مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۳ - ۳۰، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۴۷-۵۵

Original Article

بررسی عملکرد سیستم مواد تغییر فازدهنده در ساختمان به‌لحاظ آسایش حرارتی و مصرف انرژی در اقلیم کویری ایران

مهدی معرفت* **(دانشیار)**
محمد آهنگری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

کاربرد مواد تغییر فازدهنده (PCM) در ساختمان، به‌دلیل ظرفیت بالای این مواد در ذخیره‌ی انرژی گرمایی، به بهبود شرایط آسایش حرارتی و نیز کاهش مصرف انرژی می‌انجامد. با توجه به وابستگی زیاد عملکرد این مواد به نوسانات دمایی محیط، کاربرد آنها در اقلیم کویری ــ که دارای نوسانات شدید دمایی در شبانه‌روز است ــ بر شرایط آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های این نوع اقلیم بسیار اثرگذار است. در تحقیق حاضر عملکرد یک سیستم تک‌لایه از این مواد در اتاقی نمونه و در آب و هوای زمستانی شهر یزد بررسی می‌شود. در این تحقیق از قابلیت‌های نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که PCM با دمای ذوب ۲۰°C، بیشترین تأثیر را بر بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق و PCM با دمای ذوب ۲۲°C، بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی اتاق دارند.

واژگان کلیدی: مواد تغییر فازدهنده (PCM)، آسایش حرارتی، مصرف انرژی، اقلیم کویری، انرژی‌پلاس.

maerefat@modares.ac.ir
ahangari.m@gmail.com

۱. مقدمه

انرژی تابشی خورشید منبعی بزرگ برای گرمایش ساختمان در زمستان است، اما با توجه به ویژگی تناوبی‌اش در شبانه‌روز و وابستگی آن به زمان، نیاز به ذخیره و آزادسازی این انرژی در ساختمان احساس می‌شود. ذخیره‌ی انرژی به‌صورت گرمای نهان، به‌دلیل ذخیره‌سازی مقدار چشم‌گیر انرژی گرمایی به‌هنگام تغییر فاز و نیز طبیعت تقریباً هم‌دمای آن در طول فرایند ذخیره‌ی انرژی، برگرمای محسوس برتری دارد. انرژی گرمایی حاصل از تابش خورشید و نیز گرمای حاصل از منابع داخلی اتاق را می‌توان در لایه‌ی حاوی ماده‌ی تغییر فازدهنده (PCM)[1] در طول فرایند ذوب ذخیره کرد و سپس با کاهش دمای داخل اتاق، از انرژی آزادشده در طول فرایند انجمادشان استفاده کرد، این فرایند تأثیر قابل توجهی بر شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی اتاق دارد.

در سال‌های اخیر مواد تغییر فازدهنده در ساختمان به‌دلیل برخورداری از ظرفیت بالا در ذخیره‌ی انرژی گرمایی به‌صورت گرمای نهان، بسیار مورد استفاده قرارگرفته‌اند. عوامل زیادی در عملکرد این مواد نقش دارد؛ دمای ذوب و انجماد، ضریب هدایت حرارتی، ضخامت صفحات، موقعیت قرارگیری صفحات در اتاق، و شرایط اقلیمی محیط پیرامون از مهم‌ترین این عوامل‌اند.

ژو و همکاران[1] در تحقیق خود بیان کردند که برای ذخیره‌ی بیشترین مقدار انرژی گرمایی، خواص PCM مورد استفاده در اتاق باید با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه تعیین شود. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحه‌ی حاوی PCM در سطح داخلی دیوار خارجی، در مقایسه با کاربردشان در سطح خارجی آن دیوار ــ بر شرایط آسایش حرارتی اتاق بسیار اثرگذارتر است. بررسی تأثیر کاربرد لایه‌یی از این مواد در سطح داخلی دیوارهای اتاقی در شهر کبک کانادا[2] نشان داد که عملکرد این لایه به‌شدت به شرایط آب و هوایی منطقه وابسته است. تحقیقات بعدی نیز نشان داد که تعیین خواص بهینه‌ی PCM مورد استفاده در اتاق، علاوه بر شرایط اقلیمی، به فصل مورد بررسی نیز وابسته است[3] به‌گونه‌یی که این خواص از فصلی به فصل دیگر تغییر می‌کنند.

در دیگر تحقیقات به عمل آمده،[4و5] بررسی عملکرد مواد تغییر فازدهنده در کف یک اتاق در زمستان نشان داد که دمای ذوب مناسب برای این مواد، تقریباً برابر دمای میانگین اتاق در روزهای آفتابی زمستان است. همچنین نتایج شبیه‌سازی پیپو[6] نشان داد که PCM با نقطه‌ی ذوب ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای میانگین اتاق، منجر به بهترین نتایج آسایش حرارتی می‌شود. همچنین نتایج بررسی میزان انرژی ذخیره‌شده در صفحه‌ی حاوی مواد تغییر فازدهنده[7] و در نظرگرفتن هزینه‌ی اقتصادی حاکی از آن است که همواره می‌توان به ضخامت بهینه برای این صفحات در اتاق دست یافت. تحقیقات انجام‌شده در دانشگاه تربیت مدرس تهران[8] ــ که

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۸/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۱، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۱۴.

طی آن تغییرات سینوسی دمای محیط و تغییرات شار تابشی خورشید در شبانه‌روز لحاظ شده است ــ نشان داد که در یک اتاق نمونه در فصل زمستان، کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده با ضخامت ۲۵mm، گرمای نهان ذوب ۱۵۰kJ/kg و دمای ذوب ۲۱°C، بهترین شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی را در پی دارد. بررسی تأثیر خواص ترموفیزیکی میکروکپسول‌های حاوی PCM بر چگونگی عملکرد این مواد در سطوح مختلف اتاق[۹] نشان داد که با کاهش قطر میکروکپسول‌های حاوی PCM و کاهش گرمای نهان ذوب و نیز افزایش ثابت هدایت حرارتی ماده‌ی تغییر فازدهنده، زمان ذوب این ماده کاهش می‌یابد.

در تحقیق حاضر با در نظرگرفتن این مطلب که عملکرد مواد تغییر فازدهنده در اتاق تا حد زیادی به شرایط دمایی محیط پیرامون وابسته است، عملکرد صفحات حاوی این مواد از دو منظر آسایش حرارتی و مصرف انرژی در اقلیمی که با تغییرات شدید دمایی در شبانه‌روز مواجه است، بررسی شده و مقدار بهینه‌ی خواص ترموفیزیکی و ضخامت لایه‌ی به کار رفته در اقلیم کویری ایران به دست آمده است. تغییرات شدید دمایی در شبانه‌روز ضمن افزایش نرخ ذخیره و آزادسازی انرژی در این مواد، عملکرد این مواد در ساختمان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. شبیه‌سازی در شرایط آب و هوایی زمستان شهر یزد انجام، و برای بررسی نتایج با جزئیات بیشتر، روزهای ۱۲ تا ۱۵ دی‌ماه به‌عنوان چهار روز نمونه انتخاب شد. در تحقیق حاضر از قابلیت‌های نرم‌افزار انرژی‌پلاس[۲] در شبیه‌سازی مسائل مرتبط با کاربرد مواد تغییر فازدهنده در ساختمان[۱۰] استفاده شده است. در ادامه جزئیاتی از چگونگی این شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

۲. معادلات حاکم و نحوه‌ی شبیه‌سازی در انرژی‌پلاس

یکی از نرم‌افزارهای مهم در زمینه‌ی محاسبات مصرف انرژی در ساختمان، نرم‌افزار انرژی‌پلاس است. اساس کار این نرم‌افزار بر اطلاعات ورودی کاربر ــ نظیر نقشه‌ی سه‌بعدی ساختمان، ترکیب فیزیکی ساختمان، اجزای سیستم‌های مکانیکی مربوطه، الگوریتم حل و... ــ استوار است. نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای محاسبه‌ی بارهای حرارتی و برودتی از روش بالانس حرارتی (HB)[۳] بهره می‌گیرد. این روش شامل سه معادله‌ی بالانس حرارتی است که به‌ترتیب روی سطوح خارجی فضای مورد نظر، روی سطوح داخلی و در فضای مورد نظر به‌طور همزمان حل، و بار حرارتی و برودتی سیستم محاسبه می‌شود. تخمین بار ساختمان به روش بالانس حرارتی شامل محاسبات بالانس حرارتی هدایت، جابه‌جایی و تشعشع سطح با سطح برای هر سطح اتاق و بالانس حرارتی هوای اتاق است.[۱۱] یکی از قابلیت‌های مهم انرژی‌پلاس، توانایی مدل‌کردن سطوح حاوی مواد تغییر فازدهنده است. تحقیق حاضر اولین تحقیق جامعی است که از قابلیت‌های نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای بررسی عملکرد سطوح حاوی این مواد استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی یک اتاق با دیوارهای حاوی مواد تغییر فازدهنده در انرژی‌پلاس از الگوریتم تفاضل محدود هدایت[۴] استفاده شده است. در این الگوریتم پس از شبکه‌بندی سطوح مختلف دیوار با گره‌های متعدد، معادله‌ی انرژی (معادله‌ی ۱) با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی گسسته‌سازی می‌شود و برای تمام گره‌ها به کار می‌رود.

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \qquad (1)$$

سپس معادله‌ی ۱ به معادله‌ی دیگری که آنتالپی را براساس تابعی از دما تعیین می‌کند، کوپل می‌شود. معادله‌ی ۲ نیز برای تمام گره‌ها به کار می‌رود.

$$h_i = \mathrm{HTF}(T_i) \qquad (2)$$

که در آن i نشان‌گر هر گره و HTF تابع دمای آنتالپی (ETF)[۵] است که براساس اطلاعات ورودی کاربر تعیین می‌شود. افزون بر معادلات ۱ و ۲، از معادله‌ی ۳ که مقدار ظرفیت گرما را در هر گام زمانی و برای هر گره مشخص می‌کند، استفاده می‌شود.

$$C_p = \frac{h_{i,new} - h_{i.old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \qquad (3)$$

نکته‌ی قابل توجه در این محاسبات آن است که با وجود ثابت در نظرگرفتن خواص ترموفیزیکی مواد، به‌دلیل اندک بودن تغییرات دما ظرفیت گرمایی PCM متغیر و وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود.

۳. کاربرد انرژی‌پلاس در مدل‌سازی مواد تغییر فازدهنده

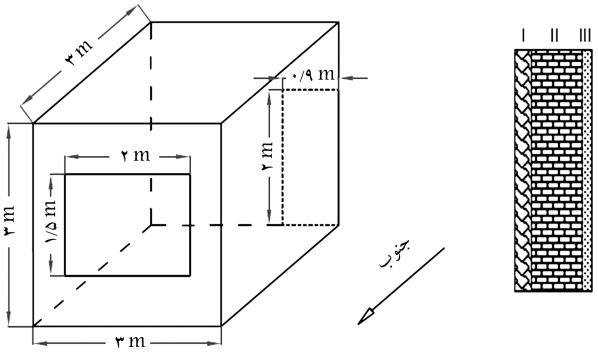
یکی از فراگیرترین و اصلی‌ترین نرم‌افزارهای محاسبات مصرف انرژی در ساختمان که کاربرد وسیعی در کشورهای مختلف دارد، نرم‌افزار انرژی‌پلاس است. در این زمینه، پژوهش‌گران با استفاده از انرژی‌پلاس تأثیر نوع شیشه‌ی پنجره را بر میزان مصرف انرژی سالیانه‌ی ساختمان بررسی کرده‌اند.[۱۲] از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به توانایی آن در مدل‌سازی سطوح حاوی مواد تغییر فازدهنده اشاره کرد. مدل‌سازی این سطوح در انرژی‌پلاس به‌کمک روش آنتالپی انجام می‌شود. الگوریتم کاربردی امکان مدل‌سازی موادی را که دارای خواص ترموفیزیکی وابسته به زمان هستند در انرژی‌پلاس میسر می‌سازد. همزمان با حل معادلات ۱ تا ۳، در نرم‌افزار انرژی‌پلاس سه معادله‌ی بالانس انرژی به‌منظور محاسبه‌ی دمای هوای اتاق، دمای سطوح داخلی و دمای سطوح خارجی اتاق به‌روش تکرار گوس ـ سایدل حل و دمای آنها در هر گام زمانی تعیین می‌شود. مزیت مدل‌سازی سطوح حاوی مواد تغییر فازدهنده در انرژی‌پلاس نسبت به دیگر نرم‌افزارها و کدهای عددی نوشته شده، سرعت و دقت بالای این مدل‌سازی است. همچنین مدل‌سازی با انرژی‌پلاس برمبنای اطلاعات هواشناسی انجام می‌شود. این اطلاعات با تلاش گروهی از اساتید و دانشجویان مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس تهران و همکاران آنان برای هفت شهر ایران ــ شامل تهران، شیراز، اصفهان، تبریز، یزد، رشت و بندرعباس ــ براساس متوسط ۳۰ ساله جمع‌آوری شده و به فرم قابل استفاده در انرژی‌پلاس تبدیل و در سایت رسمی انرژی‌پلاس قرار داده شده است.[۱۰]

۴. اتاق مدل‌سازی شده و شرایط آب و هوایی

یک اتاق نمونه در شهر یزد با دیوار خارجی رو به جنوب و پنجره‌یی دوجداره با ضریب انتقال حرارت کلی $3/01\,\mathrm{W/m^2K}$ روی دیوار جنوبی اتاق و یک درب چوبی روی دیوار شمالی، برای شبیه‌سازی انتخاب شده است (شکل ۱). غیر از دیوار جنوبی که با محیط خارج در ارتباط است، سایر دیوارها داخلی‌اند و به اتاق‌هایی با شرایط دمایی مشابه مرتبط‌اند. به‌دلیل قرارگیری دیوارهای داخلی بین دو محیط با دمای یکسان، انتقال حرارت در آنها در نظرگرفته نمی‌شود. به‌منظور ایجاد مساحتی یکسان برای تمام سطوح و امکان مقایسه‌ی ساده‌تر نتایج بین سطوح مختلف، ابعاد

جدول ۱. مصالح استفاده شده در اتاق.

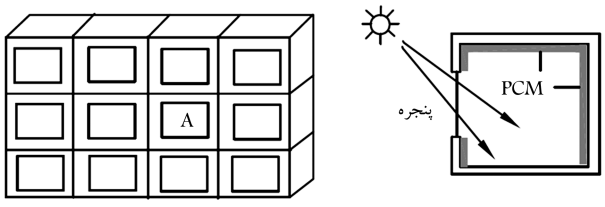
لایه‌ها	ضخامت (cm)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمای ویژه ($J/kg^\circ C$)	هدایت گرمایی ($W/m^\circ C$)	گرمای نهان (KJ/kg)
PCM (تمام سطوح به‌جز کف)	۲	۸۵۰	۱۰۰۰	۰٫۲	۱۲۰
گچ (تمام سطوح به‌جز کف)	۲	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۰٫۷۶	-
بتن (سقف و کف)	۱۵	۲۵۰۰	۹۲۰	۱٫۷۴	-
عایق (دیوار خارجی)	۱	۳۰	۱۳۸۰	۰٫۰۵	-
آجر	۹ (دیوارهای داخلی) ۱۸ (دیوار خارجی)	۱۴۰۰	۱۰۵۰	۰٫۵۸	-



الف) لایه های مختلف دیوارهای داخلی و خارجی؛ ب) ابعاد اتاق شبیه سازی شده.

اتاق شامل I: لایه گچ معمولی یا لایه گچ حاوی ماده تغییر فاز دهنده (سطح داخلی تمام دیوارها) II: آجر (در تمام دیوارها) III: عایق (سطح خارجی دیوار خارجی).

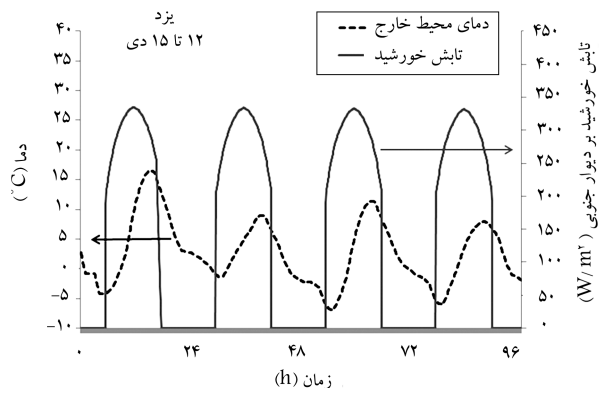
شکل ۱. اتاق شبیه سازی شده و لایه‌های دیوارهای آن.



الف) چگونگی تابش خورشید و محل قرارگیری لایه PCM در سطوح داخلی اتاق؛ ب) موقعیت اتاق در ساختمان .

شکل ۲. موقعیت اتاق شبیه سازی شده در ساختمان.

اتاق ۳ × ۳ × ۳ متر انتخاب شده است. در دیوارها، سقف و کف اتاق از مصالح ساختمانی رایج در ایران استفاده شده است (جدول ۱). به‌منظور مقایسه‌ی صحیح نتایج، شبیه‌سازی در دو حالت مختلف انجام شده است، در حالت اول با کاربرد یک لایه گچ معمولی روی تمام سطوح داخلی (غیر از کف اتاق)، و در حالت دیگر با جایگزینی این لایه‌ی گچ با یک لایه گچ حاوی PCM (سیستم تک‌لایه)، شبیه‌سازی انجام شده است. موقعیت اتاق در ساختمان و نحوه‌ی تابش خورشید به داخل اتاق را در شکل ۲، و نحوه‌ی قرارگیری لایه‌ها در دیوار خارجی و داخلی را در شکل ۱الف مشاهده می‌کنید. به‌منظور امکان بررسی نتایج با جزئیات بیشتر، شبیه‌سازی برای

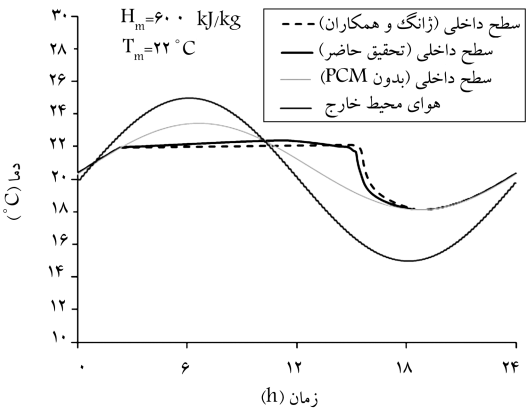


نمودار ۱. دمای هوای یزد و میزان تابش خورشید بر دیوار جنوبی.

روزهای ۱۲ تا ۱۵ دی به‌عنوان چهار روز نمونه در زمستان و در شرایط آب و هوایی شهر یزد انجام گرفته است. شرایط آب و هوایی یزد براساس اطلاعات سازمان هواشناسی و از سایت رسمی انرژی‌پلاس[۱۰] استخراج شده است. در نمودار ۱ میزان تابش خورشید بر دیوار جنوبی اتاق و نیز دمای هوای شهر یزد در بازه زمانی مورد بررسی نشان داده شده است.

۵. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام‌شده در تحقیق حاضر، نتایج حاصله برای اتاق و شرایط مشابه، با نتایج شبیه‌سازی ژانگ و همکاران[۱۳] که توسط کد دینامیک سیال محاسباتی (CFD)[۶] به دست آمده مقایسه شده است. برای این منظور، اتاقی با ابعاد ۳ × ۳ × ۳ متر که دارای دیوارهایی به‌ضخامت ۲۰mm و ضریب هدایت گرمایی $0/2 W/(m^\circ C)$ است، انتخاب شد. شبیه‌سازی در حالت اول، بدون حضور مواد تغییر فازدهنده در اتاق و در شرایطی انجام شد که تمام دیوارها از مصالح معمولی با چگالی $850 kg/m^3$ و ظرفیت گرمایی $1000 J/(kg^\circ K)$ ساخته شده بود؛ در حالت دیگر در شرایطی که تمام دیوارها از لایه‌ی حاوی PCM با خواص ترموفیزیکی مشابه مصالح معمولی ولی گرمای نهان ذوب بالا و دمای ذوب $22^\circ C$ ساخته شده‌اند، شبیه‌سازی صورت گرفت. تغییرات دمایی محیط خارج در شبانه‌روز، سینوسی و بین $15^\circ C$ تا $25^\circ C$ فرض شده است. نتایج حاصله در نمودار ۲ که دمای سطح داخلی اتاق را در بازه ۲۴ ساعت نشان می‌دهد، ارائه



نمودار ۲. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی انرژی‌پلاس با نتایج ژانگ و همکاران.

شده است. چنان‌که ملاحظه می‌کنید نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی‌پلاس به نتایج شبیه‌سازی ژانگ و همکاران بسیار نزدیک است.

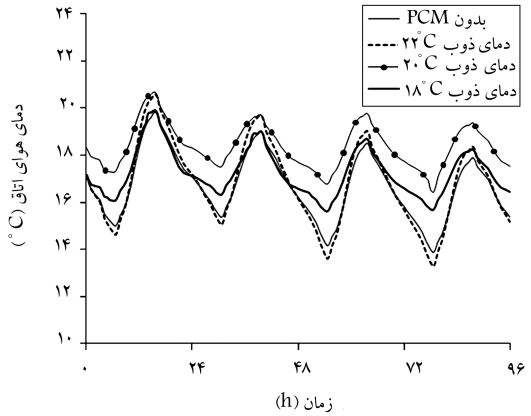
۶. نتایج

۱.۶. تأثیر نقطه‌ی ذوب PCM بر دمای هوای اتاق

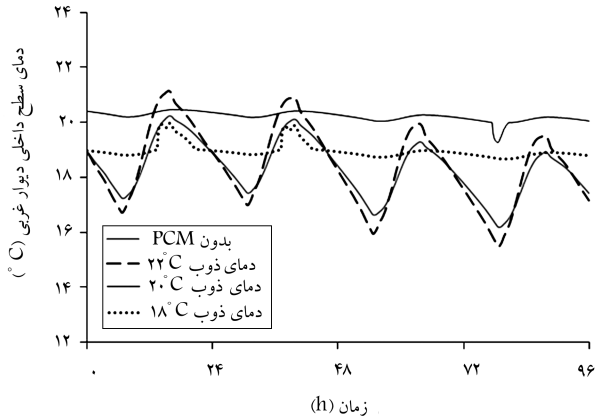
یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر عملکرد مواد تغییر فازدهنده در اتاق، دمای ذوب آن‌هاست. براساس نتایج تحقیقات انجام‌شده،[۱] برای بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق و نزدیک شدن آن به شرایط مطلوب مورد نظر، نقطه‌ی ذوب ماده‌ی تغییر فازدهنده باید در محدوده‌یی نزدیک به دمای مطلوب اتاق باشد. نقطه‌ی ذوب ایده‌آل برای PCM، با توجه به اقلیم هر منطقه تعیین می‌شود. اگر نقطه‌ی ذوب خیلی بالا باشد به‌دلیل نرسیدن دمای ماده‌ی تغییر فازدهنده به دمای ذوب، مقدار کمی از انرژی تابشی خورشید را می‌توان ذخیره کرد؛ اگر نقطه‌ی ذوب خیلی پایین باشد ممکن است باعث کم‌تر شدن دمای اتاق در شب نسبت به حالت بدون PCM شود.[۱۴]

در تحقیق حاضر تأثیر کاربرد مواد تغییر فازدهنده با سه نقطه‌ی ذوب مختلف که همگی به دمای مطلوب آسایش حرارتی اتاق نزدیک‌اند، بررسی می‌شود. براساس استاندارد اشری[۱۵] برای یک اتاق مسکونی، دمای ۲۲°C دمای مطلوب زمستانی است. نتایج ارائه شده در نمودار ۳ نشان می‌دهد که PCM با دمای ذوب ۲۰°C بیشترین تأثیر را بر بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق دارد، به‌گونه‌یی که نوسانات دمایی اتاق به‌طور متوسط ۱٫۸°C در شبانه‌روز کاهش می‌یابد. همچنین کم‌ترین دمای اتاق تا ۳°C، بیشترین دمای اتاق تا ۱٫۳°C، و متوسط دمای اتاق تا ۱٫۷°C در شبانه‌روز افزایش می‌یابد (متوسط دمای اتاق براساس متوسط‌گیری از دمای هوای اتاق در تمام گام‌های زمانی به دست آمده است). مقایسه‌ی این نتایج با نتایج پیپو[۶] ــ مبنی بر این که دمای ایده‌آل ذوب این مواد، ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بالاتر از متوسط دمای اتاق است ــ همخوانی دارد. در مقابل ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۱۸°C تأثیر کم‌تری بر دمای هوای اتاق دارد به‌گونه‌یی که متوسط دمای هوای اتاق را کم‌تر از ۱°C در شبانه‌روز افزایش می‌دهد؛ ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۲°C نیز تأثیر محسوسی بر متوسط دمای هوای اتاق ندارد و فقط باعث کاهش جزئی دمای کمینه‌ی هوای اتاق و افزایش جزئی دمای بیشینه‌ی آن می‌شود.

علت عملکرد بهتر ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۰°C را می‌توان با



نمودار ۳. دمای هوای اتاق با کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب مختلف.



نمودار ۴. دمای سطح داخلی دیوار غربی با کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب مختلف.

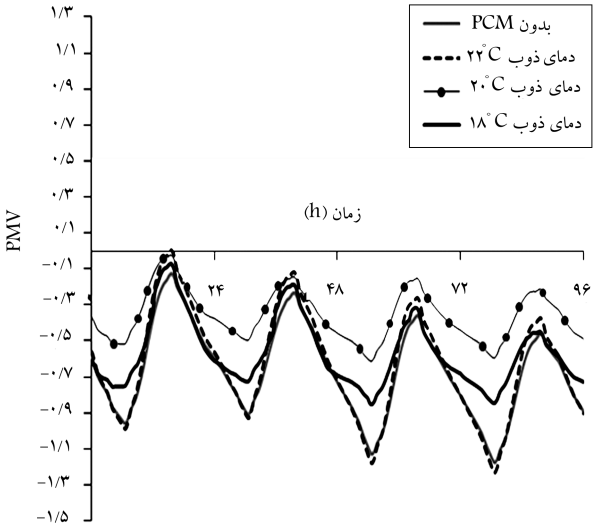
توجه به نمودار ۴ شرح داد. سطح داخلی دیوار غربی اتاق سهم زیادی از انرژی خورشید را با جذب تابش مستقیم خورشید از پنجره در ساعات ظهر و عصر، و جذب تابش پراکنده‌ی خورشید از پنجره و سطوح دیگر اتاق در طول روز، در خود ذخیره می‌کند. اگر این سطح با لایه‌یی از ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی دارای دمای ذوب ۲۰°C پوشانده شود، PCM موجود در این لایه بر اثر تابش خورشید ذوب می‌شود و دمای سطح داخلی دیوار غربی را در محدوده‌ی ۲۰ تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارد؛ همچنین دمای هوای اتاق از طریق انتقال حرارت بین این دیوار و هوای اتاق افزایش می‌یابد. اما اگر سطح داخلی دیوار غربی اتاق با ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی دارای دمای ذوب ۱۸°C پوشانده شود، دمای این سطح را در بیشتر ساعت‌های شبانه‌روز در محدوده‌ی ۱۸ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کند و باعث نزدیک‌تر کردن دمای هوای اتاق به این دما می‌شود. همچنین اگر این سطح با لایه‌یی از ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی دارای دمای ذوب ۲۲°C پوشانده شود، به‌دلیل نرسیدن ماده به مرحله‌ی ذوب تغییر فاز نمی‌دهد، و درنتیجه نمی‌تواند انرژی تابشی خورشیدی زیادی در خود ذخیره کند و فقط موجب افزایش جزئی دمای بیشینه و کاهش جزئی دمای کمینه‌ی هوای اتاق در طول شبانه‌روز می‌شود. در واقع کاربرد ماده‌یی با دمای ذوب ۲۲°C باعث افزایش دامنه‌ی نوسان دمای سطح داخلی دیوار می‌شود و از طریق انتقال حرارت بین این سطح و هوای اتاق، دامنه‌ی نوسان دمای هوای اتاق را نیز

افزایش می‌دهد. در نمودار ۴، باقی ماندن دمای سطح داخلی دیوار غربی اتاق برای مدتی طولانی در محدوده‌ی دمای ذوب مواد تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۱۸°C و ۲۰°C به‌وضوح قابل مشاهده است.

در این بخش ذکر این نکته ضروری است که دمای ذوب ماده‌ی تغییر فازدهنده فقط از طریق تبادل حرارتی سطوح حاوی این مواد با هوای اتاق و در نتیجه نزدیک‌تر کردن دمای هوای اتاق به دمای مطلوب آسایش حرارتی، بر شرایط آسایش حرارتی اتاق تأثیر نمی‌گذارد بلکه نگه‌داشتن دمای سطوح داخلی دیوارهای اتاق برای مدتی طولانی در محدوده‌ی دمای آسایش حرارتی و نیزکاهش قابل توجه نوسانات دمایی این سطوح، این امکان را فراهم می‌سازد که از طریق تبادل حرارتی و تابش گرمایی بین سطوح داخلی دیوارها و بدن افراد، شرایط آسایش حرارتی مناسب‌تری برای آنان ایجاد شود.[۱۶] محققین در بررسی‌های دیگر نیز با انجام یک سری آزمایش به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.[۱۷]

۲.۶. تأثیر نقطه‌ی ذوب PCM بر آسایش حرارتی اتاق

در بخش ۱.۶. تأثیر تغییر دمای ذوب ماده‌ی تغییر فازدهنده بر دمای هوای اتاق ــ شامل نوسانات دمایی، بیشینه و کمینه‌ی دما، و متوسط دمای هوای اتاق در شبانه‌روز ــ بررسی شد. در این بخش با استفاده از مدل آسایش فنگر[۷]، اثر تغییر نقطه‌ی ذوب PCM بر شرایط آسایش حرارتی افراد حاضر در اتاق بررسی می‌شود. اساس این مدل بر تحلیلی استوار است که در آن همه‌ی سازوکارهای دفع حرارت مانند انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشعی از سطح لباس، دفع حرارت از طریق تعرق و تنفس و انتقال حرارت از پوست به لباس لحاظ می‌شود. پارامتر متوسط رأی افراد (PMV)[۸] به‌عنوان شاخص این مدل شناخته می‌شود. مقدار PMV بین ۳- تا ۳+ است که طبق دستورالعمل تأسیساتی اشری[۱۵] هر عدد صحیح بین این دو مقدار به این صورت به احساس حرارتی ساکنین مربوط شده است: ۳+ خیلی گرم، ۲+ گرم، ۱+ کمی گرم، ۰ خنثی، ۱- کمی سرد، ۲- سرد و ۳- خیلی سرد. استاندارد آسایش حرارتی ایزو ۷۷۳۰، محدوده‌ی $-0.5 < PMV < +0.5$ را به‌عنوان محدوده‌ی قابل قبول برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند (نمودار ۵). در این



نمودار ۵. چگونگی تغییر شاخص PMV با کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب مختلف.

تحقیق فردی با میزان مقاومت حرارتی لباس ۱Clo (هر واحد Clo تقریباً معادل با $0.155 m^2/kW$ است) که در استاندارد اشری فردی است با لباس آستین‌بلند، و با میزان انتقال حرارت ۱۲۶W/person (در فردی ایستاده و با فعالیت بدنی سبک)، برای بررسی شرایط آسایش حرارتی اتاق مورد نظر انتخاب شده است. در نمودار ۵، مقدار PMV برای سه دمای ذوب مختلف PCM گزارش شده است. چنان که مشاهده می‌شود، کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۰°C باعث می‌شود که در بیشتر ساعات شبانه‌روز مقدار PMV در محدوده‌ی ۰/۵- تا ۰ قرار داشته باشد؛ این نکته حاکی از آن است که هوای اتاق در شرایط مطلوب آسایش حرارتی است و استفاده از وسایل گرمایشی ضروری نیست، در حالی که کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۲°C باعث می‌شود که در بسیاری از ساعات شبانه‌روز هوای اتاق در محدوده‌ی سرد تا کمی سرد قرار بگیرد و درنتیجه استفاده از وسایل گرمایشی ضرورت یابد. بحرانی‌ترین وضعیت در ساعات ابتدایی روز و بین ساعت ۵ تا ۷ صبح مشاهده می‌شود. علت عملکرد نامطلوب ماده‌ی دارای دمای ذوب ۲۲°C، نرسیدن دمای سطوح داخلی اتاق به ۲۲°C و درنتیجه ذوب نشدن این ماده است. این مطلب در بخش ۱.۶. نوشتار حاضر به‌همراه نمودار، بررسی و شرح داده شده است. در نمودار ۵ ملاحظه می‌کنید که ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۱۸°C عملکردی بهتر از ماده‌ی دارای دمای ذوب ۲۲°C دارد، و علت آن رسیدن دمای سطوح داخلی اتاق به بیش از ۱۸°C و درنتیجه ذوب شدن این ماده و ذخیره‌ی انرژی گرمای نهان در آن است. اما پایین بودن دمای ذوب در این حالت باعث می‌شود که دمای هوای اتاق از طریق انتقال حرارت با سطوح داخلی اتاق، پایین آمده و از محدوده‌ی آسایش حرارتی فاصله بگیرد.

نتایج به دست آمده در این بخش که با استفاده از مدل آسایش حرارتی فنگر به دست آمده، با نتایج بخش ۱.۶. مقاله، هم‌خوانی کامل دارد و نشان می‌دهد که کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۰°C، بیشترین تأثیر را بر بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق خواهد داشت.

۳.۶. تأثیر ضریب هدایت حرارتی بر دمای هوای اتاق

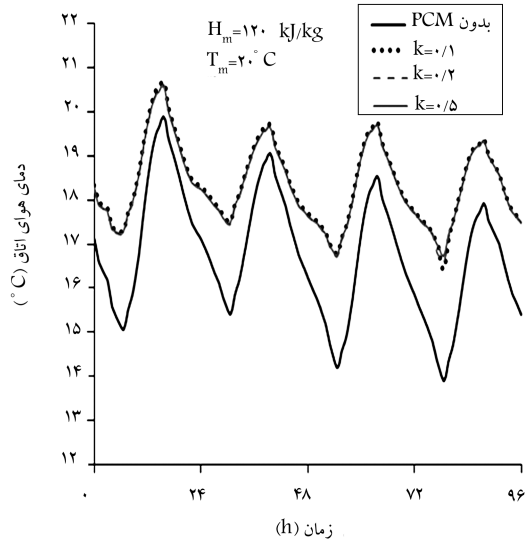
در این بخش تأثیر ضریب هدایت حرارتی بر عملکرد مواد تغییرفازدهنده را به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در مسائل انتقال حرارت بررسی می‌کنیم. مواد تغییر فازدهنده در شبانه‌روز ممکن است فرایند ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی را یک‌بار به‌طور کامل طی کنند. به‌منظور رسیدن به بیشترین راندمان، در هنگام ذخیره‌سازی انرژی گرمایی باید تمام PCM ذوب شود، و هنگام آزادسازی انرژی گرمایی نیز باید تمام PCM جامد شود. فرایند ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی مواد تغییر فازدهنده به مقدار هدایت گرمایی آنها وابسته است. در تحقیقات صورت گرفته مشخص شد که بیشتر موادی که به‌عنوان مواد تغییر فازدهنده در ساختمان به کار می‌روند، هدایت گرمایی پایینی دارند (از ۰/۱ تا $0.3 W/(m^\circ C)$) که می‌تواند محدودیت‌هایی در استفاده از این مواد در ساختمان ایجاد کند.[۱۸] محققین در مطالعه‌ی خود با بررسی سه ضریب هدایت گرمایی مختلف در شرایط آب و هوایی پکن، به این نتیجه رسیدند که تغییرات هدایت گرمایی تأثیرکمی بر دمای هوای اتاق خواهد داشت. در این تحقیق تأثیر سه ضریب هدایت گرمایی ۰/۱، ۰/۲ و $0.5 W/(m^\circ C)$ بر دمای هوای اتاق شبیه‌سازی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب هدایت گرمایی ۰/۲ همان ضریب هدایت واقعی ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی انتخاب شده در این تحقیق است (جدول ۱) و ضرایب ۰/۱ و ۰/۵ به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات ضریب هدایت گرمایی ماده بر دمای هوای اتاق انتخاب شده‌اند. ضرایب هدایت گرمایی مورد بررسی

در اینجا چنان انتخاب شده است که نزدیک به ضریب هدایت گرمایی واقعی ماده‌ی مورد بررسی باشند (نمودار ۶).

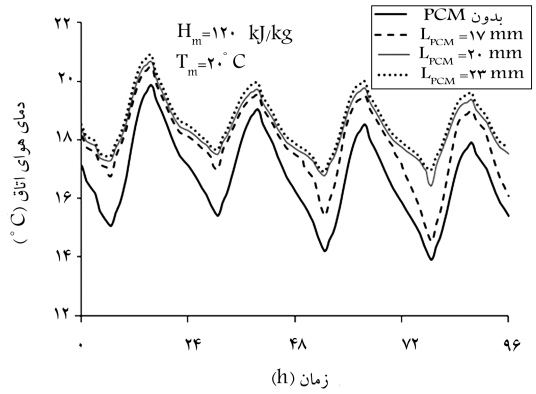
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییرات هدایت گرمایی ماده‌ی تغییر فازدهنده، تأثیر بسیار کمی بر دمای هوای اتاق داشته و تنها اثری جزئی بر دمای هوای اتاق در روز ۱۵ دی و در هنگام تخلیه‌ی شارژ انرژی (انجماد) دیده می‌شود. علت تأثیر کم تغییرات ضریب هدایت بر دمای هوای اتاق را می‌توان در شدت نوسانات دمایی کویر جست‌وجو کرد. پایین بودن ضریب هدایت گرمایی باعث می‌شود که انتقال حرارت در ماده‌ی تغییر فازدهنده از لایه‌یی به لایه‌ی دیگر به‌خوبی انجام نشود و با کاهش نرخ شارژ و انجماد آنها، این مواد نتوانند از حداکثر ظرفیت گرمایی خود استفاده کنند. اما نوسانات زیاد دمایی شهر یزد که در شرایط مورد بررسی در این تحقیق به بیش از ۲۰°C در شبانه‌روز می‌رسد (نمودار ۱)، می‌تواند نرخ شارژ و تخلیه‌ی شارژ انرژی را افزایش داده و تأثیر تغییرات ضریب هدایت گرمایی را بر دمای هوای اتاق به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. اثر ناچیز تغییرات ضریب گرمایی بر دمای هوای اتاق با نتایج ژانگ و همکارن[۱۳] که برای شهر پکن به دست آمده است، تشابه زیادی دارد.

۴.۶. تأثیر ضخامت لایه‌ی PCM بر دمای هوای اتاق

برای کاهش مقدار ماده‌ی تغییر فازدهنده و درنتیجه کاهش هزینه و نیز بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق، تعیین ضخامت مناسب برای لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده که در دیوارها به کار گرفته شده ضروری است. ازجمله تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق لین[۱۹] اشاره کرد. او در آزمایش خود به این نتیجه رسید که عملکرد یک لایه‌ی نازک با ضخامتی کم اما سطحی بزرگ، بهتر از لایه‌یی ضخیم با سطحی کوچک است زیرا سطح بزرگ باعث افزایش نرخ ذخیره و آزادسازی انرژی می‌شود و تا حد زیادی کم‌بودن ضریب هدایت گرمایی در این مواد را جبران می‌کند. محققین دیگری نیز در مطالعات خود[۱] به نتیجه‌یی مشابه با نتیجه‌ی لین دست یافتند. با توجه به این نکته که ضخامت متداول گزارش شده برای PCM در مراجع مختلف در محدوده ۲۰ mm است، در این تحقیق ضخامت ماده‌ی تغییر فازدهنده



نمودار ۶. دمای هوای اتاق با لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با ضریب هدایت‌های مختلف (W/m°C).

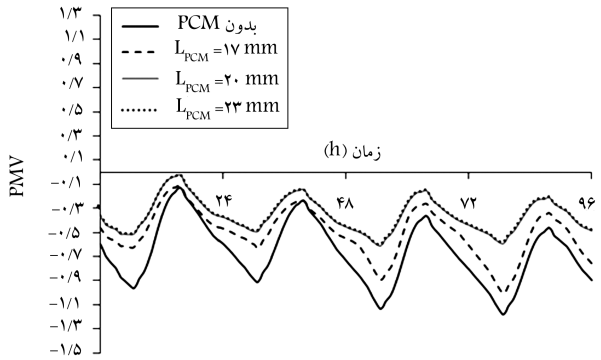


نمودار ۷. دمای هوای اتاق با کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با ضخامت‌های مختلف.

از ۱۲mm تا ۲۸mm مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از تأثیر کاربرد لایه‌ی PCM با سه ضخامت ۱۷mm، ۲۰ mm و ۲۳mm بر دمای هوای اتاق گزارش شده است (نمودار ۷). ضخامت ۱۷mm باعث افزایش متوسط دمای هوای اتاق به‌میزان ۱°C در شبانه‌روز می‌شود در حالی که ضخامت ۲۰ mm باعث افزایش متوسط دمای اتاق به‌میزان ۱٫۸°C در شبانه‌روز می‌شود. در نمودار ۷ ملاحظه می‌کنید که با افزایش ضخامت لایه از ۱۷mm به ۲۰ mm، شرایط آسایش حرارتی اتاق به‌طور محسوسی بهبود می‌یابد اما با افزایش ضخامت از ۲۰ mm به ۲۳mm تغییر محسوسی در دمای هوای اتاق ایجاد نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط مورد بررسی در این تحقیق، بهترین ضخامت ۲۰ mm است که در آن ضمن کاهش هزینه، بهترین شرایط آسایش حرارتی اتاق تأمین شود.

۵.۶. تأثیر ضخامت PCM بر آسایش حرارتی اتاق

در بخش ۴.۶. تأثیر تغییر ضخامت ماده‌ی تغییر فازدهنده بر دمای هوای اتاق بررسی شد و ضخامتی بهینه برای لایه‌ی حاوی این ماده به دست آمد، به‌گونه‌یی که با در نظر گرفتن کم‌ترین هزینه‌ی اقتصادی بهترین شرایط آسایش حرارتی اتاق حاصل شود. در این بخش با استفاده از مدل آسایش حرارتی فنگر، اثر تغییر ضخامت PCM بر شرایط آسایش حرارتی افراد حاضر در اتاق بررسی می‌شود. مشخصات در نظر گرفته شده برای فرد، همانند مشخصات فرد انتخاب شده در بخش ۲.۶. مقاله است (نمودار ۸). چنان که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود اگر در اتاق از ماده‌ی تغییر فازدهنده استفاده نشود، مقدار PMV در بیشتر ساعت‌های شبانه‌روز، خارج از محدوده‌ی آسایش حرارتی اتاق خواهد بود به‌گونه‌یی که در ساعت‌های ابتدایی روز که بحرانی‌ترین زمان است، هوای اتاق در حالت سرد قرار می‌گیرد. کاربرد لایه‌ی PCM با ضخامت ۱۷mm در سطوح داخلی اتاق می‌تواند شرایط آسایش حرارتی اتاق را به‌طور نسبی بهبود بخشد. کاربرد لایه‌یی به‌ضخامت ۲۰ mm باعث افزایش مقدار PMV، به‌ویژه در ساعت‌های بحرانی ابتدای روز می‌شود به‌گونه‌یی که مقدار PMV در بیشتر ساعت‌های شبانه‌روز بین ۰٫۵- تا ۰ است. این مقدار به‌معنی عدم نیاز به استفاده از وسایل گرمایشی در اتاق است. چنان که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت لایه‌ی حاوی ماده‌ی تغییر فازدهنده از ۲۰ mm به ۲۳mm، تأثیر محسوسی بر مقدار PMV ندارد. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج بخش ۴.۶. مقاله، همخوانی کامل دارد و نشان می‌دهد که ضخامت ۲۰ mm برای لایه‌ی حاوی PCM است.



نمودار ۸. چگونگی تغییر شاخص PMV با کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با ضخامت‌های مختلف.

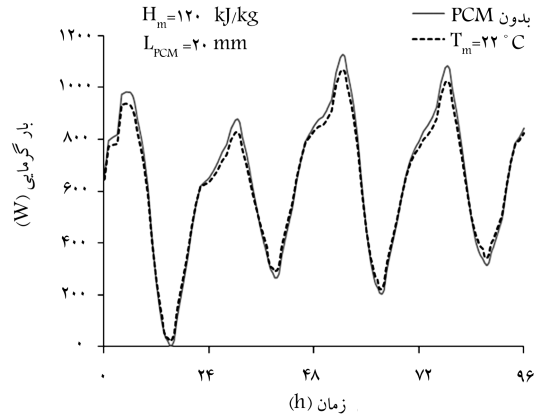
۶.۶. بارگرمایی و مصرف انرژی

ساختمان‌ها یکی از عمده‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی در جهان هستند. حدود ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی در جهان، در این بخش مصرف می‌شود و از این میان تقریباً نیمی از انرژی مصرفی در ساختمان، صرف سرمایش و گرمایش فضا می‌شود. این مطلب نشان‌گر اهمیتِ یافتن راه‌هایی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان است. انرژی گرمایی نهان ذخیره‌شده در ماده‌ی تغییر فازدهنده بخشی از انرژی گرمایی مورد نیاز اتاق را تأمین می‌کند و باعث کاهش مصرف انرژی در مقایسه با اتاق بدون کاربرد این مواد می‌شود. مطالعات انجام شده[۲۰] نشان داد که با افزایش ضخامت لایه‌ی PCM به کار رفته در سطوح داخلی اتاق و نیز افزایش آنتالپی تغییر فاز آن می‌توان از انرژی لازم برای گرمایش اتاق در فصل زمستان کاست؛ براین اساس با کاربرد لایه‌ی تغییر فازدهنده به‌ضخامت ۳۰mm و آنتالپی تغییر فاز ۶۰kJ/kg، مصرف انرژی گرمایی در اتاقی نمونه در شهر پکن معادل ۱۰ درصد یا بیشتر در فصل زمستان کاهش می‌یابد. محققین دریافتند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار PCM درخصوص کاهش مصرف انرژی، نقطه‌ی انجماد آن است.[۲۱] آنها در تحقیق خود نشان دادند که نقطه‌ی انجماد این مواد باید بالا باشد اما، این دما باید به دمای مورد نظر برای اتاق نیز نزدیک باشد.

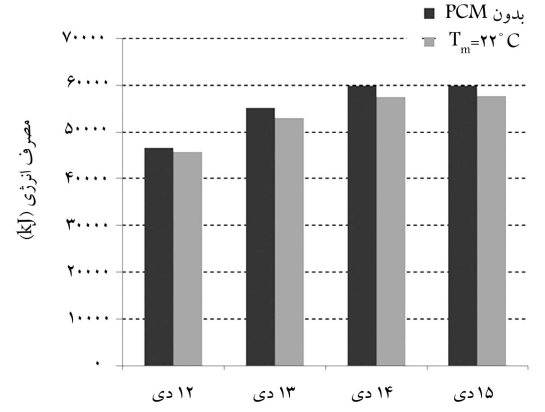
در این تحقیق از نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای بررسی تأثیر کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده بر بارگرمایی و مصرف انرژی گرمایی یک اتاق نمونه در شهر یزد و در فصل زمستان استفاده شده است. با شرط ثابت بودن دمای اتاق (در این تحقیق ۲۲°C در نظر گرفته شده است)، بالانس حرارتی برای هوای اتاق چنین نوشته می‌شود:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_i} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N=surfaces} \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{vent} \qquad (۴)$$

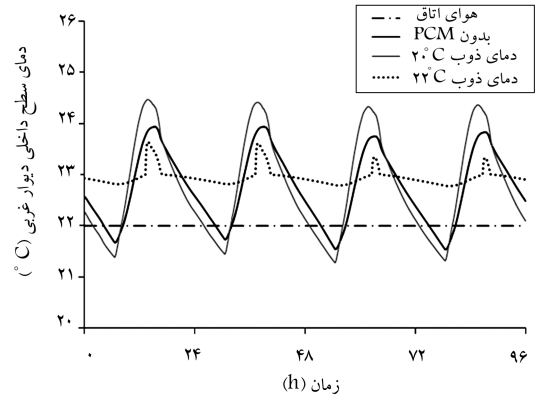
که در آن $\dot{Q}_{vent}$ انتقال حرارت ناشی از تهویه‌ی هوای اتاق (در این تحقیق تهویه‌ی هوای اتاق یک بار در ساعت انجام می‌شود)، $\sum_{i=1}^{N=surfaces} \dot{Q}_{conv}$ مجموع انتقال حرارت جابه‌جایی از سطوح داخلی اتاق، $\sum_{i=1}^{N_i} \dot{Q}_i$ مجموع بارهای داخلی اتاق مانند گرمای آزاد شده از بدن افراد حاضر در اتاق (در تحقیق حاضر از اثر بارهای داخلی صرف‌نظر شده است)، و $\dot{Q}_{sys}$ توان خروجی سیستم گرمایشی است. $\dot{Q}_{sys}$ مقدار گرمایی است که باید توسط وسایل گرمایشی تأمین شود تا دمای اتاق در ۲۲°C ثابت باقی بماند. مقدار $\dot{Q}_{sys}$ در نمودار ۹، بارگرمایی اتاق برای دو حالت با کاربرد



نمودار ۹. بارگرمایی اتاق با/بدون کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده.



نمودار ۱۰. مصرف انرژی اتاق با/بدون کاربرد لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده.



نمودار ۱۱. دمای سطح داخلی دیوار غربی در شرایطی که دمای هوای اتاق در ۲۲°C ثابت باشد.

PCM و بدون کاربرد آن در اتاق، نشان داده شده است. با انتگرال گیری از $\dot{Q}_{sys}$ در هرگام زمانی، مقدار انرژی گرمایی مصرفی اتاق در هرگام برحسب واحد ژول به دست می‌آید:

$$Q(J) = \int_{t=0}^{t} \dot{Q}_{sys} dt \qquad (۵)$$

با جمع مقادیر مصرف انرژی در تمام گام‌های زمانی، مقدارکل مصرف انرژی گرمایی اتاق در هر شبانه‌روز محاسبه می‌شود. مقدارکل مصرف انرژی گرمایی اتاق برحسب

کیلوژول برای دو حالت با کاربرد PCM و بدون کاربرد آن در اتاق، در نمودار ۱۰ نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر بررسی عملکرد مواد تغییر فازدهنده با نقطه‌ی انجماد ۱۹°C تا ۲۴°C، نشان داد که بیشترین تأثیر در کاهش بارگرمایی و مصرف انرژی اتاق را ماده‌یی با دمای انجماد ۲۳°C خواهد داشت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ماده‌ی تغییر فازدهنده‌یی با نقطه‌ی انجماد ۲۳°C و نقطه‌ی ذوب ۲۲°C در نمودار ۹ مشاهده می‌شود. در این نمودار میزان بارگرمایی لازم برای نگه‌داشتن دمای هوای اتاق در دمای مطلوب آسایش حرارتی (۲۲°C)، در شرایط آب و هوایی ۱۲ تا ۱۵ دی‌ماه شهر یزد، نشان داده شده است. نتایج نشان داد که PCM با دمای انجماد ۲۳°C، بیشترین کاهش در بارگرمایی مورد نیاز اتاق را موجب می‌شود به‌گونه‌یی که در بازه زمانی مورد بررسی به‌طور متوسط معادل ۵/۷ درصد (۵۶ وات) بارگرمایی اتاق در شبانه‌روز کاهش می‌یابد (مقدار متوسط با متوسط‌گیری از حداکثر بارگرمایی در روزهای مورد بررسی به دست آمده است). در تشریح علت این کاهش می‌توان گفت که PCM با دمای انجماد ۲۳°C و دمای ذوب ۲۲°C، باعث باقی ماندن دمای دیوار غربی اتاق در دمایی نزدیک به ۲۳°C، در بیشترین ساعات شبانه‌روز می‌شود (نمودار ۱۱). علت این موضوع طولانی بودن فرایند تغییر فاز این ماده به‌دلیل بالا بودن ظرفیت گرمای نهان آن است. انرژی گرمایی ذخیره شده در سطح داخلی دیوار از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی، به هوای اتاق منتقل شده و دمای هوای اتاق را افزایش می‌دهد که این مطلب باعث کاهش بارگرمایی مورد نیاز اتاق می‌شود. این در حالی است که لایه‌ی ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای انجماد ۲۱°C و دمای ذوب ۲۰°C، به‌دلیل این که دمای هوای اتاق بالاتر از دمای انجماد آن است، به مرحله‌ی تغییر فاز نرسیده و نمی‌تواند بارگرمایی اتاق را کاهش دهد. به‌طور مشابه می‌توان این تحلیل را برای نمودار مصرف انرژی اتاق نیز انجام داد. در نمودار ۱۰ میزان مصرف انرژی برای گرمایش اتاق در شبانه‌روز ارائه شده است. براساس این نتایج، ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای انجماد ۲۳°C، میزان مصرف انرژی گرمایی اتاق را به‌طور متوسط ۳/۳ درصد (۱۸۵۴ کیلوژول) در شبانه‌روز کاهش می‌دهد (مقدار متوسط بامتوسط‌گیری از انرژی مصرفی در روزهای مورد بررسی به دست آمده است).

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیرکاربرد مواد تغییر فازدهنده در ساختمان بر شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی در اقلیم کویری یزد بررسی شد. چهار روز ۱۲ تا ۱۵ دی ماه شهر یزد به‌عنوان چهار روز نمونه از فصل زمستان برای تجزیه و تحلیل نتایج، انتخاب شد. نتایج حاصل از به‌کارگیری ماده‌ی تغییر فازدهنده در دیوارهای اتاق عبارت است از:

۱. PCM با دمای ذوب ۲۰°C، بیشترین تأثیر را بر دمای هوای اتاق دارد به‌گونه‌یی که دمای کمینه‌ی هوای اتاق را حداکثر تا ۲۳°C و دمای متوسط هوای اتاق را ۱/۸°C در شبانه‌روز افزایش می‌دهد.

۲. کاربرد ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۰°C به‌لحاظ آسایش حرارتی بهترین عملکرد را دارد به‌گونه‌یی که باعث می‌شود در بیشتر ساعات شبانه‌روز مقدار PMV در محدوده‌ی ۰/۵- تا ۰ قرار داشته باشد. این نکته حاکی از شرایط مطلوب آسایش حرارتی هوای اتاق و بی‌نیازی ازکاربرد وسایل گرمایشی است.

۳. ضریب هدایت گرمایی PCM تأثیر چندانی بر دمای هوای اتاق ندارد و تغییر آن اثرکمی بر دمای هوای اتاق به‌هنگام آزادسازی انرژی (انجماد) باقی می‌گذارد.

۴. برای کاهش مقدار PCM به کار رفته در دیوارها و کاهش هزینه‌ها و نیز بهبود شرایط آسایش حرارتی اتاق، کاربرد لایه‌یی از این مواد به‌ضخامت ۲۰mm بهترین نتیجه را در بر دارد.

۵. کاربرد PCM به ضخامت ۲۰mm در دیوارهای ساختمان باعث افزایش مقدار PMV به‌ویژه در ساعات بحرانی ابتدای روز می‌شود، به‌گونه‌یی که مقدار PMV در بیشتر ساعات شبانه‌روز مقداری بین ۰/۵- تا ۰ دارد.

۶. ماده‌ی تغییر فازدهنده با دمای انجماد ۲۳°C، بیشترین کاهش در میزان مصرف انرژی و بارگرمایی اتاق را به همراه دارد، به‌گونه‌یی که بیشینه بارگرمایی اتاق در شبانه‌روز را به‌طور متوسط ۵/۷ درصد و مصرف انرژی اتاق در شبانه‌روز را به‌طور متوسط ۳/۳ درصد کاهش می‌دهد.

پانوشت‌ها

1. phase change material (PCM)
2. energy Plus
3. heat balance (HB)
4. conduction finite difference
5. enthalpy temperature function (ETF)
6. computational fluid dynamics (CFD)
7. Fanger comfort model
8. predicted mean vote (PMV)

منابع (References)

1. Zhou, G.B., Zhang, Y.P., Lin, K.P. and Xiao, W. "Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates", *Renewable Energy*, **33**, pp. 1228-1236 (2008).
2. Arnault, A., Mathieu-Potvin, F. and Gosselin, L. "Internal surfaces including phase change materials for passive optimal shift of solar heat gain", *International Journal of Thermal Sciences*, **49**, pp. 2148-2156 (2010).
3. Izquierdo-Barrientos, M.A., Belmonte, J.F., Rodríguez-Sánchez, D., Molina, A.E. and Almendros-Ibeáñez, J.A. "A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)", *Applied Thermal Engineering*, **47**, pp. 73-85 (2012).
4. Zhang, Y.P., Lin, K.P., Yang, R., Di, H.F. and Jiang, Y. "Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings", *Energy and Buildings*, **38**, pp. 1262-1269 (2006).

5. Xu, X., Zhang, Y.P., Di, H.F., Lin, K.P. and Yang, R. "Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings", *Energy and Buildings,* **37**(10), pp. 1084-91 (2005).
6. Peippo, K., Kauranen, P. and Lund, P.D. "Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating", *Energy and Buildings,* **17**, pp. 259-270 (1991).
7. Kuznik, F., Virgone, J. and Noel, J. "Optimization of a phase change material wallboard for building use", *Applied Thermal Engineering,* **28**, pp. 1291-1298 (2008).
8. Kianparvar, S. "Application of PCM in room walls and evaluation of its influence in reducing thermal energy consumption in winter", M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University (2009).
9. Maleki Pirbazari, M. "Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage", M.S. thesis, Department of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University (2011).
10. www.apps1.eere.energy.gov/buildings /energyplus.
11. ASHRAE Handbook- Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2009).
12. Davoodi, F. "Energy performance evaluation of different glazings in buildings for Iranian climates", M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University (2011).
13. Zhang, Y.P., Zhou, G.B., Lin, K.P., Zhang, Q. and Di, H.F. "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook", *Building and Environment*, **42**, pp. 2197-2209 (2007).
14. Zhang, Y.P., Xu, X., Di, H.F., Lin, K.P. and Yang, R. "Experimental study on the thermal performance of the shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings", *J Solar Energy Eng Trans ASME*, **128**(2), pp. 255-7 (2006).
15. ASHRAE, HVAC., Fundamentals handbook, Atlanta (2005).
16. Ahmad, M., Bontemps, A., Salle′e, H. and Quenard, D. "Experimental investigation and computer simulation of thermal behavior of wallboards containing a phase change material", *Energy and Buildings,* **38**, pp. 357-366 (2006).
17. Kuznik, F., Virgone, J. and Johannes, K. "In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard", *Renewable Energy*, **36**, pp. pp. 1458-1462 (2011).
18. Jaworski, M. and Abeid, S. "Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications", *Journal of Power Technologies*, **91**(2), pp. 49-53 (2011).
19. Lin, K., Lin, K.P., Zhang, Y.P., Xu, X., Di, H.F., Yang R. and Qin, P. "Modeling and simulation of underfloor electric heating system with shape-stabilized PCM plates", *Building and Environment*, **39**, pp. 1427-1434 (2004).
20. Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H. and Wang, Ch. "A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard", *Energy and Buildings*, **40**, pp. 882-890 (2008).
21. Heim, D. and Clarke, J.A. "Numerical modeling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r", *Energy and Buildings,* **36**, pp. 795-805 (2004).