفازدهنده در فواصل جداره‌ها

شکل ۶ رولهای انعطاف‌پذیر حاوی ماده تغییرفازدهنده و پانلهای سخت قابل نصب حاوی ماده تغییرفازدهنده

۳-۱- استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوار ترومب

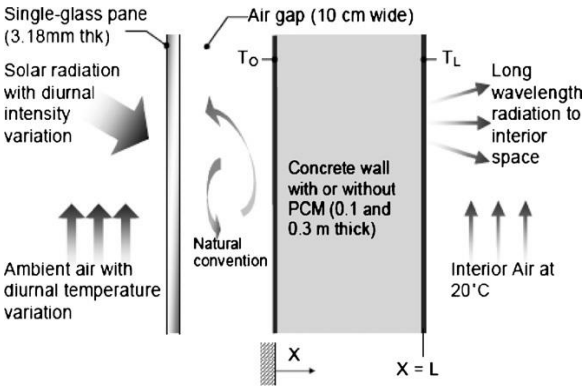
بر اساس تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای ترومب، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در این دیوارها به جای آب و تخته‌های گچ، وزن این دیوارها را بسیار کاهش می‌دهد و همچنین با انتخاب صحیح این مواد ظرفیت ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد. مواد تغییرفازدهنده در این نوع دیوارها معمولا شامل هیدرات نمک و یا هیدروکربن‌ها می‌باشد. با افزودن مقداری فلز به این مواد می‌توان هدایت حرارتی و همچنین بازده این مواد را افزایش داد [۱۲-۱۳].

شکل ۷ نمونه‌ای ساده ای از دیوار ترومب را نشان می‌دهد که بدون استفاده از مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۷ نمونه‌ای ساده ای از دیوار ترومب بدون استفاده از ماده تغییرفازدهنده

تجزیه و تحلیل انجام شده به ارزیابی درجه حرارت گذرا از یک دیوار ترومب بتن معمولی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر (۱۲ اینچ) و ۱۰ سانتی‌متر (۴ اینچ) می‌پردازد. نتایج بدست آمده با دیوار ترومب بتونی مشابه، با این تفاوت که ۲۰٪ از وزن آن را پارافین ترکیب شده با بتن تشکیل می‌دهد مقایسه می‌شود[۱۴]. کاستلون و همکاران در مطالعات خود در زمینه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در یک دیوار ترومب جنوبی به بررسی اثر مواد تغییرفازدهنده موجود در این دیوار برروی کاهش تقاضای سرمایش و گرمایش در تمام طول سال در آب‌وهوای مدیترانه‌ای پرداختند. مشخصات و نحوه به کارگیری دیوار ترومب در مطالعه مذکور در شکل ۸ آمده است [۱۴].



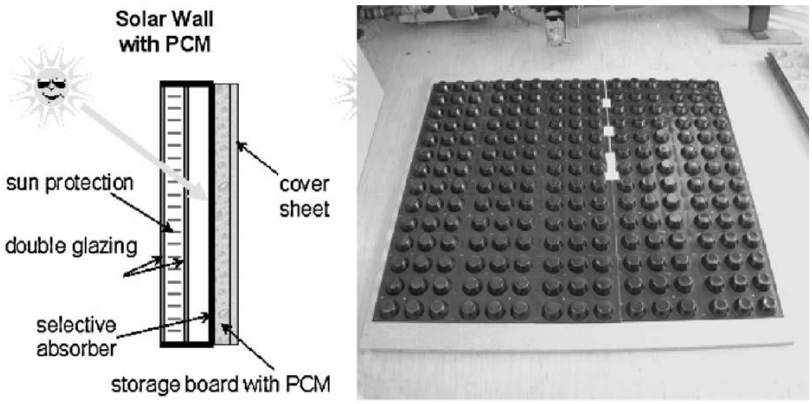
شکل ۸ مشخصات و نحوه به کارگیری دیوار ترومب

نواک و همکاران یک دیوار خورشیدی برای تهویه ساختمان، که از طریق جذب انرژی خورشیدی درون موم پارافین سیاه (نقطه ذوب، ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) عمل می‌کند ارائه داده‌اند. گرمای ذخیره شده برای گرم کردن هوا برای تهویه خانه استفاده می‌شود. بازده کارکرد سیستم ۷۹٪ می‌باشد که ۲۳٪ بالاتر از دیوار معمولی است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار حرارت ذخیره شده در پانل و دیوار به صورت گرمای نهان در دمای هوای خروجی از پانل جهت تهویه تاثیر دارد. مقدار ضخامت بهینه این دیواره‌ها از آزمایش گرمایش فصلی انجام شده برای داشتن بازده بالاتر، ۵۰ میلی‌متر محاسبه شده و دمای ذوب مواد تغییرفازدهنده معمولا چند درجه بالاتر از دمای اتاق انتخاب می‌شود[۱۵].

۳-۲- به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در دیوار خارجی شفاف ساختمان‌ها

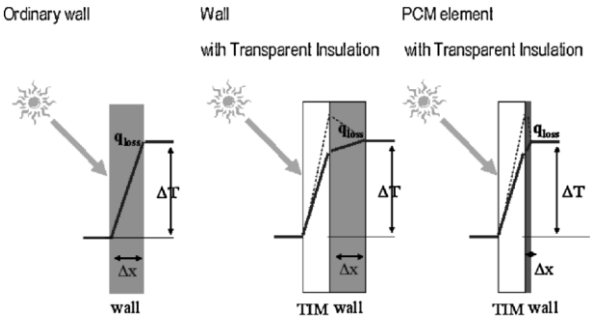
استفاده از عایق حرارتی شفاف درون دیوار خارجی به منظور گرمایش ساختمان چند دهه مورد بررسی قرار گرفته است. ایده اولیه آن در شکل۹ آورده شده است[۱۱].

در دیوار معمولی (در شکل ۹-چپ)، گرادیان دما در داخل دیوار باعث اتلاف حرارتی از قسمت گرم داخلی به قسمت سرد خارجی ساختمان می‌شود. گرمای ناشی از تابش خورشید بر روی سطح خارجی از طریق انتقال حرارت جابه‌جای آزاد و اجباری توسط باد هدر می‌رود. برای کاهش این اتلاف حرارت ناشی از تابش خورشید عایق حرارتی شفاف مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱۰ شماتیکی از دیوار خورشیدی (شکل چپ) و دیوار شامل مواد تغییر فاز دهنده‌ها (شکل راست) [۱۱]

این عایق که شامل مواد عایق شفاف[۱] یا ساختار لایه‌ای می‌باشند، اجازه می‌دهند که تابش خورشید توسط دیواره جذب شده و از اتلاف آن به بیرون به وسیله جابه‌جایی آزاد جلوگیری شود. همانطور که در شکل ۹-وسط دیده می‌شود اتلاف حرارتی به مقدار کمینه خود می‌رسید. در این حالت حتی اجزای دیوار می‌تواند همانند یک گرم‌کن عمل کنند[۱۱].

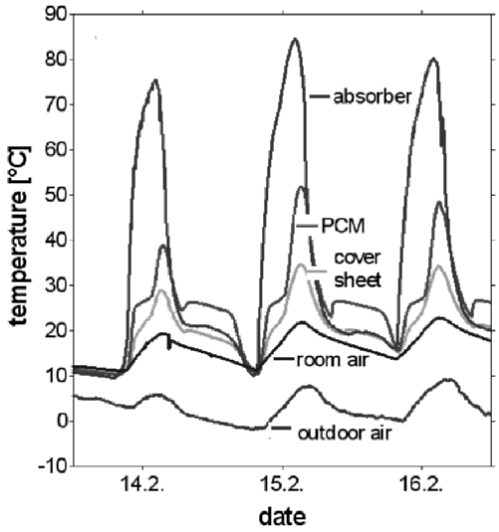


شکل ۹ ساختار مختلف دیواره‌های خارجی برای استفاده از تابش خورشید برای گرمایش فضا[۱۱]

هرچند در ترکیب دیوار معمولی با عایق شفاف، برای اطمینان از ظرفیت ذخیره کافی برای کاهش اتلاف حرارتی گاهی نیاز به ضخامت زیاد می‌باشد. افزایش ضخامت عایق علاوه بر محدودیت در اجرا می تواند به افزایش هزینه ها نیز منجر شود. برای رفع این مشکل استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌تواند بسیار کارآمد باشد[۱۱].

آرنولد و بایرن برای اولین بار ایده تعویض دیوار معمولی با دیوار شامل مواد تغییرفازدهنده را عنوان داشتند (شکل ۹-راست). شمای این طراحی در شکل ۱۰ آورده شده است[۱۱].

شکل ۱۱ نتایج آزمایشی را نشان می‌دهد که از پوشش شیشه‌ای دوگانه به عنوان عایق شفاف استفاده شده است.



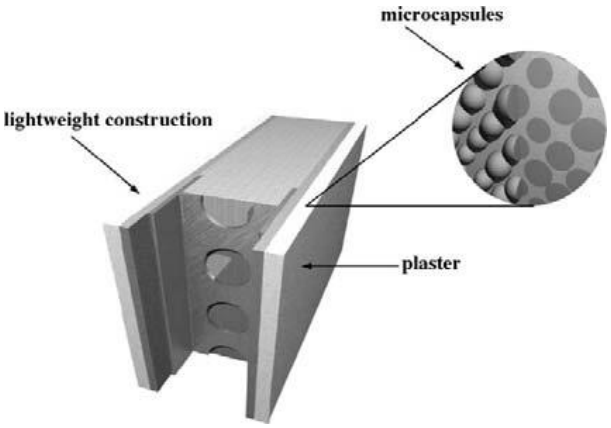
شکل ۱۱ نتایج تجربی یک دیوار خورشیدی با مواد تغییرفازدهنده از نصب در یک ساختمان[۱۱]

مواد تغییرفازدهنده با جذب تابش اشعه خورشید توسط صفحه جاذب و رسیدن دمای آن به نقطه ذوب خود شروع به ذوب شدن می‌کند و تغییر فاز به مایع می‌دهد. در همین زمان، دمای پوشش متصل به مواد تغییرفازدهنده که در واقع دیوار داخلی ساختمان را پوشش می‌دهد نیز گرم شده و همانطور که از شکل ۱۱ پیداست تا ۳۰°C افزایش پیدا می‌کند. زمانی که عملیات ذوب شدن مواد تغییرفازدهنده تقریبا به طور کامل انجام می‌شود، به شب و زمان اوج مصرف و نیاز گرمایشی نزدیک شده و دمای هوای داخل ساختمان و پوشش دیوار افت کرده در این هنگام مواد تغییرفازدهنده شروع به تغییر فاز به جامد می‌کند و گرمای نهفته درون خود را به پوشش و در نهایت هوای ساختمان می‌دهد این امر باعث ثابت ماندن دمای ساختمان در دمای مطلوب و در تمام طول روز می‌شود[۱۱].

۱) Transparent insulation materials (TIM)

۳-۳- کاربرد مواد تغییرفازدهنده در دیواره‌های ساختمان و مصالح استفاده شده در ساخت دیواره‌ها

از آنجا که دیوارهای ساختمان دارای سطوح وسیعی برای انتقال حرارت غیرفعال و ذخیره سازی انرژی هستند، انواع مواد تغییرفازدهنده را می‌توان به صورت‌های مختلف در دیوارهای ساختمان بکار برد و تاثیر آنها را از نظر پتانسیل ذخیره‌سازی انرژی و کاهش بار گرمایشی، ماکزیمم انرژی ذخیره شده و نیز انتخاب مواد تغییرفازدهنده بهینه مورد بررسی قرار داد. نتایج شبیه‌سازی پیپو [۱۶] نشان داد که مواد تغییرفازدهنده با نقطه ذوب حدود ۱-۳°C بالاتر از دمای میانگین اتاق، منجر به نتایج بهینه می‌گردد. همچنین تیاگی [۱۷] در مروری که بر تحقیقات صورت گرفته انجام داده است، عنوان می‌کند که مواد تغییرفازدهنده‌ای که در بازه دمایی ۲۰-۳۲ °C قرار می‌گیرند پتانسیل بکارگیری برای آسایش حرارتی را دارا می‌باشند. اغلب آزمایشات صورت گرفته، از مواد تغییرفازدهنده ای که به روش غوطه‌وری تخته گچ در مواد تغییرفازدهنده و اضافه نمودن میکروکپسول‌های مواد تغییرفازدهنده به داخل گچ استفاده نموده اند.(شکل ۱۲)



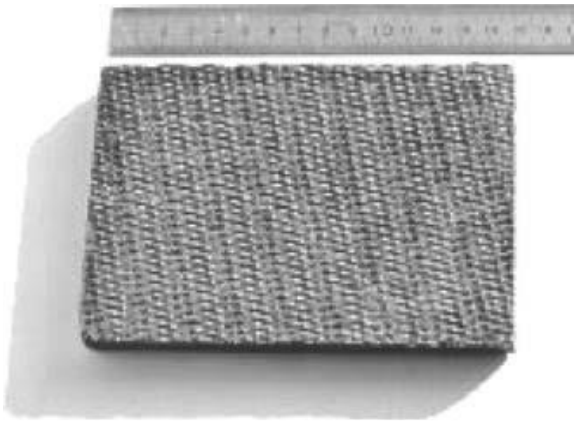
شکل۱۲ شکل یک دیوار که میکروکپسول‌های مواد تغییرفازدهنده به لایه داخل گچ اضافه می‌گردند.

اما چنین نمونه‌هایی امکان نشتی دارند و نیز میزان مواد تغییرفازدهنده قابل افزودن به تخته گچ محدود است[۱۸].

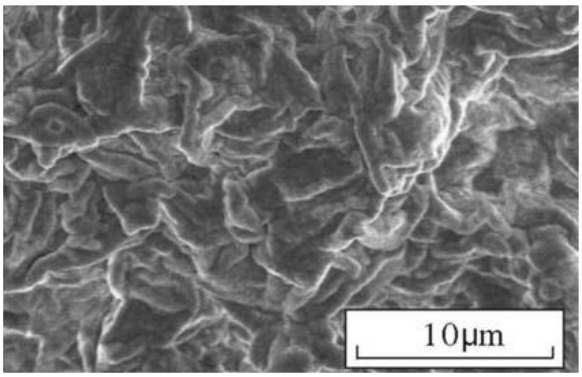
نوع جدید مواد تغییرفازدهنده که محققین [۱۹] در سالهای اخیر معرفی نموده‌اند، مواد تغییرفازدهنده با شکل ثابت (شکلهای ۱۳-الف و ۱۳-ب) می‌باشد که متشکل از پارافین به عنوان مواد تغییرفازدهنده و پلی اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) به عنوان ماده محافظ می‌باشد. از آنجا که بیش از ۸۰٪ وزن صفحه مواد تغییرفازدهنده با شکل ثابت را پارافین تشکیل می‌دهد، میزان انرژی ذخیره شده توسط آن به مراتب بیشتر از مواد تغییرفازدهنده‌های رایج خواهد بود. این نوع مواد تغییرفازدهنده توسط لین [۲۰] در سیستم گرمایش از کف در یک اتاق در معرض تابش مستقیم به کار گرفته شد. نتیجه شبیه سازی که با آزمایش نیز تایید گردید، مبین آن است که این سیستم در ساختمان‌های مختلف با بارهای گرمایشی متفاوت قابل استفاده است.

در کل، بررسی‌ها نشان می‌دهند که بکارگیری مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای شرقی و غربی و نیز سقف و کف موثر بوده و مواد تغییر فاز دهنده موجود بر روی این سطوح با انجام عمل تغییر فاز، منجر به ذخیره حدود ۲۹٪ انرژی می‌گردد.

مواد تغییرفازدهنده در دیوار شمالی نقش عایق را ایفا ء می‌کند. در دیوار جنوبی تاثیر عکس داشته و در واقع انتقال حرارت از هوای اتاق به دیوار صورت گرفته که باعث کاهش دمای اتاق می‌گردد.



شکل۱۳-الف تصویر یک صفحه مواد تغییرفازدهنده با شکل ثابت

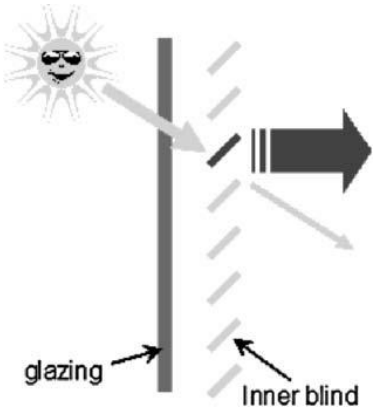


شکل ۱۳-ب تصویر میکروسکوپیک گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونیکی

۴-۳-سیستم ترکیبی مواد تغییرفازدهنده و سایه‌بان

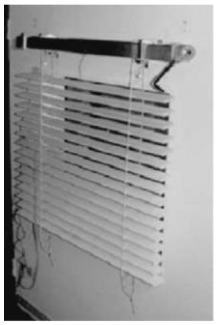
سایه‌بان‌های خارجی در معرض بادهای شدید قرار می‌گیرند بنابراین برای پایداری نیازمند سیستم مکانیکی مستحکمی می‌باشند اما سایه‌بان و پرده‌های داخلی هزینه بسیار کمی نسبت به پرده‌های خارجی دارند[۱۱].

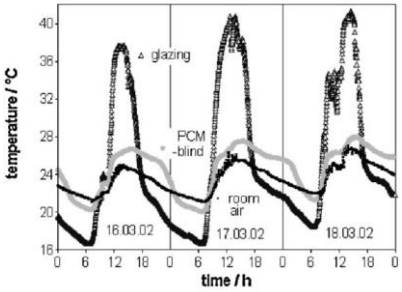
پرده‌های داخلی توانایی جذب بخشی از تشعشع وارد شده از خورشید به اتاق را دارند. این امر باعث افزایش دمای پرده شده و در هنگام نیاز این حرارت را به اتاق منتقل می‌کند[۱۱]. (شکل ۱۴)



شکل ۱۴ شماتیکی از پرده داخلی که تابش خورشیدی را جذب و گرما را به اتاق می‌دهد.

وارما و بایرن به بررسی ایده جلوگیری از کاهش ناگهانی و افزایش سریع دما در پرده‌های داخلی به وسیله مواد تغییرفازدهنده پرداختند. شکل ۱۵ نمودار آزمون دمایی و شماتیک ایده پرده‌های داخلی با مواد تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری در این آزمون نشان می‌دهد که مواد تغییرفازدهنده می‌تواند افزایش ناگهانی دما را بین ۱۰ – ۱۵°C کاهش دهد و تقریبا ثابت نگه دارد[۱۱].

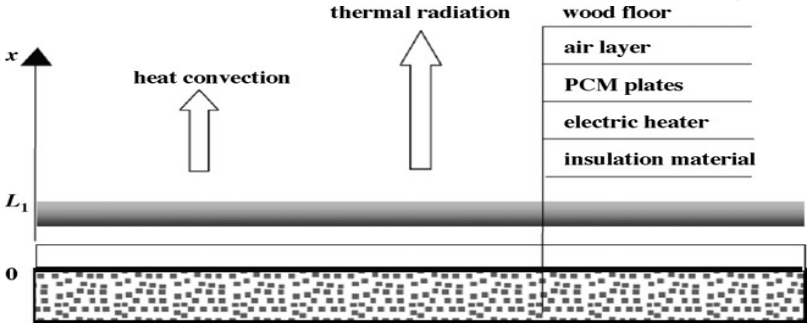




شکل ۱۵ نمونه‌ای از پرده افقی با PCM و نتایج آزمایش آن[۱۱]

۳-۵- استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش از کف

کف یکی از مهمترین قسمت مهمترین قسمتهای تشکیل دهنده ساختمان به منظور گرمایش و سرمایش آن است. چن و همکاران[۲۱] به بررسی انتقال حرارت گذار در سیستم گرمایش از کف پرداختند.



شکل ۱۶ شماتیک کارکرد سیستم گرمایش از کف را به وسیله گرمایش الکتریکی و لایه مواد تغییر فاز دهنده

تحقیقات آنها حول اثر لایه پوششی و تابش خورشید بر توزیع دمای کف و همچنین مصرف انرژی بود.

نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای یک اتاق که به محیط بیرون دید داشته باشد توانایی جذب تابش خورشید توسط کف و افزایش دمای آن تا ۸°C نسبت به اتاقی که در آن سایه حاکم است می‌باشد.

فرش که قسمتی از کف را پوشانده است مانند یک منبع ذخیره سازی عمل کرده و با ذخیره‌سازی حرارت جذب شده از تابش خورشید دمای کف را تا ۱۵°C افزایش می‌دهد. این نتایج عاملی برای ظهور ایده برای استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستم‌های گرمایش از کف می‌باشد.

در سیستم‌های گرمایش از کف به دلیل تولید میزان حرارت یکنواخت جهت مصرف به طور مداوم، استفاده از آن در زمان اوج مصرف کاهش می‌یابد و به زمانی موکول می‌شود که هزینه‌های استفاده از منابع تولید حرارت کمتر می‌باشد. مواد متراکم مثل بتن ممکن است باعث ایجاد نوسانات زیادی در دمای داخل اتاق شود برعکس در نقطه مقابل آن استفاده از مواد تغییرفازدهنده نه تنها مقدار زیادی حرارت را در خود ذخیره می‌کند بلکه دما را تا حد زیادی ثابت نگه می‌دارد که سبب راحتی و آسایش انسان در ساختمان می‌شود.

شکل ۱۶ شماتیک کارکرد سیستم گرمایش از کف را به وسیله گرمایش الکتریکی و لایه مواد تغییرفازدهنده نشان می‌دهد[۲۲].

گرمکن برقی با گرم کردن لایه حاوی مواد تغییرفازدهنده و ذوب آن با استفاده از تعرفه برق ارزان‌تر در هنگام شب نسبت به روز سبب ذخیره‌سازی گرما می‌شود. در طول روز با خاموش کردن گرمکن و با جامد شدن مواد تغییرفازدهنده گرما به محیط داخل خانه پس داده می‌شود و محیط را گرم می‌کند. در برخی از کشورها مثل چین تعرفه برق در هنگام شب به یک سوم تعرفه در هنگام روز تبدیل می‌شود که این امر علاوه بر صرفه گرمایشی و ثابت نگه داشتن دمای داخل ساختمان در دمای آسایش به وسیله مواد تغییرفازدهنده صرفه اقتصادی نیز به همراه خواهد داشت[۲۲].

۳-۶-سیستم سرمایش رایگان

سیستم‌های فعالی که از هوای خنک در هنگام شب برای سرمایش استفاده می‌کنند به آن‌ها سیستم سرمایش رایگان گفته می‌شود[۱۱].

همانطور که در شکل ۱۷-چپ دیده می‌شود هوای سرد در هنگام شب توسط فن به داخل ساختمان کشیده می‌شود. داخل ساختمان مواد تغییرفازدهنده توسط هوای سرد به داخل کشیده شده سرد می‌شود و وارد فاز جامد می‌شود. در طول روز هوای گرم داخل ساختمان توسط فن از مقابل مواد تغییرفازدهنده عبور داده می‌شود. هوای گرم باعث ذوب شدن مواد تغییرفازدهنده شده و خنک می‌شود. در این سیستم فقط مقدار اندکی هزینه بابت صرف انرژی فن‌ها می‌شود[۱۱].

شکل ۱۷-راست طراحی قابل استفاده از این نوع سیستم را نشان می‌دهد که در سوئد در حال حاظر بر روی چند ساختمان نسب شده است. آزمایشات نشان می‌دهد که دمای اتاق با این سیستم ۴°C – ۳ با کمترین مصرف انرژی کاهش یافته است[۱۱].

۴-تأثیر مواد تغییرفازدهنده درصرفه جویی برق در ساختمان

تحقیقات و تلاشها زیادی به منظور توسعه سیستم‌های ذخیره سازی مواد تغییر فاز دهنده (انواع نمک‌های هیدرات) برای صرفه جویی در زمان اوج مصرف برق انجام شده است[۲۳-۲۵] بدین صورت که در زمان اوج مصرف برق مواد تغییرفازدهنده به منظور ذخیره سازی برق در قالب انرژی حرارتی گرمای نهان به وسیله منابع حرارتی، ذوب و یا منجمد می‌شود و در زمان مورد نیاز از آن استفاده می‌شود. بنابراین اگر سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی گرمای نهان با سیستم‌های فعال مثل چیلرهای جذبی ترکیب شوند، باعث کمک به کاهش اوج بار و کاهش هزینه مصرف برق می‌شود.

یک سیستم الکتریکی گرمایش از کف شامل موم پارافین (با نقطه ذوب، ۴۰°C) به عنوان مواد تغییرفازدهنده توسط فرید و چن [۲۶] پیشنهاد شد. آنها لایه‌ای از مواد تغییرفازدهنده به ضخامت ۳۰ میلی‌متر بین سطح گرمایش و کاشی های کف قرار دادند. با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری آنها دریافتند که گرمای خروجی از کف می تواند به طور قابل توجهی از $\frac{W}{m^2}$ ۳۰ به و $\frac{W}{m^2}$۷۵ با استفاده از مواد تغییرفازدهنده افزایش یابد. این سیستم توسط یک گرمکن الکتریکی در ساعات خارج از اوج مصرف مواد تغییرفازدهنده را به دمای ذوب می‌رساند و از طریق ذخیره‌سازی گرما باعث کاهش هزینه مصرف برق می‌شود.

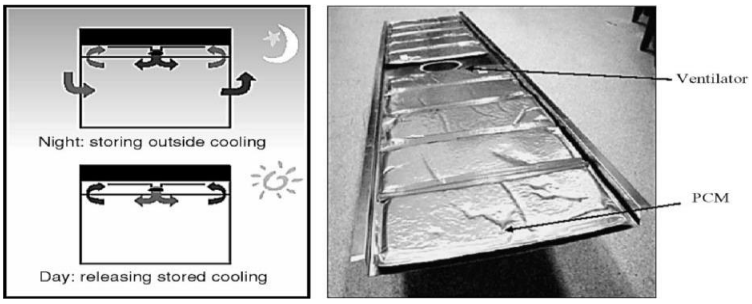
۵-نتیجه‌گیری

یکی از سیاست مهم بخش انرژی در کشور جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع تجدیدپذیر و استفاده از سوخت‌های با صرفه و مطابق با استانداردهای محیط‌زیست است. در این راستا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی، هوای خنک در هنگام شب و ذخیره‌سازی آن به صورت‌های مختلف در ساختمان‌ها به جای سوخت‌های فسیلی مد نظر سازمان بهینه سازی مصرف سوخت قرار دارد. امروزه در بسیاری از کشورها استفاده از مواد تغییرفازدهنده به منظور ذخیره‌سازی و صرفه جویی انرژی بسیار رایج شده است.

در این تحقیق، پس از معرفی مواد تغییرفازدهنده و چگونگی عملکرد آنها، به نکاتی در ارتباط با چگونگی کاربرد آن در ساختمان و نتایج موثر آن در کاهش مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان پرداخته شده است. با توجه به هزینه بالای تولید میکروکپسول‌های حاوی این گونه مواد، می‌توان مواد مذکور را به صورت پاکت‌های بزرگتر و یا پانل‌های حاوی این مواد ، در فواصل بین جداره‌ها و یا بین شیشه‌های دوجداره به کار برد .در صورت انتخاب نوع صحیح این ماده براساس اقلیم منطقه، تغییرات دمایی منطقه و متناسب با فصل، می‌توان بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و تنها با استفاده از قابلیت‌های فیزیکی این مواد، کاهشی ۱۹ درصدی در انرژی مصرفی ساختمان داشت.

به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای ساختمان و مصالح به کار رفته در اجزای دیواره، نقش تعیین کننده‌ای در کاهش بار حرارتی-برودتی ساختمان دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که بکارگیری این مواد در دیوارهای شرقی و غربی و نیز سقف وکف با انجام عمل تغییر فاز بر روی این سطوح، منجر به ذخیره حدود ۲۹٪ انرژی می‌گردد. مواد تغییرفازدهنده در دیوار شمالی نقش عایق را ایفا ء می‌کند. در دیوار جنوبی تاثیر عکس داشته و در واقع انتقال حرارت از هوای اتاق به دیوار صورت گرفته که باعث کاهش دمای اتاق می‌گردد.

در زمان اوج مصرف برق، مواد تغییرفازدهنده به منظور ذخیره‌سازی برق در قالب انرژی حرارتی گرمای نهان به وسیله منابع حرارتی، ذوب و یا منجمد می‌شود و در زمان مورد نیاز از آن استفاده می‌شود. بنابراین اگر سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی گرمای نهان با سیستم‌های فعال مثل چیلرهای جذبی ترکیب شوند، باعث کمک به کاهش اوج بار و کاهش هزینه مصرف برق می‌شود.



شکل ۱۷ سرمایش رایگان به وسیله ذخیره‌سازی هوای خنک در هنگام شب و استفاده از آن برای سیستم خنک‌کاری در روز (شکل چپ). طراحی سیستم توسط شرکت Climators CoolDeck/Sweden (شکل راست) [۱۱]

۶- مراجع

[۱] M. Fatih Demirbas, "*Thermal Energy Storage and Phase change Materials: an Overview*", Energy Sources, part B, ۱:۸۵-۹۵, ۲۰۰۶.

[۲] S. Mondal, "*Phase change materials for smart textiles – an overview*", Applied Thermal Engineering, V.۲۸ (۲۰۰۸), N. ۱۱-۱۲, P. ۱۵۳۶-۱۵۵۰.

[۳] Zalba B., Marin J. M., Cabeza L. F., Mehling H.*; Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering*, ۲۳, (۲۰۰۳) pp. ۲۵۱ -۲۸۳.

[٤] *Latent heat storage in building materials*, D.W. Hawes, Energy and buildings, V. ۲۰, Issue ۱,۱۹۹۳.

[۵] *بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان جهت صرفه جویی در انرژی گرمایشی*، م . معرفت، س.کیان، مهندسی مکانیک، شماره ۶۸ ، سال هجدهم،۱۳۸۸

[٦] S. Mondal, "*Phase change materials for smart textiles – an overview*", Applied Thermal Engineering, V.۲۸ (۲۰۰۸), N. ۱۱-۱۲, P. ۱۵۳٦-۱۵۵۰.

[۷] *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption/ Fundamentals, Case Studies and Design* /edited by Halime O¨ . Paksoy / Series II: Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. ۲۳٤/ PART V / phase change materials/ chapter ۱۷

[۸] Kenisarin, M., and Mahkamov, Kh., *Solar Energy Storage using Phase Change Materials*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, No.۱۱, pp.۱۹۱۳-۱۹٦۵, (۲۰۰۷).

[۹] *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Atul Sharma ,V.V. Tyagi, C.R. Chen , D. Buddhi , Renewable and Sustainable Energy Reviews ۱۳ (۲۰۰۹) ۳۱۸–۳٤۵

[۱۰] M ehling, Harald, "*Innovative PCM Technology*", ۸th Expert Meeting and Work Shop, Kizkalesi, Turkey, (۲۰۰٤).

[۱۱] *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption /Fundamentals, Case Studies and Design* /edited by Halime O¨ . Paksoy / Series II: Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. ۲۳٤/ PART V / phase change materials/chapter ۲۰

[۱۲] Swet J. *Phase change storage in passive solar architecture. In:Proceedings of the ٥th national passive solar conference. Massachusetts*: Amhearst; ۱۹۸۰. p. ۲۸۲–٦.

[۱۳] GhoneimAA, Klein SA, Duffie JA. *Analysis of collector–storage building walls using phase change materials*. Solar Energy ۱۹۹۱;٤۷(۱):۲۳۷–٤۲.

[۱٤] Eiamworawutthikul C, Strohbehn J, Harman C. *Investigation of phasechange thermal storage in passive solar design for light-construction building in the southeastern climate region*. A research program to promote energy conservation and the use of renewable energy.

[۱۵] Stritih U., Novak P., *Solar heat storage wall for building ventilation.* World renewable energy congress (WREC); ۱۹۹٦. p. ۲٦۸–۲۷۱.

[۱٦] Peippo, K., Kauranen, P., and Lund, PD., "*Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating*", Energy and Buildings, No.۱۷, pp. ۲۵۹–۲۷۰, (۱۹۹۱).

[۱۷] Tyagi, V., and Buddhi, D., "*PCM Thermal Storage in Buildings*": A State of Art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No.۱۱, pp. ۱۱٤٦–۱۱٦٦ (۲۰۰۷).

[۱۸] Schossig, P., Schossig P., Henning H.-M., Gschwander S., and Haussmann T., "*Microencapsulated Phase-Change Materials Integrated into Construction Materials, Solar Energy Materials*, No. ۸۹, pp. ۲۹۷-۳۰٦, (۲۰۰۵).

[۱۹] Inaba, H., and Tu, P., *"Evaluation of Thermophysica Characteristics on Shape-Stabilized Paraffin as a Solid–Liquid Phase Change Material*", Heat Mass Transfer, No.۳۲, pp. ۳۰۷–۳۱۲, (۱۹۹۷).

[۲۰] Lin, K., Lin, K., P, Zhang, Y.P, Xu Xu, Di H.F., Yang R., Qin P., *"Modeling and Simulation of Under-Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates, Building and Environment*, No. ۳۹, pp.۱٤۲۷–۱٤۳٤, (۲۰۰٤).

[۲۱] Athienities A, Chen Y., *The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. Solar Energy* ۲۰۰۰; ٦۹(۳): ۲۲۹–۳۷.

[۲۲] Lin KP, Zhang YP, Xu X, Di HF, Yang R, Qin PH. *Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates.* Build Environ ۲۰۰٤;۳۹(۱۲):۱٤۲۷–۳٤.

[۲۳] Lillich KH. *Electro–Tech* ۱۹۷۱; ٤۹:۵۷۹.

[۲٤] Shitzer, *Levy M. Trans ASME J Sol Energy Eng* ۱۹۸۳; pp. ۱۰۵:۲۰۰.

[۲۵] Farid MM, Husian Rafah M. *An electrical storage heater using the phase change method of heat storage. Energy Convers Manage* ۱۹۹۰;۳۰(۳):۲۱۹–۳۰.

[۲٦] Farid MM, Chen XD. *Domestic electrical space heating with heat storage.* Proc Inst Mech Eng ۱۹۹۹; ۲۱۳: ۸۳–۹۲.