اهمیت و کاربرد مواد تغییر فاز دهنده

قاسم نجفی[۱]، مجید خانعلی[۲]، امین قبادپور [۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin.ghobadpour@ut.ac.ir

چکیده

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) انرژی حرارتی را به روش گرمای نهان در خود ذخیره می‌کنند. این مواد دارای چگالی ذخیره‌سازی حرارتی بالایی هستند و با تغییرات دمایی اندک نقش مهمی را در حفاظت از انرژی و آسایش حرارتی را در ساختمان فراهم می‌کنند. همچنین بکارگیری این مواد به سبب کاهش اندازه نوسانات دمای هوای داخل و باقی ماندن دمای هوای اتاق برای مدت زمان طولانی تر نزدیک به دمای مطلوب اتاق به طور طبیعی انتقال حرارت به ساختمان را در ساعات اوج مصرف چندین ساعت به تاخیر می اندازند. روش‌های مختلفی توسط محققان برای ترکیب مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان بررسی‌شده است و یافت شده که مواد تغییر فاز دهنده نوسانات درجه حرارت داخلی ساختمان را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهند و مانع از تغییرات سریع دمایی می‌شوند. این مقاله خلاصه‌ای از آثار قبلی در مورد مواد تغییر فاز دهنده، نحوه و نوع کاربرد این مواد را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انرژی حرارتی، پوشش ساختمان، ذخیره‌سازی ، مواد تغییر فاز دهنده.

مقدمه

مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی هزینه بالا و کاهش منابع سوخت فسیلی استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر را لازم و مطلوب ساخته است. در انتهای قرن ۲۱ و فقط باگذشت ۴۰۰ سال از فعالیت صنعتی بشر، بیشتر سوخت‌های فسیلی ذخیره‌شده در طی ۴۰۰ میلیون سال در پوسته‌ی زمین، تمام خواهد شد. سوزاندن زغال‌سنگ، نفت و گاز مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن در جو آزادکرده و آب‌وهوای کره زمین را تغییر می‌دهد. مصرف انرژی‌های فسیلی خطر افزایش گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد که براثر این پدیده، کره زمین گرم‌تر شده و اثرات نامطلوبی بر آب‌وهوا و شرایط زیست‌محیطی وارد می‌سازد (Falk *et al.*, 2013).

بسیاری از طرفداران محیط‌زیست که نگران گرم شدن کره زمین و خطرات احتمالی استفاده از انرژی هسته‌ای هستند، خواهان استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشند .محققین در جهان معتقدند که باید پایه انرژی از نفت خارج گردد و تأمین آن از منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی‌های آبی، بادی و خورشیدی گذاشته شود. از موارد کاربرد انرژی خورشیدی می‌توان جمع کننده‌های تخت (کلکتورهای خورشیدی)، دستگاه‌های گرم‌کننده خورشید، اجاق‌های خورشیدی، دودکش‌های خورشیدی، آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، سیستم‌های فتوولتاییک و سیستم‌های ذخیره کننده انرژی را نام برد آنچه همواره با واژه انرژی همراه می‌باشد سیستم ذخیره‌ساز انرژی است .در سال‌های اخیر سیستم‌های ذخیره کننده انرژی موردتوجه بسیاری از محققین قرارگرفته است. ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی باعث می‌شود تا امکان ساخت ذخیره کننده‌های کوچک فراهم گردد و بتوان آن‌ها را به‌صورت فشرده تولید کرد .این ویژگی باعث می‌شود که واحدهای ذخیره کننده انرژی در کاربردهای تجاری و فضایی که معمولاً با محدودیت ابعادی مواجه هستند، استفاده فراوانی داشته باشد .مواد تغییر فاز دهنده بکار برده شده در این سیستم‌ها اصطلاحاً مواد تغییر فاز دهنده (PCM) نامیده می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده محلول‌هایی می‌باشند که برای تعدیل درجه حرارت به کار می‌روند. ذخیره‌سازی انرژی نهان گرمایی و یا در نگاه عام‌تر هدر رفتن انرژی عامل پراهمیتی در ضرورت ذخیره‌سازی انرژی سودمند منابع و بازیافت گرمایی هدر رونده در صنعت می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی درزمینهٔ برودت و حرارت دارند. همچنین امکان تبادل حرارت ناشی از بهره‌گیری انرژی‌های پنهان و یا احیاناً ذخیره‌سازی انرژی عمل بازیافت انرژی امکان‌پذیر و ممانعت از به هدر رفتن انرژی میسرتر می‌شود (Zhou *et al.*, 2012).

تعریف

مواد تغییر فاز دهنده، مواد ذخیره‌سازی انرژی هستند که مقدار ذخیره انرژی حرارتی[1] خیلی بیشتری از مواد ذخیره کننده‌ی انرژی آشکار دارند و قادر به جذب و آزادسازی مقدار زیادی انرژی در یک دمای ثابت دارند که این عمل با توجه به تغییر فاز آن صورت

[1] thermal energy storage (TES)

نمی‌گیرد [۳]. ذخیره‌سازی انرژی وسیله‌ای کاربردی برای افزایش راندمان انرژی و نگهداری از آن است. سه‌راه برای ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد که شامل روش‌های شیمیایی محسوس و نامحسوس می‌باشد. انرژی شیمیایی (واکنش‌های معکوس‌پذیر). گرمای آشکار[1] و گرمای نهان[2]. از این روش‌ها ذخیره‌سازی به‌وسیله گرمای نهان به خاطر حفظ و آزادسازی انرژی به مقدار زیادی در واحد وزن PCM در یک دمای ثابت بیشتر مورد استقبال قرارگرفته است. انتقال انرژی حرارتی وقتی صورت می‌گیرد که یک ماده از جامد به مایع یا از مایع به جامد تغییر کند.

در ابتدا، این مواد تغییر فاز دهنده‌ی جامد به مایع مانند مواد نگه‌دارنده‌ی مرسوم عمل می‌کند: دمای آن‌ها با جذب حرارت افزایش می‌یابد برعکس مواد نگه‌دارنده مرسوم (آشکار). مواد تغییر فاز دهنده انرژی حرارتی را تقریباً با دمای ثابت جذب و آزاد می‌کند. آن‌ها ۵-۱۴ برابر بیشتر از مواد نگه‌دارنده‌ی آشکار مانند آب در واحد حجم انرژی را نگه می‌دارند. بسیاری از مواد تغییر فاز دهنده در هر رنج موردنیاز ذوب می‌شوند. بااین‌وجود برای استفاده از مواد نگه‌دارنده‌ی گرمای نهان این مواد باید ویژگی‌های موردنیاز ترمودینامیکی، جنبشی و شیمایی را داشته باشند ازنظر اقتصادی و در دسترس بودن مواد باید موردتوجه قرار بگیرند (Sharma *et al.*, 2009).

دسته‌بندی

مواد تغییر فاز دهنده‌ی زیادی وجود دارند و به سه دسته کلی ارگانیک، غیر ارگانیک و یوتکتیک دسته‌بندی می‌شوند. همچنین با توجه به دمای ذوب و گرمای نهان ذوب هم مشخص می‌شوند. از بین این مواد، آن‌هایی که دمای ذوبی بین ۲۰ تا ۶۰ درجه‌دارند برای ساختمان‌های مسکونی که از سیستم گرمایش کف با تشعشع استفاده می‌کند مناسب می‌باشد.

مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک[3]

مواد ارگانیک بیشتر به مواد پارافینی و مواد غیر پارافینی دسته‌بندی می‌شوند مواد ارگانیک با دمای ذوب متجانس خود هسته شده و معمولاً برای مخازن خود خاصیت فرسایش ندارند. مواد تغییر فاز دهنده‌ی ارگانیک، چسبندگی موردنیاز، پایداری شیمایی، عدم واکنش‌پذیری و قابلیت بازسازی، از مزیت‌های آن‌هاست بااین‌وجود، رسانش گرمایی خیلی کمی در حالت‌جامد دارند و ظرفیت گرمای نهان آن‌ها کم است نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب مواد تغییر فاز دهنده‌ی ارگانیک رایج در ساختمان‌های مسکونی که از سیستم گرمایش کف با تشعشع استفاده می‌کنند. در جدول ۱ نشان داده‌شده است.

[1] sensible heat
[2] latent heat (LH)
[3] Organic PCMs

جدول ۱: مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک

گرمای همجوشی (kJ/kg)	نقطه ذوب (°C)	ترکیب	گرمای همجوشی kJ/kg))	نقطه ذوب ((°C	ترکیب
(۲۰)۱۲۲	(۲۰)۲۹–۲۷	اسید استاریک وینیل	(۱۶)۱۵۲	(۱۶)۲۲–۲۰	پارافین C16–C18
(۱۸)۲۰۵	(۱۸)۳۸	1-Tetradecanol	(۱۷)۱۲۷,۲	(۱۷)۲۲	پلی گلایکول E600
(۱۴)۱۸۹	(۱۴)۴۴–۴۲	پارافین C16–C28	(۱۴)۱۸۹	(۱۴)۲۴–۲۲	پارافین C13–C24
(۱۴)۱۸۹	(۱۴)۵۰–۴۸	پارافین C20–C33	(۱۸)۲۰۰	(۱۸)۲۶	1-Dodecanol
(۱۷)۱۷۳,۶	(۱۷)۶۴	واکس پارافین	(۱۹)۲۴۳,۵	(۱۹)۲۷,۵	پارافین C18

مواد تغییر فاز دهنده غیر ارگانیک[1]

ترکیب‌های غیر ارگانیک گرمای نهان ذوب بالایی در واحد جرم‌دارند. همچنین هزینه کمتری در مقایسه با ارگانیک‌ها دارند. اشتغال ناپذیر هم هستند بااین‌وجود آن‌ها در سرمایش زیاد و دچار پوسیدگی می‌شوند که بر خواص تغییر فاز آن‌ها اثر می‌گذارد.

مواد تغییر فاز دهنده‌ی غیر ارگانیک گرمای نهان زیاد و انتقال حرارت بالایی دارند همچنین از مواد تغییر فاز دهنده‌ی یوتکتیک ارزان‌تر هستند. خوشبختانه به خاطر خاصیت اشتغال ناپذیری آن‌ها در برابر آتش مقاوم هستند.

جدول ۲: مواد تغییر فاز دهنده غیر ارگانیک

گرمای همجوشی (kJ/kg)	نقطه ذوب (°C)	ترکیب	گرمای همجوشی (kJ/kg)	نقطه ذوب (°C)	ترکیب
(۱۸)۲۵۴	(۱۸)۳۲,۴	Na2SO4·10H2O	(۱۴)۲۳۱	(۱۴)۱۸,۵	KF·4H2O
(۱۷)۴۱۶,۹	(۱۷)۳۶	Zn(NO3)2·6H2O	(۲۲)۱۲۵,۵	(۲۱)۲۵,۵	Mn(NO3)2·6H2O
(۱۴)۲۰۱	(۱۴)۴۸	Na2S2O3·5H2O	(۱۷)۱۹۰,۸	(۱۷)۲۹	CaCl2 · 6H2O
(۶)۲۲۶	(۶)۵۸	Na(CH3COO)·3H2O	(۶)۲۹۶	(۶)۳۰	LiNO3·3H2O

مواد تغییر فاز دهنده یوتکتیک[2]

یوتکتیک یک ترکیب دو یا چند جزئی با نقطه ذوب حداقل است. که هر جزء به‌صورت متجانس ذوب یا منجمد می‌شود و یک ترکیب کریستالی معین کرستالیزه شده تشکیل می‌دهد. تحقیقات بسیار کمی راجع به آن‌ها صورت گرفته است (Vineet and Buddhi, 2007).

[1] Inorganic PCMs
[2] Eutectics

جدول ۳. مواد تغییر فاز دهنده یوتکتیک

ترکیب	نقطه ذوب (°C)	گرمای همجوشی (kJ/kg)	ترکیب	نقطه ذوب (°C)	گرمای همجوشی (kJ/kg)
66.6% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	(۲۳)۲۵	(۲۳)۱۲۷	61.5%$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$+ 38.5% NH_4NO_3	(۲۵)۵۲	**(۲۵)۱۲۵,۵**
48%$CaCl_2$ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H_2O	(۲۳)۲۶,۸	(۲۳)۱۸۸,۰	37.5% Urea + 63.5% acetamide	(۱۴)۵۳	**n.a**
47% $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 33% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	(۱۴)۳۰	(۱۴)۱۳۶	58.7%$Mg(NO_3) \cdot 6H_2O$ + 41.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	(۲۵)۵۹	**(۲۵)۱۳۲,۲**
60%$Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O$+ 40% $CO(NH_2)_2$	(۲۴)۳۱,۵	(۲۴)۲۲۶	67.1% Naphthalene + 32.9% benzoic acid	(۲۵)۶۷	**(۲۵)۱۲۳,۴**

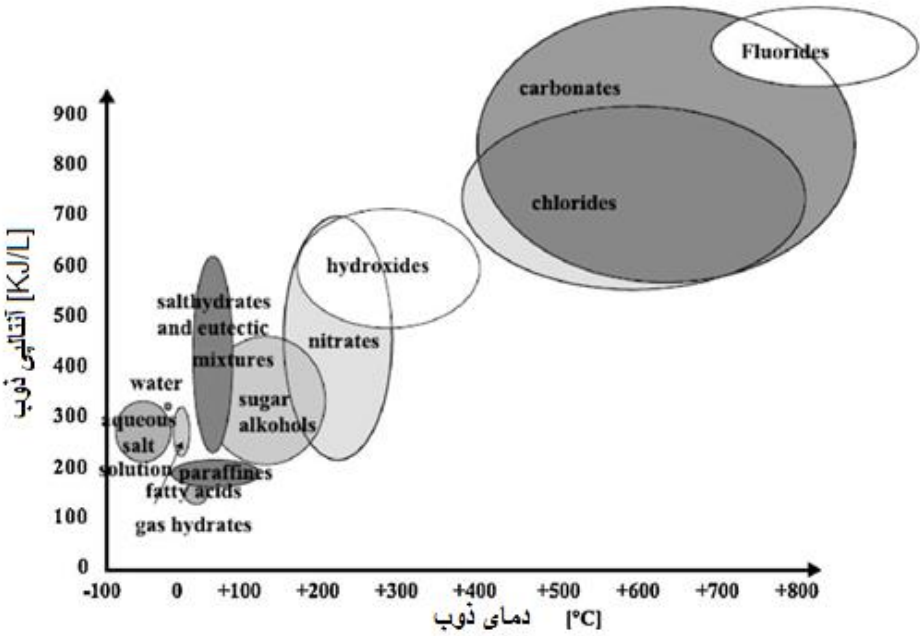
کاربرد مواد تغییر فاز دهنده

انتقال مواد تغییر فاز دهنده برای مصالح ساختمانی

مواد تغییر فاز دهنده به خاطر وجود فاصله‌های متفاوت تغییر فازشان برای کارهای گوناگونی گسترش‌یافته‌اند.

موادی که زیر ۱۵ درجه ذوب می‌شوند برای نگهداری دمای خنک در کاربردهای مربوط به جابجایی هوا مورداستفاده قرار می‌گیرند. درحالی‌که موادی که بالای ۹۰ درجه ذوب می‌شوند در مواردی که افزایش ناگهانی دما وجود دارد مورداستفاده قرار می‌گیرند. تا از اشتغال جلوگیری کند. موادی که نقطه‌ی ذوبی بین این‌ها دارند می‌توانند برای گرمایش خورشیدی و برای کارهایی که احتیاج به تنظیم مقدار گرما دارند مورداستفاده قرار گیرند (Huang, 2006).

موادی که طی ۴۰ سال اخیر موردمطالعه قرارگرفته است شامل نمک‌های هیدراته، روغن‌های پارافین، اسیدهای چرب و یوتکتیک اجزای ارگانیک و غیر ارگانیک می‌باشند. بااین‌وجود مواد تغییر فاز دهنده نمی‌توانند به‌آسانی مستقیم درجاهای کاربردی مورداستفاده قرار گیرند که این امر به خاطر پایداری حرارتی پایین و رسانش پایین گرمایی است. بنابراین مواد تغییر فاز دهنده بهبودیافته برای غلبه بر این مشکلات توسعه می‌یابند (Sumin *et al.*, 2009).



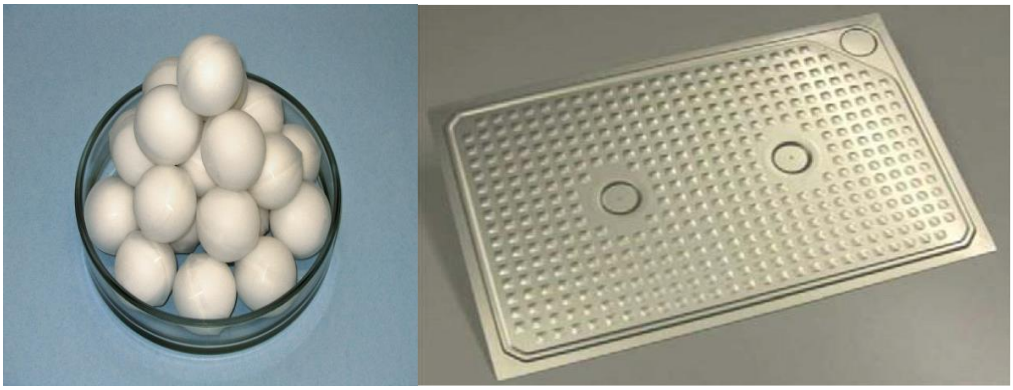
شکل ۱. کلاسی از مواد است که می‌تواند به‌عنوان PCM با توجه به دمای ذوب و آنتالپی ذوب استفاده شوند.

برای کاربردهای مربوط به مصالح ساختمانی، مواد تغییر فاز دهنده احتیاج به دستگاه‌های خاص گرمای نهان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی[1] در شکل‌ها یا اجزای مختلف مانند لایه و لوله‌های PCM انتقال‌دهنده حرارت و تعداد زیادی قوطی برای کپسول کردن آن‌ها دارد تا از حالت‌جامد به مایع در پروسه ذخیره‌سازی انرژی دربیاید. بااینکه استفاده از این مواد مشکل پراکندگی و هدر رفت مواد تغییر فاز دهنده را در پروسه تغییر فاز جامد به مایع کم می‌کند ولی نه‌فقط مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد که هزینه گرمای نهان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (LHTES) نیز زیاد می‌شود. بااین‌وجود این مشکل با استفاده از کپسول‌های میکرو /نانو مواد تغییر فاز دهنده[2] حل می‌شود. با کپسول کردن مواد تغییر فاز دهنده در ترکیب‌های پلیمری می‌شود به این منظور دست‌یافت. میکرو کپسول کردن با توجه به پارامترهایی مانند قطر ذره، ضخامت لایه، ظرفیت گرمایی، رسانش، پایداری و ... دسته‌بندی می‌شوند. ضخامت دیواره ذرات باید کمتر از ۱ میکرومتر باشد و قطر ذرات از ۱ میکرومتر تا ۲۰۰ میکرومتر با توجه به روش کپسول کردن متغیر است ولی معمولاً ۲۰–۴۰ میکرومتر است. مقدار PCM هر کپسول بین ۸۰–۸۵ درصد است (Nelson, 2002).

میکرو کپسول کردن تکنیک مهمی در صنعت کشاورزی و زمینه‌های پزشکی است. چراکه یک جسم می‌تواند با یک‌لایه محافظت گردد. خیلی از مواد مانند رنگ‌ها، جوهر مایع، توتر، داروها و مواد تغییر فاز دهنده کپسوله می‌شوند. اخیراً این تکنیک برای گسترش دامنه‌ی کاربردی مواد تغییر فاز دهنده موردتوجه واقع‌شده. مواد تغییر فاز دهنده‌ی میکرو کپسوله شده یک‌شکل از مواد تغییر فاز دهنده‌ی کپسوله شده هستند که در کپسول‌های پلیمری طبیعی یا مصنوعی کپسوله شده‌اند (شکل ۲). میکروکپسوله ها دارای این

[1] latent heat thermal energy storage (LHTES)
[2] micro/nano-PCM

مزین هستند:۱–از مواد تغییر فاز دهنده در برابر عوامل محیطی نگهداری می‌کنند. ۲–سطح انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. ۳–به مادی هسته و تحت پوشش خود این قابلیت را می‌دهند که در برابر تغییر حجم PCM هنگام تغییر فاز مقاومت بیشتری داشته باشد. ۴–به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) کوچک و قابل‌حمل سازگار هست (Liang *et al.*, 2009).



شکل۲. مواد تغییر فاز دهنده‌ی کپسوله شده

با توجه به هزینه بالای تولید میکرو کپسول‌ها و باهدف کم‌هزینه‌تر شدن، می‌توان مواد تغییر فاز دهنده را به‌صورت پاکت‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر به کاربرد. در صورت استفاده از این مواد به‌صورت پاکتی و یا غیرمیکروکپسول، امکان استفاده از آن‌ها در فضاهای کوچک همچون خلل و فرج مصالح از بین رفته و لذا به فضاهای بزرگ‌تری برای جا دادن این مواد نیاز خواهیم داشت .ازجمله موارد کاربرد بدین‌صورت، می‌توان به پانل‌های مهارشده با فرم‌های فلزی بین جداره‌ها اشاره نمود. پانل‌های سخت و یا انعطاف‌پذیر حاوی این مواد امروزه در بازار نیز موجود بوده و به‌صورت تولید انبوه به شکل رول‌های بسته‌بندی‌شده و یا پانل‌های سخت قابل‌نصب (شکل ۳) به مشتریان عرضه می‌شود.

شکل ۳. مواد تغییر فاز دهنده با پانل‌های سخت

عوامل مؤثر در کاربرد مواد تغییر فاز دهنده

علاوه بر نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده، در طراحی هر سیستم ذخیره انرژی که بر مبنای مواد تغییر فاز دهنده عمل می‌کند، بایستی موارد زیر در نظر گرفته شود:

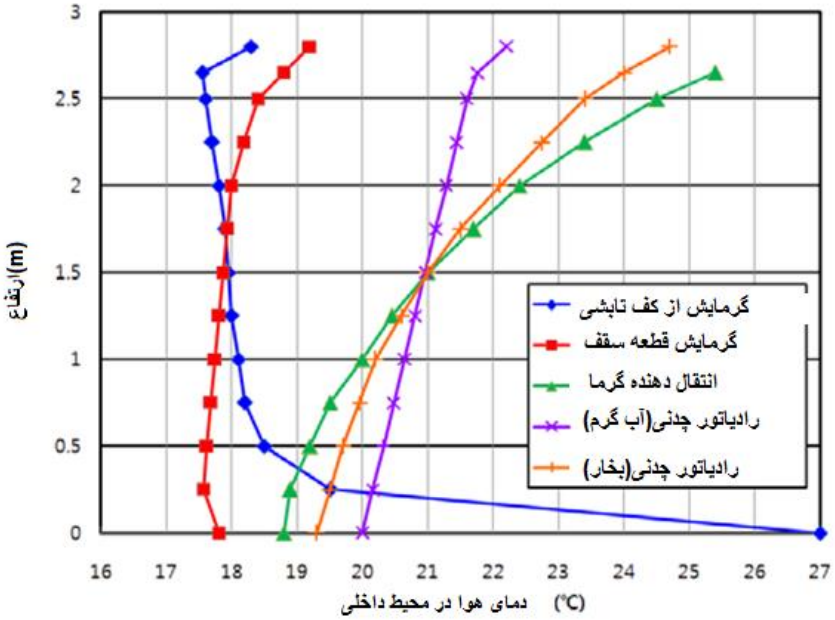
- ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب موردنظر
- مبدل حرارتی با سطح تبادل حرارتی مناسب
- محفظه نگه‌دارنده ماده تغییر فاز دهنده که قابلیت جذب تغییرات حجم این مواد به هنگام تغییر فاز را داشته باشد و سازگار با آن نیز باشد

نکته قابل‌توجه آنکه برای دستیابی به کارایی بهتر باید دمای ذوب مواد موردنظر در محدوده دمای کاری باشد تا علاوه بر خاصیت عایق بودن آن‌ها بتوان از خواص تغییر فاز نیز استفاده کرد .هرچند برای استفاده از این مواد در طراحی و ساخت ساختمان‌ها راه زیادی در پیش است اما ازجمله نکات بسیار مهم در کاربرد این مواد نیز نظیر دیگر سامانه‌های ایستا مسائل مربوط به محاسبات توجیه اقتصادی و زمان بازگشت سرمایه اولیه بعد از زمان بهره‌برداری هست .در برخی موارد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند میزان شار حرارتی ورودی به ساختمان را تا ۳۸ درصد کاهش می‌دهد .همچنین افزایش تعداد حفره‌های مواد تغییر فاز دهنده در آجر موجب کاهش ۱۱ درصدی شار حرارتی و بار سرمایشی می‌شود

سیستم گرمایشی کف با تشعشع[1]

مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان مصالح ساختمانی در خیلی از مطالعات مورداستفاده قرارگرفته ولی کمتر درباره‌ی ساختمان‌هایی که از سیستم گرمایشی کف با تشعشع تحقیق‌شده است مهم‌ترین مؤلفه‌ی مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌های مسکونی ظرفیت گرمایی و نقطه ذوب آن است هرچند دستگاه‌های که از این روش استفاده می‌کنند ازنظر پراکنش گرمایی باحالتی که از سیستم‌های انتقال حرارت استفاده می‌کنند متفاوت است؛ بنابراین برای عملی کردن مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌های مسکونی که از سیستم گرمایش کف با تشعشع استفاده می‌کنند باید واکنش گرما رابین دمای اتاق و دمای مصالح ساختمانی داشته شود. شکل ۴ پراکنش دمای اتاق را نمایش می‌دهد. در حالت گرما با روش تشعشع اختلاف دما بین کف تا سقف بیشتر از سایر روش‌های حرارتی است؛ بنابراین مواد تغییر فاز دهنده‌ای که دمای ذوب مناسب داشته باشد باید موردتوجه قرار بگیرد؛ زیرا اختلاف گرمایی داخل و خارج سازه وجود دارد (Jeon and Jisoo, 2010).

[1] Radiant floor heating (ONDOL)systems

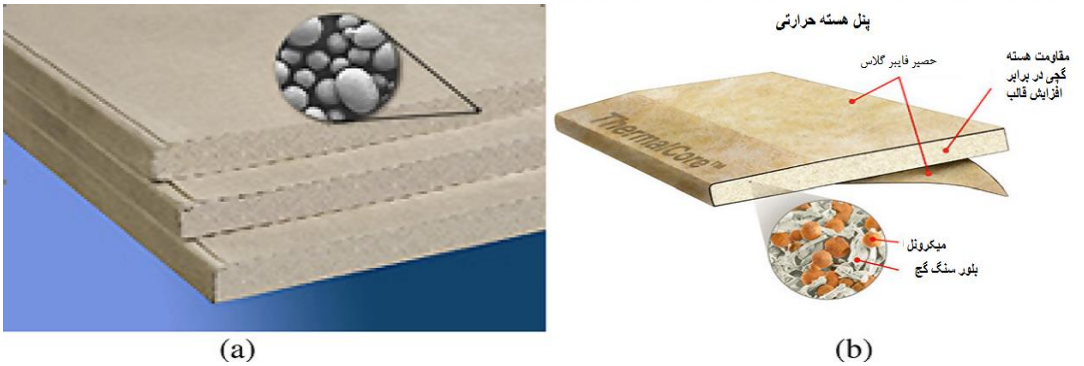


شکل ۴. بررسی توزیع دمای داخلی در سیستم‌های گرمایشی

دیوارهای تخته‌ای مواد تغییر فاز دهنده[1]

دیوارهای تخته‌ای مواد تغییر فاز دهنده یک جایگزین مؤثر و کم‌هزینه‌تر و دارای جرم استاندارد برای ذخیره حرارت خورشیدی در ساختمان هست که در داخل گچ و سایر سازه‌های ساختمانی تعبیه می‌شوند. (شکل ۵) ویژگی‌های حرارتی دیوارهای مواد تغییر فاز دهنده بسیار نزدیک به عملکرد خود مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. با توجه به فرایند انتشار مواد تغییر فاز دهنده بیشتر در یک‌سوم ضخامت بیرونی دیوار نهفته شده‌اند.

[1] **PCM wallboard**



شکل ۵. دیوارهای تخته‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده

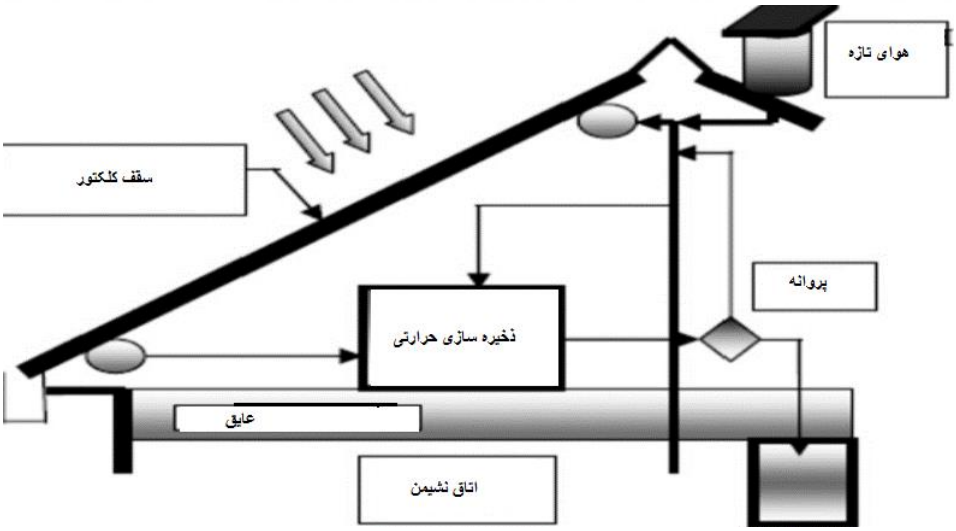
اسکالت و همکاران به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این دیوارها می‌توان دمای اتاق در منطقه آسایش انسان برای مدت‌زمان طولانی‌تر پس از حرارت دادن و خنک کردن بعد از قطع شدن سیستم حفظ کرد (Scalat *et al.*, 2002).

سیناتس و همکاران با استفاده از یک دیوار گچی آغشته به مواد تغییر فاز دهنده با بررسی اتاق آزمون در فضای باز عملکرد حرارتی دیوار گچی حاوی مواد تغییر فاز دهنده را موردبررسی قراردادند و نشان دادند که دمای اتاق با کاهش حداکثر ۴ درجه‌ای در طول روز مواجه می‌شود (Athienitis *et al.*, 2009).

سقف با مواد تغییر فاز دهنده برای گرمایش و سرمایش فعال[1]

صفحات سقف که با مواد تغییر فاز دهنده برای سیستم تهویه ساخته‌شده‌اند نقش مؤثری در کنترل Peak shaving دارند. یک گروه تحقیقاتی که در دانشگاه جنوب استرالیا فعالیت می‌کنند یک سیستم نگهداری حرارتی با خورشید و هوا که سقف به آن‌ها تجهیز شده است طراحی کرده‌اند که در (شکل ۶) نشان داده‌شده است واحد نگهداری حرارت نهان به‌صورت صفحه‌ی سقفی فلزی چین‌چین خورده وجود دارد که مانند کلکتور های خورشیدی عمل می‌کند و برای نگهداری حرارت در طول روز و تأمین حرارت در شب یا وقتی‌که خورشید زیر ابر پنهان است مورداستفاده قرار می‌گیرد.

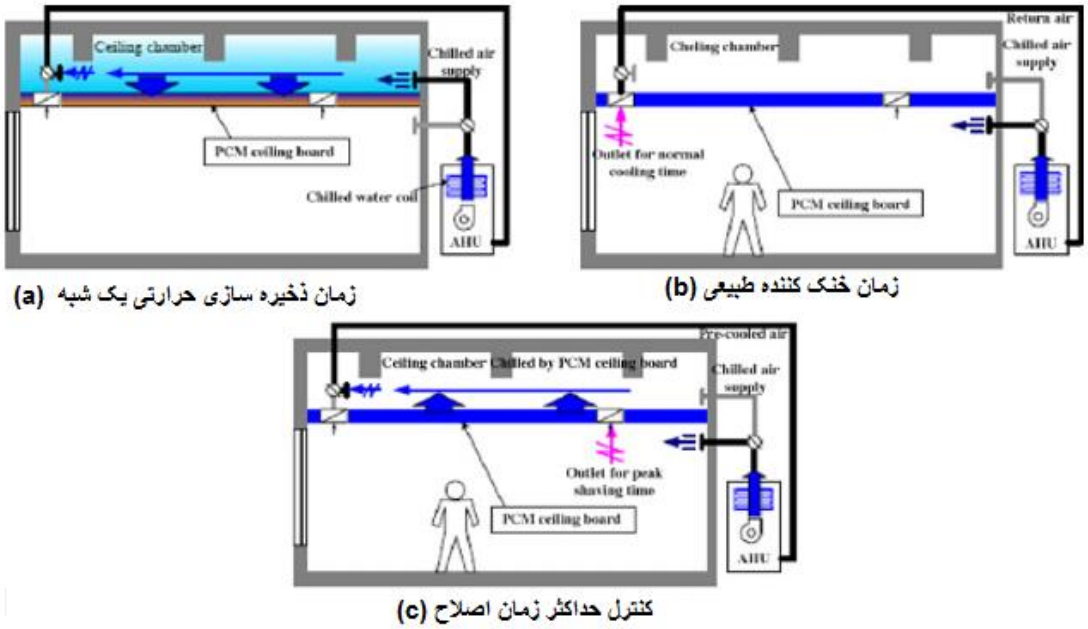
[1] PCM ceilings for active heating and cooling



شکل ۶. نمای کلی از یک سیستم ذخیره‌سازی گرمایش خورشید

کندو و ایراموتو یک صفحه‌ی سقف با (PCM با پشم سنگ) که از میکرو کپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده بهره می‌برد برای یک ساختمان اداری طراحی کرده‌اند نمای کلی این سیستم به (شکل ۷) نشان داده‌شده است هنگام نگهداری حرارت در طول شب هوای سرد با واحد مدیریت هوا[1] (AHU) که از جریان مقطع برق سقف جریان پیدا می‌کند و صفحه‌ی سقف دارای مواد تغییر فاز دهنده را خنک می‌کند استفاده می‌شود در محفظه‌ی در طول روز خنک‌سازی، هوای سرد که از واحد مدیریت هوا به‌طرف اتاق جریان پیدا می‌کند به‌واسطه‌ی محفظه‌های سقف با واحد مدیریت هوا باز برمی‌گردد. وقتی‌که از صفحات مواد تغییر فاز دهنده سقف عبور می‌کند هوای گرم که از اتاق بازمی‌گردد در مسیرش هنگام برگشت به واحد مدیریت هوا پیش سرد می‌شود. آن‌ها دریافتند که مقدار بار در واحد کنترل هوا وقتی‌که به دوره Shaving control می‌رسد کاهش پیدا می‌کند و همچنین پیشنهاد داده‌شده که صفحات سقف به خاطر اشتغال پذیری احتیاج به بهبود دارند (Kondo and Iwamoto, 2005).

[1] air-handling unit(AHU)



شکل ۷. نمای کلی از سیستم ceiling board سقف

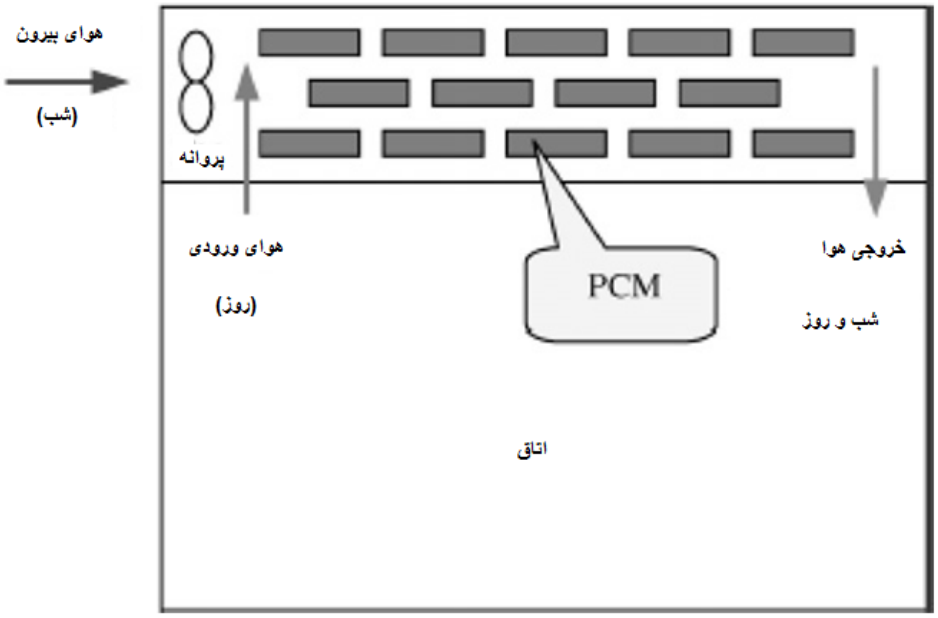
کاچنز و لهمن مفهوم جدیدی از صفحات سقف که از نور حرارتی اکتیو هستند برای ساختمان‌های جدید ارائه کرده‌اند در این سیستم ترکیب میکرو کپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده و گچ بر یک صفحه‌ی فولادی قرار داده می‌شود؛ که به‌عنوان یک ساپورت برای نگهداری مکانیکی صفحات مورداستفاده قرار می‌گیرند. از یک لوله‌ی موئین آب برای کنترل جرم حرارتی استفاده می‌شود. آن‌ها کارایی حرارتی این سیستم را آزمایش کردند و نشان دادند که فقط یک‌لایه ۵ سانتی‌متری از میکرو کپسول و گچ برای یک شرکت استاندارد کافی است که دمای داخل آن را به حد راحتی برساند (Koschenz and lehmann, 2008).

سرمایش شب[1]

سرمایش رایگان یک مفهوم برای کارهای سرمایش به این صورت که سرما از هوای محیط در طول شب جمع شده و در طول گرم‌ترین ساعات روز آزاد می‌شود. وکیلاتوژار و سامان یک مدل برای آنالیز تغییر فاز سیستم نگهداری برای کاربردهای سرمایش پیشنهاد داده است آن‌ها فهمیدند که خلأ هوای کوچک‌تر و قطعات مواد تغییر فاز دهنده باریک‌تر کارایی حرارتی بهتری دارد.

کنگ و همکاران مدل جدیدی از تهویه شبانه پیشنهاد کرده‌اند که با سیستم بستر محفظه مواد تغییر فاز دهنده همراه است که در (شکل ۸) نشان داده‌شده است. در شب هوای بیرون، هوای درون سیستم نگهداری حرارت پنهان ذخیره می‌شود تا سردی را به مواد تغییر فاز دهنده شارژ کنند. درحالی‌که در طول روز سرد به‌وسیله مواد تغییر فاز دهنده در شب ذخیره‌شده است (Kang *et al.*, 2009).

[1] Night cooling



شکل ۸. شماتیک دیاگرام یک سیستم NVP

دیوارهای حاوی مواد تغییر فاز دهنده

روش دیگر برای اعمال مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها، ساختن مواد تغییر فاز دهنده در قالب بتنی با سلول‌های باز سیمانی است. این ساختار ترموکرت نامیده می‌شود. هاوز و همکاران گزارش داده‌اند که به سازی و تعدیل بتنی و تکنیک‌های ساختن مواد تغییر فاز دهنده اثر زیادی بر ظرفیت نگهداری حرارت دارد که این نتیجه بعد از مطالعه‌ی کارایی مواد تغییر فاز دهنده در انواع بلوک‌های بتونی به دست آمد بااین‌حال مقاومت بتن بعدازاین که در مواد تغییر فاز دهنده مورداستفاده قرار گرفت مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند (Hawes *et al.*, 2006).

حایل ها

مهلینگ اولین بار گزارش خود را در هشتمین نشست کارشناسانه در اختراعات در تکنولوژی مواد تغییر فاز دهنده ارائه داده است او پیشنهاد می‌کند که حداکثر دمای سایه تا ۳ ساعت باقی می‌ماند و دمای اتاق را به کمک حائل مواد تغییر فاز دهنده تا ۲ درجه کاهش می‌دهد شکل حائل مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۹ نشان داده‌شده است. گرمایش پیوسته و سرمایش شبانه از تجهیزات مکانیکی با برقی برای نگه‌داشتن حرارت در استفاده بعدی یا حرکت هوا برای تهویه و خنک کاری استفاده می‌کند در کاربردهای ساختمانی مواد تغییر فاز دهنده معمولاً طوری ساخته می‌شوند که دیوارها، کف، سقف و حائل را می‌پوشانند (Mehling *et al.*, 2004).

شکل ۹. حائل‌های PCM

نتیجه‌گیری

در این مقاله پژوهش‌های قبلی در مورد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده برای ساخت برنامه کاربردی در زمینه ذخیره‌سازی انرژی مرور شده است. مواد تغییر فاز دهنده‌ای که در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند باید دارای دمای تغییر فازی بین ۱۸ تا ۳۰ درجه سانتی گراد باشند تا معیارهای آسایش حرارتی را فراهم کنند. علاوه بر این سازگاری خواص شیمایی، پایداری، ویژگی‌های آتش‌سوزی و سازگاری با ساخت‌وساز نیز در انتخاب مواد تغییر فاز دهنده در نظر گرفته می‌شود. انرژی حرارتی ذخیره‌شده با مواد تغییر فاز دهنده به روش گرمای نهان صورت می‌گیرد و از آن در دیوارها و سقف و... استفاده می‌شود و تأثیر قابل‌توجهی در کاهش دمای نوسانات با ذخیره انرژی ایجاد می‌کند.

از مزایای اصلی مواد تغییر فاز دهنده بهبود ظرفیت عایق حرارتی است که بار حرارتی در ساعت‌های اوج تولید که توسط پوسته ساختمان ایجادشده است به حداقل می‌رساند. استفاده از PCM باعث کاهش میزان مصرف تهویه مطبوع و نتیجتاً کاهش مصرف انرژی می‌شود.

منابع

Falk. A, C. Durschner, and K. Remmers. *Photovoltaics for professionals: solar electric systems marketing, design and installation*. Routledge, 2013.

Zhou. D., C. Zhao, and Y. Tian. "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications." *Applied energy* 92 (2012): 593-605.

Sharma. A., V.V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renew. Sustain. Energy Rev. 13 (2009), pp. 318–345.

Vineet V. T., and D.Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 6 (2007), pp.1146-1166

Huang, M., "The Application of a Validated Numerical Model to Predict the Energy Conservation Potential of Using Phase Change Materials in the Fabric of a Building", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, pp1951-1960, 2006

Sumin. K, T. Lawrence, F. Drzal High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(1) 2009, Pages 136-14

Nelson. G, Application of microencapsulation in textiles, Int. J. Pharm. 242 (2002) 55–62.

Liang. C, X. Lingling, S. Hongbo, Z. Zhibin, Microencapsulation of butyl stearate as a phase change material by interfacial polycondensation in a polyurea system. Energy Convers Manage 2009;50:723–9

Jeon. P, Jisoo. C., "PCM Application Methods for Residential Building Using Radiant Floor Heating Systems." Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, P 136-14.

Scalat. S, D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghighata, D. Feldman, Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. Solar Energy Mater Solar Cells2002;44:49–61.

Athienitis A.K., C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. Build Environ 1997;2(5):3405–10.

Kondo T, T. Iwamoto, Research on using the PCM for ceiling board. IEA ECESIA, Annex 17, 3rd workshop, Tokyo, Japan; 2005.

. Koschenz M, B. Lehmann, Development of a thermally actived ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy Build 2004;36:567–78.

Kang YB, Y. Jiang, YP. Zhang. Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system – NVP system. Energy Build 2008;35(4): 417–25.

Hawes DW, D. Banu, D. Feldman, Latent heat storage in concrete II. Solar Energy Mater 2006;21:61–80.

. Mehling H., Strategic project ‘‘Innovative PCM-Technology’’—results and future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey, April 18–24; 2004