

مطالعه تجربی کاهش مصرف انرژی با بکارگیری ماده تغییر فاز پارافینی در ترموود مصرفی داخل و خارج ساختمان

مرضیه کوچک پور

دانشجوی دکتری معماری، مرکز تفرش، دانشگاه آزاد اسلامی، تفرش، ایران

چکیده

در سال های اخیر، کاهش مصرف انرژی در ساختمان ها به یکی از چالش های اساسی در ایران و جهان تبدیل شده است. مواد تغییر فاز دهنده (PCM) با قابلیت ذخیره سازی انرژی به صورت گرمای نهان، راهکاری مؤثر هستند، اما هدایت حرارتی پایین آن ها کاربرد گسترده شان را محدود کرده است. در پژوهش حاضر، ترکیب ماده تغییر فاز پارافینی-RT ۵۵ با صفحه ترموود سلول باز به عنوان یک راهکار نوین برای افزایش هدایت حرارتی و بهبود عملکرد حرارتی پوسته ساختمان معرفی می شود. تحقیق به صورت ترکیبی (شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی) انجام شده است. در بخش شبیه سازی، یک مدل ساختمان مرجع در نرم افزارهای Revit، Insight و DesignBuilder تحت اقلیم شهر تهران (داده های سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹) تحلیل شد. در بخش تجربی، یک سامانه آزمایشگاهی شامل منبع حرارتی (۴۵ و ۹۰ وات)، کانال هوا و دو قطعه ترموود (با و بدون پارافین-RT ۵۵) ساخته شد. چهار حالت مختلف (تزیق پارافین در الیه داخلی، میانی، خارجی و بدون پارافین) در سرعت های جریان هوا ۲، ۲.۵ و ۳ متر بر ثانیه مورد آزمون قرار گرفت. دمای سطح در شش نقطه، دمای خروجی کانال و افت فشار اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که در حالت اول (پارافین درون صفحه)، دمای سطح به طور متوسط ۲ تا ۴ درجه سلسیوس نسبت به حالت بدون پارافین کاهش یافت. حداکثر شار حرارتی ورودی در تابستان ۳۰ تا ۴۷ درصد کاهش نشان داد. افزایش سرعت جریان هوا از ۲ به ۳ متر بر ثانیه، کاهش دمای بیشتری (حدود ۱.۵ درجه) به همراه داشت. افت فشار ناشی از صفحه ترموود ناچیز بود (کمتر از ۲ پاسکال). شبیه سازی نشان داد که استفاده از این کامپوزیت در دیوار جنوبی بیشترین صرفه جویی حرارتی را دارد. به طور کلی، ترکیب ترموود سلول باز و پارافین-RT ۵۵ می تواند به عنوان یک سیستم غیرفعال ذخیره سازی انرژی، مصرف انرژی ساختمان را کاهش داده و آسایش حرارتی را بهبود بخشد.

واژه های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، ترموود، پارافین -RT ۵۵، کاهش مصرف انرژی، پوسته ساختمان، مطالعه تجربی.

۱- ۱ مقدمه

بخش ساختمان با سهم حدود ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی در ایران، یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی محسوب می شود (منصوری و جبار، ۱۳۸۹). افزایش قیمت حامل های انرژی و آلودگی های زیست محیطی ناشی از سوخت های فسیلی، لزوم بهره گیری از راهکارهای نوین برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان را دوجندان کرده است. یکی از این راهکارها، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) است. این مواد قابلیت ذخیره سازی انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان را در هنگام تغییر فاز (جامد به مایع و بالعکس) دارند و می توانند نوسانات دمایی را کاهش دهند (طاهری و همکاران، ۱۳۹۱).

با این حال، مشکل اصلی بسیاری از PCM ها، هدایت حرارتی پایین (معمولاً کمتر از ۰.۲ وات بر متر-کلوین) است که فرآیند شارژ و دشارژ انرژی را کند می کند (قاسمی و پیرکندی، ۱۳۸۸). برای رفع این مشکل، روش هایی مانند افزودن ذرات با هدایت بالا (گرافیت، نانولوله های کربنی) یا استفاده از ساختارهای متخلخل پیشنهاد شده است (بیگانه طلب و سالاریان، ۱۳۹۴). در این میان، ترموود سلول باز به دلیل داشتن شبکه متخلخل با نسبت سطح به حجم بالا، می تواند به عنوان یک ماتریس مناسب برای میزبانی از PCM عمل کرده و انتقال حرارت را تسهیل کند. ترموود از طریق فرآیند حرارتی (۱۸۰ تا ۲۲۰ درجه سلسیوس) تولید می شود که طی آن صمغ و رطوبت چوب خارج شده و ساختاری متخلخل و پایدار ایجاد می گردد (فروتی، ۱۳۸۱).

پیشینه پژوهش نشان می دهد که مطالعات متعددی بر روی ترکیب PCM با مصالح ساختمانی مانند بتن، گچ و آجر انجام شده است (آرامی و مختاری، ۱۳۹۲؛ جمشیدی و صدفی، ۱۳۹۵). اما مطالعات اندکی به استفاده از چوب اصلاح شده حرارتی (ترموود) به عنوان ماتریس PCM پرداخته اند. نوآوری این پژوهش در ترکیب همزمان پارافین RT-۵۵ با ترموود سلول باز و بررسی تجربی و عددی عملکرد آن در شرایط اقلیمی تهران است.

اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: (۱) بررسی تأثیر استفاده از پارافین RT-۵۵ بر دمای سطح و عملکرد حرارتی ترموود در سرعت های مختلف جریان هوا؛ (۲) تعیین ضخامت بهینه الیه PCM در پوسته ساختمان (سقف و دیوار) برای اقلیم تهران؛ (۳) محاسبه میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان با استفاده از این کامپوزیت. فرضیه پژوهش این است که ترکیب ترموود متخلخل با پارافین RT-۵۵ به دلیل افزایش سطح تماس و گرمای نهان بالای پارافین، موجب کاهش محسوس دمای سطح، کاهش نوسانات دمایی و کاهش بار سرمایشی ساختمان می شود.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۱-۲. مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

مواد تغییر فاز دهنده دسته ای از مواد هستند که توانایی ذخیره سازی انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان را دارند. در هنگام تغییر فاز از جامد به مایع، مقدار قابل توجهی انرژی جذب شده و دمای ماده تقریباً ثابت می ماند. این ویژگی، PCM ها را به گزینه ای ایده آل برای یکنواخت سازی دمای داخلی ساختمان تبدیل کرده است (طاهری و همکاران، ۱۳۹۱). PCM ها به سه دسته آلی (پارافین ها، اسیدهای چرب)، غیر آلی (هیدرات های نمک) و یوتکتیک تقسیم می شوند. پارافین ها به دلیل گرمای نهان بالا، پایداری شیمیایی و عدم خوردگی، بیشترین کاربرد را در ساختمان دارند. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی ترموود و پارافین RT-۵۵ را نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات ترموود سلول باز و پارافین RT-۵۵

ویژگی	ترموود (سلول باز)	RT-۵۵ پارافین
چگالی (kg/m^3)	۴۵۰	۷۸۰
هدایت حرارتی (W/m.K)	۰.۱۲	۰.۲۲
گرما ی ویژه (kJ/kg.K)	۱.۵	۲.۱
دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	-	۵۵
گرما ی نهان (kJ/kg)	-	۲۵۰

۲-۲. پیشینه پژوهش

در سطح بین المللی، پژوهش های گسترده ای بر روی کاربرد PCM در ساختمان انجام شده است. زلبا و همکاران (۲۰۰۴) سیستم های خنک سازی رایگان با PCM را بررسی کردند. مارین و همکاران (۲۰۰۵) با افزودن گرافیت به PCM پارافینی، هدایت حرارتی را افزایش دادند. ناگانو و همکاران (۲۰۰۶) از گرانول های PCM در کف ساختمان استفاده کردند و کاهش نوسانات دمایی را گزارش نمودند. در ایران، آرامی و مختاری (۱۳۹۲) به بررسی ذخیره سازی انرژی در ساختمان با PCM پرداختند. جمشیدی و صدفی (۱۳۹۵) تأثیر نانومواد تغییر فاز دهنده را در سیستم گرمایش از کف بررسی کردند. منصوری و همکاران (۱۳۹۴) نقش PCM را در مدیریت مصرف انرژی ساختمان های اداری تهران شبیه سازی کردند. با این حال، شکاف تحقیقاتی اصلی، عدم توجه به ماتریس های آلی و زیست بنیان با ساختار متخلخل مانند ترموود به عنوان حامل PCM است. نوآوری پژوهش حاضر در استفاده از ترموود سلول باز به عنوان یک ماتریس سبک، در دسترس و سازگار با محیط زیست برای میزبانی از پارافین RT-۵۵ می باشد.

۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، ترکیبی (شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی) است.

۳-۱. شبیه سازی عددی

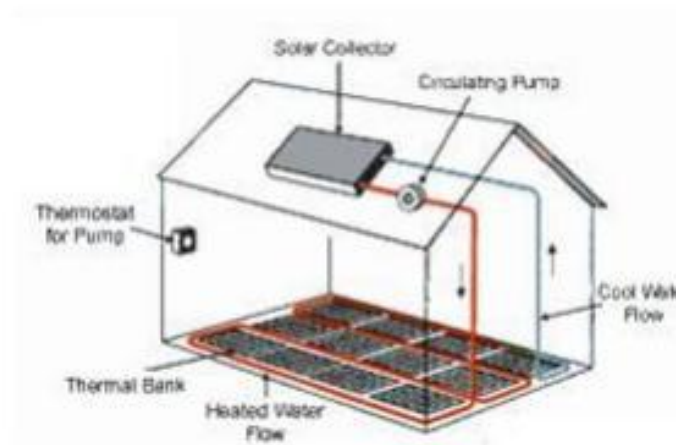
شبیه سازی با استفاده از نرم افزارهای (Revit ، Insight و) DesignBuilder موتور EnergyPlus انجام شد. مدل مرجع یک ساختمان مسکونی یک طبقه با مساحت زیربنای ۱۰۰ مترمربع در شهر تهران در نظر گرفته شد. داده های آب و هوایی (دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت) برای بازه زمانی مهر ۱۳۹۸ تا شهریور ۱۳۹۹ از ایستگاه سینوپتیک مهرآباد دریافت گردید. دو حالت مقایسه شد: (الف) پوسته ساختمان با مصالح مرسوم) بدون (PCM) ، (ب) پوسته ساختمان با الیه ۳ سانتی متری کامپوزیت ترموودود PCM-ضخامت های ۱، ۲ و ۳ سانتی متر نیز برای یافتن ضخامت بهینه بررسی شد. خروجی های شبیه سازی شامل دمای داخلی سقف و دیوار در فصول مختلف، شار حرارتی ورودی/خروجی و مصرف انرژی سالانه بودند.

۳-۲. آزمایش تجربی

یک سامانه آزمایشگاهی شامل یک کانال هوای مستطیلی (مقطع ۲۰×۲۰ سانتی متر)، یک هیتر برقی با قابلیت تنظیم توان (۴۵ و ۹۰ وات)، یک دمنده هوا با سرعت متغیر (۲، ۲.۵ و ۳ متر بر ثانیه)، دو صفحه ترموودود سلول باز (ابعاد ۲۰×۲۰×۳ سانتی متر) و یک حسگر دمای سطح از نوع ترموکوپل (دقت ۰.۱ درجه سلسیوس) ساخته شد (شکل ۱). پارافین RT-00 (دمای ذوب ۵۵ درجه سلسیوس، گرمای نهان ۲۵۰ کیلوژول بر کیلوگرم) به چهار حالت درون صفحات ترموودود تزریق شد:

- حالت اول : تزریق پارافین در تمام حجم صفحه (الیه داخلی)
- حالت دوم : تزریق پارافین فقط در الیه میانی (ضخامت ۱ سانتی متر)
- حالت سوم : تزریق پارافین فقط در الیه خارجی (سطح در معرض جریان هوا)
- حالت چهارم : بدون پارافین (صفحه ترموودود خالص)

دمای سطح در شش نقطه با فاصله زمانی ۵ دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه ثبت شد. همچنین دمای خروجی کانال هوا و افت فشار (شکل U با مانومتر) اندازه گیری شد. هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین داده ها گزارش گردید.

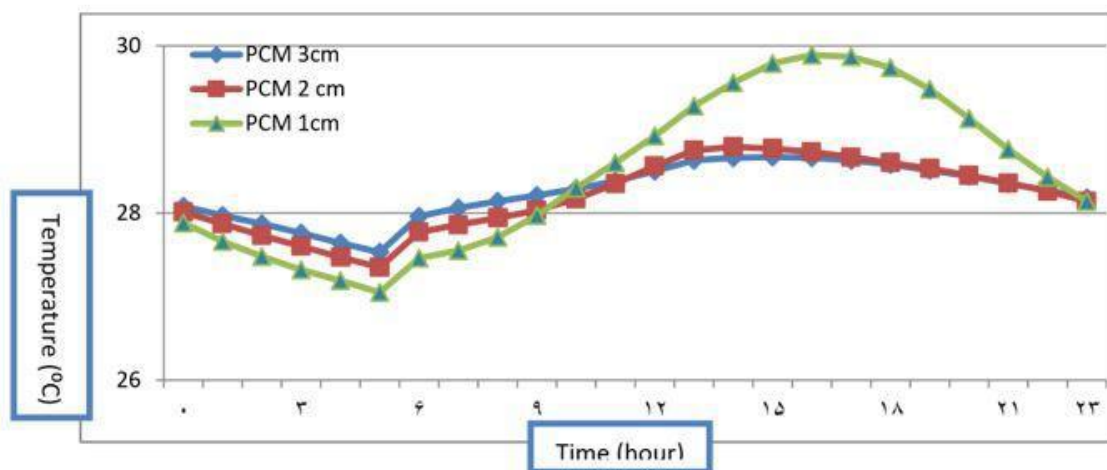


شکل ۱: نمای شماتیک سامانه آزمایشگاهی

۴- یافته ها

۴-۱. نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی برای سقف با ضخامت های مختلف PCM در تیر ماه (گرم ترین ماه سال) در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش ضخامت PCM از ۱ به ۳ سانتی متر، حداکثر دمای داخلی سقف از ۳۲ درجه به ۲۸ درجه سلسیوس کاهش یافت و نوسان دمایی روزانه از ۵ درجه به ۲ درجه رسید. ضخامت ۳ سانتی متر به عنوان ضخامت بهینه انتخاب شد.





شکل ۲. مقایسه ی دمای مختلف سقف در تیر ماه برای ضخامت های مختلف PCM - در شهر تهران

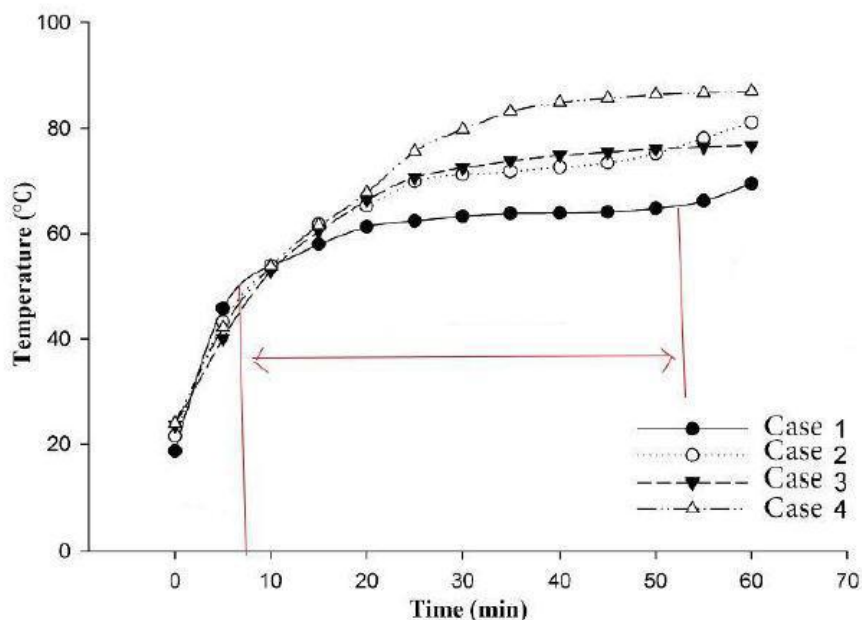
در جدول ۲، شار حرارتی ورودی از سقف در تابستان برای حالت با و بدون PCM مقایسه شده است. استفاده از PCM به ترتیب در تیر، مرداد و شهریور باعث کاهش شار حرارتی به میزان ۴۷، ۳۸ و ۳۰ درصد شد.

جدول ۲. مقایسه شار حرارتی آنی دریافتی سقف (W/m^2)

ماه	بدون PCM	PCM (سانتی متر ۳) با	درصد کاهش
تیر	۱۳.۲	۷.۰	۴۷٪
مرداد	۱۲.۵	۷.۸	۳۸٪
شهریور	۱۰.۸	۷.۶	۳۰٪

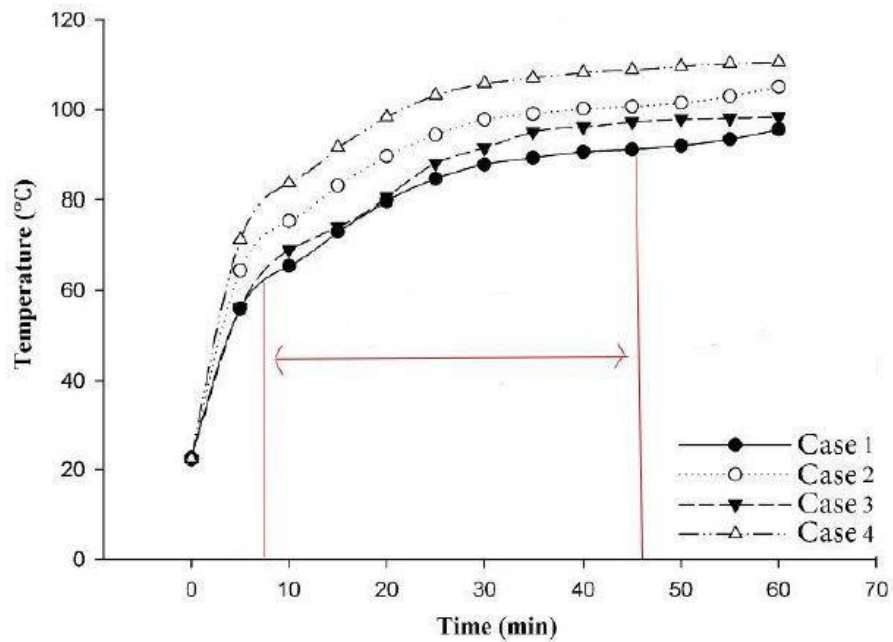
۲-۴. نتایج آزمایش تجربی

دمای سطح نقطه مرکزی (نقطه ۶) صفحه ترموود در حالت اول (پارافین درون صفحه) با توان ۴۵ وات و سرعت ۲.۵ متر بر ثانیه در شکل ۳ نشان داده شده است. دمای نهایی پس از ۶۰ دقیقه به حدود ۴۴ درجه رسید، در حالی که در حالت بدون پارافین (حالت چهارم) دمای مشابه حدود ۴۷ درجه بود. در توان ۹۰ وات، اختلاف بیشتری مشاهده شد: دمای حالت اول حدود ۶۵ درجه و حالت چهارم حدود ۷۰ درجه (شکل ۳).



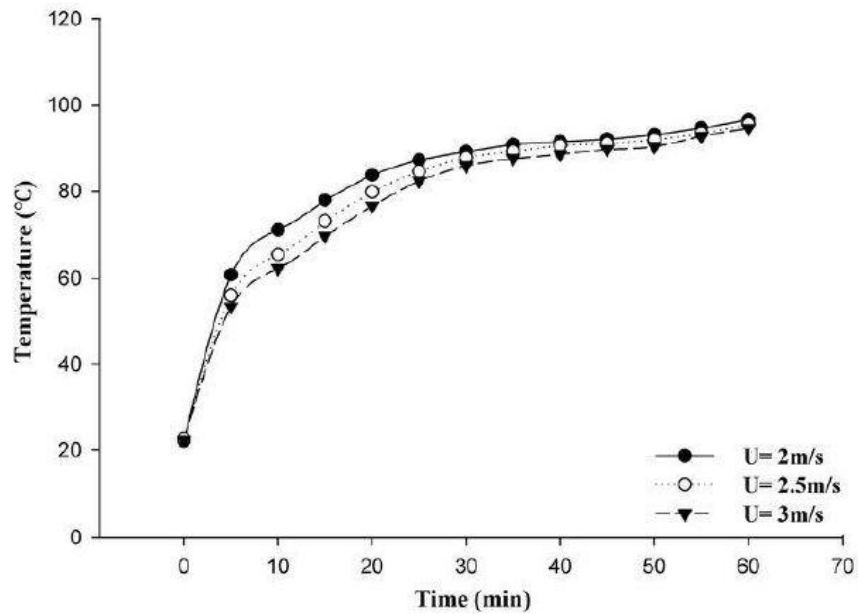


شکل ۳. دمای سطح نقطه ۶ در حالت اول با توان ۴۵ وات و سرعت ۲.۵



شکل ۴. دمای سطح نقطه ۶ در حالت اول با توان ۹۰ وات و سرعت ۲.۵

تأثیر سرعت جریان هوا در شکل ۵ نشان داده شده است. افزایش سرعت از ۲ به ۳ متر بر ثانیه، دمای سطح را حدود ۱.۵ درجه کاهش داد، اما میزان کاهش در سرعت های بالاتر کمتر بود.



شکل ۵. دمای سطح نقطه ۶ با سرعت های مختلف در توان ۹۰ وات (حالت اول)

دمای خروجی کانال هوا در حالت اول به طور میانگین ۲-۳ درجه کمتر از حالت چهارم بود (جدول ۳).

جدول ۳. دمای خروجی کانال هوا در توان ۴۵ وات و سرعت ۲.۵ m/s

حالت آزمایش	دمای خروجی (°C)
(داخل PCM) حالت اول	۳۲.۷
(میانی PCM) حالت دوم	۳۳.۵
(خارجی PCM) حالت سوم	۳۴.۶
(بدون PCM) حالت چهارم	۳۵.۸

افت فشار اندازه گیری شده در سرعت ۳ متر بر ثانیه حدود ۱.۸ پاسکال بود که بسیار ناچیز است و تأثیر محسوسی بر عملکرد سیستم ندارد.

۵- بحث



۶- نتایج تجربی و عددی به وضوح نشان داد که ترکیب پارافین RT-۵۵ با ترمووود سلول باز، عملکرد حرارتی پوسته ساختمان را بهبود می بخشد. دلیل اصلی، گرمای نهان بالای پارافین (۲۵۰ کیلوژول بر کیلوگرم) است که باعث جذب انرژی قابل توجهی در هنگام ذوب می شود و از افزایش ناگهانی دما جلوگیری می کند. همچنین ساختار متخلخل ترمووود سطح تماس مؤثر با جریان هوا را افزایش داده و انتقال حرارت را تسهیل می کند که این موضوع در کاهش دمای خروجی کانال هوا مشاهده شد.

۷- مقایسه با مطالعات پیشین نشان می دهد که نتایج این پژوهش با یافته های خرقانی و خدائی (۱۳۹۳) مبنی بر کاهش ۲ تا ۵ درجه ای نوسانات دمایی توسط PCM هماهنگ است. با این حال، نوآوری پژوهش حاضر استفاده از ترمووود به عنوان حامل PCM است که نسبت به ماتریس های متداول مانند بتن (با وزن زیاد) یا گچ (با دوام محدود)، مزایایی مانند سبکی، قابلیت نصب آسان و زیبایی ظاهری دارد.

۸- تأثیر جهت دیوار: نتایج شبیه سازی نشان داد که دیوار جنوبی بیشترین بهره را از PCM می برد. این موضوع به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشید در طول روز است که فرآیند ذوب PCM را کامل می کند. بنابراین توصیه می شود کامپوزیت پیشنهادی در نماهای جنوبی و شرقی ساختمان در تهران به کار رود.

۹- یکی از محدودیت های پژوهش، انجام آزمایش در مقیاس کوچک (صفحه ۲۰×۲۰ سانتی متر) است. برای تعمیم نتایج، نیاز به آزمایش در یک اتاقک در مقیاس واقعی وجود دارد. همچنین پایداری طولانی مدت پارافین درون ترمووود باید در پژوهش های آینده بررسی شود.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه گیری:

- ترکیب پارافین RT-۵۵ با ترمووود سلول باز (حالت اول) دمای سطح را ۲ تا ۴ درجه سلسیوس نسبت به حالت بدون PCM کاهش داد.
- این کامپوزیت توانست شار حرارتی ورودی از سقف را در فصل تابستان بین ۳۰ تا ۴۷ درصد کاهش دهد.
- ضخامت بهینه برای پوسته ساختمان در اقلیم تهران ۳ سانتی متر است.
- افزایش سرعت جریان هوا از ۲ به ۳ متر بر ثانیه تأثیر مثبت اما نزولی بر کاهش دما دارد.
- افت فشار ناشی از ترمووود ناچیز است و مانعی برای کاربرد در سیستم های تهویه ایجاد نمی کند.
- شبیه سازی نشان داد که دیوار جنوبی بهترین مکان برای نصب این کامپوزیت در تهران است.

پیشنهادهای برای پژوهش های آتی:

- ساخت اتاقک تست در مقیاس ۱:۱ و اندازه گیری مصرف واقعی انرژی.



- بررسی طول عمر و پایداری کامپوزیت پس از ۵۰۰ چرخه ذوب-انجماد.
- مقایسه با سایر PCM های تجاری (مانند هیدرات های نمک) و سایر ماتریس های متخلخل (مانند فوم فلزی).
- آنالیز اقتصادی (دوره بازگشت سرمایه) برای کاربری مسکونی و تجاری.

منابع :

- آرامی، حمیدرضا؛ مختاری یزدی، مطهره (۱۳۹۲). ذخیره سازی انرژی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده. نشریه انرژی ایران، دوره ۱۱.
- بیگانه طلب، بهنام؛ سالاریان، حسام الدین (۱۳۹۴). تحلیل عددی سیستم ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده. فناوریهای نوین در سیستمهای انرژی، سال اول، شماره دوم، صص ۳۷-۴۷.
- پیرکندی، جاماسب (۱۳۸۱). بررسی تأثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در بهینه سازی سیستم های ذخیره کننده انرژی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- جمشیدی، نغمه؛ صدقی، نسیم (۱۳۹۵). تأثیر نانومواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش از کف در آب و هوای معتدل و مرطوب. مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۶، ویژه نامه، صص ۸۷-۹۱.
- خرقانی، فاطمه؛ خدائی، رعنا (۱۳۹۳). بررسی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی. چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.
- شاه حسینی، رویا؛ افلاطونیان، زین العابدین (۱۳۹۳). اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان. چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.
- طاهری، هلیا؛ ثقفی، محمدجواد؛ محمدکاری، بهروز (۱۳۹۱). بررسی انواع مواد تغییر فاز دهنده و استفاده از آن در عملکرد های مختلف. دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران.
- فروتنی، سام (۱۳۸۱). کتاب مصالح و ساختمان. انتشارات روزنه، تهران.
- قاسمی، مجید؛ پیرکندی، جاماسب (۱۳۸۸). بهبود خواص مواد تغییر فاز دهنده با افزودن ذرات نانو. هفدهمین کنفرانس سالانه و بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.
- منصوری، شبنم؛ پیرکندی، جاماسب؛ افشاری، ابراهیم (۱۳۹۴). بررسی نقش مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت مصرف انرژی ساختمانها. انرژی های تجدیدپذیر و نو، سال دوم، شماره دوم.
- منصوری، شبنم؛ جبار، محسن (۱۳۸۹). طراحی سیستم ذخیره ساز سرما برای یک ساختمان اداری در شهر اهواز و مقایسه آن با سیستم های سرمایشی مرسوم. دومین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران.
- یزدان شناس؛ خالصی دوست، الیاس و عبدالله (۱۳۸۹). مبدل حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده PCM برای ذخیره انرژی خورشیدی، اولین کنفرانس بین المللی سالانه انرژی پاک، کرمان.
- Arkar, C., Medved, S. (۲۰۰۷). Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, ۸۱, ۱۰۷۸-۱۰۸۷.



- Arkar, C., Medved, S. (۲۰۰۹). Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model. *Thermochimica Acta*, ۴۳۸, ۱۹۲-۲۰۱.
- Lazaro, A., Dolado, P., Marin, J.M., Zalba, B. (۲۰۱۰). PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings. *Energy Conversion and Management*, ۵۰, ۴۳۹-۴۴۳.
- Marin, J., Zalba, B., Cabeza, F., Mehling, H. (۲۰۰۴). Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, ۲۷, ۸۳۹-۸۴۹.
- Nagano, K., Takeda, S., Mochida, T., Shimakura, K., Nakamura, T. (۲۰۰۶). Study of a floor supply air conditioning system using granular PCM. *Energy and Buildings*, ۳۸, ۴۳۶-۴۴۶.
- Sarier, N., Onder, E. (۲۰۱۲). Organic Phase Change Materials and Their Textile Applications: An Overview. *Thermochimica Acta*, ۵۴۰, ۷-۱۰.
- Takeda, S., Nagano, K., Mochida, T., Shimakura, K. (۲۰۰۴). Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing PCM. *Solar Energy*, ۷۷, ۳۲۹-۳۳۸.
- Tzivanidis, A., Antonopoulos, K., Kravvaritis, E. (۲۰۱۳). Parametric analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with PCM-embedded piping. *International Journal of Energy Research*, ۳۶, ۱۸-۳۵.
- Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (۲۰۰۴). Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, ۲۷, ۸۳۹-۸۴۹.