نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹٤ – کرج

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده به منظور ذخیره سازی انرژی گرمایی

اسماعیل عرب چادگانی[۱*]، شاهین رفیعی[۲]

۱ و ۲ – به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم و استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران

ایمیل مکاتبه کننده: es_arab@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله ابتدا به معرفی مواد تغییر فاز دهنده و سپس به کاربردهای آن به منظور ذخیره سازی انرژی گرمایی پرداخته شده است. در مطالعاتی که در زمینه کاربرد این گونه مواد در ساختمان صورت گرفته، نتایج بسیار مطلوبی در ارتباط با کاهش انرژی مصرفی برای گرمایش و سرمایش تا حدود ۲۰٪، افزایش حدود C°5 حداقل دمای اتاق و همچنین سهولت در تامین شرایط آسایش و راحتی ساکنین به دست آمده است. با کاربرد این مواد در گلخانه می‌توان نوسانات دما را حدود C°12-6 کاهش داد همچنین زمان به حداقل رسیدن دمای گلخانه را به تاخیر انداخت. نتایج استفاده از PCM در آبگرم کن خورشیدی نشان داد این مواد به طور کلی بازدهی آبگرم کن را افزایش می‌دهد. این مواد بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی، به صورت هوشمندانه، و تنها از طریق تمایل ذاتی به تغییر فاز، به طور طبیعی خود را به نوسانات دمایی محیط تطبیق داده و کاهش مصرف انرژی را به دنبال خواهد داشت.

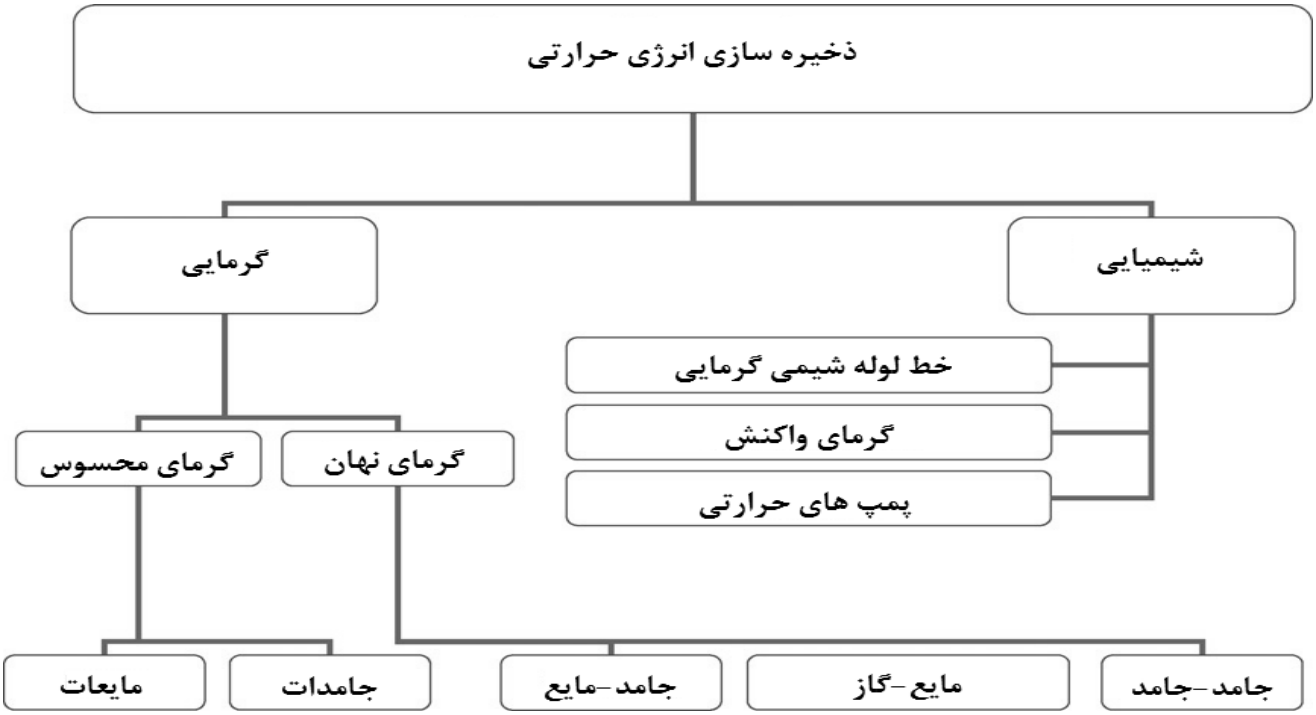
واژه های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره انرژی، PCM، بهینه سازی مصرف انرژی

مقدمه

PCM به مواد تغییرفاز دهنده گفته می‌شود. این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فازدهنده قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچگونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ نماید. *(مختاری یزدی و آرامی, ۱۳۹۲)*

ذخیره سازی انرژی گرمایی

ذخیره سازی انرژی گرمایی به دو روش شیمیایی و گرمایی انجام می‌شود. در روش گرمایی می‌توان انرژی را به صورت گرمای نهان(LHS[1]) یا محسوس (SHS[2]) ذخیره نمود (شکل۱) . گرمای محسوس گرمایی است که مواد مختلف و اجسام درون محیط با افزایش دما در خود ذخیره می‌کنند که این گرما به جرم، گرمای ویژه و میزان تغییر دمای ماده بستگی دارد.

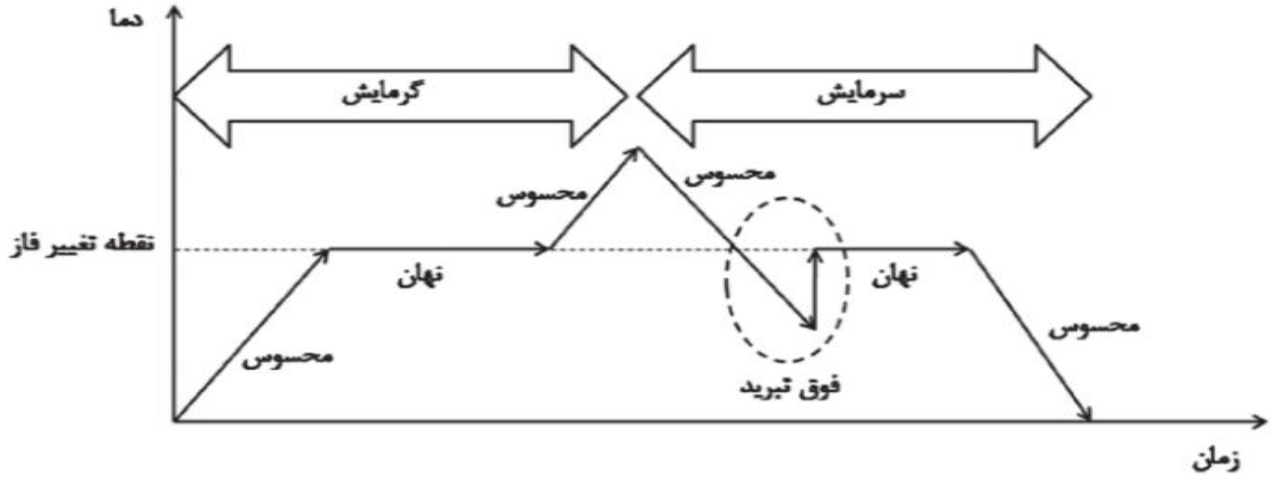


شکل 1–نمودار روش های ذخیره سازی انرژی گرمایی (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)

گرمای نهان گرمایی است که مواد به واسطه تغییر فاز و در دمای ثابت در خود ذخیره می‌کنند (شکل۲). ذخیره سازی گرما به صورت نهان مزایایی دارد که از آن جمله می‌توان به چگالی بالای گرمای ذخیره شده و نیز ذخیره گرما در دمای ثابت نام برد. ذخیره گرما در دمای ثابت باعث افزایش آسایش حرارتی و مانع از ایجاد تنش های دمایی در کاربرد های حساسی چون گلخانه ها، خشک کن ها و صنایع فضایی و... می‌شود.(Shalaby, Bek, & El-Sebaii, 2014)

[1] latent heat storage

[2] Sensible heat storage



شکل۲ –نمایش گرمای نهان ذوب و نهان انجماد

معرفی مواد تغییر فاز دهنده

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. به عبارت دیگر با بهره گیری از این مواد می‌توان با انحراف درجه حرارت محیط از دمای پافشاری مقابله کرد. انواع مواد تغییر فاز دهنده در گستره دمایی وسیعی ذوب یا منجمد می‌شوند که کاربرد های جالبی را بوجود می‌آورند. (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)
مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به دو گروه آلی و معدنی تقسیم کرد:

مواد تغییر فازدهنده آلی

این مواد به دو دسته پارافین‌ها و غیر پارافین‌ها تقسیم می‌شوند. خواص مطلوب پارافینها عبارتند از:
گرمای نهان ذوب بالا، تغییر حجم کوچک هنگام ذوب، فشار بخار پایین در حالت مذاب، غیر خورنده و نسبتا ارزان بودن.
معایب این گروه از مواد عبارتند از:
هدایت حرارتی پایین، عدم سازگاری با مخزن پلاستیکی، نسبتاً قابل اشتعال .
اما غیر پارافین‌های آلی که بیشتر به اسیدهای چرب شناخته می شوند، فراوان‌ترین مواد تغییر فازدهنده با خواص بسیار متغیر هستند . بر خلاف پارافین‌ها که دارای تشابه خواص هستند، هر کدام از این مواد دارای ویژگیهای منحصر به خود می‌باشد. از جمله:
گرمای نهان ذوب بالا، قابلیت اشتعال، هدایت گرمایی پایین، نقطه اشتعال پایین، سطح سمی بودن متغیر، عدم تعادل در دماهای بالا. (معرفت و کیان پرور, ۱۳۸۸)

مواد تغییر فازدهنده معدنی

مواد معدنی تحت دو گروه نمکهای هیدرات و فلزی‌ها دسته‌بندی می‌شوند.

جذاب‌ترین خواص نمک‌های هیدرات عبارتند از: گرمای نهان ذوب در واحد حجم بالا، هدایت گرمایی نسبتاً بالا (تقریبا دو برابر پارافینها)، تغییر حجم کم در هنگام ذوب.

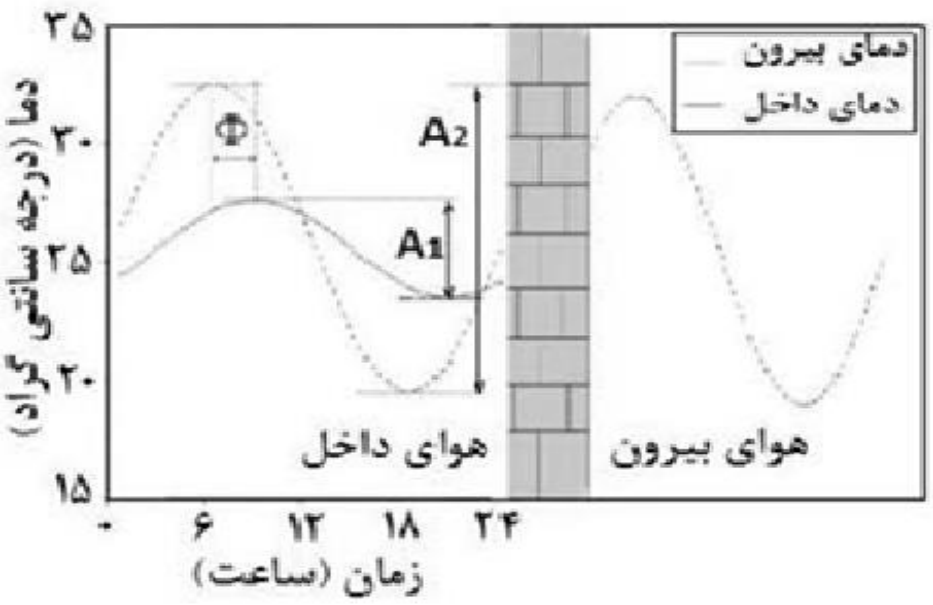
این نمکها چندان خورنده نیستند و با پلاستیک سازگارند، تنها اندکی سمی هستند . بسیاری از نمک‌های هیدرات به اندازه کافی برای استفاده در ذخیره سازی ارزان هستند . عمده ترین مشکلات نمک‌های هیدرات بعنوان PCM، ذوب غیریکنواخت، مادون سرد شدن، کاهش خودبخود تعداد مولهای آب نمکهای هیدرات در طول فرایند تخلیه می‌باشد. (معرفت و کیان پرور, ۱۳۸۸)

مطالعات گذشته توسط محققین بر روی PCM که کاربرد این مواد را در موارد گوناگون مورد بررسی قرار داده اند با تقسیم بندی بر اساس کاربرد خاص آنها در ادامه آورده شده است.

کاربرد مواد تغییر فاز دهنده

کاربرد در ساختمان

PCM در صورت استفاده در ساختمان، از طریق چرخه‌های متوالی ذوب و انجماد در تغییرات شدید دمای هوا (مثلا بین شب و روز)، مقادیر زیادی گرما را با محیط تبادل نموده و از این طریق دمای هوای متعادل‌تری را برای فضای داخل ساختمان تامین می‌نمایند. طبق نتایج حاصل از بکارگیری این مواد در ساختمان، نوسانات دمای هوای داخل به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و حفظ دمای محیط مناسب با دمای مطلوب بدن انسان آسان می گردد. از طریق این سیستم می‌توان انرژی مورد نیاز جهت گرمایش و سرمایش را تا ۱۹ درصد کاهش داد. (معرفت و کیان پرور, ۱۳۸۸) شایان ذکر است که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در صنعت ساختمان یک علم نوظهور بوده و برای رسیدن به نتایج مطلوب از این فناوری، تحقیقات و تجربه های بیشتری مورد نیاز است.



شکل ۳–استفاده از PCM باعث کاهش دامنه نوسان دما و تاخیر زمانی ماکسیمم و مینیمم دمای داخل ساختمان می‌شود.

ذخیره سازی انرژی گرمایی در ساختمان

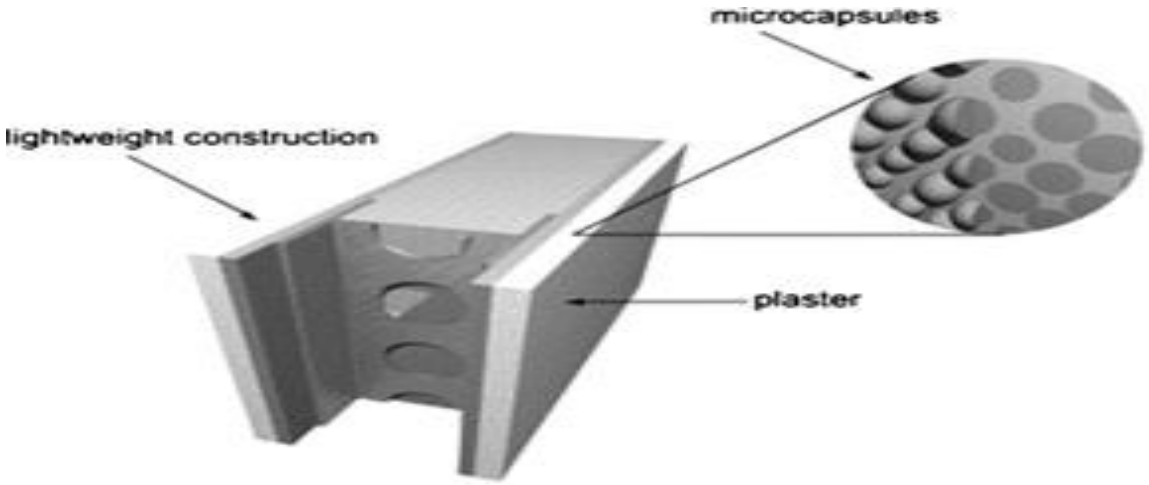
در مطالعه ای، تحلیل گرمایی بر روی یک اتاق رو به جنوب که از صفحه ماده تغییر فاز دهنده با شکل ثابت (SSPCM[۳]) برروی کلیه دیوار ها، سقف و کف آن استفاده شده است، در فصل زمستان بررسی گردید. هدف از بکارگیری ماده تغییر فازدهنده ذخیره سازی انرژی تابشی در طول روز با انجام فرآیند ذوب و آزادسازی این انرژی در طول شب طی فرآیند انجماد، به منظور کاهش مصرف انرژی می‌باشد. تاثیر خواص ترموفیزیکی مختلف ماده تغییر فازدهنده نظیر نقطه ذوب، گرمای نهان ذوب و هدایت گرمایی آن و نیز سایر شرایطی مانند ضخامت صفحه SSPCM بررسی شده‌اند. طبق نتایج حاصله استفاده از ماده تغییر فازدهنده منجر به افزایش ۵/۱°C حداقل دمای اتاق و ذخیره سازی حدود ۱۹٪ انرژی می گردد. همچنین بکارگیری این ماده به سبب کاهش اندازه نوسانات دمای هوای داخل و باقی ماندن دمای هوای اتاق برای مدت زمان طولانی‌تر نزدیک به دمای مطلوب اتاق، باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی نیز می‌شود. (معرفت و کیان پرور, ۱۳۸۸)

کاهش بار سرمایشی ساختمان

از PCM هایی که دمای ذوبشان کمتر از ۱۵ درجه سانتیگراد است برای تهویه مطبوع و خنک‌کنندگی استفاده می‌شوند. استفاده از این تکنولوژی به خصوص برای سرمایش در تابستان در کشورهای کانادا و آمریکا باعث صرفه جویی ۵۰ درصدی انرژی شده است. همچنین این کار باعث انتقال مصرف انرژی الکتریکی از ساعات پرباری به ساعات کمباری می‌شود که صرفه‌جویی اقتصادی بسیار زیادی به همراه دارد. (معروفی و آقانجفی, ۱۳۹۱)

[۳] Shape Stabilized Phase Change Material

در مطالعه‌ای که به بررسی کارایی حرارتی آجرهای مجهز به مواد تغییر فاز دهنده(شکل ٤) پرداخته شده، نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند میزان شار حرارتی ورودی به ساختمان را تا ۳۸ درصد کاهش دهد. همچنین افزایش تعداد حفره‌های مواد تغییر فاز دهنده در آجر موجب کاهش ۱۱ درصدی شار حرارتی و بار سرمایشی می‌شود. (حقشناس کاشانی, ۱۳۸۸)

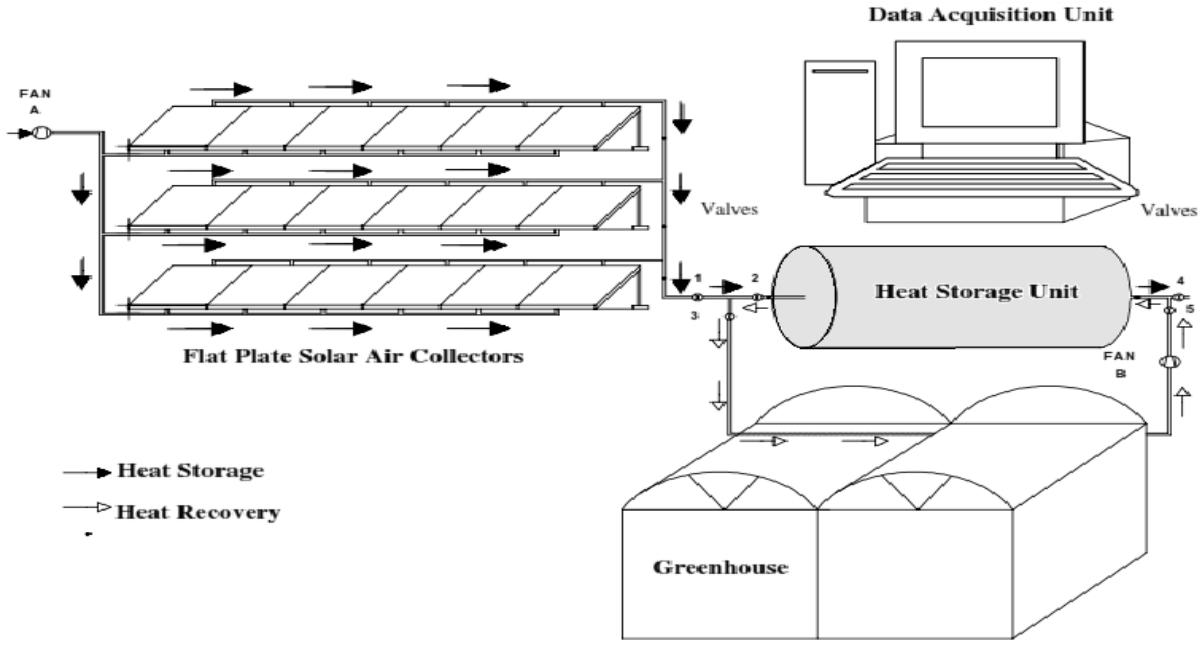


شکل٤– یک دیوار که میکروکپسول‌های PCM به لایه گچ داخلی اضافه می‌گردند.

با توجه به هزینه بالای تولید میکروکپسول‌های حاوی این گونه مواد، میتوان مواد مذکور را به صورت پاکت‌های بزرگتر و یا پانل‌های حاوی این مواد ، در فواصل بین جداره‌ها و یا بین شیشه‌های دوجداره به کار برد. در صورت انتخاب نوع صحیح این ماده براساس اقلیم منطقه، تغییرات دمایی منطقه و متناسب با فصل، میتوان بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و تنها با استفاده از قابلیت‌های فیزیکی این مواد، کاهشی ۲۰ درصدی در انرژی مصرفی ساختمان داشت. (مختاری یزدی و آرامی, ۱۳۹۲)

کاربرد در گلخانه

نتایج مربوط به ذخیره سازی انرژی گرمایی به صورت گرمای نهان در واحد ذخیره سازی گرما برای گلخانه ای آزمایشی متشکل از صفحه جاذب خورشیدی، واحد ذخیره سازی، مبدل حرارتی و واحد تحصیل داده با استفاده از ٦۰۰۰ kg پارافین (۳۳/۳۳ kg به ازای هر متر مربع از گلخانه) نشان می‌دهد که سیستم مورد استفاده متوسط بازدهی انرژی ٪ ٤۰/٤ و متوسط بازدهی اکسرژی ٪ ٤/۲ داشته است طرحواره این سیستم در شکل۵ به نمایش در آمده. (ztu¨rk, 2005)



شکل۵-گلخانه مجهز به سیستم ذخیره انرژی PCM

در پژوهشی دیگر که در یک گلخانه مدل انجام شده، کاهش حداکثر تغییرات دمای داخل گلخانه ای که در آن از PCM استفاده شده مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل ریاضی نیز برای مواد ذخیره ساز انرژی و گلخانه توسعه یافت که در این مدل از روش های عددی و برنامه جاوا کد برای حل استفاده شد. اثر پارامترهای مختلف بر روی دمای داخل گلخانه بررسی شد که نتایج مربوطه حاکی از این بود که با استفاده از PCM نوسان دمای داخل گلخانه بین ۳ تا ۵ درجه سانتی گراد کاهش یافت که این تاثیر می‌تواند با افزایش انتقال حرارت بین واحد ذخیره انرژی PCM و هوای داخل گلخانه بیشتر شود. (Najjar & hasan, 2008)

مطالعه دیگری در رابطه با استفاده از PCM به منظور گرمایش محیط گلخانه ای در ترکیه انجام پذیرفت، که در آن از $CaCl_2 6H_2O$ با دمای تغییر فاز ۲۹°C در جاذب خورشیدی استفاده گردید و نتایج آزمایش ها نشان داد که سیستم مورد اسفاده میزان ۲۳٪-۱۸ از نیاز حرارتی روزانه گلخانه را برای مدت ٤-۳ ساعت تامین نمود. (Benli & Durmus, 2009)

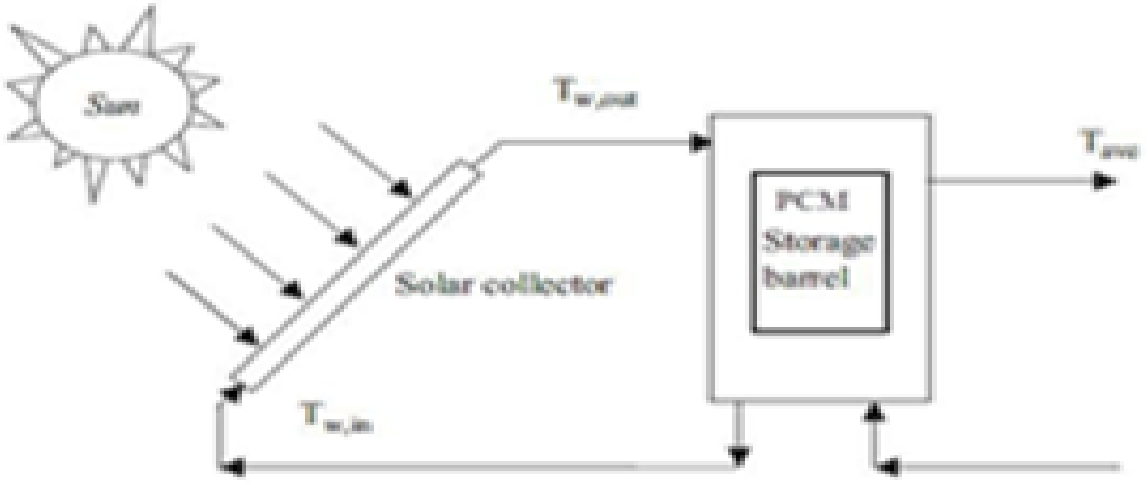
مطالعه ای در یک گلخانه در مراکش بر روی تاثیر کاربرد PCM در دیوار شمالی یک گلخانه شرقی غربی انجام پذیرفت. در این دیوار از $CaCl_2 6H_2O$ به عنوان PCM استفاده شده و یک مدل حرارتی عددی برای محاسبه اجزای مختلف همچون پوشش گلخانه، گیاهان، هوای داخل و دیوار شمالی بر اساس موازنه ی جرم و گرمای گلخانه توسعه یافت تا تاثیر PCM را بر روی دما و رطوبت گلخانه مورد بررسی قرار دهد. محاسبات برای آب و هوای معمولی ژانویه مراکش (31/6°N,8/03°W) انجام گرفت. نتایج نشان دهنده این بود که به ازای ۳۲/٤ Kg PCM به ازای هر متر مربع از مساحت گلخانه، نوسانات دمای گیاهان و هوای داخل ٦-۱۲°C در شب زمستانی کمتر شده و نیز رطوبت نسبی به طور متوسط ۱۵٪-۱۰کاهش بافته. (Berroug, Lakhal, Omari, Faraji, & Qarnia, 2011)

نتایج بررسی کاربرد سیستم ذخیره سازی گرما با PCM در گلخانه ای در شمال فرانسه نشان داد که میتوان دمای گلخانه را تقریبا ۱۰°C بالاتر از دمای محیط خارج در طول شب های مارس و آپریل نگه داشت و همچنین به نظر می‌رسد یک PCM

با دمای گذار ۲۰°C برای ماه هایی با تابش کم نور خورشید مثل ژانویه و فوریه مناسب نیست. علاوه بر این مشخص شد زمانی که دمای گلخانه از دمای ذوب PCM (در اواخر زمستان) تجاوز میکند چگالی ذخیره سازی ($1/6\ MJ.m^{-2}$) برای ذخیره انرژی خورشید خیلی کم است. اندازه گیری رطوبت نشانگر تاثیر مثبت ذخیره سازی گرما بود و نیز با کاهش رطوبت محصولات کشاورزی از گزند بیماری های قارچی حفظ شدند. (Boulard, Razafinjohany, Baille, Jaffrin, & Fabre, 1990)

کاربرد در آبگرم کن خورشیدی

بهره‌گیری از گرمای نهان ناشی از تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده به همراه انرژی گرمایی محسوس، از روش های نوین برای ذخیره سازی انرژی حرارتی است. کاهش زمان تولید آب گرم، نزدیکی دمای آب گرم تولیدی به دمای مورد نیاز،چگالی انرژی گرمایی ذخیره شده در آبگرمکن، دوام آب گرم خروجی از مخزن و بازده قانون دوم ترمودینامیک مواردی است که میزان تغییر آنها با به کارگیری PCM در یک سیستم آبگرمکن غیر فعال به روش تجربی مورد بررسی قرارگرفته شده است. در تحقیقات انجام شده از یک نمونه پارافین به عنوان PCM، در مخزن تانک دوجداره یک نمونه آب گرم کن خورشیدی مدل(شکل ٦) استفاده شده و تغییر عملکرد آبگرمکن مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاکی از بهبود کلی رفتار آبگرمکن در همه موارد مذکور بود. (فضیلتی و عالم رجبی, ۱۳۸۸)



شکل٦ – بهسازی آبگرمکن خورشیدی با استفاده از PCM

کاربرد در خشک کن خورشیدی

نتایج حاصل از کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در خشک کن خورشیدی بیان می‌کند که خشک کن خورشیدی با PCM تلفات حرارتی را کاهش داده و راندمان دستگاه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این پژوهش ها بیان می‌کند که الیاف کربن، فوم گرافیت، گرافیت پهن شده وذرات با رسانش حرارتی بالا باعث بهبود راندمان حرارتی یک سیستم خورشیدی با بکارگیری پارافین شده است. (Shalaby, Bek, & El-Sebaii, 2014)

کاربرد در منسوجات

کاربرد های منسوجات حاوی مواد تغییر فاز دهنده شامل البسه، پتو، پزشکی، عایق بندی، محافظتی و بسیاری دیگر است. در ادامه، مختصری از کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده در زمینه نساجی توضیح داده می‌شود.

فضانوردی

از نخستین مصارف تکنولوژی مواد تغییر فاز دهنده، استفاده در دستکش‌ها و لباس های فضانوردی است که از فضانوردان در برابر سرمای زیاد، محافظت می‌کند.

البسه ورزشی

گرمای تولید شده توسط بدن حین فعالیت ورزشی اغلب به مقدار الزم به محیط اطراف انتقال داده نشده و این امر باعث بروز تنش حرارتی می‌شود. وجود ماده تغییر فاز دهنده می‌تواند این گرمای اضافی را جذب نموده و در فرصت مناسب آن را آزاد کند. دستکش‌های اسنوبرد، لباس زیر و لباس کوهنوردی، لباس زیر برای دوچرخه سواری و دو، چکمه‌های اسکی، چکمه‌های کوهنوردی، چکمه های راننده های رالی، کلاه و دستکش موتورسواری و کفش گلف مثال هایی از کاربردهای مواد تغییر فازدهنده در البسه ورزشی می‌باشند. (سیف پور, نوری و مختاری, ۱۳۹۰)

کاربرد های دیگر

از سایر کاربرد های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی گرمایی می‌توان به مصارف پزشکی (جابجایی خون و اعضای بدن)، دارویی (مخصوصا برای انتقال داروهای حساس به تغییرات دما)، حمل و نقل مواد غذایی، استفاده در محصولات الکترونیکی (حفاظت حرارتی)، آسایش حرارتی وسایل نقلیه، کاربرد در سیستم های مخابراتی و... نام برد. (Zalba, , Cabeza, & Mehling, 2003) (معروفی و آقانجفی, ۱۳۹۱)

بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعات و پژوهش های انجام گرفته در رابطه با کاربرد PCM به منظور ذخیره سازی انرژی گرمایی می‌توان بیان کرد در تمامی موارد کاهش مصرف انرژی (در بعضی موارد کاربرد تا حدود ٪۲۰) بویژه در ساعات اوج مصرف انرژی از مزایای این روش ذخیره سازی است. از محاسن کاربرد این مواد در ساختمان ها می‌توان به افزایش آسایش حرارتی ساکنان در پی کاهش نوسانات دما اشاره کرد. همچنین کاهش نوسانات شدید دمایی در موارد حساسی همچون دمای گلخانه ها، آبگرم کن‌های خورشیدی و خشک کن‌ها که می‌تواند در کیفیت مطلوب محصول نهایی تاثیر گذار باشد، از مزیت‌های دیگر بکارگیری این روش می‌باشد.

مراجع و منابع

۱. حقشناس کاشانی، س. ۱۳۸۸. کاهش مصرف انرژی در ساختمان با ذخیرهسازی انرژی در مواد تغییر فاز دهنده. *اولین کنفرانس بینالمللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع.*

۲. سیف پور، م. نوری، م. و مختاری، ج. ۱۳۹۰. مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آنها در منسوجات. *مجله علوم وفناوری نساجی.*

۳. فضیلتی، م. و عالم رجبی، ع. ۱۳۸۸. بهسازی آبگرمکن خورشیدی به کمک مواد تغییر فاز دهنده PCM. *هفدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک*.

٤. مختاری یزدی, م., و آرامی, ح. ۱۳۹۲. ذخیره سازی انرژی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر. *شریه انرژی ایران*.

۵. معرفت، م. و کیان پرور، س. ۱۳۸۸. بکارگیری مواد تغییر فازدهنده در ساختمان. *مهندسی مکانیک*.

٦. معروفی، آ. و آقانجفی، س. (۱۳۹۱). بررسی انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده (PCM) و کاربرد آن در تجهیزات سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع به روش شبکهای بولتزمن. *چهارمین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش، و تهویه مطبوع*.

7. Benli, h., & Durmus, A. 2009. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. *Solar Energy 83* .
8. Berroug, F., Lakhal, E., Omari, M., Faraji, M., & Qarnia, H. 2011. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings*.
9. Boulard, T., Razafinjohany, E., Baille, A., Jaffrin, A., & Fabre, B. 1990. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. *Agricultural and Forest Meteorology*.
10. Najjar, A., & hasan, a. 2008. Modeling of greenhouse with PCM energy storage. *Energy Conversion and Management*.
11. Shalaby, S., Bek, M., & El-Sebaii, A. 2014. Solar dryers with PCM as energy storage medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
12. Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 13*.
13. Zalba, , Cabeza, & Mehling, H. 2003. Review on thermal energy storage with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*.
14. ztu¨rk, H. H. 2005. Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating. *Energy Conversion and Management*.

Review on application of phase change material in order to store thermal energy

Abstract

This paper aims to introduce PCM and its usage to store thermal energy. Studies about application of PCM in building showed good efficacy on energy saving for heating and cooling around 20%, Increased approximately 5˚C at room temperature to provide the comfort and convenience of residents is obtained. Using this material in the greenhouse temperature fluctuations can be reduced to about 6-12˚C, also time to minimize greenhouse temperatures delayed. The results showed that the use of PCM in solar water heater generally increases the efficiency of the water heater. This material without the use of mechanical equipment and only through natural inclination to change phase, naturally adapted to fluctuations in temperature and decrease energy consumption.

Keywords: phase change material, energy storage, PCM, energy efficiency