



بررسی انتخاب مواد تغییر فازدهنده در سرمایش غیرفعال برای بهبود تهویه طبیعی و آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک

سید حسین نشاط صفوی^۱، سید رحمان اقبالی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲- دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

* صندوق پستی ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸، s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir

چکیده

بخش سرمایش بیشترین سهم مصرف انرژی ساختمانی به‌ویژه در اقلیم های گرم و خشک را به خود اختصاص داده است. از این رو تأمین انرژی مورد نیاز سیستم های سرمایشی و راهکارهای غیرفعال برای کاهش دمای محیط بسیار اهمیت می‌یابد. در این راستا به‌عنوان یک راهکار، مواد تغییر فاز دهنده با تغییر فاز خود، انرژی را ذخیره و به بهبود تهویه طبیعی و آسایش حرارتی ساکنین کمک می نمایند. این مواد بر اساس ساختار شیمیایی و نقطه ذوب خود، دارای انواع گوناگونی هستند. در این جهت، انتخاب PCM مناسب، بر اساس ویژگی‌ها و کاربرد آن جهت بهبود تهویه طبیعی و سرمایش در ساختمان‌ها بسیار قابل توجه است. این پژوهش به بررسی ویژگی‌ها و رفتار مواد تغییر فاز دهنده جهت استفاده در سیستم های سرمایش غیرفعال ساختمانی و تهویه طبیعی به کمک مرور و تحلیل مطالعات و اسناد معتبر می‌پردازد. در نهایت با توجه به نوع و کاربرد ماده تغییر فاز دهنده، PCM بهینه با نقطه ذوب مناسب جهت ایجاد شرایط آسایش حرارتی و تهویه طبیعی در محیط ارائه می‌شود. به‌عنوان یک نتیجه، استفاده از PCM با نقطه ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد می تواند شرایط دمایی محیط را در محدوده آسایش حرارتی قرار دهد و نیز بهبود شرایط آسایش حرارتی و تهویه طبیعی را منجر گردد.

کلیدواژه‌گان: تهویه طبیعی، مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، ذخیره انرژی، سرمایش غیرفعال، آسایش حرارتی

Investigation of Phase Change Materials Selection in Passive Cooling to Improve Natural Ventilation and Thermal Comfort

Seyed Hossein Neshat Safavi¹, Seyed Ragman Eghbali^{2*}

¹- MSc student, Architecture Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

²- Associate professor, Architecture Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 3414896818, Qazvin, Iran, s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir

Received: 9 March 2020 Accepted: 29 December 2020

Abstract

The cooling energy has covered most portion of building energy consumption in hot and arid climates. Accordingly, suppling of required energy for cooling systems as well as passive solutions to reduce air temperature are so noticeable. As an effective factor, Phase change materials through changing phase save energy and help to improve natural ventilation as well as thermal comfort. These materials have various types base on their chemical structure and melting point. In this way, optimal PCM selection base on their application and melting point is very important; so that, improve natural ventilation and cooling energy in buildings. This study investigates the properties and behavior of phase change materials for their implementation in building passive cooling systems as well as natural ventilation by reviewing and analyzing valid researches and documents in hot and dry climate of Yazd city. Finally, due to PCMs type, their application, and climate condition, optimal PCM has been found; so that, provide thermal comfort, energy consumption reduction, and natural ventilation. As a result, PCM with melting point of 28 °C can put the environmental temperature in the thermal comfort zone; besides, improve thermal comfort conditions and natural ventilation.

Keywords: Natural Ventilation, Phase Change Materials (PCM), Energy Storage, Passive Cooling, Thermal Comfort

۱- مقدمه

ملبورن، اتفاق می‌افتد. یافته‌های این مقاله می‌تواند برای بهبود درک پتانسیل تهویه طبیعی در آب‌وهوای مختلف و برای طراحی آگاهانه در شرایط آب و هوایی ساختمان‌های مسکونی استرالیا مفید واقع گردد [۵]. همچنین در زمینه مواد تغییر فاز دهنده نیز لیژانا و همکاران در پژوهشی به مطالعه سرمایه‌های غیرفعال در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. این پژوهش با نرم‌افزار ترنسیس به صورت پارامتریک، معیارهای تأثیرگذار و مهم در اجرای بهینه مواد تغییر فاز دهنده به منظور کاهش انرژی سرمایشی ساختمان را شبیه‌سازی کرده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بدون استفاده از سیستم تهویه سبب کاهش ۶۵ درصد شرایط عدم آسایش حرارتی می‌شود [۶]. سان و همکاران در ارزیابی سرمایه‌های غیرفعال به این نتیجه رسیدند که مواد تغییر فاز دهنده موجب کاهش ۵۰ تا ۶۷ درصد از مصرف انرژی می‌شود [۷]. براردی و همکاران در ارزیابی تجربی مواد تغییر فاز دهنده در استراتژی‌های غیرفعال با مصالح سبک‌وزن برای شرایط آب و هوایی تورنتو و ونکوور با هدف کاهش بار سرمایشی ساختمان به این نتیجه رسیدند که با توجه به شرایط اقلیمی، استفاده از این مواد ۲۹/۲ تا ۵۹ درصد بار سرمایشی ساختمان را کاهش می‌یابد [۸]. هو و هیژلبرگ در سال ۲۰۱۸ میلادی به کاربرد این مواد جهت استفاده از خاصیت حرارتی آن‌ها در تهویه ساختمان‌ها پرداخته‌اند؛ به نحوی که در تابستان، در مد خنک‌سازی با تبدیل از حالت جامد به مایع حرارت را از محیط می‌گیرند و باعث خنک‌سازی هوای عبوری می‌شوند و در شب هم در مد عکس با تبدیل شدن از حالت جامد به مایع با گرفتن سرمای محیط باعث گرم شدن هوای عبوری می‌شوند [۹]. همچنین آکیبر و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی بیان می‌کنند که راه‌حل‌های مختلف خنک‌کننده منفعل و نیز ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از گرمای نهان، راهی کارآمد برای افزایش اینرسی حرارتی در ساختمان است، که می‌تواند نوسانات دما را کاهش داده و منجر به بهبود آسایش حرارتی اشخاص شود [۱۰]. ناوارو و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ بیان کردند که تهویه هوای شبانه با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده یک استراتژی بسیار قدرتمند برای کاهش تقاضای خنک‌کنندگی ساختمان‌ها است که باعث کاهش تقاضای بار سرمایشی در ساختمان می‌شود. همچنین به بررسی اشکالات استفاده از تهویه هوای شبانه به‌عنوان یک استراتژی قوی جهت کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها و ارائه راه‌حل‌های نوآورانه با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای غلبه بر شرایط مذکور پرداختند. در مقایسه با راه‌حل‌های موجود، راه‌حل‌های نوآورانه پیشنهاد شده، سطح تماس مواد تغییر فاز دهنده و هوا را تقریباً ۳/۶ و همچنین ضریب انتقال حرارت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند [۱۱]. موجد عیسی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۰ میلادی، عنوان کردند که نوآوری مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای ذخیره‌سازی حرارت، استراتژیی منسجم و پایدار است که می‌تواند به طرح‌های ساختمانی متصل شود. این تحقیق در راستای بررسی و ارزیابی عملکرد مواد موجود با یکپارچه‌سازی مواد تغییر فاز دهنده و پیشنهاد استراتژی طراحی برای بهبود سیستم انجام شد و فوم مسی را به‌عنوان وسیله‌ای برای یکپارچه‌سازی با مواد تغییر فاز دهنده میکرو کپسول معرفی کرد [۱۲]. همچنین می‌توان به پژوهش سلگی و همکاران در زمینه مطالعه پارامتریک مواد تغییر فاز دهنده در تهویه شبانه اشاره کرد. این مطالعه، رفتار مواد تغییر فاز دهنده را در شرایط آب و هوایی متفاوت مورد ارزیابی قرار داده است. پژوهش موردنظر رابطه میزان مواد تغییر فاز دهنده با انتقال حرارت، جریان تهویه شبانه، میزان تغییرات دما، عایق حرارتی و ذخیره انرژی را نشان می‌دهد. در واقع هدف

بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی^۱، در طی ۲۰ سال گذشته میزان تولید انرژی اولیه ۴۹ درصد و انتشار ۴۳ CO₂ درصد افزایش داشته است [۱]. به‌علاوه ۳۰ تا ۴۰ درصد از مجموع انرژی مصرفی در کشورهای توسعه‌یافته مربوط به بخش ساختمان‌های مسکونی و اداری می‌شود. از طرف دیگر افزایش جمعیت، تعداد ساختمان‌های مسکونی و بالا رفتن تقاضای مصرف انرژی سبب افزایش اهمیت این موضوع شده است. چراکه تأمین انرژی موردنیاز کاربران حائز اهمیت است. در این راستا ذخیره انرژی حرارتی^۲ می‌تواند به‌عنوان یک راهکار، خلأ میان مصرف و تأمین انرژی را در بخش سرمایه‌های پر کند [۲]. سیستم ذخیره انرژی حرارتی می‌تواند دمای نهان، دمای محسوس یا واکنش‌های شیمیایی را ذخیره کند. استفاده از سامانه‌های غیرفعال نیز یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها محسوب می‌شود. این سامانه‌ها بدون مصرف انرژی فسیلی با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر همچون باد و تابش خورشید نیازهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان را برطرف می‌کنند. از طرفی تهویه طبیعی راهکاری غیرفعال است که با صرف هزینه‌ای کم بر اساس پتانسیل‌های دمایی و نرخ وزش باد منطقه برای بهبود آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل ساختمان به‌ویژه در اقلیم‌های گرم استفاده می‌شود. امروزه به خاطر تغییرات آب و هوایی به وجود آمده، استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع برای تأمین آسایش حرارتی در حال افزایش است. از این رو تکنیک‌های سرمایش غیرفعال جایگزینی بسیار مناسب برای سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها می‌باشند [۳]. همچنین بهره‌مندی از تهویه طبیعی در سیستم‌های سرمایشی تابع دمای محیط است به‌طوری‌که افزایش این عامل سبب کاهش بهره‌مندی از این نوع سیستم‌ها به‌ویژه در طی ماه‌های گرم سال می‌شود. همین‌طور به‌کارگیری روش‌هایی همچون گرمای نهان از طریق مواد تغییر فاز دهنده (PCM) جهت ذخیره انرژی می‌تواند در افزایش کارایی این سیستم‌ها و بهبود تهویه طبیعی تأثیرگذار باشد. این مواد با جذب گرمای محیط اطراف خود در طول روز، بر اساس دمای نقطه ذوب خود، تغییر فاز داده و قابلیت مناسبی در بهبود دمای هوا محیط از خود نشان می‌دهند. همچنین با توجه به رفتار و ویژگی‌های مختلفشان در شرایط اقلیمی و محیطی مختلف می‌توانند رفتارهای متفاوتی را از خود نشان دهند. بنابراین انتخاب نوع مناسب PCM متناسب با کاربرد و اقلیم منطقه می‌تواند در دستیابی به اهداف موردنظر بسیار موردتوجه باشد.

۲- پیشینه تحقیق

در بخش تهویه طبیعی می‌توان، مطالعات لیو و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی را ذکر کرد، که بابیان اهمیت تهویه طبیعی برای حفظ انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود سطح راحتی محیط و نیز ارائه روشی برای مطالعه موردی و بهینه‌سازی تهویه طبیعی ساختمان از طریق شبیه‌سازی سی اف دی CFD، از سه جنبه: برنامه‌ریزی سایت، شکل ساخت و پوسته ساختمان انجام شده است [۴]. تان و دنگ نیز در سال ۲۰۱۷ میلادی به بررسی پتانسیل تهویه طبیعی ساختمان‌های مسکونی برای یک‌خانه معمولی در سه منطقه پرجمعیت آب و هوایی استرالیا پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که آسایش حرارتی داخل ساختمان در تمام طول سال تنها با استفاده از تهویه طبیعی، به‌جز دوره‌های غیراستاندارد تهویه در تابستان داروین و زمستان



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

سال هشتم، شماره دوازدهم پاییز و زمستان ۱۴۰۰

^۲ Thermal energy storage (TES)

^۱ International Energy Agency (IEA)

یزد، مطالعه و پژوهش تحلیل-توصیفی انجام گردیده است. تمرکز اصلی این تحقیق بر معرفی انواع روش‌های سرمایش غیرفعال، معرفی و دسته‌بندی انواع مواد تغییر فاز دهنده، عملکرد PCM ها و در نهایت پیشنهاد نوع PCM با دمای ذوب مناسب برای اقلیم شهر یزد می‌باشد. شایان ذکر است که این مقاله با تحلیل داده‌های اقلیمی شهر یزد، ویژگی‌ها و عملکرد انواع PCM ها به روشن‌سازی زوایای مساله موجود کمک نموده و اطلاعات و آگاهی‌های جامع خوبی پیرامون موضوع ارائه می‌کند. در زمینه دلایل انتخاب شهر یزد در تحقیق حاضر نیز می‌توان بیان کرد که بخش اعظمی از ایران را اقلیم گرم و خشک تشکیل داده است به طوری که با توجه جدول ۱ و داده‌های اقلیمی، در این نوع اقلیم نیاز سرمایشی در ساختمان‌ها نسبت به سایر بخش‌های مصرف انرژی غالب است. در این جهت با بهبود شرایط آسایش حرارتی و کاهش تقاضای بار سرمایشی، می‌توان میزان قابل توجهی در مصرف انرژی سرمایشی این نوع اقلیم‌ها صرفه‌جویی کرد. در این میان شهر یزد به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین اقلیم گرم و خشک ایران و دارنده قدمت و پیشینه مورد توجه از کاربرد بادگیر و تهویه طبیعی به عنوان راهکاری غیرفعال مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۱ داده آب و هوایی میانگین ماهانه شهر یزد (۱۰۱۵-۱۰۲۰) (سازمان آب و

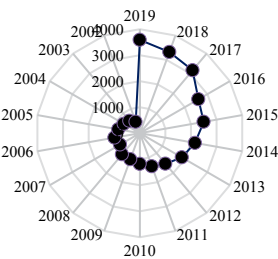
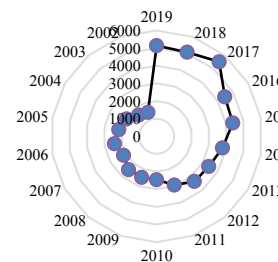
هواشناسی یزد)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
میانگین دمای شبانه	۳۱	۳۶	۴۰	۴۳	۴۰	۳۹
میانگین دمای روزانه	۱۲	۱۷	۲۰	۲۲	۱۸	۱۶
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین دمای شبانه	۳۱	۲۱	۱۸	۱۸	۱۹	۲۶
میانگین دمای روزانه	۱۰	۳	۲	۰	۰	۷

۴- سرمایش غیرفعال

سیستم های سرمایشی می‌توانند باهدف کاهش، تعادل و پراکندگی گرما در ساختمان‌ها استفاده شوند. همین‌طور که در شکل ۲ نیز مشخص است سرمایش تهویه‌ای یکی از سیستم‌های سرمایش در ساختمان است که با استفاده از جریان هوا و تهویه می‌تواند سرمایش را در ساختمان ایجاد کند. یکی از راه‌کارهای مورد استفاده در این سیستم نیز استفاده از تهویه شبانه، گرمای نهان و ذخیره آن است که این مهم می‌تواند با کمک فناوری‌های بروز همچون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) که در این زمینه نقش مؤثری را ایفا می‌کنند، دست یابد [۹]. در جدول ۲ انواع PCM های مورد استفاده در سرمایش ساختمانی آورده شده است.

این پژوهش بررسی تجربی مدل کالری متر در مقیاس واقعی و شبیه‌سازی عددی مواد تغییر فاز دهنده در سه شرایط اقلیمی متفاوت هست. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از این مواد بر عملکرد تهویه شبانه اقلیم استوایی هیچ تأثیری نداشته است اما باین‌وجود در اقلیم نیمه استوایی و گرم خشک، تغییر ست پوینت ترموستات سرمایشی، به‌خوبی عایق حرارتی نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد تهویه شبانه دارد [۱۳]. بنابراین آنچه گفته شد، مرور ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که تاکنون در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان راه‌کاری غیرفعال جهت افزایش عملکرد تهویه طبیعی ساختمان‌ها پژوهش جامعی صورت نگرفته است. شکل ۱ نیز تحقیقات جامعی که تاکنون در زمینه تهویه طبیعی و مواد تغییر فاز دهنده انجام گرفته است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است انجام مطالعه و پژوهش در زمینه تهویه طبیعی و PCM در ساختمان‌ها موضوعی مهم و روبه رشد می‌باشد. این امر به‌ویژه در جنبه‌های؛ گرمای نهان، ذخیره‌سازی انرژی، انواع سیستم‌ها و روش‌های تهویه طبیعی در ساختمان، تأثیر PCM ها بر میزان مصرف انرژی و غیره می‌باشد. در واقع در این پژوهش مباحث تهویه طبیعی، مواد تغییر فاز دهنده و ویژگی‌های فیزیکی این مواد در زمینه سرمایش و تهویه طبیعی ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری پژوهش نیز از جهت بررسی مواد تغییر فاز دهنده جهت استفاده در سیستم‌های سرمایش ساختمانی، افزایش تهویه طبیعی و انتخاب PCM با نقطه ذوب مناسب با توجه به شرایط دمایی محیط می‌باشد.



شکل ۱ نمایش فراوانی تحقیقات علمی معتبر جهانی طی سال‌های اخیر (۲۰۰۲-۲۰۲۰) در زمینه تهویه طبیعی (نمودار اول) و مواد تغییر فاز دهنده (نمودار دوم) (نگارنده)

۳- روش تحقیق

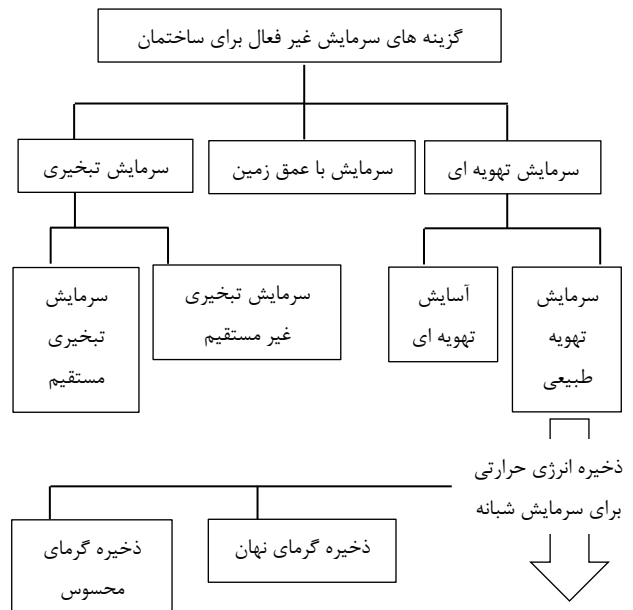
پژوهش حاصل بر اساس مطالعات و تحقیقات صورت گرفته، اسناد و منابع مکتوب و چاپ‌شده موجود در کتابخانه و سایر مراکز اطلاع‌رسانی علمی، تدوین و منتشر گردیده است. به‌نوعی می‌توان گفت که این مقاله از طریق گردآوری، جابه‌جایی، تلفیق، ترکیب و تحلیل دانش موجود تهیه شده است. در این راستا با بررسی پیشینه تحقیقات صورت گرفته در زمینه تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک شهر



خورشیدی [۱۸]، خشک‌کن‌های خورشیدی در صنعت کشاورزی [۱۹] و انرژی فتوولتائیک رشد یافته است. آلن تاور واترمن^۱ مواد تغییر فاز دهنده^۲ را در اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی زمانی که مشغول کار بر روی پروژه خود در دانشگاه یل^۳ بود کشف کرد. زمانی که در حال مطالعه درباره انتشار ترمومیونیک نمک داغ بود متوجه ویژگی هدایت حرارتی مولیبدنیت^۴ شد که می‌تواند به تدریج تغییر کند [۲۰]. همچنین این مواد در بهبود کارایی انرژی و آسایش حرارتی در ساختمان‌ها قابل استفاده هستند. بنابراین کاربرد PCM می‌تواند ابزاری قدرتمند در طراحی ساختمان‌های صفر انرژی باشند [۲۱]. از طرفی در تعریف این مواد می‌توان گفت؛ مواد تغییر فاز دهنده (PCM) ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را در خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد طی فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. همچنین قابلیت آن را دارند که انرژی نهفته را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز درون خود حفظ نمایند [۲۲]. مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، مواد ذخیره کننده حرارت هستند که در مقایسه با مواد ذخیره کننده حرارت محسوس دارای دانسیته ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بالاتری می‌باشند و می‌توانند مقدار زیادی انرژی را در یک دمای ثابت جذب یا آزاد کنند. موادی که برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی حاصل از تغییر فاز به کار می‌روند لازم است گرمای نهان بالا داشته و نیز با توجه به کاربردشان دارای هدایت حرارتی خوبی باشند. طراحی و کاربرد گرمای نهان ذخیره‌شده به فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده بستگی دارد.

۱-۵- طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

بخت و همکاران در پژوهشی به طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده پرداخته‌اند. این مواد به دلیل ویژگی‌های ترموفیزیکی و شیمیایی خود می‌توانند دمای نهان را در خود ذخیره کنند [۲۳]. در پژوهشی توسط Barreneche و همکاران نیز بیش از ۳۰۰ نوع از مواد تغییر فاز دهنده از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار داده شده است [۲۴]. همچنین طبق شکل ۳ تغییر فاز مواد می‌تواند در ۴ دسته؛ جامد به جامد، جامد به مایع، گاز به جامد و گاز به مایع طبقه‌بندی شود. از میان این ۴ حالت تنها حالت جامد به مایع می‌تواند در سیستم سرمایشی و گرمایشی ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. این امر به خاطر محدودیت تکنیکی سایر حالت‌ها می‌باشد. تنوع زیادی از انواع PCM ها با محدوده نقطه ذوب متفاوت وجود دارد. رایج‌ترین طبقه‌بندی برای PCM ها؛ آلی، غیر آلی و ترکیبی (eutectic) می‌باشد [۲۵].



شکل ۲ طبقه‌بندی انواع تکنیک‌های سرمایش غیر فعال در کاربردهای ساختمانی [۱۴].

جدول ۲ مشخصات انواع PCM مورد استفاده در سرمایش ساختمانی [۱۵].

مولفه	مواد تغییر فاز دهنده	نقطه ذوب (سانتی گراد)	دمای نهان (سانتی گراد)
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	هیدرات نمک	۲۱	۱۹۸
RT۲۵		۲۴	۱۶۴
RT۲۰	پارافین	۲۰-۲۲	۱۷۲
FM۳۰	پارافین	۲۰-۲۳	۱۳۰
GM (granules)	۶۵ درصد مواد سرمایشی ۳۵ درصد مواد پارافینی	۲۴.۹-۲۳.۵	۴۱.۹
SP ۲۷ A ۸	ترکیب شده	۲۷	۱۸۰

۵- مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

در سال‌های اخیر کاربرد PCM در صنایع مختلف همچون؛ صنعت فضاوردی [۱۶]، الکترونیک [۱۷]، سرمایش خورشیدی و نیروگاه‌های حرارتی

^۴ Molybdenite (MoS₂).

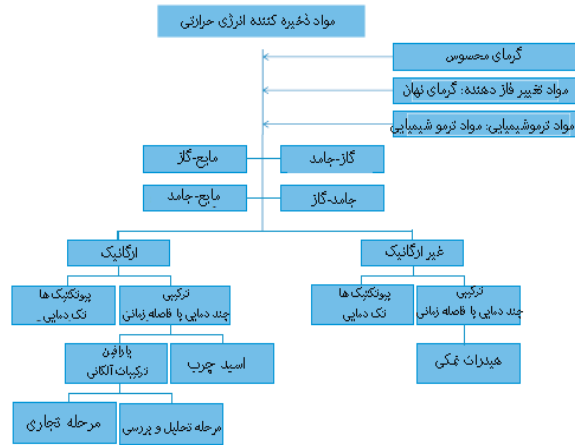
^۱ Alan Tower Waterman

^۲ Phase Change Material (PCM)

^۳ Yale University

۵-۱-۲- مواد تغییر فاز دهنده پارافینی

محدوده دمای ذوب برای این نوع از PCM ها ۱۲ تا ۷۱ درجه سانتی گراد است که می‌تواند ۱۲۸ تا ۱۹۸ کیلوژول بر کیلوگرم گرما را ذخیره کنند. این PCM ها یکی از رایج‌ترین PCM های قابل استفاده هستند. PCM های پارافینی همه فاکتورهای مهم در کاربردهای ساختمانی همچون؛ ایمنی، قابل اعتماد بودن، هزینه پایین و گرمای نهان بالا را دارند. همین‌طور از نظر شیمیایی PCM های پایداری هستند و در دماهای پایین‌تر از ۵۰۰ درجه سانتی گراد راکد می‌مانند و حجمشان به‌ویژه در زمان تغییر فاز تغییر نمی‌آید. با وجود اینکه ضریب هدایت حرارتی این نوع PCM ها عامل اصلی کاهش کاربرد گسترده آن‌ها است. این مواد در کنار ویژگی‌های مفید خود برخی ویژگی‌های منفی همچون؛ نسبتاً قابل اشتعال و ناسازگار با پلاستیک را نیز دارند [۳۰].



شکل ۳ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان ماده ذخیره کننده انرژی حرارتی [۲۶].

۵-۱-۳- مواد تغییر فاز دهنده غیر پارافینی

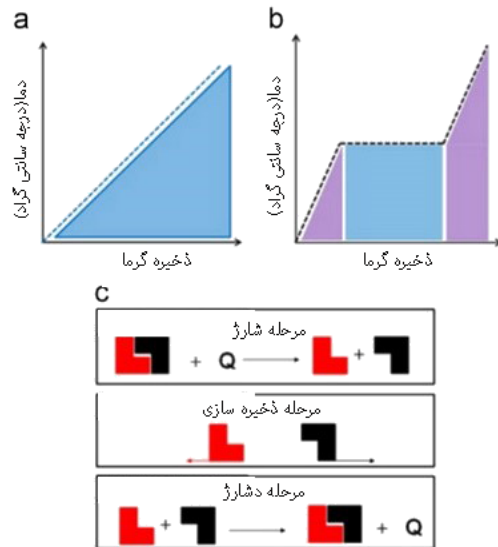
این نوع از PCM ها برخلاف PCM های پارافینی رنج وسیعی از تنوع در ویژگی‌های متفاوت از هم رادارند. بنابراین آن‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین PCM برای استفاده در ذخیره حرارتی در نظر گرفته می‌شوند. آلکان ها، استرها، گلیکول ها و اسیدهای چرب شناخته‌شده‌ترین PCM های غیر پارافینی هستند. در این طبقه‌بندی اسیدهای چرب به خاطر؛ گرمای نهان بالا، عدم جدایی فاز و دمای ذوب متفاوت بیشترین کاربرد را در سرمایش ساختمان‌ها دارند. همچنین آن‌ها برای اقلیم‌ها و شرایط متفاوت نیز مناسب خواهند بود. اما در مقایسه با PCM های پارافینی، گران‌تر و فاسد کننده نیز هستند [۳۱].

۵-۱-۱- مواد تغییر فاز دهنده آلی

اگرچه PCM های آلی محدوده وسیعی را از آلکان ها، اسیدهای چرب و استرها پوشش می‌دهند، شناخته‌شده‌ترین مواد برای ذخیره گرمای نهان هستند [۲۷]. این نوع از PCM ها به خاطر اضافه گرمای نهان، دمای تغییر فاز مناسب و کاراکترهای شیمیایی و فیزیکی‌شان بسیار مورد توجه و استفاده هستند. در شکل ۴ این ویژگی‌ها به‌خوبی نشان داده شده است.

۵-۱-۴- مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی

این نوع از PCM ها در مقایسه با PCM های ارگانیک، گرمای ترکیبی بالاتری در واحد جرم و قابلیت اشتعال و هزینه کمتری دارند. اگرچه آن‌ها از جدایی فاز، فقدان پایداری حرارتی، خوردگی و تجزیه رنج می‌برند، چیزی که مزیت‌هایشان را زیر سایه قرار می‌دهد. این PCM ها در انواع؛ هیدرات‌های نمک، محلول نمک و فلزها تقسیم می‌شوند. هیدرات‌های نمک شناخته‌شده‌ترین نوع از PCM های غیر آلی هستند که در شمار زیادی از تحقیقات برای کاربرد ذخیره حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جدول ۲ خلاصه‌ای از گرمای نهان و نقطه ذوب چندین PCM غیر ارگانیک (هیدرات نمکی) را نشان می‌دهد. هیدرات‌های نمکی باهدف ذخیره گرما در ساختمان با توجه به گنجایش ذخیره حجمی مناسب، انتقال حرارت بالا و قیمت پایین در مقایسه با PCM های ارگانیک انتخاب می‌شود [۳۲]. در جدول ۳ برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع از pcm ها آورده شده است.



شکل ۴ مقایسه بین ذخیره گرما (a) آشکار، (b) نهان، (c) ذخیره شیمیایی مواد تغییر فاز دهنده آلی [۲۸].

مواد تغییر فاز دهنده آلی نواقص و محدودیت‌هایی همچون؛ انتقال حرارت پایین (کمتر از ۲ وات بر مترمربع کلوبین)، تنوع حجم بالا و چکیدن مایع در طول مدت تغییر فاز را در استفاده دارند. با این حال نقطه ذوب و گرمای نهان برخی از این نوع PCM ها برای کاربرد در ساختمان‌ها مناسب است. همچنین این مواد در دو نوع پارافین و غیر پارافین طبقه‌بندی می‌شوند [۲۹].



جدول ۳ گرمای نهان و دمای ذوب برخی از pcm های هیدرات نمکی [۳۳]

دمای نهان و نقطه ذوب تعدادی مواد تغییر فاز دهنده هیدرات نمکی			
شماره	ماده	دمای نهان (KJ/Kg)	نقطه ذوب (درجه سانتی گراد)
۱	$KF \cdot 4H_2O$	۲۳۱	۱۸/۵
۲	$K_2HPO_4 \cdot 4H_2O$	۲۳۱	۱۸/۵
۳	$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	۱۰۵	۲۱
۴	$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	۱۴۸	۲۵/۵
۵	$LiBO_2 \cdot 8H_2O$	۲۸۹	۲۵/۷
۶	$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	۱۰۵	۲۷
۷	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	۱۹۱	۲۹
۸	$CaCl_2 \cdot 12H_2O$	۱۷۴	۲۹/۸
۹	$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	۲۹۶	۳۰
۱۰	$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	۱۸۹	۳۰

۲. PCM بکار	۲. این ماده مخلول آب و نمک های معدنی است	محدودیت های تکنیکی
هزینه	نسبتا گران	دو تا سه برابر گران تر از پارافین است
فوائد	۱. غیر قابل انفکک و سرمایشی ۲. پایداری شیمیایی ۳. دمای نهان زیاد ۴. سازگاری بالا با همه ظروف فلزی ۵. امن و غیر واکنشی	۱. قابلیت انتقال فاز بالا ۲. نقطه ذوب بالا ۳. هدایت حرارتی مناسب ۴. تغییرات حجمی کم ۵. چگالی مناسب
معایب	۱. هدایت حرارتی کم ۲. نقطه ذوب بالایی ندارد ۳. قابل اشتعال ۴. نقطه ذوب پایین	۱. سرد شونده خوردگی ۲. به دلیل چگالی بالا، نمک در کف محفظه ته نشین می شود و فعال بودن ماده به نسبت حجم آن کاهش می یابد.

۶- عملکرد مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

طبق شکل 5 مواد تغییر فاز دهنده این خاصیت را دارند که حالت خود را در یک دامنه دمایی مشخص تغییر دهند، به این مفهوم که طی فرآیند تغییر حالت، دمای خود را برای طول مدت تغییر حالت حفظ می نمایند. در واقع، روش کار این مواد برای ذخیره انرژی گرمایی به این صورت است که طی فرآیند گرم شدن محیط، به صورت موزی با محیط گرم می شوند تا زمانی که به دمای ذوب خود (تغییر فاز) برسند. پس از رسیدن به این دما علی رغم اینکه دمای محیط همچنان به روند افزایشی خود ادامه می دهد، دمای این مواد و البته محیط اطراف آن ها به دلیل اینکه در حال تغییر فاز است، ثابت مانده و در برابر افزایش دما مقاومت می نماید. در واقع، طی این بازه زمانی که معمولاً چند ساعت نیز به طول می انجامد، ماده تغییر فاز دهنده مقدار زیادی از گرمای محیط را به خود جذب می نمایند، ولی آن را صرف افزایش دمای خود نمی کنند، بلکه این گرمای جذب شده را صرف تغییر فاز خود از جامد به مایع نموده و طی فرآیند تغییر فاز، دمای خود و محیط اطراف خود را ثابت نگاه می دارند [۳۶]. در منطقه مشخص شده، فرآیند تغییر فاز در حال شکل گرفتن بوده و در همین منطقه است که انرژی گرمایی جذب شده توسط ماده درون آن ذخیره می شود.

۵-۱-۵- مواد تغییر فاز دهنده ترکیبی

این نوع از PCM ها شامل ترکیبی از حداقل دو نوع PCM دیگر می باشند. این ترکیب می تواند به صورت: آلی با آلی، آلی با غیر آلی و غیر آلی با غیر آلی باشد. در طول فرآیند خنک سازی، آن ها یک کریستال خمیده را شکل می دهند [۳۴]. در جدول ۴ انواع مختلف PCM، ویژگی ها و منابعشان مقایسه شده است.

جدول ۴ مقایسه انواع مختلف مواد تغییر فاز دهنده [۳۵].

نوع	مواد آلی (ارگانیک)		مواد غیر آلی (غیر ارگانیک)	
	پارافین	بدون پارافین	هیدرات نمک	فلزی
ویژگی های دمای نهان نقطه ذوب	۱۲- تا ۷۱ درجه سانتی گراد ۱۹۰- تا ۲۶۰ کیلوژول در کیلوگرم	۷/۸ تا ۱۸۷ درجه سانتی گراد	۱۱ تا ۱۲۰ سانتی گراد ۱۰۰- تا ۲۰۰ کیلوژول در کیلوگرم	۴- تا ۹۳ سانتی گراد ۱۰۰- تا ۲۳۰ کیلوژول در کیلوگرم
۱. دمای نهان و نقطه ذوب جا ۲. اضافه کردن کریستال افزایش می یابد	۱. دامنه وسیع نقطه ذوب ۲. دامنه وسیع در دمای نهان ذوب	۱. علاقه محققان به مطالعات گسترده به دلیل چگالی، هزینه بالا و ویژگی های این ماده	عدم مطالعات گسترده به دلیل چگالی، هزینه بالا و	شامل دو یا بیش از دو PCM

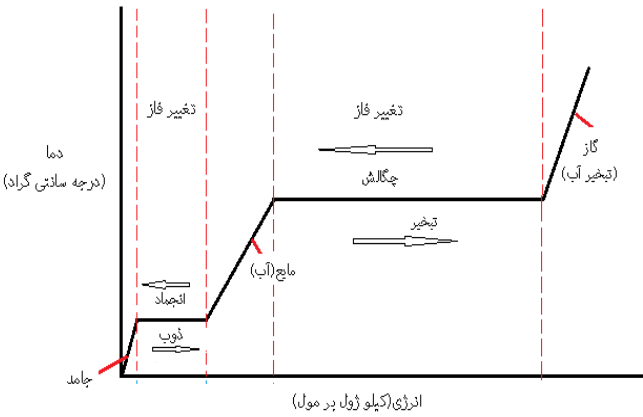


فصلنامه علمی انرژی های تجدیدپذیر و نو- سال هشتم، شماره دوازدهم، زمستان ۱۴۰۰

شکل ۶ رابطه بین دمای ذوب و گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای

مختلف [۲۶].

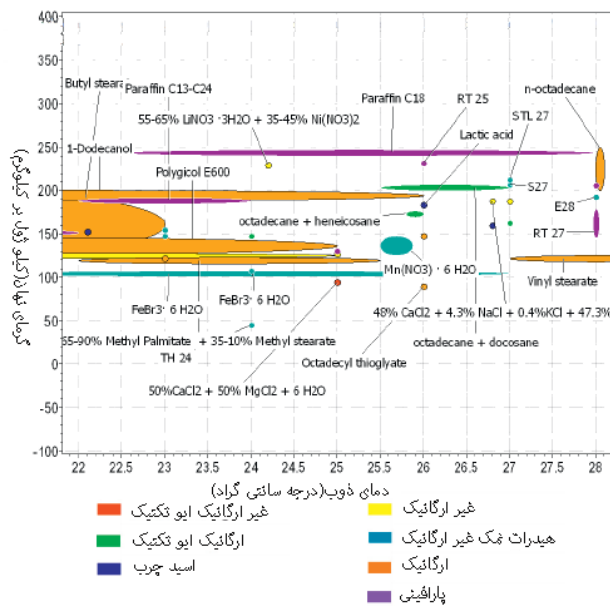
همچنین طبق شکل ۷ دسته‌ای از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی به منظور بهبود دمای آسایش هوای داخل ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند تا دمای هوای داخل ساختمان در محدوده آسایش دمایی باشد. محدوده دمایی نقطه ذوب این مواد تغییر فاز دهنده بین ۱۸ تا ۳۴ درجه سانتی گراد است. این دسته از مواد تغییر فاز دهنده به‌طور رایج در سیستم‌های غیرفعال مورد استفاده قرار می‌گیرند. دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده با توجه به شرایط دمایی هر اقلیم انتخاب می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک فراوانی بیشتری در طبقه‌بندی PCM ها دارند. به این صورت که در ابتدا استفاده از مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک برای ایجاد آسایش حرارتی در سیستم‌های غیرفعال و سپس مواد تغییر فاز دهنده با ترکیبات پارافینی بیشترین فراوانی در این دسته‌بندی دارند. همچنین مواد تغییر فاز دهنده غیر ارگانیک هیدرات نمک نیز پس از دو نمونه دیگر در این طبقه‌بندی پرکاربردترین است. انتخاب مواد تغییر فاز دهنده مناسب از این طبقه‌بندی برای ایجاد آسایش حرارتی در سیستم‌های غیرفعال ساختمان به عوامل دیگری مانند محیط و شرایط سیستم مورد استفاده، دسترسی به تولیدکننده، هزینه تهیه و نگهداری این مواد ارتباط دارد. دامنه نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده برای هر یک از مواد بارنگ‌های متمایز مشخص شده است. نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده پارافینی بین ۲۲/۵ تا ۲۸ درجه سانتی گراد است و نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده غیر ارگانیک هیدرات نمک بین ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی گراد است و نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده غیر ارگانیک بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد است. انتخاب مواد تغییر فاز دهنده مناسب به رابطه نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده و دمای محیط مورد استفاده بستگی دارد. بنابراین عامل دما با انتخاب مواد تغییر فاز دهنده مناسب ارتباط مستقیم دارد. به‌علاوه در انتخاب این مواد باید به ویژگی‌های ترموفیزیکی و شیمیایی که بر عملکرد مناسب آن‌ها مؤثر است نیز توجه داشت. بر همین اساس PCM های مورد استفاده برای تهویه طبیعی در ساختمان از گروه PCM هایی با کاربرد آسایش حرارتی انتخاب می‌شوند.



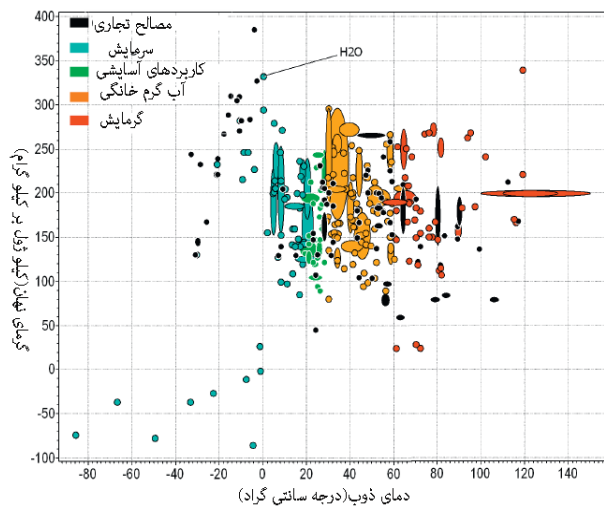
شکل ۵ نمودار تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده [۲۶].

۱-۶- انتخاب مواد تغییر فاز دهنده برای کاربردهای مختلف

مطابق مطالب گفته‌شده PCM ها در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند. در شکل ۶ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در سیستم‌های فعال و غیرفعال ساختمان نشان داده شده است. این نمودار بر اساس دو کمیت دمای نهان نقطه ذوب و نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده ترسیم شده است. رنگ‌های متفاوت نشان‌دهنده گروه‌های مختلف این مواد از جمله، ایوتکتیک، ارگانیک، اسید چرب، پارافین و غیرآلی است. هر یک از این مواد نقطه ذوب و دمای نهان متفاوتی دارند که کاربرد هر کدام بر اساس دمای محیط، ساختمان و نوع استفاده متفاوت است. رنگ‌های متفاوت نشان‌دهنده دماهای متفاوت مواد است. در این نمودار دامنه گسترده‌ای از نقطه ذوب و دمای نهان ذوب مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است مواد تغییر فاز دهنده کاربرد ذخیره حرارت از جمله ذخیره سرما با دامنه دمایی نقطه ذوب (۹۰- تا ۲۱-) درجه سانتی گراد، محدود متوسط آسایش حرارتی (۳۴-۱۸) درجه سانتی گراد، محدوده ذخیره حرارت آب گرم بهداشتی (۶۴-۳۰) درجه سانتی گراد، ذخیره حرارت سیستم گرمایش (۱۵۰-۵۴) درجه سانتی گراد و محدوده صنعتی و تجاری (۱۰۸-۳۴-) درجه سانتی گراد را دارا هستند. بنابراین با توجه به نوع کاربرد مواد مورد نظر می‌توان PCM با نقطه ذوب مناسب را انتخاب کرد. در اینجا برای استفاده سرمایشی و آسایشی نیز PCM مناسب با نقطه ذوب بین (۳۴-۱۸) را می‌توان لحاظ نمود [۲۶].



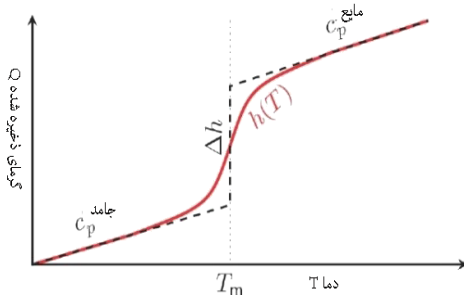
شکل ۷ انواع مواد تغییر فاز دهنده برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در محیط [۲۶].



ذخیره‌سازی PCM ها با منحنی آنتالپی نشان داده می‌شود. شیب اضافه این نمودار $h(T)$ توانایی بالای ذخیره‌سازی PCM را بیان می‌کند. شکل ۹ منحنی آنتالپی یک PCM ایده آل و واقعی را نشان می‌دهد. یک PCM ایده آل با مشخصاتی مثل؛ گرمای ویژه فاز جامد و مایع، آنتالپی تغییر فاز Δh ، دمای ذوب T_m و یک PCM واقعی با عملکرد یا شیب آن $h(T)$ بیان می‌شود. همه PCM ها یک محدوده ذوب دارند که تغییر فاز نیز در آن محدوده اتفاق می‌افتد [۴۰]. فرمول (۱) و (۲) رابطه میان پارامترهای ذکر شده را تعریف می‌کند.

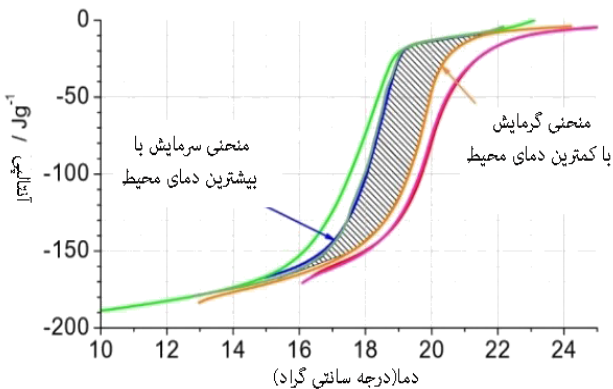
$$\text{Heat storage} = Q(T) \quad (1)$$

$$Q(T) = h(T) + h. \quad (2)$$



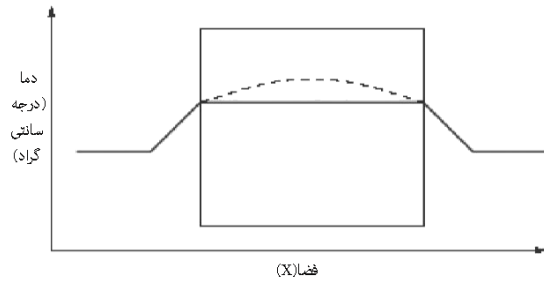
شکل ۹ منحنی آنتالپی pcm ایده آل و واقعی [۴۰].

در شکل ۱۰ نیز منحنی سرمایه‌گذاری با حداکثر دمای محیط و منحنی سرمایه‌گذاری با حداقل دمای محیط، محدوده منحنی آنتالپی را در شرایط ایزو ترمال محدود می‌کند.



شکل ۱۰ محدوده دما سرمایه‌گذاری و سرمایه‌گذاری در نمودار آنتالپی [۴۰]

حال با مقایسه نمودار آنتالپی PCM های مختلف با توجه به شکل ۱۱ و مقایسه آن با شکل ۹ و ۱۰ می‌توان فهمید که کدام PCM برای استفاده در ایجاد شرایط آسایش و تهویه طبیعی محیط به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک شهر یزد مناسب‌تر می‌باشد [۴۱]. از آنجاکه PCM های غیر ارگانیک هیدرات نمکی نسبت به سایر PCM ها از لحاظ هزینه و دسترسی در ایران مناسب‌تر می‌باشند. بنابراین در این مقایسه ۴ نوع از این PCM ها با نقاط ذوب مختلف مقایسه شده است.



شکل ۸ عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در سرمایه‌گذاری ساختمانی [۳۷]

طبق شکل ۸ نیز مواد تغییر فاز دهنده در طی شب به دلیل کاهش قابل توجه دما در اقلیم گرم و خشک با تغییر فاز، شارژ می‌شوند و انرژی حرارتی را در خود ذخیره می‌کنند، در طی روزهای گرم نیز این ذخیره انرژی به کاهش دمای محیط و بهبود کارایی تهویه طبیعی در سیستم سرمایه‌گذاری غیرفعال کمک می‌نماید.

۷- انتخاب PCM با نقطه ذوب مناسب برای تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک یزد

با توجه به کاربرد PCM ها در ایجاد شرایط آسایش حرارتی، می‌توان از PCM هایی که دارای نقطه ذوب متناسب با دمای اقلیم شهرها، که در محدوده بین ۱۸ تا ۳۴ درجه سانتی گراد هستند را استفاده نمود. از این رو مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند برای بهبود پتانسیل تهویه طبیعی سیستم‌های سرمایه‌گذاری غیرفعال به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک استفاده شوند البته زمانی مواد تغییر فاز دهنده حداکثر بازدهی خود را دارند که نقطه ذوب این مواد متناسب با دمای آسایش در گرم‌ترین ماه سال آن منطقه باشد [۳۷]. در تحقیقی نیز بیان شده که PCM با نقطه ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد، دمای اتاق را از ۳۸/۵ درجه سانتی گراد به ۳۷/۲ کاهش داده است [۳۸]. بیشترین ویژگی PCM ها برای بهبود آسایش حرارتی در ساختمان؛ دمای ذوب، محدوده دمای انتقال و گرمای نهان است. طبق جدول ۱ همان‌طور که محدوده میانگین دمای روزانه شهر یزد ۱۸ تا ۴۳ درجه سانتی گراد می‌باشد. همچنین میانگین دمای روز گرم‌ترین ماه سال در این اقلیم ۴۳ درجه سانتی گراد می‌باشد و نیز بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی محدوده آسایش شهر یزد بین ۲۱ تا ۲۸ درجه سانتی گراد است. بنابراین با توجه به محدوده آسایش حرارتی و نیز میانگین دمایی، در شهر یزد استفاده PCM ها با دمای ذوب ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد برای بهبود سیستم‌های سرمایه‌گذاری غیرفعال مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این صورت که در زمان افزایش و پیک دمای محیط، گرما را از محیط گرفته و در زمان‌های کاهش دما، آن را به محیط پس می‌دهند [۳۷]. همچنین با توجه به اینکه مرز دمایی آسایش حرارتی گرم‌ترین ماه سال در یزد ۲۸ درجه سانتی گراد است؛ بنابراین استفاده از PCM ۲۸ می‌تواند دما را در محدوده آسایش حرارتی قرار دهد. هزینه‌های اجرا و نگهداری نیز با کاربرد PCM ها در سیستم‌های سرمایه‌گذاری غیرفعال به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که استفاده از PCM ها در سیستم‌های سرمایه‌گذاری فعال ساختمانی می‌تواند تا ۹ درصد انرژی الکتریکی کمتری را مصرف کند اما هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری آن ۱۰ درصد بیشتر و با دوره برگشت سرمایه ۳-۴ می‌باشد. همچنین کربن دی‌اکسید کمتری را نیز منتشر می‌کند [۳۹]. از طرفی ویژگی اصلی PCM ها دمای آنتالپی آن‌ها است که ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای آن‌ها را نشان می‌دهد. در واقع توانایی

پژوهشی به کاربرد هر چه بهتر و مناسبتر مواد تغییر فاز دهنده برای بهبود عملکرد تهویه طبیعی کمک می‌کند و سبب کاهش تقاضای بار سرمایشی، مصرف انرژی، انتشار کربن دی‌اکسید شده و نیز در فراهم آوردن آسایش حرارتی ساکنین کمک شایانی می‌نماید.

۹- فهرست علائم

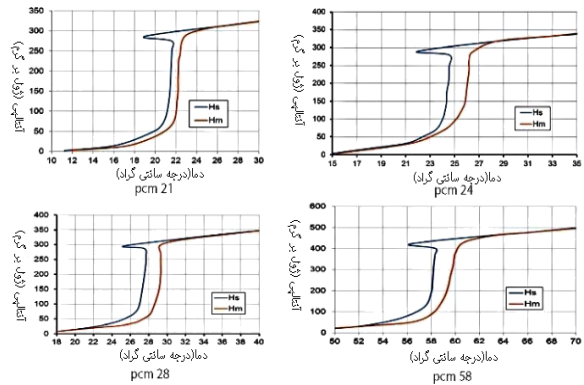
ذخیره گرمایی	$Q(T)$
منحنی آنتالپی	$h(T)$
دمای ذوب	T_m
آنتالپی تغییر فاز	Δh

زیر نویس‌ها

مواد تغییر فاز دهنده	PCM
ذخیره انرژی حرارتی	Thermal energy storage (TES)
آژانس بین‌المللی انرژی	International Energy Agency (IEA)
الن تاور واترمن	Alan Tower Waterman
دانشگاه یل	Yale University
ماده مولیبدنیت	Molybdenite (MoS ₂)

۱۰- مراجع

- [۱] Technology Roadmap. Solar Heating and Cooling. International energy Agency (IEA). Available from, ۱۰-۲۰-۲۰۱۲
- [۲] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: *materials and applications Energy Covers Manage*, ۴۵, ۱۵۹۷-۶۱۵, ۲۰۰۴.
- [۳] Energy Technology Perspectives (ETP), *International Energy Agency*, ۲۰۱۲.
- [۴] Guo, W., Liu, X. & Yuan, X. Study on natural ventilation design optimization based on CFD simulation for green buildings. *Procedia Engineering*, ۱۲۱, ۵۷۳-۵۸۱, ۲۰۱۳.
- [۵] Tan, Z. & Deng, X. Assessment of natural ventilation potential for residential buildings across different climate zones in Australia. *Atmosphere*, ۸, ۱۷۷, ۲۰۱۷.
- [۶] Lizan, J., DE-BORJA-TORREJON, M., BARRIOS-PADURA, A., AUER, T. & CHACARTEGUI, R. Passive cooling through phase Change materials in buildings. A critical study of implementation alternatives. *Applied Energy*, ۲۵۴, ۱۱۳۶۵۸, ۲۰۱۹.
- [۷] Sun, X., Zhang, Q., Medina, M. A. & Liao, S. Performance of A free-air cooling system for telecommunications base stations using phase change materials (PCMs): in-situ tests. *Applied energy*, ۱۴۷, ۳۲۵-۳۳۴, ۲۰۱۵.
- [۸] Berardi, U. & Manca, M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada. *Energy Procedia*, ۱۱۱, ۴۶۲-۴۷۱, ۲۰۱۷.
- [۹] Hu, Y. & Heiselberg, P. K. A new ventilated window with PCM Heat exchanger—Performance analysis and design optimization. *Energy And Buildings*, ۱۶۹, ۱۸۵-۱۹۴, ۲۰۱۸.



شکل ۱۱ نمودار آنتالپی برای pcm ها با نقطه ذوب: ۲۱، ۲۴، ۲۸ و ۵۸ درجه سانتی گراد (نگارنده)

همان‌طور که مشخص است PCM با دمای ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد که از لحاظ تئوری گزینه مناسب‌تری برای ایجاد شرایط آسایش و تهویه طبیعی می‌باشد، با بررسی رفتار و منحنی آنتالپی آن از نظر عملی نیز این نتیجه تأیید شده است. در واقع رفتار این نوع از PCM به PCM ایده آل نزدیک‌تر می‌باشد. به طوری که در دمای بالاتر از ۲۸ درجه سانتی گراد تغییر فاز داده و گرمای اضافه را در خود ذخیره کرده و در زمانی که دما از ۲۱ درجه سانتی گراد پایین‌تر باشد، آن را به محیط پس می‌دهد. به این شکل دمای محیط را در محدوده آسایش حرارتی در روزهای گرم سال نگه می‌دارد و به بهبود تهویه طبیعی نیز کمک می‌نماید.

۸- نتیجه گیری

در جهان حاضر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر با سرعت فراوانی در حال پیشرفت می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی این انرژی وجود دارد. از میان آن‌ها ذخیره انرژی گرمایی نهمان به دلیل قابلیت ایجاد چگالی بالای ذخیره انرژی و خاصیت ذخیره انرژی در دمای ثابت از اهمیت بیشتری برخوردار است. مواد تغییر فاز دهنده نیز به این روش انرژی را در خود ذخیره نگه می‌دارند. بنابراین کاربرد این مواد جهت ذخیره‌سازی انرژی به‌ویژه در بخش سرمایش و تهویه طبیعی ساختمان‌ها می‌تواند بسیار مورد توجه باشد. پژوهش حاضر نیز کمک می‌کند تا از میان طیف گسترده مواد تغییر فاز دهنده، با توجه به محدوده دمایی داخل ساختمان، شرایط اقلیمی و محیطی شهر یزد، PCM مناسب جهت استفاده سیستم‌های سرمایشی غیرفعال و بهبود تهویه طبیعی محیط انتخاب شود. با بررسی‌های انجام‌شده از طریق مطالعات و منابع معتبر صورت گرفته در نهایت چگونگی کاربرد PCM مناسب با توجه به نوع کاربرد و اقلیم منطقه به‌دست آمده است. به این صورت که چه نوع از مواد تغییر فاز دهنده در کاربردهای مختلف؛ سرمایش، سیستم‌های غیرفعال، آب گرم، تجاری و نیز آسایشی استفاده می‌شوند. همچنین برای هر نوع کاربرد، PCM مناسب با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و نیز رفتار PCM باید انتخاب گردد. به طوری که با توجه به محدوده آسایش حرارتی در هر اقلیم و نیز میانگین دمایی آن، PCM مناسب انتخاب و بکار می‌رود. بنابراین برای اقلیم گرم و خشک شهر یزد با وجود دمای آسایش ۲۱ تا ۲۸ و نیز میانگین دمایی ۵ تا ۳۲ درجه سانتی گراد استفاده از PCM با دمای ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد برای سرمایش غیرفعال، تهویه طبیعی و ایجاد شرایط آسایش حرارتی محیط مناسب می‌باشد. چنین



- [۲۷] Kenisarin, M. M. Thermophysical properties of some organic Phase change materials for latent heat storage. A review. *Solar Energy*, ۱۰۷, ۵۵۳-۵۷۵, ۲۰۱۴.
- [۲۸] De grasia, A. & Cabeza, L. F. Phase change materials and Thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, ۱۰۳, ۴۱۴-۴۱۹, ۲۰۱۵.
- [۲۹] Ehrali, M., Latibari, S. T., Mehrali, M., Mahlia, T. M. I., Sadeghinezhad, E. & Metselaar, H. S. C. Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy storage. *Applied energy*, ۱۳۵, ۳۳۹-۳۴۹, ۲۰۱۴.
- [۳۰] Kamali, S. Review of free cooling system using phase change Material for building. *Energy and Buildings*, ۸۰, ۱۳۱-۱۳۶, ۲۰۱۴.
- [۳۱] Kenisarin, M. M.. Thermophysical properties of some organic Phase change materials for latent heat storage. A review. *Solar Energy*, ۱۰۷, ۵۵۳-۵۷۵, ۲۰۱۴.
- [۳۲] Tatsidjodoung, P., Le pierres, N. & Luo, L A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۸, ۳۲۷-۳۴۹, ۲۰۱۳.
- [۳۳] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. & Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, ۱۳, ۳۱۸-۳۴۵, ۲۰۰۹.
- [۳۴] Tyagi, V. V. & Buddhi, D. PCM thermal storage in buildings: a State of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۱, ۱۱۴۶-۱۱۶۶, ۲۰۰۷.
- [۳۵] Rathod, M. K. & Banerjee, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, ۱۸, ۲۴۶-۲۵۸, ۲۰۱۳.
- [۳۶] Mondal, S. Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*, ۲۸, ۱۵۲۶-۱۵۵۰, ۲۰۰۸.
- [۳۷] Waqas A, Kumar S. Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation of buildings in hot and dry climates. *International Journal Green Energy*, ۸:۱-۲۴, ۲۰۱۱.
- [۳۸] T. Silva, R. Vicente, N. Soares, V. Ferreira, Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution, *Energy Build*. ۴۹, ۲۳۵-۲۴۵, ۲۰۱۲.
- [۳۹] Turnpenny J, Etheridge D, Reay D. Novel ventilation system for reducing air conditioning in buildings. Part II: testing of prototype. *Applied Thermal Engineering*, ۲۱:۱۲۰۳-۱۷, ۲۰۰۱.
- [۴۰] Marin J, Zalba B, Cabeza F, Mehling H. Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, ۲۷:۸۳۹-۴۹, ۲۰۰۴.
- [۱۰] Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Famileh, I. Z., Calutit, J. K., Hughes, B. R. B. R. & Zaki, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۶۰, ۱۴۷۰-۱۴۹۷, ۲۰۱۶.
- [۱۱] Zaki, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۶۰, ۱۴۷۰-۱۴۹۷, ۲۰۱۶.
- [۱۲] De grasia, A., Navarro, L., Castell, A., Ruiz-pardo, Á. alvarez, S. & cabeza, L. F. Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications. *Energy and Buildings*, ۶۵, ۵۰۸-۵۱۵, ۲۰۱۳.
- [۱۳] Isa, M. H. M., Zhao, X. & Yoshino, H. Preliminary study of passive cooling strategy using a combination of PCM and copper foam to increase thermal heat storage in building facade. *Sustainability*, ۲, ۲۳۶۵-۲۳۸۱, ۲۰۱۰.
- [۱۴] Solgi, E., Hamedani, Z., Fernando, R., Kari, B. M. & Skates, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. *Building and Environment*, ۱۴۷, ۳۲۷-۳۳۶, ۲۰۱۹.
- [۱۵] Givoni, B. Passive low energy cooling of buildings, *John Wiley & Sons*. ۱۹۹۴.
- [۱۶] Waqas, A. & Din, Z. U. Phase change material (PCM) storage for Free cooling of buildings—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, ۱۸, ۶۰۷-۶۲۵, ۲۰۱۳.
- [۱۷] Zhou, Z., Zhang, Z., Zuo, J., Hung, K. & Zhang, L. Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۴۸, ۷۰۳-۶۹۲, ۲۰۱۵.
- [۱۸] Dhadian, N. S. & Khodadadi, J. Melting and convection of Phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۴۳, ۴۴۹-۴۷۷, ۲۰۱۵.
- [۱۹] Aydin, D., Casey, S. P. & Riffat, S. The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۴۱, ۳۵۶-۳۶۷, ۲۰۱۵.
- [۲۰] Shalaby, S., Bek, M. & El-Sebaei, A. Solar dryers with PCM as energy storage medium :A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۳۳, ۱۱۰-۱۱۶, ۲۰۱۴.
- [۲۱] Waterman, A. T. Xxi. On the positive ionization from certain hot salts, together with some observations on the electrical properties of molybdenite at high temperatures. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, ۳۳, ۲۲۵-۲۴۷, ۱۹۱۷.
- [۲۲] Bastani, A., Haghghat, F. & Kozinski, J. Designing Building envelope with PCM wallboards: design tool development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۳۱, ۵۵۴-۵۶۲, ۲۰۱۴.
- [۲۳] Demirbas, M. F. Thermal energy storage and phase change materials: an overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, ۱, ۸۵-۹۵, ۲۰۰۶.
- [۲۴] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Sol Energy*, ۳۰:۳۱۳-۳۲, ۱۹۸۳.
- [۲۵] Anisur, M., Mahfuz, M., Kibria, M., Saidor, R., Metsellar, I. & Mahlia, T. Curbing global warming with phase change Materials for energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۸, ۲۳-۳۰, ۲۰۱۳.
- [۲۶] Cabeza LF, Castel A, Barreneche C, de Gracia A, Fernández AI. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. *Renew Sust Energy Rev*, ۱۵:۱۶۷۵-۹۵, ۲۰۱۱.

