

مدلسازی کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در ساختمان با هدف کاهش مصرف انرژی

۱ نسیم دهقانی،^۲ سید مجتبی صدر عاملی*

چکیده

ساختمان‌ها در سطح جهانی ۴۰ درصد از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند و بخش قابل توجهی از این انرژی سهم کنترل دمای ساختمان می‌شود. یکی از راه حل‌های جدید جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان و استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در مصالح و اجزای ساختمان می‌باشد. در این مطالعه، کارایی حرارتی یک لایه ماده تغییر فاز دهنده آلی در سقف و دیوارهای یک ساختمان در دو اقلیم گرم-مرطوب (بوشهر) و سرد-خشک (همدان) با هدف کاهش مصرف انرژی، بهبود شرایط آسایش داخلی، کاهش نوسان دمای داخلی ساختمان و یکنواخت کردن مصرف انرژی ساختمان در طول شبانه روز شبیه‌سازی شد. از این رو مدل یک بعدی انتقال حرارت با روش تفاضل محدود صریح و با استفاده از نرم افزار ++C حل و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی سایر تحقیقات مشابه مقایسه شد. ماده‌ی تغییر فاز دهنده، پارافین C18 با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه‌ی سانتیگراد است. به منظور ارزیابی شرایط بهینه‌ی کاربرد ماده تغییر فاز دهنده، ضخامت‌های یک، دو و سه سانتی‌متری ماده‌ی تغییر فاز دهنده، شرایط متفاوت آب و هوایی در دو شهر بوشهر و همدان در طول یک سال و جهت گیری‌های متفاوت دیوار مطالعه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضخامت سه سانتی‌متری بهترین عملکرد را دارا می‌باشد و استفاده از یک لایه‌ی سه سانتی‌متری ماده تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه سانتیگراد، شار حرارتی ورودی به ساختمان از طریق سقف را تا ۳۰ درصد در بوشهر و ۴۷ درصد در همدان در فصل تابستان کاهش می‌دهد. همچنین حداکثر دمای داخل ساختمان در فصل بهار در هر دو اقلیم ۲ درجه سانتیگراد و در فصل تابستان به ترتیب ۴ و ۲ درجه در همدان و بوشهر کاهش یافته است. بهترین عملکرد ماده‌ی تغییر فاز دهنده در دیوار، مربوط به دیوار جنوبی و در ماه‌هایی از سال است که میانگین دمایی نزدیک به دمای تغییر فاز دارند.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰ / ۲ / ۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۰ / ۵ / ۱۷

کلمات کلیدی:

مواد تغییر فاز دهنده، مدیریت گرمایی در ساختمان، ذخیره‌ی انرژی، کنترل دمایی.

Nasim.dehqani@modares.ir

sadrameli@modares.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول)

۱. مقدمه

طی سال‌های اخیر، افزایش نشر گازهای گلخانه‌ای و نیز افزایش قیمت سوخت، تلاش برای یافتن منابع جدید و تجدیدپذیر انرژی را موجب گردیده است (احمد و ژانگ، ۲۰۲۰). در بسیاری از نقاط جهان انرژی مستقیم خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی جدید مورد توجه قرار گرفته است، اما یکی از گزینه‌های مورد تحقیق، توسعه ابزارهای ذخیره انرژی است که به اندازه توسعه منابع جدید انرژی اهمیت پیدا کرده است (تائو و لینگ هی، ۲۰۱۸). ذخیره انرژی در شکل‌های مناسب و قابل تبدیل به فرم‌های مورد نیاز، چالش امروزه حوزه فناوری انرژی است و یکی از روش‌های آینده‌نگرانه در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۱ است. مواد تغییر فاز دهنده، موادی هستند که مازاد انرژی حرارتی محیط اطراف خود را در زمان عدم نیاز، بر پایه گرمای نهان ذوب و انجماد در خود ذخیره می‌کنند و در زمان نیاز، دوباره به محیط باز می‌گردانند و با این کار به طور کاملاً هوشمند محیط اطراف خود را مجبور می‌کنند که در درجه حرارت معینی موسوم به دمای پافشاری باقی بماند (نظیر و همکاران، ۲۰۱۹ – عمیر و همکاران، ۲۰۱۹). از طرفی کارایی حرارتی ساختمان‌های ساخته شده با مواد تغییر فاز دهنده، به عوامل گوناگونی بستگی دارد. شرایط آب و هوایی (آهنگری و معرفت، ۲۰۱۹)، نوع ماده‌ی تغییر فاز دهنده (مارکاریان و فاضل پور، ۲۰۱۹)، دمای ذوب ماده‌ی تغییر فاز دهنده (سافاری و همکاران، ۲۰۱۷)، محدوده تغییرات دمای اجزای ساختمان شامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده (ضیا سیستانی و فاضل پور، ۲۰۱۹)، ضخامت ماده‌ی تغییر فاز دهنده (اریکی و همکاران، ۲۰۲۰) و جهت گیری ساختمان (کوز و مانیوگلا، ۲۰۱۹) از جمله مهمترین این عوامل هستند. از این رو عملکرد مثبت ماده تغییر فاز دهنده در بهبود شرایط آسایش و کاهش مصرف انرژی در ساختمان به بهینه‌سازی این عوامل در هر اقلیم بستگی دارد. تحقیقات محققان در این زمینه نشان داد مواد تغییر فاز دهنده‌ی آلی به علت سازگار بودن با مصالح ساختمانی متداول، تغییر حجم کم در هنگام تغییر فاز، موجود بودن در محدوده‌ی وسیع دمای تغییر فاز، پایداری شیمیایی و حرارتی و ... مطلوب‌ترین مواد تغییر فاز به منظور کاربرد در ساختمان هستند (راتور و شکلا، ۲۰۲۱).

1 Phase Change Material (PCM)

در مصرف انرژی و همچنین کاهش ۸ درصدی بار خنک‌کنندگی ساختمان شده است. معماران و همکاران (۱۳۹۶)، اثرات کاربرد مواد تغییرفازدهنده با نقطه ذوب مختلف (۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹ درجه سلسیوس) در ساختمان مسکونی را شبیه‌سازی کردند و تأثیر آنها بر دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به دست آمده ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۹ درجه سلسیوس، سبب کاهش مصرف انرژی سالانه و افزایش طول دوره گذر فصلی نسبت به کل سال شد و در نهایت ۳۸ روز در دوره گذر بهاری و ۲۹ روز در دوره گذر پاییزی با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه، منجر به عدم کارکرد سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی شد. شیجا و همکاران (۲۰۱۹) به منظور افزایش کارایی ذخیره‌ی حرارتی در ساختمان، یک دیوار ساختمانی آجری که درون حفره‌های آن ماده تغییر فاز دهنده به کار رفته است را به روش تفاضل محدود مدل‌سازی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد ماده تغییر فاز دهنده اینرسی حرارتی ساختمان را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد از طرف دیگر مطالعات آن‌ها نشان داد جهت‌گیری دیوار و موقعیت لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده از فاکتورهای مهم در کاهش حرارت ورودی به ساختمان هستند. چیلدس و همکاران (۲۰۱۲) به منظور صرفه‌جویی انرژی، یک لایه ماده تغییر فاز دهنده را در دیوار قرار دادند. نوع ماده تغییر فاز دهنده بررسی شده، میکرو کپسول‌های پارافین بودند که درون عایق سلولزی توزیع شدند. آنها در این تحقیق برای دستیابی به شرایط بهینه، متغیرهایی مانند آب و هوا، موقعیت ماده تغییر فاز دهنده در درون دیوار، نقطه‌ی ذوب ماده تغییر فاز دهنده و جهت‌گیری دیوار را تغییر دادند. نتایج نشان داد که افزودن ماده تغییر فاز دهنده به دیواری عایق شده، برای اقلیم‌های متفاوت بین ۳۳/۰-۱۷/۰ کیلووات ساعت به ازای هر متر مربع انرژی برق را در طول یک سال ذخیره خواهد کرد. اساید و همکاران (۲۰۲۰)، برای بهبود عملکرد حرارتی مصالح ساختمانی، درصد‌های مختلفی از ماده تغییر فاز دهنده را در بتن ساختمانی ادغام کرده و به روش تفاضل محدود مدل‌سازی کردند همچنین داده‌ها با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان دهنده‌ی کاهش هدایت حرارتی و افزایش ظرفیت ذخیره حرارتی بتن است که بهبود عملکرد حرارتی را نشان می‌دهد. ماچنیویچ و همکاران (۲۰۱۲)، برای ذخیره‌سازی حرارتی، یک لایه ماده تغییر فاز دهنده را به دیوار خارجی ساختمانی اضافه کردند. به منظور بهره‌برداری موثر از پتانسیل ذخیره‌سازی حرارتی ماده تغییر فاز دهنده، بهترین موقعیت قرار‌گیری ماده تغییر فاز دهنده ارزیابی شد. نتایج بررسی‌ها نشان دادند هر چه لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده به سطح داخلی دیوار نزدیک‌تر باشد، ذخیره‌سازی حرارتی توسط آن بهتر

صورت می‌گیرد و نوسانات دمایی کاهش می‌یابد. سان و همکاران (۲۰۱۹)، با هدف کاهش مصرف انرژی، ماده تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز ۲۹ درجه سانتی‌گراد را به دیوارهای یک ساختمان اضافه کرده و جهت گیری‌های مختلف دیوار را با درصدهای جرمی متفاوتی از ماده تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد در اقلیم مورد نظر (آمریکا) دیوار غربی بیشترین صرفه جویی انرژی را با ادغام ماده تغییر فاز دهنده نشان می‌دهد. سویی و همکاران (۲۰۱۷) از اختلاط میکروکپسول هایماده تغییر فاز دهنده در بتن برای کاهش دما و به تعویق انداختن پیک گرمایی استفاده کردند. ماده‌ی تغییر فاز دهنده در کره‌های توخالی فولادی قرار داده شد. سپس اتاقک‌های شامل این کامپوزیت با اتاقک‌های نمونه مقایسه شد و نتایج نشان دهنده ۳ تا ۶ درصد کاهش دمایی با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در دوره‌ی گرمایش است که کاهش مصرف انرژی را موجب شده است. گنی و العالم (۲۰۱۷)، یک لایه‌ماده تغییر فاز دهنده را به دیواره‌ی یک ساختمان اضافه کرده و بهترین محل قرار گیری آن را برای به دست آوردن حداقل مصرف انرژی و کاهش دمایی به صورت تجربی بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد هنگامی که محل قرار گیری ماده تغییر فاز دهنده به منبع گرما نزدیک است ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش را در دمای سطح موجب می‌شود. آردیتو و همکاران (۲۰۱۸) دو سیستم کنترل دمایی را با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در یک ساختمان شبیه‌سازی کردند. سیستم اول شامل یک لایه ماده تغییر فاز دهنده جامد است که در بالای یک لایه بازتابنده قرار گرفته است و سیستم دوم شامل یک لایه‌ی فومی از ماده تغییر فاز دهنده جامد است. عملکرد حرارتی سیستم با استفاده از مدل تفاضل محدود ارزیابی شد و نتایج نشان داد هر دو سیستم در کاهش انتقال حرارت میان ساختمان و محیط تاثیر مثبت دارند و باعث کاهش انرژی مصرفی با کاهش نوسانات دمایی شده‌اند. کریم و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی یک لایه ماده تغییر فاز دهنده را به کف ساختمانی اضافه کردند و نتایج با ساختمان نمونه مقایسه شد. ماده‌ی تغییر فاز دهنده ترکیبی از پلیمر و ۸۵ درصد پارافین با دمای تغییر فاز ۲۷ درجه سانتی‌گراد است. دما و شار گرما اندازه‌گیری شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و افزایش اینرسی حرارتی کف در مقایسه با کف مرجع مشاهده شد. یو و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سقف یک واحد مسکونی را به صورت عددی تحلیل و بررسی کردند. نتایج نشان داد بهترین ضخامت برای ماده تغییر فاز دهنده، ۳۰ میلی‌متر است اما بر حسب منطقه و اقلیم مورد بررسی دمای پافشاری ماده تغییر فاز دهنده برای مناطق خیلی سرد، سرد، تابستان گرم-زمستان سرد، تابستان گرم-زمستان خنک و معتدل به ترتیب

باید در محدود ۳۳-۳۱، ۳۶-۳۴، ۳۸-۳۶، ۳۶-۳۴ و ۳۱-۲۹ درجه سانتیگراد باشد. مازئو و همکاران (۲۰۱۷)، با مدل عددی به روش تفاضل محدود یک لایه ماده تغییر فاز دهنده را در دیوار خارجی ساختمانی با هدف افزایش اینرسی حرارتی ساختمان در دو آب و هوای متفاوت مدیترانه ای و حاره ای شبیه سازی کردند. چند ماده تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز متفاوت ارزیابی شد و نتایج نشان داد هنگامی که دمای تغییر فاز در زمستان ۱۶ درجه و در تابستان ۲۶ درجه سانتی گراد است کمترین میزان خروج انرژی از ساختمان وجود دارد و شرایط بهینه، انتخاب ماده ی تغییر فاز دهنده ای با متوسط دمای ذوب بین این دو مقدار است که امکان ذوب و انجماد را در فصول سرد و گرم تواما داشته باشد. رامارکریشان و همکاران (۲۰۱۶)، یک ساختمان را با میکروکپسوله های ماده تغییر فاز دهنده در اقلیم استرالیا بازسازی کردند. هدف از این مطالعه به حداکثر رساندن ظرفیت گرمای نهان برای بهبود آسایش داخلی و کاهش مصرف انرژی در تابستان بود. نتایج مطالعات آن ها نشان میدهد استفاده از تهویه ی طبیعی شب بر عملکرد ماده تغییر فاز دهنده تاثیر مطلوب دارد و بهینه سازی عوامل موثر بر ماده تغییر فاز دهنده در هر اقلیم بازده استفاده از مواد تغییر فاز دهنده را به طور قابل توجهی افزایش می دهد.

از جمله مسائل دیگری که پیش روی پژوهشگران است دستیابی به شرایط بهینه ی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در شرایط آب و هوایی متفاوت از جمله تابش خورشیدی، سرعت باد و شرایط دمایی مختص هر اقلیم است. به گونه ای که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در ساختمان های هر اقلیم تاثیر مثبت بر عملکرد حرارتی آن در فصول مختلف سال داشته باشد. از طرف دیگر به علت گستردگی مواد تغییر فاز دهنده و جدید بودن فناوری استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، شرایط بهینه ی کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در بسیاری از اقلیمها و در مورد مواد تغییر فاز دهنده ی بسیاری همچنان ناشناخته باقی مانده است لذا در این تحقیق به بررسی کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در سقف و دیوار ساختمان در دو اقلیم مختلف بوشهر و همدان پرداخته شد.

۲. مدل سازی

در این بخش روابط ریاضی جهت مدل سازی سقف و دیوارهای ساختمانی شامل یک لایه ماده تغییر فاز دهنده آلی با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه سانتیگراد در دو اقلیم گرم و مرطوب و سرد (شهر بوشهر و همدان) ارائه شده است. برای این منظور مدل انتقال حرارت یک بعدی با روش تفاضل محدود صریح در نظر

گرفته شد و کدنویسی با نرم افزار ++C انجام شد. اطلاعات هواشناسی شامل دمای هوا در هر ساعت، سرعت باد و جهت باد از سایت سازمان هواشناسی ایران و میانگین شرایط متوسط آب و هوایی و مدت تابش خورشید از پایگاه هواشناسی و در اسپارک^۱ تهیه شدند.

۱-۲. ساختار سقف و دیوار

شرایط مرزی خارجی حاکم بر سقف شامل جابجایی و تابش و شرایط داخلی، جابجایی طبیعی است. برای تابش، متوسط ماهیانه‌ی تابش خورشیدی از مرجع (باکسول، ۲۰۱۰)، انتخاب شد. برای جابجایی اجباری سقف مسطح بر اساس سرعت باد از مدل ارایه شده توسط اسمیت (اسمیت، ۲۰۱۰) استفاده شد که در آن v_{∞} سرعت باد و h_c ضریب انتقال حرارت جابهجایی است. ساختار سقف و شرایط مرزی موثر بر آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$h_c = 5.11v_{\infty}^{0.78} \quad (1)$$

محل قرار گرفتن ماده تغییر فاز دهنده، با توجه به مطالعات و آزمایشات انجام گرفته در ساختار سقف‌های رایج، بایستی بین دو لایه و نزدیک به لایه‌ی بیرونی سقف باشد. نزدیک بودن ماده تغییر فاز دهنده به بیرون باعث جذب گرمای روز در زمان تابش خورشید و در نتیجه تعدیل دمای داخلی ساختمان و کاهش ورود گرما به فضای داخلی خانه خواهد شد. از طرف دیگر هنگام خنک شدن هوای خارج در شب، ماده تغییر فاز دهنده قادر است فرآیند انجماد را طی کرده و برای استفاده‌ی دوباره در روز آماده گردد (پسوپاتیپادی و همکاران، ۲۰۰۸). ضخامت ماده تغییر فاز دهنده متغیر در نظر گرفته شده است تا کارایی ضخامت‌های مختلف با هم مقایسه گردند. سقف دیگری که در آن از یک لایه ماده‌ی تغییر فاز دهنده از نوع هیدرات نمک^۲ با دمای تغییر فاز ۷۲ درجه سانتیگراد استفاده شده است به عنوان سقف مرجع با سقف شامل ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی آلی (پارافین) مقایسه شد. دمای تغییر فاز به این علت ۷۲ درجه سانتیگراد انتخاب شده که ماده تغییر فاز دهنده امکان ذوب در دیوار مرجع را نداشته باشد تا کارایی پارافین با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه سانتیگراد با آن مقایسه شده و دو سقف ضخامت یکسان داشته باشند.

1 Weather Spark
2 Na2sio3.5H2o

به منظور ارزیابی نتایج عددی، نتایج به دست آمده برای سقف با نتایج تجربی ارایه شده در مرجع (پسوپاتی و همکاران، ۲۰۰۸)، مقایسه شد.

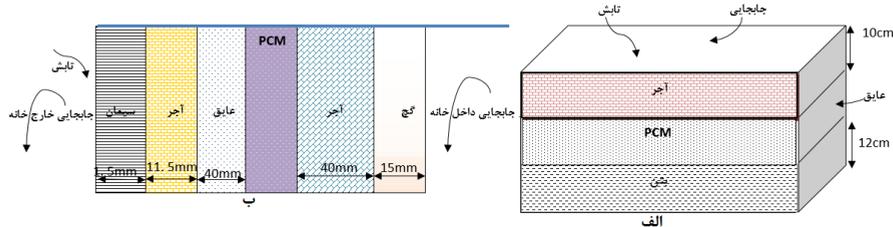
شرایط مرزی حاکم بر دیوار شامل تابش و جابجایی در خارج و جابجایی طبیعی در داخل است. انتقال حرارت در دیوار شمال، جنوبی و شرقی با حل معادله‌ی یک بعدی انتقال حرارت با روش تفاضل محدود صریح با نرم افزار C^{++} شبیه‌سازی شد. ضخامت ماده تغییر فاز دهنده متغیر در نظر گرفته شد و دیوار دیگری با یک لایه ماده تغییر فاز دهنده از نوع هیدرات نمک با دمای تغییر فاز ۷۲ درجه سانتیگراد به عنوان دیوار مرجع با شرایطی که امکان ذوب برای ماده‌ی تغییر فاز دهنده در دیوار مرجع فراهم نشود، به منظور مقایسه با دیوار شامل ماده تغییر فاز دهنده آلی شبیه‌سازی گردید. هنگامی که عایق در ساختار دیوار قرار دارد، بهترین محل قرار گیری ماده تغییر فاز دهنده پس از لایه‌ی عایق است. در اینصورت نوسان دمایی به حداقل خواهد رسید (نظیر و همکاران، ۲۰۱۹-۲۰۱۹-اریکی و همکاران، ۲۰۲۰). جابجایی اجباری بر اساس سرعت باد، برای سطح خارجی دیوار از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه است.

$$h_c = 5.15V_{\infty}^{0.81} \text{ برای دیوار بادگیر}$$

$$h_c = 3.5V_{\infty}^{0.76} \text{ برای دیوار بادپناه} \quad (2)$$

$$h_c = 3 \text{ جابجایی طبیعی}$$

دمای داخلی ساختمان ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی برای تمام ماه‌های سال انجام گردید. دمای داخلی ساختمان به منظور ارزیابی اثر لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده در دمای داخلی ثابت و شرایط آب و هوایی متغیر، ثابت در نظر گرفته شد. خواص ترموفیزیکی مواد سازنده‌ی سقف و دیوار در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. ساختار سقف (الف) و دیوار (ب)

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته در سقف (طراحی محیطی ساختمانهای شهری، ۲۰۰۶)

مواد	C(kJ/Kg. K)	ρ (kg/m ³)	K(W/m.° C)
آجر	۰/۸۴	۱۶۰۰	۰/۸
آجر حفره دار	۰/۸۴	۱۶۰۰	۰/۴
بتن	۰/۱۶	۲۳۲۰	۱/۷
گچ	۰/۹	۸۴۹	۰/۲
سیمان	۰/۸۴	۱۴۴۲	۰/۲۹
ماده تغییر فاز دهنده آلی	۱/۹۳ جامد- ۲/۱۹ مایع	۸۰۰	۰/۲۵
ماده تغییر فاز دهنده هیدرات نمک	۳/۸۳ جامد	۱۴۵۰ جامد	۰/۱۲ جامد
عایق	۰/۸۴	۳۲	۰/۰۳۸

۲-۲. فرمول بندی ریاضی

به منظور فرمول بندی ریاضی سقف و دیوار، فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شد:

- انتقال حرارت در سقف و دیوار یک بعدی و انتقال حرارت در سایر جهت‌ها نادیده گرفته می‌شود.
- هدایت حرارتی مواد سازنده‌ی سقف و دیوار (به جز ماده تغییر فاز دهنده)، ثابت در نظر گرفته شده و با دما تغییر نمی‌کند.
- ماده تغییر فاز دهنده همگن و همسانگرد^۱ است.
- مقاومت بین سطحی قابل اغماض است.
- سقف و دیوار ابتدا در دمای یکنواخت T_i قرار دارند.
- مقدار C_p برای ماده تغییر فاز دهنده، به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$C_p = C_{pS} \quad T < T_m - \Delta T \quad (۳)$$

$$C_p = C_{pI} \quad T > T_m + \Delta T$$

$$C_p = C_{pm} \quad T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T$$

رایج‌ترین مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای محاسبه‌ی ظرفیت گرمایی تغییر فاز در مسائل انتقال

حرارت در ماده تغییر فاز دهنده‌ها، روش آنتالپی و ظرفیت حرارتی هستند. در واقع در شرایط تغییر فاز،

ممکن است سطح مشترک ناپدید شود. علاوه بر این تغییر فاز معمولاً در غیر همدم اتفاق می‌افتد. در این صورت ردیابی سطح مشترک ممکن است مشکل یا غیر ممکن شود. بنابراین از نقطه نظر محاسباتی سودمند است که معادلات در اشکال جدیدی ارائه شوند. با استفاده از روش ظرفیت حرارتی برای پارافین‌ها، C_{Pm} (ظرفیت حرارتی تغییر فاز) مطابق رابطه (۴) به دست می‌آید که در آن L گرمای نهان، ΔT نصف دامنه‌ی دمایی تغییر فاز و C_{pl} و C_{ps} به ترتیب ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع و جامد هستند. در این روش فرض می‌شود که ظرفیت حرارتی به صورت خطی با دما تغییر می‌کند.

$$C_{Pm} = \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_{PS} + C_{Pl}}{2} \quad (4)$$

۲-۲-۱. معادلات حاکم بر سقف و دیوار

در شکل (۲) شبکه گره‌ها برای سقف و دیوار نشان داده شده است. بر اساس فرضیات ذکر شده معادلات حاکم و شرایط مرزی سقف مطابق رابطه (۵) است:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 < x < L \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = q_{rad} + h_c(T_\infty - T_{X=0}) \quad X = 0$$

q_{rad} تنها در ساعات آفتابی محاسبه می‌شود و در سایر ساعات صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = h_i(T_{X=L} - T_{room}) \quad X = L \quad (6)$$

هنگامی که ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع قرار دارد، به علت اثر جابجایی طبیعی در آن،

معادله‌ی (۶) به صورت رابطه (۷) نوشته خواهد شد:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + h\Delta T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

جابجایی طبیعی بر سطح مشترک در شرایط تغییر فاز در پارافین به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود

که در آن T_m دمای تغییر فاز، β ضریب انبساط، μ ویسکوزیته‌ی سینماتیک، g شتاب گرانشی، C_{pl} ظرفیت گرمایی در حالت مایع و h ضریب انتقال حرارت جا به جایی است.

$$h = 0.072 \left[\frac{g (T_w - T_m)}{2} \rho_l^2 c_{pl} k_l^2 \beta \right]^{1/3} \quad (8)$$

بر اساس فرضیات بیان شده معادلات حاکم بر دیوار برای انتقال حرارت یک بعدی مطابق رابطه

(۹) است. در گره‌های میانی داریم:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 < x < L \quad (9)$$

در $X=0$ ، که شرایط مرزی ترکیبی از جابجایی و تابش است، داریم:

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = q_{rad} + h_o(T_\infty - T_{X=0}) \quad X = 0 \quad (10)$$

در $X=L$ ، که شرایط مرزی شامل جا به جایی طبیعی است، داریم:

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} = h_i(T_{X=L} - T_{room}) \quad X = L \quad (11)$$

هنگامی که ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع قرار دارد، معادله‌ی (۱۰) برای آن به معادله‌ی (۷)

تبدیل خواهد شد و ضریب جابه جایی مطابق معادله‌ی ۸ که در مورد سقف بیان شد، به دست خواهد آمد.

۲-۲-۲. حل عددی معادلات حاکم بر سقف و دیوار

در حل معادلات یک بعدی با روش تفاضل محدود مقدار پارامتر $M = \frac{\Delta X^2}{\alpha \Delta t}$ بایستی همواره بزرگتر یا مساوی ۲ باشد. مقدار نمو زمانی و مکانی با توجه به این محدودیت برای M انتخاب شد و مطابق شکل (۲) هر ماده (برای دیوار و سقف) به پنج گره تقسیم شد.

ابتدا روش حل عددی و معادلات حاکم بر سقف بیان شد. با توجه به ضخامت هر ماده، ΔX برای

آجر ۲ سانتیمتر و برای بتن ۴/۲ سانتیمتر و گام زمانی برای شبیه‌سازی ۲ ثانیه در نظر گرفته شد. حل

عددی برای گره خارجی مطابق رابطه (۱۲) است:

$$k1 \frac{T1 - T2}{\Delta X1} = \alpha q_s + \sigma[\alpha T_\infty^4 - \epsilon T_1^4] + h_o(T_\infty - T_1) \quad x = 0 \rightarrow \quad (12)$$

$$T1 = \frac{(\alpha q_s + \sigma[\alpha T_\infty^4 - \epsilon T_1^4] + h_o(T_\infty) + k1 \frac{T2}{\Delta X1})}{h_o + \frac{k1}{\Delta X1}}$$

که در آن q_{rad} شار تابش بر حسب (W/m^2) ، T_∞ دمای هوا بر حسب $(^\circ C)$ ، α ضریب جذب، ϵ ضریب نشر، σ ثابت استفان بولتزمن، q_s شار تابش بر سطح و h_o ضریب انتقال حرارت خارجی است. در این معادله تابش به صورت خطی محاسبه شده است. α ضریب جذب و ϵ ضریب نشر در معادله‌ی (۱۲) به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۹۳ فرض شده اند (آردیتو وهمکاران، ۲۰۱۸).

برای گره‌های میانی

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X} = \rho c \Delta X i \frac{T_i^{\text{new}} - T_i}{\Delta t} \quad 0 < x < L \quad (۱۳)$$

$$T_i^{\text{new}} = \left(k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X} \right) \frac{\Delta t}{\rho c \Delta X i} + T_i$$

هنگامی که ماده تغییر فاز دهنده جامد است یا در حال انجماد است از معادله‌ی (۱۳) پیروی می‌کند اما در حال ذوب معادله‌ی (۱۳) به معادله‌ی (۱۴) تغییر می‌یابد:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + h \Delta T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱۳)$$

$$k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X} + h(T_{i-1} - T_i) = \rho c \Delta X \frac{T_i^{\text{new}} - T_i}{\Delta t}$$

$$T_i^{\text{new}} = \frac{(k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X} + h(T_{i-1} - T_i)) \Delta t}{\rho c \Delta X} + T_i$$

معادله فوق برای $i=7,8,9$ در حالت ذوب ماده تغییر فاز دهنده، صادق است. همچنین شار لحظه‌ای گرمای دریافت شده و از دست رفته در تابستان و زمستان به ترتیب مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$Q = hi(T_{15} - T_{\text{room}}) \quad (۱۴)$$

$$Q = hi(T_{\text{room}} - T_{15}) \quad (۱۵)$$

در ادامه معادلات حاکم بر دیوار ارائه شده است. Δx برای مواد سازنده دیوار به ترتیب برای سیمان، آجر، عایق، آجر و گچ ۳، ۲۳، ۸، ۸ و ۳ میلیمتر در نظر گرفته شد. حل عددی برای گره‌های میانی مطابق رابطه (۱۶) است:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X} = \rho c \Delta X \frac{T_i^{\text{new}} - T_i}{\Delta t} \quad (۱۶)$$

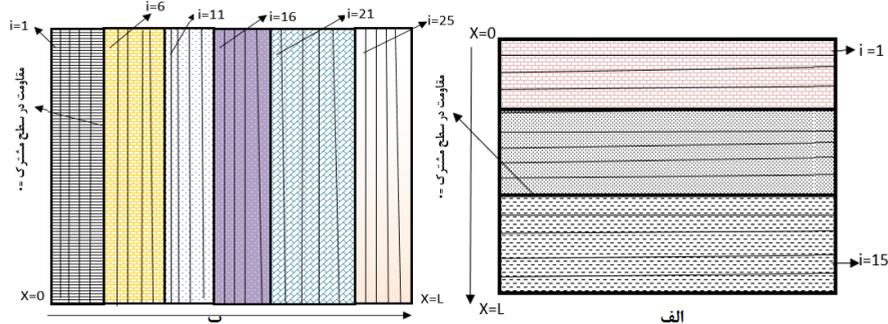
$$T_i^{\text{new}} = \frac{k \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta X} - k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta X}}{\rho c \Delta X} \Delta t + T_i \quad 0 < x < L$$

همچنین شار لحظه‌ای گرمای دریافت شده و از دست رفته در تابستان و زمستان به ترتیب مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌شود:

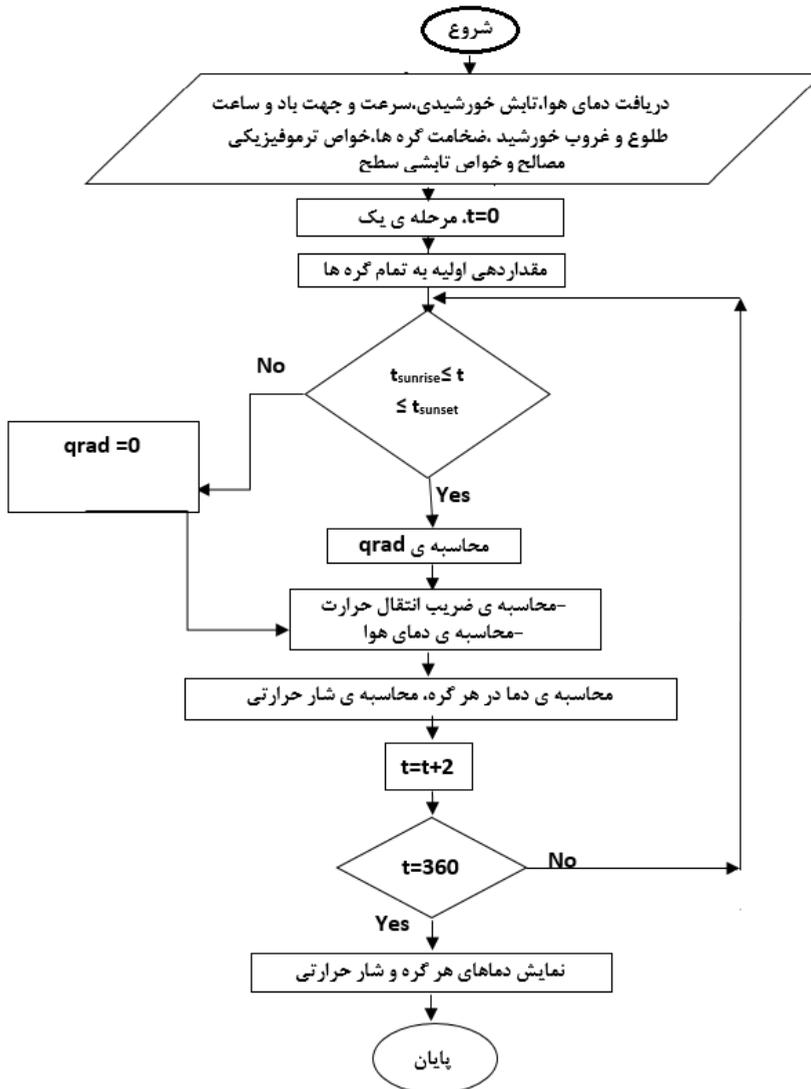
$$Q = hi(T_{30} - T_{\text{room}}) \quad (۱۷)$$

$$Q = hi(T_{room} - T_{30}) \quad (18)$$

الگوریتم حل برای معادلات فوق در شکل (۳) نشان داده شده است. داده‌های ورودی به این الگوریتم شامل دمای هوا، سرعت باد و تابش خورشیدی در طول یک سال در شهر بوشهر و همدان بودند (۱ فروردین ۱۳۹۲ تا پایان اسفند ۱۳۹۲). داده‌های خروجی الگوریتم شامل شار گرمایی دریافت شده یا از دست رفته در طول فصول گرم و سرد و درجه حرارت در طول سقف برای ۱۵ گره مشخص شده بودند. سپس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی سقفی با ماده‌ی تغییر فاز دهنده از نوع هیدرات نمک با دمای تغییر فاز ۷۲ درجه سانتیگراد مقایسه شدند. همچنین ضخامت لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده برای یافتن ضخامت بهینه‌ی مورد استفاده در سقف متغیر در نظر گرفته شد.



شکل ۲. شبکه گره‌ها برای سقف (الف) و دیوار (ب)

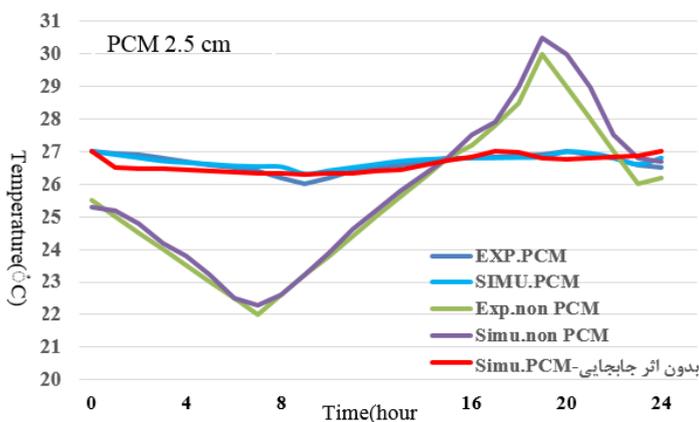


شکل ۳. الگوریتم حل معادلات

۳. بحث و نتایج

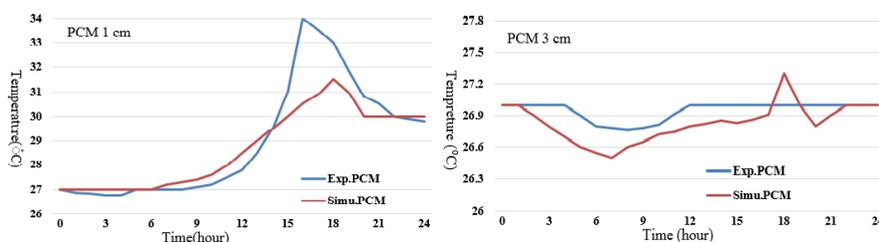
۳-۱. ارزیابی نتایج عددی

در این بخش مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی سقفی شامل ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌ی حرارتی در ماه ژانویه ارائه شده است. در طول آزمایشات، دمای سقف اتاق تقریباً در $27 \pm 3^\circ\text{C}$ قرار دارد. همانگونه که در شکل (۴) مشخص است، دمای سقف اتاق در روز با شروع تابش خورشیدی اندکی افزایش و در شب اندکی کاهش یافته است. علت این امر، اثرگذاری شرایط داخلی اتاق و دیوارها در طول شب و روز بر دمای داخلی سقف است. از سوی دیگر، نوسان زیادی در دمای سقف بدون ماده تغییر فاز دهنده مشاهده شد زیرا محیط بیرون سریعاً بر دمای سقف تاثیر می‌گذارد. تفاوت دمایی قابل ملاحظه‌ای میان دمای سقف بدون ماده تغییر فاز دهنده و سقف شامل ماده تغییر فاز دهنده وجود دارد که نشان دهنده‌ی تاثیر وجود ماده تغییر فاز دهنده در جذب حرارت ورودی به ساختمان و به خاطر ظرفیت بالای ذخیره‌سازی در ماده تغییر فاز دهنده است. در شکل (۵) نتایج حاصل از ضخامت‌های ۱ و ۳ سانتیمتری ماده تغییر فاز دهنده مقایسه شده‌اند. هنگامی که ضخامت ۱ سانتیمتری به کار برده شده است، دمای سقف پس از ۹ ساعت تغییر کرد در حالی که در ضخامت بالاتر دما عمدتاً در ۲۷ درجه نگه داشته شده است. همچنین دمای سقف در ضخامت کمتر تا حدود ۳۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته در حالی که در مورد دوم حداکثر دما حدود ۲۷ درجه سانتیگراد است. شاخص پراگندگی داده‌های شبیه‌سازی ۰/۰۳ است. روند نتایج شبیه‌سازی در توافق خوب و منطقی با نتایج تجربی است از این رو این مدل برای شبیه‌سازی سقف اتاقی با داده‌های آب و هوایی واقعی دو شهر بوشهر و همدان توسعه داده شد.



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی سقف با نتایج تجربی (پسوپاتی، ۲۰۰۸)

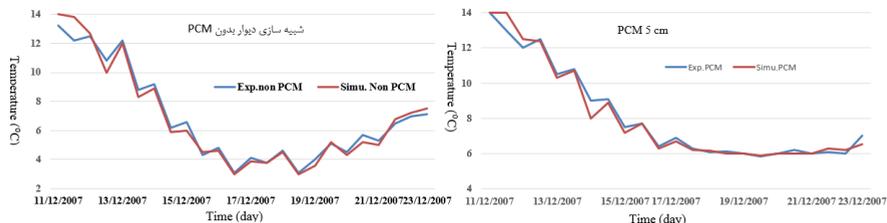
(دمای سطح داخلی سقف (ژانویه))



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج تجربی (پسوپاتی، ۲۰۰۸) و شبیه‌سازی سقف اتاق با ماده تغییر فاز دهنده

مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای دوره‌ی زمستانی دیوار در این قسمت ارائه شده است. آزمایشات انجام گرفته در دو اتاقک، یکی بدون ماده تغییر فاز دهنده و دیگری با میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده است که در طول دو هفته در ماه دسامبر ۲۰۰۷ انجام گرفته است. در شکل ۶ مقایسه‌ی نتایج تجربی مرجع (پسوپاتی، ۲۰۰۸) و شبیه‌سازی دمای داخلی دیوار شامل ماده تغییر فاز دهنده و دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت ماده تغییر فاز دهنده در کاهش نوسانات دمایی و همچنین افزایش حداقل دمایی در ساعات سرد به علت ذخیره‌ی انرژی است. در اتاقک با ماده تغییر فاز دهنده، حداقل دمایی حدود ۶ درجه‌ی سانتیگراد و در اتاقک دیگر حدود ۲ درجه سانتیگراد است. بنابراین استفاده از یک لایه ماده تغییر فاز دهنده حدود ۴ درجه اختلاف در حداقل دمایی را موجب شده است. از طرف دیگر نوسان دمایی بین ساعات سرد شب و روز در اتاقک با ماده تغییر فاز دهنده به

صورت چشمگیری کاهش یافته است که در این مورد ماده تغییر فاز دهنده به علت ضریب هدایت حرارتی کوچک مانند یک عایق عمل کرده است.



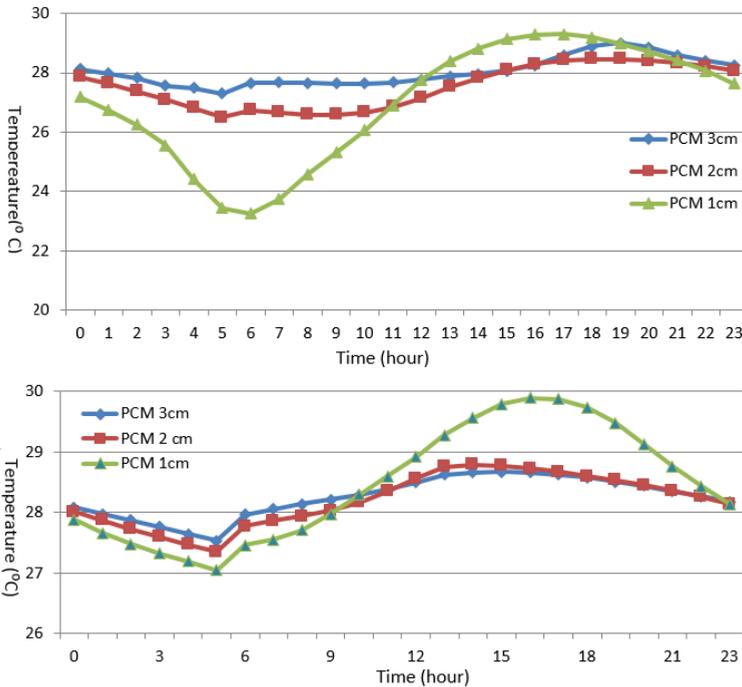
شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج تجربی (پسوپاتی، ۲۰۰۸) و شبیه‌سازی دمای داخلی دیوار

شامل ماده تغییر فاز دهنده و دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده

۳-۲. نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم پیشنهادی

۳-۲-۱. اثر ضخامت ماده تغییر فاز دهنده بر دمای سقف

برای بررسی اثر ضخامت ماده تغییر فاز دهنده بر انتقال حرارت در سقف، ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ سانتیمتری ماده تغییر فاز دهنده در سقف شبیه‌سازی و نتایج برای مرداد ماه ارایه شد. با توجه به شکل ۷، با افزایش ضخامت از ۱ به ۳ سانتیمتری ماکزیمم دمای داخلی سقف کاهش و مینیمم دمایی افزایش یافته است. بنابراین نوسان دمایی کم شده است. اختلاف میان سه نمودار در ساعات تابش خورشید (۶ تا ۲۰) افزایش یافته و در ساعات شب سه نمودار به هم نزدیک شده و عملکرد نزدیک‌تری را نشان داده‌اند. از طرف دیگر ضخامت‌های ۲ و ۳ سانتی عملکرد مشابه‌تری نسبت به ضخامت ۱ سانتیمتری ماده تغییر فاز دهنده از خود نشان داده‌اند به گونه‌ای که خصوصاً در نمودار مربوط به بوشهر ضخامت ۱ سانتیمتری عملکرد متفاوت‌تری را نشان می‌دهد که شامل نوسان بیشتر و تاثیر پذیری بیشتر از شرایط بیرونی است. در نمودار مربوط به همدان حداکثر دمایی در ضخامت ۳ سانتیمتری نسبت به ضخامت یک سانتیمتری ۱/۲ سانتیگراد و نسبت به ضخامت ۲ سانتی ۰/۲ سانتیگراد کاهش یافته است.



شکل ۷. مقایسه‌ی دمای داخلی سقف در تیر ماه برای ضخامت‌های مختلف

ماده تغییر فاز دهنده در شهرهای همدان (بالا) و بوشهر (پایین)

همچنین در نمودار ۴-۱۱ نمودار مربوط به ضخامت سه سانتی متری ۴ درجه اختلاف با دمای ضخامت ۱ سانتی متری و ۱ درجه اختلاف با دمای مربوط به ضخامت ۲ سانتی متری از خود نشان می‌دهد که نزدیک شدن دما به دمای آسایش و کاهش نوسانات را نتیجه می‌دهد. بنابراین با توجه به مقایسه‌ی ضخامت‌های ۱،۲ و ۳ سانتی متری، و عملکرد بهتر ضخامت ۳ سانتی متری از این ضخامت برای شبیه‌سازی سقف و دیوار استفاده می‌شود.

۲-۳. تاثیر ماده‌ی تغییر فاز دهنده بر دمای داخلی سقف

تاثیر ماده‌ی تغییر فاز دهنده بر دمای سطح داخلی سقف در فصول مختلف سال بررسی و در شکل ۸ نتایج آن ارائه شده است. ماده تغییر فاز دهنده در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در همدان و همچنین در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، آذر در بوشهر بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. هرچند میانگین دمایی این

ماه‌ها در حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد است که با دمای تغییر فاز (۲۸ درجه سانتی‌گراد) در حدود ۶ درجه سانتی‌گراد اختلاف را نشان می‌دهد. در مطالعات پیشین محققان، بهترین شرایط استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سقف در شرایط آب و هوایی که دمای میانگین نزدیک‌تری به دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده دارند، گزارش شده است. در حالی که در شهر بوشهر آبان ماه با میانگین دمایی ۲۸ درجه سانتی‌گراد نزدیک‌ترین دما را به دمای تغییر فاز داراست و انتظار می‌رود بیشترین حفظ دمایی و کمترین نوسانات در این ماه مشاهده شود. اما نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر در فروردین ماه است. علت این مورد در نظر نگرفتن تابش خورشیدی است که بر دمای اجزای سقف که در تماس با ماده تغییر فاز دهنده هستند اثر گذار است بنابراین دمای سقف به بالاتر از دمای محیط افزایش پیدا کرده است. تابش خورشیدی در ساعات آفتابی به طور میانگین در ماه‌هایی که عملکرد مطلوب را شاهد هستیم در حدود ۰/۵۲ کیلووات ساعت در همدان و ۰/۴۸ کیلووات ساعت در بوشهر به ازای هر متر مربع در هر یک ساعت آفتابی روز است. بنابراین با دریافت این تابش خورشیدی دمای ماه‌های با عملکرد مطلوب، تقریباً ۵ درجه از دمای تغییر فاز پایین‌تر است.

میانگین دمایی نوسانات دمایی و دمای سقف در حالتی که از یک لایه‌ی سه سانتیمتری پارافین استفاده شده است، در طول سه ماه بهار تقریباً بین ۲۶ تا ۳۰ درجه تغییر کرده است. در مدت تابش خورشید و افزایش دمای هوای بیرون، دمای سقف اندکی افزایش یافته و هنگامی که دمای لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده به بالاتر از دمای ذوب می‌رسد (در حدود ۲۸ درجه سانتی‌گراد)، شروع به ذوب کرده و به علت بزرگ بودن ظرفیت ذخیره‌ی حرارتی به علت بالا بودن گرمای نهان، از افزایش دمای سقف جلوگیری کرده است. بنابراین اختلاف دمای بین شب و روز کاهش یافته و حداکثر حدود ۳ درجه‌ی سانتیگراد است و نوسان دمایی کمتری نسبت به سقف مرجع، مشاهده می‌شود. از این رو شرایط محیطی در این سه ماه تاثیر کمی بر دمای سقف با پارافین در بوشهر داشته است. در سقف مرجع، نوسان دمایی بزرگتر و در حدود ۵ درجه سانتیگراد اختلاف را بین حداکثر دمای روز و حداقل دمای شب مشاهده شد. همچنین حداکثر دمایی در این حالت ۳۲ درجه سانتیگراد است در حالی که برای سقف با ماده تغییر فاز دهنده، در حدود ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد به دست آمده است که ۲ درجه اختلاف دمایی را نتیجه داد. تغییرات دما در سقف با ماده تغییر فاز دهنده آلی طی خرداد ماه تقریباً ثابت و در ۲۷ درجه‌ی سانتیگراد نگه داشته شده است در حالی که در دو ماه ابتدایی بین ۱۸ تا ۲۶ درجه نوسان کرده است. در دو ماه

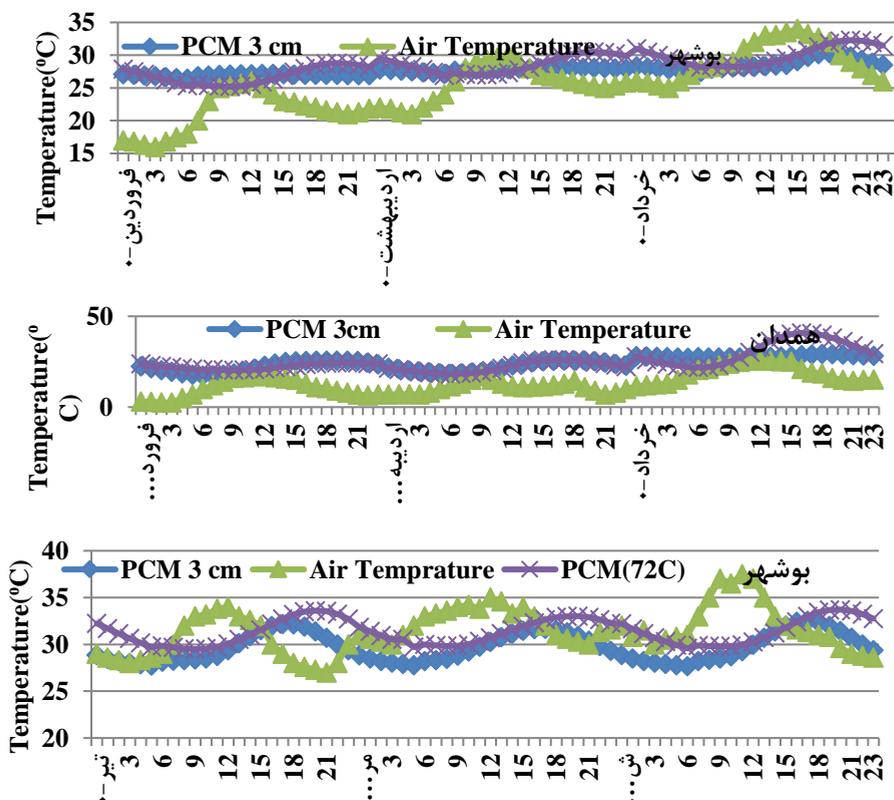
ابتدایی پارافین امکان تغییر فاز را نیافته و مانند یک عایق عمل کرده است. از آن جا که ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی سقف مرجع نیز امکان ذوب نداشته و از طرف دیگر ضریب هدایت حرارتی کوچک‌تر و چگالی و گرمای ویژه‌ی بزرگتری در حالت جامد دارد، عملکرد بهتری نسبت به پارافین نشان داده است.

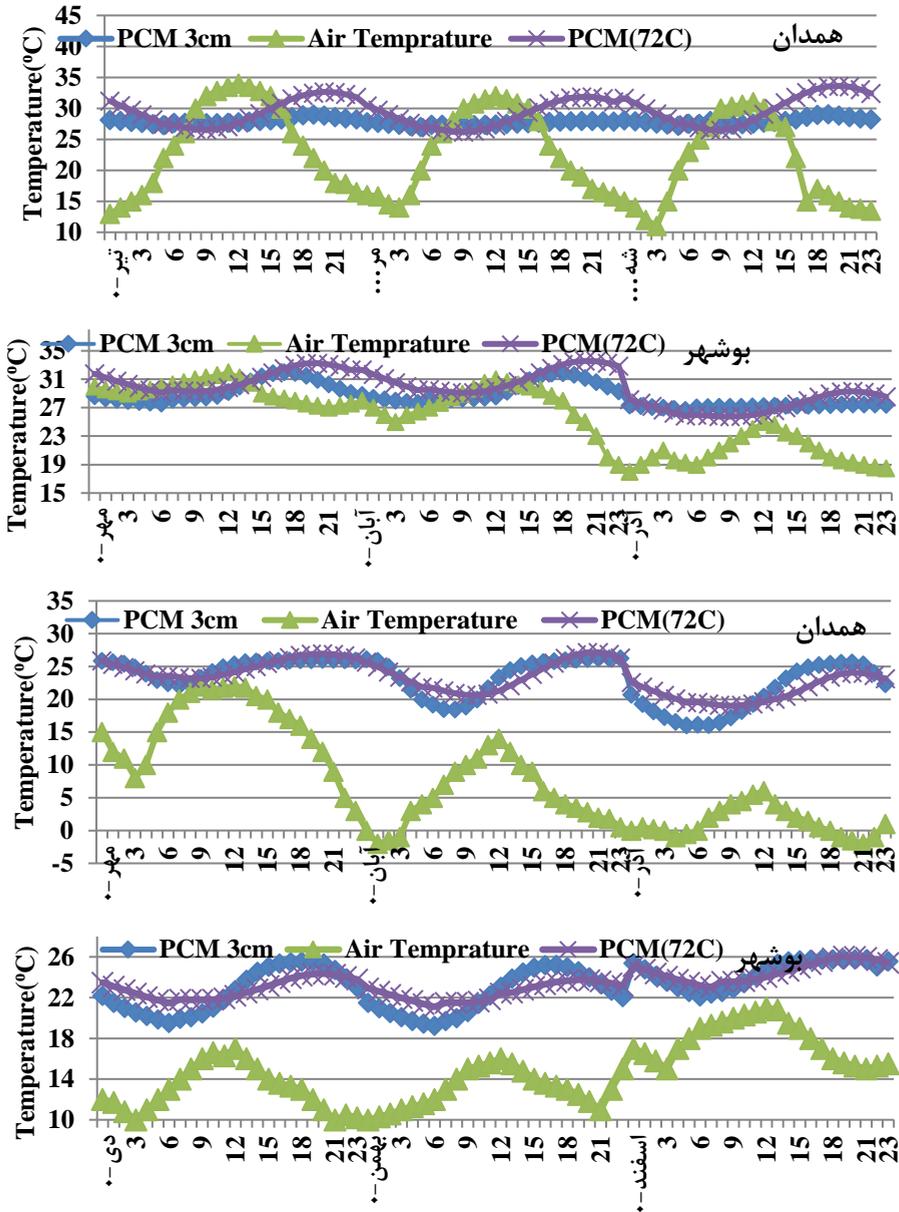
با وجود افزایش میانگین دمای هوا در فصل تابستان نسبت به بهار، دمای داخلی سقف در حالتی که از ماده‌ی تغییر فاز دهنده استفاده شده است در شهر همدان در حدود ۲۸ درجه سانتیگراد باقی مانده است در حالی که در شهر بوشهر بین ۲۸ تا ۳۲ درجه نوسان دارد. این مورد به علت بزرگ‌تر بودن اختلاف دمای شب و روز در همدان است که امکان ذوب و انجماد مطلوب‌تری را برای ماده تغییر فاز دهنده فراهم ساخته است. با وجود آن که میانگین دمایی فصل تابستان در هر دو شهر نزدیک به دمای تغییر فاز است و امکان ذخیره انرژی وجود دارد اما اختلاف بین دمای شب و روز در همدان تقریباً ۳ برابر اختلاف درجه حرارت در بوشهر در تابستان است. همچنین میانگین دمای هوا در تابستان در بوشهر ۳۱ درجه و در همدان ۲۲ درجه سانتیگراد است. از آن جا که تیر و مرداد گرم‌ترین ماه‌های سال در هر دو شهر همدان و بوشهر هستند، ماکزیمم دمای حدود ۳۴ درجه سانتیگراد را در تیر ماه در هر دو شهر در سقف مرجع مشاهده شد در حالی که ماکزیمم دمایی سقف با لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده آلی حدود ۳۲ درجه سانتیگراد است. از طرف دیگر در سقف با پارافین در هر دو شهر در تمام ماه‌ها دمای پایین‌تری مشاهده شد و در شهر همدان نوسان دمایی نیز کاهش یافته است.

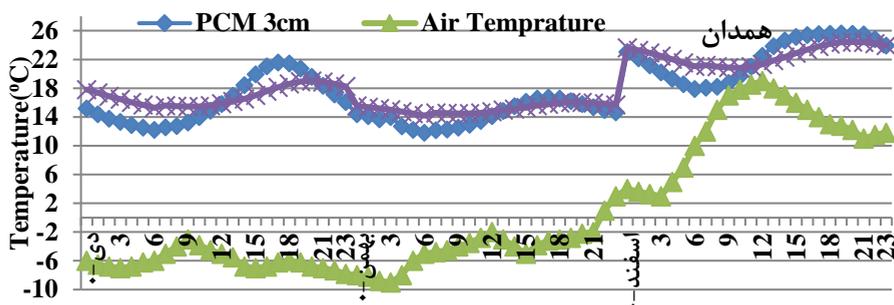
در مهر و آبان حداکثر دمایی کاهش یافته و پیک درجه حرارت دو ساعت منتقل شده است. تغییرات دمایی برای آذر ماه برای بوشهر روی سقف با ماده تغییر فاز دهنده کمترین نوسان را نشان می‌دهد که به علت کاهش دمای هوا و تابش خورشیدی نسبت به ماه‌های دیگر در این فصل است. اما همین ماه بیشترین نوسان دمایی را در مورد همدان نشان می‌دهد. کاهش دمای هوا در آذر ماه در همدان موجب شده میانگین دمایی بیرون به ۱ درجه سانتیگراد برسد از این رو دمای سقف در سطح خارجی به شدت پایین رفته و با اثر گذاری سطح خارجی به لایه‌های دیگر دمای لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده به پایین‌تر از ۲۵ درجه سانتیگراد که دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده است، می‌رسد؛ بنابراین ماده تغییر فاز دهنده به صورت جامد در آمده و امکان ذوب را پیدا نمی‌کند لذا ظرفیت حرارتی پایین آمده و نوسان بیشتری با تغییر شرایط خارجی از خود نشان می‌دهد. ماده تغییر فاز دهنده آلی در مقایسه با سقف مرجع در همدان نوسان بیشتری را در دمای داخلی موجب شده است. هنگامی که در مهر و آبان ماه دما در محدوده‌ی

تغییر فاز قرار گرفته است (بین ساعات ۹ تا ۱۲ مهر و ساعات ۱۰ تا ۲۱ در آبان) حفظ دما در ۲۶ درجه سانتیگراد را موجب شده است. از آن جا که در زمستان دما عمدتاً پایین‌تر از دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده قرار دارد، نوسان دمایی بیشتری نسبتاً به فصل‌های گذشته مشاهده شد.

وجود لایه‌ی ماده تغییر فاز دهنده آلی در سقف در فصل زمستان تاثیر کمتری بر تغییرات دمایی داشت. نتایج نشان داد که دما در سقف با ماده تغییر فاز دهنده آلی، نوسان بیشتری را نشان می‌دهد و حداقل دمایی پایین‌تر و حداکثر دمایی بالاتری را در تمام ماه‌های این فصل مشاهده شد که نشان داد سقف با پارافین عملکرد مثبتی نسبت به سقف مرجع نداشته است همچنین هنگامی که دمای متوسط سالیانه‌ی یک اقلیم به دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده نزدیک باشد در صورتی که اختلاف دمای بین شب و روز بیشتر باشد عملکرد مطلوب‌تری را شاهد هستیم





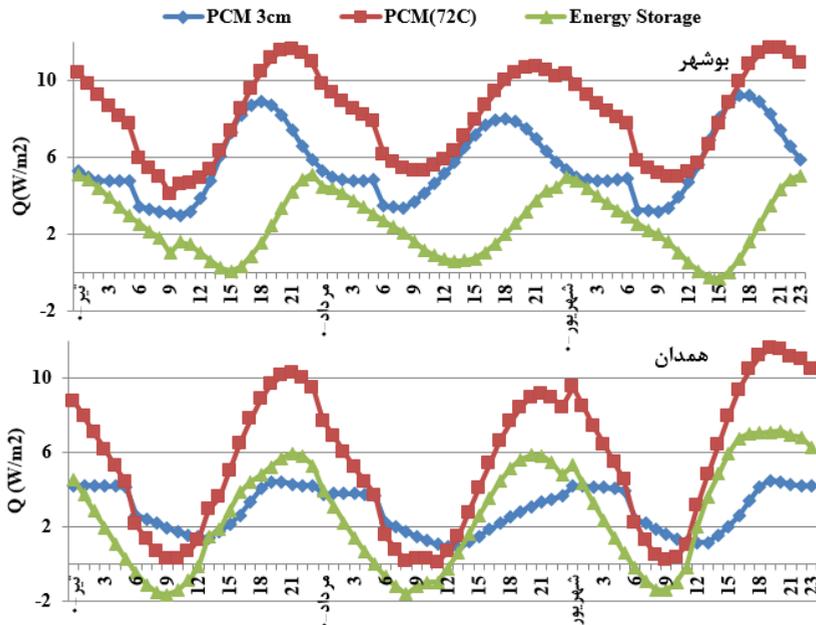


شکل ۸. مقایسه‌ی دمای داخلی سقف با ماده تغییر فاز دهنده و سقف مرجع در فصلول مختلف برای همدان و بوشهر

۳-۲-۳. مقایسه‌ی شار حرارتی آبی دریافتی سقف در تابستان

در شکل ۹ شار حرارت دریافتی در سقف در دو حالت با ماده تغییر فاز دهنده آبی و سقف مرجع مقایسه شده است. حداکثر حرارت دریافتی در تابستان در سقف با ماده تغییر فاز دهنده آبی در بوشهر حدود $5 (W/m^2)$ و در همدان $9 (W/m^2)$ و در سقف مرجع در هر دو شهر حدود $13 (W/m^2)$ است که ۸ واحد اختلاف را در بوشهر و ۴ واحد اختلاف را در همدان نشان می‌دهد. از نتایج به دست آمده کاملاً مشخص است که حرارت دریافتی در فصل گرم با به کار بردن یک لایه ۳ سانتیمتری ماده تغییر فاز دهنده در هر دو شهر کاهش چشمگیری داشته است. علاوه بر این در محدوده‌ی زمانی ۶ تا ۲۰ که تابش بر سطح سقف وجود دارد، حرارت دریافتی تقریباً ثابت مانده و افزایش بسیار کمی داشته است. در ماه تیر و مرداد در هر دو شهر نزدیک به ۱۴ ساعت تابش خورشیدی وجود دارد. و این دو ماه بیشتر شدت تابش را نیز دارا هستند. بنابراین کاربرد ماده تغییر فاز دهنده تاثیر مثبت در کاهش حرارت دریافتی و کاهش بار خنک کنندگی در این دو ماه را نشان می‌دهد. که باعث افزایش شرایط آسایش داخلی و کاهش مصرف انرژی سیستم‌های سرمایشی خواهد شد. همچنین ذخیره‌ی انرژی با توجه به شکل در تیر ماه حداکثر مقدار خود را داراست. از جمله اثرات مثبت کاربرد پارافین در این فصل یکنواخت کردن مصرف انرژی

بوده است که حداکثر مصرف انرژی را کاهش داده که افزایش طول عمر سامانه‌های سرمایشی و کاهش مصرف انرژی را موجب می‌شود.



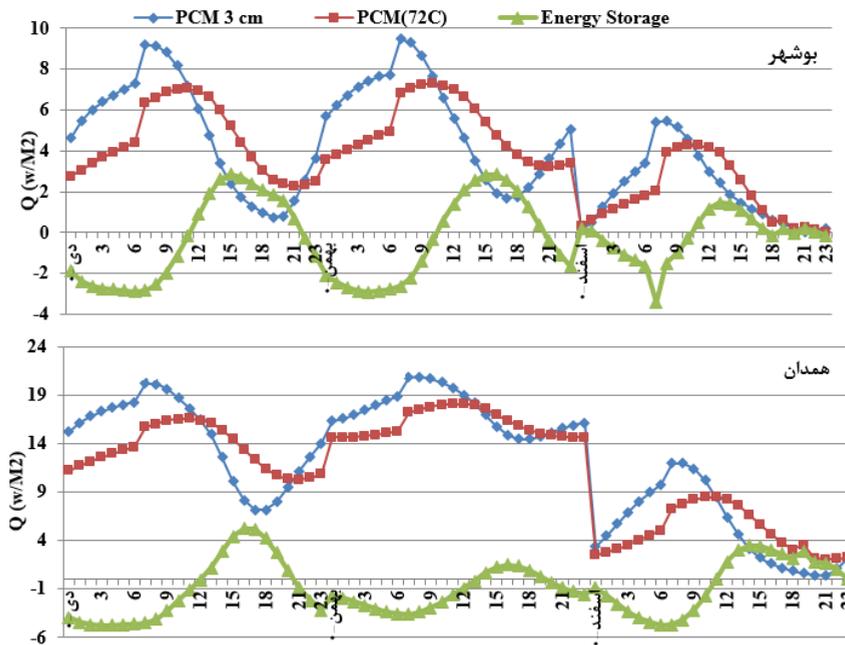
شکل ۹. مقایسه‌ی شار حرارتی آبی دریافتی سقف در طول تابستان در بوشهر و همدان

۴-۲-۳. مقایسه‌ی شار آبی اتلافی سقف

شار حرارتی دریافتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده‌ی اثر مثبت ماده تغییر فاز دهنده از ساعت ۱۲ تا ۲۱ است که تا ۳ واحد ذخیره‌ی انرژی را موجب شده است. از طرف دیگر اثر منفی در سایر ساعات مشاهده شد که اتلاف بین ۰ تا ۳ واحد انرژی را به دنبال دارد. در دی ماه کمترین ذخیره‌ی انرژی را در بین سایر ماه‌ها داراست که علت آن پایین‌تر بودن دما و تابش خورشیدی و عدم امکان ذوب و انجماد آن در این ماه می‌باشد. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است بین ساعات ۱۲ تا ۲۱، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بین ۱ تا ۴ واحد صرفه جویی انرژی را به دنبال داشته اما در سایر موارد عملکردی ضعیف‌تری در مقایسه با سقف مرجع داراست. مانظور که می‌دانیم، مواد تغییر فاز توانایی

مدیریت تغییرات دمای بالا به منظور بهینه‌سازی انرژی را دارند. به عبارت دیگر، هنگامی که اختلاف دما بین سردترین و گرمترین ساعات روز زیاد باشد، می‌توان از این مواد برای صرفه جویی در مصرف انرژی استفاده کرد، و با تغییر حالت آنها، می‌تواند در مصرف انرژی صرفه جویی کند، بنابراین نکته قابل توجه این است که در مناطقی که اختلاف دما بین روز و شب زیاد است استفاده شود. از آنجا که خصوصیات این مواد تنها به نقاط ذوب و انجماد بستگی دارد، از این نظر تنها متفاوت هستند

مقایسه‌ی صرفه جویی حرارتی در سقف در تابستان و زمستان نشان داد که ماده‌ی تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰ درصد حرارت ورودی از طریق سقف را در شهر بوشهر در تابستان کاهش داده است. همین رقم برای شهر همدان ۴۷ درصد است که عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. این امر به علت اختلاف زیاد بین دمای شب و روز در همدان است که شرایط بهتری برای ذخیره گرما از طریق ماده تغییر فاز دهنده فراهم ساخته است. در زمستان استفاده از پارافین نسبت به سقف مرجع در دو شهر تا ۸ درصد اثر منفی داشته و حرارت اتلافی را افزایش داده است. علت این امر نبودن شرایط آب و هوایی در محدوده‌ی دمای تغییر فاز پارافین است که قابلیت ذخیره‌ی حرارتی در حالت تغییر فاز را امکان‌پذیر نساخته و هیدرات نمک موجود در سقف مرجع به علت ضریب هدایتی پایین‌تر و چگالی و گرمای ویژه‌ی بالاتر، عملکرد بهتری در کاهش حرارت اتلافی داشته است.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی شار حرارتی آبی اتلافی در زمستان در بوشهر و همدان

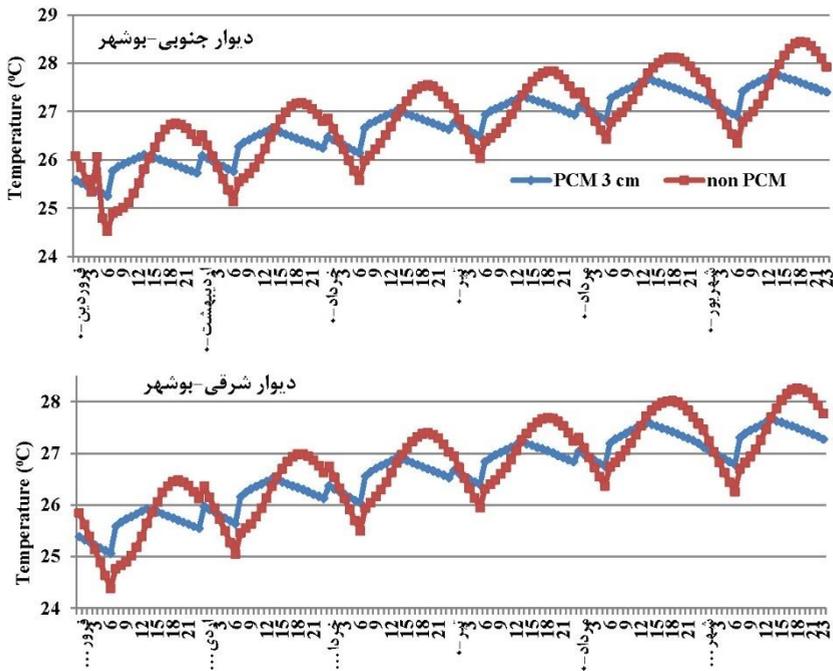
۵-۲-۳. اثر کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در دیوار برای شش ماهه‌ی اول سال

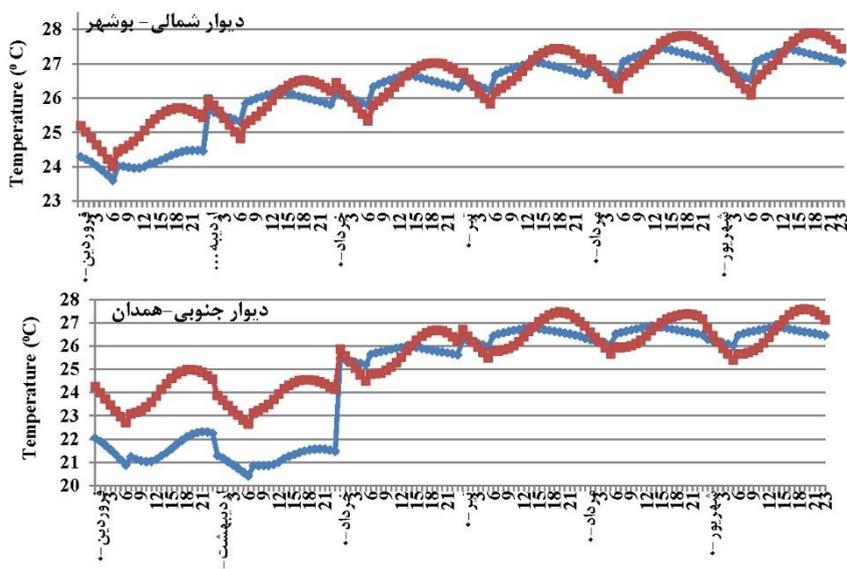
دمای داخلی دیوار مجهز به پارافین در شش ماه اول سال با دیوار مرجع (شامل $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) که شامل ۴ سانتیمتر عایق است، در شکل ۱۱ مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده‌ی اثر مثبت ماده تغییر فاز دهنده آبی بر کاهش نوسانات و حفظ دمای داخلی دیوار در محدوده‌ی دمای مطلوب در دیوارهای جنوبی و شرقی هستند. دیوار شمالی اثر منفی پارافین را در فروردین ماه نشان می‌دهد. هر چند در سایر ماه‌ها عملکرد آن در این دیوار مطلوب ارزیابی می‌شود. به علت تابش متفاوت خورشیدی بر دیوارها با جهات مختلف، ماده‌ی تغییر فاز دهنده با شرایط خارجی مختلفی در دیوارها روبه روست و تحت تاثیر این شرایط تاثیرات مثبت و منفی را از خود نشان می‌دهد. طبق مطالعات انجام گرفته در مورد بافت مسکونی در بوشهر (نیک قدم، ۱۳۹۵)، بهترین جهت ساخت خانه‌های یک طرفه رو به جنوب است که تابش خورشیدی کمتر و دمای مطلوب‌تری را در فصول گرم موجب می‌شود. از طرف دیگر جهت بادهای این شهر عمدتاً از سمت جنوب شرقی به جنوب غربی است که موجب انتقال حرارت بهتر در دیوار جنوبی در

ساختمان‌های یک طرفه خواهد شد. همچنین در همدان، بهترین جهت خانه‌های یک طرفه جنوبی با شیب ۱۵ درجه شرقی-غربی است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸)، که این مورد با بررسی تابش خورشیدی و جهت باد در همدان که عمدتاً شمالی-جنوبی است انتخاب شده است. همچنین مطالعات پیشین درباره‌ی باد (راما کریشان و همکاران، ۲۰۱۶)، نشان می‌دهد انتقال حرارت جا به جایی توسط تهویه‌ی طبیعی که باد ایجاد میکند بر عملکرد ماده‌ی تغییر فاز دهنده اثر مطلوب دارد.

با توجه به نمودار همدان مربوط به دیوار جنوبی، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده آلی در دو ماه اول سال تاثیر منفی و در سایر ماه‌ها تاثیر مثبت بر دمای داخلی دیوار داشته است. این امر به علت دور بودن متوسط دمایی همدان از دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده اتفاق افتاده است. کمتر بودن دمای هوا و تابش خورشیدی در دو ماه اول موجب شده اند لایه‌ی پارافین در مرحله‌ی تغییر فاز قرار نگیرد. میانگین دمایی دو ماه فروردین و اردیبهشت در همدان که به ترتیب ۱۰ و ۱۱ درجه سانتی گراد است، تابش خورشیدی در این دو ماه به طور متوسط ۴ کیلووات ساعت در هر متر مربع به ازای یک روز است که منجر به افزایش دمای اجزای دیوار نشده و دمای در محدوده ۲۰ درجه سانتی گراد نوسان می‌کند. از طرف دیگر در نمودارهای مربوط به دیوار شرقی و دیوار شمالی به ترتیب شاهد اثر منفی ماده تغییر فاز دهنده در سه و چهار ماه ابتدایی سال هستیم. متوسط دمای سالیانه همدان ۱۱ درجه سانتی گراد و بوشهر ۲۸ درجه سانتی گراد است. دما در همدان بین ۳۲ درجه زیر صفر تا ۴۰ درجه سانتی گراد تغییر میکند. میانگین دمایی بوشهر ۲۵ درجه سانتی گراد و اختلاف درجه حرارت شب و روز در آن کم است. آب و هوای بوشهر گرم و مرطوب است. و دارای دو فصل گرم و سرد می‌باشد. ۶ ماه اول سال جزو فصل گرم به شمار می‌آیند. همچنین بیشترین ساعات آفتابی در خرداد ماه و کمترین در بهمن ماه است. تابش خورشیدی در خرداد همراه با بالا رفتن تدریجی دما در این ماه موجب افزایش تدریجی دمای اجزای دیوار در این ماه شده است. ماده تغییر فاز دهنده در این ماه‌ها عمدتاً در شرایط تغییر فاز قرار دارد. هنگامی که ماده تغییر فاز دهنده در شرایط تغییر فاز قرار ندارد به علت ضریب هدایت حرارتی پایین مانند یک عایق عمل کرده و انتقال حرارت در اجزای دیوار را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تاثیر مثبت کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در بوشهر در شش ماهه‌ی اول سال، برای دیوار جنوبی در اردیبهشت ماه، برای دیوار شرقی فروردین ماه و برای دیوار شمالی خرداد ماه است. از طرف دیگر بیشترین تاثیر منفی در همدان برای تمام جهات در اردیبهشت ماه مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده

از ماده تغییر فاز دهنده در دیوار جنوبی بیشترین و دیوار شمالی کمترین صرفه جویی حرارتی را در میان سایر جهت‌ها داشته است. در مجموع نتایج نشان داد که استفاده از پارافین در دیوار جنوبی مناسب‌تر از سایر جهت‌ها است هر چند در دو ماه اولیه به علت شرایط آب و هوایی و تابش خورشیدی، عملکرد مطلوبی از ماده‌ی تغییر فاز دهنده مشاهده نشد.





شکل ۱۱. مقایسه‌ی دمای داخلی دیوار

بررسی نتایج برای استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در شش ماهه‌ی دوم سال در دیوار نشان داد که در مهر، آبان و آذر تاثیر مثبت بر دمای داخلی دیوار داشته است. نوسانات نسبت به دیوار مرجع کاهش یافته و دما در محدوده‌ی دمای مطلوب و نزدیک به دمای داخلی (۲۵ درجه سانتی‌گراد) حفظ شده است. هر چند دو دیوار عملکرد نزدیکی را نشان می‌دهند اما دیوار شامل پارافین اثر محسوسی بر دمای داخلی داشته است. از طرف دیگر در سه ماه آخر سال ماده تغییر فاز دهنده آلی عمدتاً اثر نامطلوب بر دمای داخلی دیوار داشته است، هر چند نوسان کمتری را شاهدیم اما دما فاصله‌ی بیشتری را با دمای داخلی اتاق نشان می‌دهد. این فاصله در اسفند ماه به حداقل رسیده است. همچنین واضح است که ماده تغییر فاز دهنده آلی مطلوب‌ترین عملکرد را در دیوار جنوبی دارد. ماده تغییر فاز دهنده قابلیت تغییر فاز در یک محدوده دمایی خاص را نشان می‌دهد. در حقیقت با گرم شدن محیط ماده تغییر فاز دهنده گرمای دریافتی را تا رسیدن به نقطه ذوب خود ذخیره کرده و پس از آن علیرغم اینکه محیط همچنان در حال گرم شدن است ماده تغییر فاز دهنده و البته محیط اطراف آن ثابت مانده است. ماده تغییر فاز دهنده گرمای ذخیره شده را صرف تغییر فاز کرده که معمولاً چند ساعت طول می‌کشد و در این مدت در

برابر افزایش دما مقاومت کرده است. نمودارها نشان می‌دهد هنگامی که تغییر فاز به پایان می‌رسد، مقاومت در برابر افزایش دما از بین می‌رود، اما این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که محیط به دلیل گذر از اوج تابش، روند گرمایش را متوقف کرده است. بنابراین، با استفاده از این مواد در دیوار ساختمان، ما توانسته ایم به نحوی از بار حرارتی محیط در ساعات اوج مصرف بکاهیم. این امر در طی فرآیند انجماد در ساعات سرد شب نیز اتفاق می‌افتد، بدین معنی که علی‌رغم خنک شدن هوا در طول شب، مواد تغییر فاز پس از رسیدن به نقطه انجماد خود به دلیل آزاد شدن گرمای نهان و تبدیل از مایع به جامد در برابر افت دما مقاومت می‌کنند. با حذف گرمای جذب شده در طول روز، این ماده از افزایش دمای محیط اطراف خود جلوگیری می‌کند و در نتیجه باعث خنک شدن محیط در ساعات سرد شب می‌شود. بنابراین فقط با انتخاب هوشمندانه مواد تغییر فاز از نظر دمای تغییر فاز و کاربرد آن در دیواره ساختمان به راحتی و بدون هیچ تجهیزات مکانیکی مورد نیاز و فقط با استفاده از قابلیت طبیعی این مواد برای تغییر فاز، با کاهش بار خنک‌کنندگی و گرمایش در ساعات اوج مصرف، کاهش نوسانات دمای ساختمان و تأمین دمای هوای متعادل‌تر در اوج گرما یا سرما، مصرف انرژی کاهش می‌یابد. از آن‌جا که برای استفاده از تغییر فاز ماده‌ی تغییر فاز دهنده برای کارایی بهتر، دمای ذوب بایستی در محدوده‌ی دمای کاری باشد، کارایی بهتر ماده تغییر فاز دهنده و استفاده از گرمای نهان بالای آن برای ذخیره‌سازی حرارتی (علاوه بر نقش عایق بودن آن) در ماه‌هایی که دمای هوا دور از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده است فراهم نمی‌شود.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه کارایی حرارتی یک لایه ماده تغییر فاز دهنده آلی در سقف و دیوارهای یک ساختمان در دو شهر بوشهر و همدان با مدل یک بعدی انتقال حرارت شبیه‌سازی و با روش تفاضل محدود صریح با استفاده از نرم افزار سی پلاس پلاس حل شد. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی ارائه شده در مراجع مقایسه شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ضخامت ۳ سانتی متری ماده تغییر فاز دهنده نسبت به ضخامت‌های ۱ و ۲ سانتی متری عملکرد حرارتی بهتری در کاهش نوسانات دمایی و صرفه جویی انرژی در سقف از خود نشان داد. همچنین دما مدت طولانی‌تری در محدوده‌ی نزدیک به دمای آسایش حفظ شد.

- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سقف در فصل بهار در بوشهر حداکثر دمایی را ۲ درجه سانتی گراد کاهش داده است، و در همدان بیشترین تاثیر را در خرداد ماه داشته است که تا ۱۰ درجه کاهش دما را شاهد هستیم.
 - دمای سقف به طور متوسط ۱ درجه سانتی گراد کمتر از سقف مرجع در تمام سال در هر دو شهر حفظ شده است.
 - استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سقف در فصل تابستان در دو شهر نتایج مثبت مشابهی در پی داشت. کاهش نوسانات دمایی، حفظ دمای داخلی در حدود ۲۸ درجه سانتی گراد در همدان و کاهش شار حرارتی ورودی از نتایج کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در این فصل است.
 - مقایسه‌ی صرفه جویی حرارتی دو سقف نشان داد که ماده‌ی تغییر فاز دهنده با دمای تغییر فاز ۲۸ درجه سانتی گراد حرارت ورودی از طریق سقف را تا ۳۰ درصد در بوشهر و ۴۷ درصد در همدان کاهش داده است.
 - هنگامی که تابش خورشیدی متوسط دریافتی به وسیله‌ی سقف در ساعات آفتابی یک روز در حدود ۰/۵ کیلووات به ازای هر متر مربع است، دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده برای عملکرد مطلوب در سقف بایستی در حدود ۵ درجه سانتی گراد بالاتر از میانگین دمایی ماهیانه باشد.
 - استفاده از ماده تغییر فاز دهنده آلی در دیوار، تاثیر منفی بر حفظ دمای داخلی و کاهش نوسانات در شهر همدان در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، دی، بهمن و اسفند دارد. همچنین کاربرد ماده تغییر فاز دهنده آلی در شش ماه اول در دیوار جنوبی بوشهر به طور متوسط یک درجه اختلاف درجه حرارت را با دیوار بدون ماده تغییر فاز دهنده نشان داد. در مجموع نتایج نشان داد که دیوار جنوبی در بوشهر بهترین شرایط را برای کاربرد ماده تغییر فاز دهنده آلی داراست و بیشترین صرفه جویی حرارتی مربوط به این دیوار است. در حالی که در همدان دیوارهای جنوبی و شرقی عملکرد تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند.
 - هنگامی که دمای متوسط سالیانه‌ی یک اقلیم به دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده نزدیک باشد در صورتی که اختلاف دمای بین شب و روز بیشتر باشد عملکرد مطلوب‌تری را شاهد هستیم.
- در نهایت نتایج این تحقیق نشان داد که شرایط آب و هوایی هر شهر (درجه حرارت سالیانه، اختلاف درجه حرارت شب و روز، میزان تابش خورشیدی و شرایط وزش باد) بر کارایی ماده تغییر فاز دهنده موثر است. باد امکان انتقال حرارت بالاتری را برای کامل شدن چرخه‌ی ذوب و انجماد فراهم می‌کند.

از طرف دیگر تابش خورشیدی امکان ذوب ماده تغییر فاز دهنده را در طول روز موجب می‌شود. همچنین هنگامی دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده با بررسی شرایط اقلیمی هر شهر انتخاب شود، اثر مطلوبی بر کاهش دمای داخلی سقف و دیوار، کاهش نوسانات و صرفه جویی حرارتی در طول یک سال خواهد داشت اما ماده تغییر فاز دهنده انتخابی برای یک شرایط آب و هوایی، مناسب شرایط آب و هوایی دیگر نیست و انتخاب ماده تغییر فاز دهنده بایستی باید با توجه به شرایط آب و هوایی، جهت گیری ساختمان و دمای متوسط سالیانه انجام گیرد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مورد کاربرد ماده تغییر فاز دهنده در ساختمان و جهت دستیابی به نتایج بهتر، ادغام مواد تغییر فاز دهنده با مصالح ساختمانی و همچنین استفاده از PCM در کف، نما، پوشش و کف پوش در شرایط آب و هوایی متفاوت توسعه داده شود.

منابع

- حسینی، سید محمد و همکاران. (۱۳۹۸). "بهینه‌سازی جهت سازه‌های ساختمانی بر اساس تابش انرژی خورشید در همدان". جغرافیا، ۱۷ (۶۰): ۵-۲۰.
- معماریان، سینا، محمدکاری، بهروز، فیاض، ریما، اسدی، سیما. (۱۳۹۶). "بررسی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده بر طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی در ساختمان های مسکونی". نامه معماری و شهرسازی، ۱۹ (۳۹): ۳۹-۶۰.
- نیک قدم، نیلوفر. (۱۳۹۵). "تأثیر باد و آفتاب در تعدیل شرایط گرمایی خانه‌های بوشهر نمونه موردی: خانه گلشن". معماری و شهرسازی ایران، ۷ (۱۲).
- Ahangari, M. and Maerefat, M. (2019). "An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions". Sustainable Cities and Society, 44: 120-129.
- Ahmad, T. and Zhanga, D. (2020). "A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far". Energy Reports, 6: 1973-1991.
- Arıcı, M., Bilgin, F., Nižetić, S. and Karabay, H. (2020). "PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat". Applied Thermal Engineering, 165: 114560.
- Ardito, G. et al. (2018). "A numerical study of adaptive building enclosure systems using solid-solid phase change materials with variable transparency". Energy and Buildings, 167: 240-252.

- Bhamare, D.K., Rathod, M.K. and Banerjee, J.** (2020). "Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer". *Journal of Building Engineering*, 28:101018.
- Barzin, R., Chen, J.J., Young, B.R. and Farid, M.M.** (2015). "Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system". *Applied energy*, 148: 39-48.
- Boxwell, M.** (2010). "Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems". Greenstream publishing.
- Childs, K.W. and Stovall, T.K.** (2012). "Use of phase change material in a building wall assembly: a case study of technical potential in two climates". *Applied Thermal Engineering*, 14(3): 450-460.
- Cui, H. and etc.** (2017). "Development of structural-functional integrated energy storage concrete with innovative macro-encapsulated PCM by hollow steel ball". *Elsevier Applied Energy*, 185(1, 1) : 107-118.
- De Gracia, A.** (2019). "Numerical Analysis of Building Envelope with Movable Phase Change Materials for Heating Applications". *Applied Sciences*, 9: 3688-3700.
- Durakovic, B.** (2020). "Application of phase change materials in glazing and shading systems: Issues, trends and developments". Conference: International Engineering Research Symposium ,154-171.
- Esbati, S. and etc.** (2019). "Investigating the effect of using PCM in building materials for energy saving: Case study of Sharif Energy Research Institute". *Energy Science & Engineering*, 1002:100-125.
- Essid, N. et al.** (2020). "Experimental and Numerical Thermal Properties Investigation of Cement-Based Materials Modified with PCM for Building Construction Use". *Journal of Architectural Engineering*, 26(3) :184-197.
- Faraji, M.** (2017). "Numerical study of the thermal behavior of a novel Composite PCM/concrete wall". *Energy Procedia*, 139: 105-110.
- Gounni, A., Alami, M.** (2017). "The optimal allocation of the PCM within a composite wall for surface temperature and heat flux reduction: An experimental Approach". *Elsevier Applied Thermal Engineering*, 127:1488-1494.
- Izquierdo-Barrientos, M.A., Belmonte, J.F., Rodríguez-Sánchez, D., Molina, A.E. and Almendros-Ibáñez, J.A.** (2012). "A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)". *Applied Thermal Engineering*, 47: 73-85.
- Kant, K. et al.** (2017). "Heat transfer studies of building brick containing phase change materials". *Solar Energy* 155(C):1233-1242.
- Karim, L. and etc.** (2014). "New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings". *Energy and Buildings*, 68: 703-706.
- Köse, E. and Manioğlu, G.** (2019). "Evaluation of the Performance of a Building Envelope Constructed with Phase-Change Materials in Relation to Orientation in Different Climatic Regions". *E3S Web of Conferences*, 111, 04003.

- Li, Z.X., Al-Rashed, A.A., Rostamzadeh, M., Kalbasi, R., Shahsavari, A. and Afrand, M.** (2019). "Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: Effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of PCM". *Energy Conversion and Management*, 195: 43-56.
- Marani, A. L.Nehdi, M.** (2019). "Integrating phase change materials in construction materials: Critical review", *Construction and Building Materials*. 217: 36-49.
- Markarian, E. and Fazelpour, F.** (2019). "Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM". *Solar Energy*, 191: 481-496.
- Machniewicz, A., Heim, D.** (2012) "Investigation of PCM layer position in thermal insulation component semi-exposed to external environment", *Energy Buildings*, 46(2): 882-890.
- Mazzeo, D. et al.** (2017). " A Method for Thermal Dimensioning and for Energy Behavior Evaluation of a Building Envelope PCM Layer by Using the Characteristic Days". *Journals Energies*, 10 (5):659-674.
- Nazir, H., et al.** (2019). "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129: 491-523.
- Paksoy, H., Kardas, G., Konuklu, Y., Cellat, K. and Tezcan, F.** (2017). "Characterization of concrete mixes containing phase change materials". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251: 012118.
- Pasupathy, A., Athanasius, L., Velraj, R. and Seeniraj, R.V.** (2008). "Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management". *Applied Thermal Engineering*, 28(5-6): 556-565.
- Rathore, P.K.S. and Shukla, S.K.** (2021). "Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review". *Energy and Buildings*: 110799.
- Rongqi, P. and etc.** (2021). " Transparent wood with phase change heat storage as novel green energy storage composites for building energy conservation". *Journal of Cleaner Production*. 296: 126-142.
- Ramakrishnan, S. et al** (2016). " Parametric analysis for performance enhancement of phase change materials in naturally ventilated buildings". *Energy and Buildings*, 124: 35-45. [38] J. O. Smith. (2010). "Determination of the convective heat transfer coefficients from the surfaces of buildings within urban street canyons", *Energy and building*, 42(4), 534-540.
- Saffari, M., De Gracia, A., Fernández, C. and Cabeza, L.F.** (2017). "Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings". *Applied Energy*, 202: 420-434.
- Santamouris, M.** (2006), *Environmental Design of Urban Buildings: An Integrated Approach*, Earthscan, London.

- sheeja, Y. and etc.** (2019). " Numerical analysis of energy savings due to the use of PCM integrated in lightweight building walls". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 211-235
- Sun, X. et al.** (2019). " Potential Thermal Enhancement of Lightweight Building Walls Derived From Using Phase Change Materials (PCMs)". Energy Science & Engineering, 152:95-110.
- Tao, Y.B. and LingHe, Y.** (2018). "A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat ". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93: 245-259.
- Umair, M.M., et al.** (2019). "Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review". Applied energy, 235: 846-873
- Ziasistani, N. and Fazelpour, F.** (2019). "Comparative study of DSF, PV-DSF and PV-DSF/PCM building energy performance considering multiple parameters". Solar Energy, 187: 115-128 .
- Yang, Y.K., Kang, I.S., Chung, M.H., Kim, S. and Park, J.C.** (2017). "Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon". Building and Environment, 122: 411-421.
- Yu, J., Yang, Q., Ye, H., Luo, Y., Huang, J., Xu, X., Gang, W. and Wang, J.** (2020). "Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM". Renewable Energy, 145: 2538-2549.

فهرست علائم و اختصارات

واحد	علامت	توضیحات
-	ACH	تغییر هوا در هر ساعت
(kj/kg.k)	C	گرمای ویژه
(kj/kg.k)	C _{pl}	گرمای ویژه مایع
(kj/kg.k)	C _{ps}	گرمای ویژه ی جامد
(kj/kg.k)	C _{pm}	گرمای ویژه ی تغییر فاز
(m/s ²)	g	شتاب گرانش
(W/m ² .k)	h _o	ضریب انتقال حرارت خارجی
(W/m ² .k)	h _i	ضریب انتقال حرارت داخلی
(W/m ² .k)	h	ضریب انتقال حرارت جا به جایی
(W/m.k)	K	ضریب هدایت حرارتی
(J/kg)	L	گرمای نهان
(w/m ²)	q _{rad}	شارحرارتی تابشی
(w/m ²)	Q	شار حرارتی
(°C)	T _∞	دمای هوا
(°C)	T _i	دمای اولیه
(°C)	T _m	دمای تغییر فاز
(°C)	T _{room}	دمای اتاق
(s)	t	زمان
(°C)	ΔT	اختلاف دما
(°C)	T ^{new}	دما در گام زمانی بعدی
(kg/m ³)	ρ	دانشسته
-	β	ضریب انبساط
m	Δx	ضخامت هر حجم کنترل