سال دوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۴، ص ص ۲۸- ۳۸
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۲

بررسی نقش مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت مصرف انرژی ساختمان‌ها

شبنم منصوری[۱*]، جاماسب پیرکندی[۲]، ابراهیم افشاری[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، گروه سیکل و مبدل‌های حرارتی، پژوهشگاه نیرو، تهران
۲- استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
*تهران، صندوق پستی ۱۴۶۶۵۵۱۷، shmansoori@nri.ac.ir

چکیده

درک چگونگی روند مصرف انرژی و ارائه روش‌های مختلف جهت کاهش و بهینه‌سازی آن تحت عنوان ممیزی یا مدیریت مصرف انرژی در سال‌های اخیر، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. ممیزی انرژی در ساختمان تابعی از سطح علمی، تجربه، آگاهی و شناخت ممیز از فن‌آوری‌های نوین و جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی انرژی می‌باشد. انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش آنها در مساله مدیریت مصرف انرژی، مساله مهمی است که کمتر مورد توجه متخصصان این بخش قرار گرفته است. مواد تغییر فاز دهنده (پی‌سی‌ام‌ها)[۱] نسل جدیدی از اجرام حرارتی می‌باشند که در هنگام دریافت انرژی، با تغییر فاز آن را به صورت انرژی نهان[۲] در خود ذخیره می‌کنند و در زمان مورد نظر با برگشت به فاز اولیه، انرژی ذخیره شده را در اختیار محیط پیرامونی خود قرار می‌دهند. با توجه به متنوع بودن دمای ذوب این مواد استفاده از آنها در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی ساختمان و همچنین تامین آب گرم بهداشتی در سالیان اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی خورشید در روزهای گرم و استفاده از آن جهت تامین بار گرمایشی ساختمان در هنگام شب و همچنین ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی تولید شده در مولدهای برودتی در ساعات غیرضروری و استفاده از آن در ساعات پرمصرف می‌تواند راهکاری مناسب در جهت کاهش نرخ هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی در ساختمان باشد. هدف از ارائه این مقاله بررسی نقش مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌باشد.

کلیدواژگان: مواد تغییرفاز دهنده، ذخیره انرژی، مدیریت مصرف انرژی، ساختمان

Investigation on the Role of Phase Change Materials in Buildings' Energy Consumption Management

Shabnam Mansouri[۱*], Jamasb Pirkandi[۲], Ebrahim Afshari[۳]

۱- Department of Thermal Cycles and Heat Exchangers, Niroo Research Institute, Tehran, Iran
۲- Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran.
۳-Department of Mechanical Engineering, Isfahan University, Isfahan, Iran
* P.O.B. ١٤٦٦٥٥١٧ Tehran, Iran, shmansoori@nri.ac.ir
Received: ٩ November ٢٠١٥ Accepted: ١ February ٢٠١٦

Abstract

Energy consumption tendency in buildings and to find out the methods to manage and optimize it as audit or energy management methods are considered nowadays. Energy audit in every building is influenced by academic studies, experience and acquainting with new technologies of energy conservation. Renewable energies can play an important role in this way. Phase change materials (PCMs) are new substances with high heat of fusion. They absorb energy as latent heat until transformation in their phase. When the absorbed heat is needed, heat is extracted and material change to the primary condition. PCMs are very effective because they can be used in a variety of temperatures in cooling and heating. During the summer season, the benefits are a decrease in overall energy consumption and a time shift in peak load to off-peak hours that can decrease energy consumption cost. So, in this paper the role of PCMs in energy consumption management is considered.

Keywords: Phase Change Materials, Energy Storage, Energy Management, Building

---

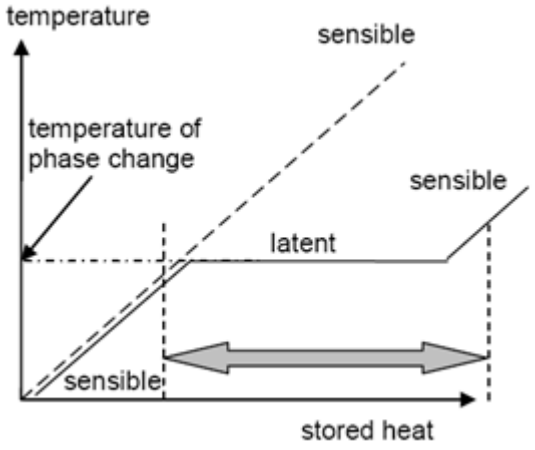
۱ Phase change material (PCM)
۲ Latent

۱- مقدمه

مدیریت مصرف انرژی و تعیین راهکارهای کاهش تلفات به معنی بررسی انواع انرژی‌های مورد نیاز ساختمان (گرمایشی، سرمایشی و الکتریکی) و یافتن گلوگاه‌های مصرف و اتلاف آنها می‌باشد. مدیریت مصرف انرژی می‌تواند به عنوان یک روش، میزان انرژی واقعی مورد نیاز یک ساختمان را اندازه‌گیری نموده و سپس راهکارهایی جهت کاهش و کمینه کردن آن ارائه دهد. در این روش حیطه‌هایی که در آن انرژی بطور موثر استفاده شده یا هدر می‌رود، شناسایی می‌شوند. در حقیقت می‌توان مدیریت مصرف انرژی در ساختمان را چگونگی ارتباط اجزاء سیستم با یکدیگر و نحوه اثر گذاری محیط خارجی بر ساختمان دانست. استفاده از روش‌های جدید و انرژی‌های تجدید پذیر در جهت مدیریت مصرف ساختمان، یک مساله مهمی می‌باشد که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. رشد جمعیت جهان، کاهش منابع انرژی و همچنین افزایش آلایندگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی جامعه جهانی را به سمت استفاده از انرژی‌های نو و تجدید پذیر سوق داده است. با توجه به گسترش استفاده از این نوع انرژی‌ها استفاده از آنها در بحث ممیزی انرژی ساختمان‌ها در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است.

در میان انرژی‌های تجدید پذیر، خورشید به عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی در کانون توجهات پژوهشگران زیادی در سطح جهان قرار گرفته است. با توجه به متغیر بودن شدت تابش خورشید در ساعات مختلف شبانه‌روز، استفاده از این انرژی بدون ذخیره‌سازی مناسب امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به این مساله، بحث ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی از میزان اهمیت بالایی برخوردار بوده و در سال‌های اخیر کانون توجهات پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. یکی از مهمترین راهکارهای استفاده از انرژی خورشیدی ذخیره انرژی خورشیدی طی ساعات گرم و استفاده از آنها در ساعات سرد است. در ساختمان‌های اولیه با استفاده از موادی با ظرفیت حرارتی بالا مانند سنگ، بتن، خشت، آجر و آب مقدار قابل توجه از حرارت خورشید در طی روز جذب و ذخیره شده و در هنگام شب با سرد شدن هوا از این انرژی استفاده می‌گردید. اما این روش قدیمی معایبی از جمله استفاده زیاد از مصالح ساختمانی و سنگین شدن ساختمان را به همراه داشت. از سوی دیگر استفاده از مصالح زیاد از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نبود. یکی از روش‌های جدید ذخیره انرژی خورشیدی، استفاده از اجرام حرارتی با قابلیت بالا در ذخیره انرژی می‌باشد. اجرام حرارتی موادی هستند که توانایی جذب، نگهداری و آزاد سازی انرژی را در زمان مورد نیاز دارند. مواد تغییر فاز دهنده نسل جدیدی از این نوع اجرام حرارتی می‌باشند که در هنگام دریافت انرژی، با تغییر فاز آن را به صورت انرژی نهان در خود ذخیره کرده و در زمان مورد نظر با برگشت به فاز اولیه، انرژی ذخیره شده را در اختیار محیط پیرامونی خود قرار می‌دهند. در این مواد هدف استفاده از گرمای نهان ذوب در طول تغییر فاز می‌باشد (شکل ۱). ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی باعث شده است تا امکان ساخت ذخیره‌کننده‌های کوچک فراهم گردد و بتوان آنها را به‌صورت فشرده تولید کرد. این ویژگی باعث می‌شود که واحدهای ذخیره‌کننده انرژی در کاربردهای تجاری که معمولاً با محدودیت ابعادی مواجه هستند، استفاده فراوانی داشته باشد[۱].

ایده اولیه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و به‌کارگیری آن برای ذخیره‌سازی انرژی در سال ۱۹۴۰ مطرح گردید که در آن زمان زیاد مورد توجه قرار نگرفت. از اوایل سال ۱۹۸۰ با مطرح شدن بحران انرژی، تحقیقات گسترده‌ای بر بهینه‌سازی خواص و کاربردهای مختلف مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی صورت گرفت[۲].



شکل ۱ گرمای نهان بالا مواد تغییر فاز دهنده[۲]

از کاربردهای مهم مواد تغییر فاز دهنده می‌توان به استفاده از آنها در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشید و استفاده از آنها جهت تامین بارهای گرمایشی ساختمان‌ها اشاره کرد. قابلیت ذخیره مقدار قابل توجهی از انرژی خورشیدی در حجم نسبتاً کمی از مواد تغییر فاز دهنده، کاهش مخازن ذخیره انرژی حرارتی، بالا بودن سرعت جذب و دفع انرژی گرمایی، هوشمند بودن و قیمت نسبتاً ارزان این مواد از جمله مزایای استفاده از این مواد در ساختمان‌ها می‌باشد. این مواد قادر می‌باشند که در زمان‌هایی که ساختمان نیاز به گرما ندارد آن را جذب نموده و در زمان مورد نیاز آن را به محیط برگردانند. مواد با دمای ذوب حدود ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس برای استفاده در سیستم‌های گرمایشی مستقیم ساختمان و مواد با دمای ذوب حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس برای تامین آب گرم بهداشتی و همچنین گرمایش غیرمستقیم ساختمان استفاده می‌شوند. بحث ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی ناشی از تولید آب سرد دستگاههای مولد مانند چیلر نیز موضوع جدیدی می‌باشد که در سال‌های اخیر مطرح شده است [۳]. هدف از این مقاله معرفی انواع روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و برودتی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. با استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی می‌توان گامی بلند در جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و مساله مدیریت انرژی در ساختمان دست یافت.

۲- مکانیزم‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (یا برودتی) در اجرام حرارتی به دو روش محسوس[۱] و نهان صورت می‌گیرد. در ذخیره‌سازی محسوس، انرژی گرمایی (یا سرمایشی) متناسب با ظرفیت حرارتی ماده موجب تغییر دمای آن شده و در آن ذخیره می‌گردد. آب، سنگ، آجر، خاک، ماسه، بتن، نمک و ... از جمله مواد مختلفی هستند که از روش محسوس برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کنند. ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در هر یک از این مواد متفاوت بوده و بستگی به خواص فیزیکی ماده ذخیره کننده (مانند ظرفیت گرمایی، دانسیته، جرم و ...) دارد. از سوی دیگر انتخاب نوع ماده ذخیره کننده در این روش وابسته به طول مدت ذخیره‌سازی بوده و می‌تواند به صورت کوتاه مدت یا بلند مدت باشد. در این روش مقدار انرژی ذخیره شده در هر لحظه متناسب با اختلاف دمای ماده ذخیره کننده با دمای محیط است. به طور مثال استفاده از آب به عنوان ذخیره کننده انرژی در کنار مزایایی مانند بالا بودن ظرفیت

[۱] Sensible

گرمایی، ارزان و قابل دسترس بودن دارای معایبی نیز می‌باشد. نیاز به ساخت مخازن بزرگ و عایق بندی شده به منظور ذخیره‌سازی آب و ذخیره‌سازی انرژی از ایرادات مهم این ماده می‌باشد.

در روش نهان از فرایند تغییر فاز و حرارت انتقال یافته ناشی از آن برای ذخیره سازی انرژی استفاده می‌گردد. با توجه به بالا بودن ظرفیت حرارتی نهان هر ماده نسبت به ظرفیت حرارتی محسوس آن، در بسیاری از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی از فرایند تغییر فاز به منظور ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. این روش نسبت به روش محسوس، دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتری بوده و استفاده از آن باعث می‌شود که آزاد یا ذخیره سازی انرژی در یک دمای ثابت صورت گیرد. استفاده از این روش سبب می-گردد که سیستم‌های ذخیره کننده حرارتی (یا برودتی) دارای ابعاد کمتری گردد و در ساخت و نصب آنها صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی صورت گیرد. در این روش اغلب از مواد تغییر فاز دهنده جهت ذخیره و آزاد سازی انرژی استفاده می‌گردد. توان ذخیره‌سازی این مواد ۵ تا ۱۵ برابر انواع مختلف ذخیره‌سازهای نهان می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده در ابتدا با جذب حرارت دمایشان بالا رفته و پس از رسیدن به دمای نقطه ذوب شروع به تغییر فاز می‌دهند. در حین فرایند ذوب شدن و در دمای ثابت، این مواد انرژی زیادی را در خود ذخیره می‌نمایند. از سوی دیگر با کاهش دمای محیط این مواد انرژی جذب شده را آزاد نموده و خود منجمد می‌شوند. یخ نمونه ساده‌ای از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد که در دمای صفر درجه سانتیگراد عمل جذب و آزاد سازی انرژی را صورت می‌دهد. نمک‌های هیدراته، ترکیبات پلیمری، اسیدهای چرب و ... چند نمونه دیگر از مواد تغییر فاز دهنده می‌باشند.

۳- مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده مخلوطی از دو یا چند ماده مختلف است که اگر به نسبت مشخصی با هم مخلوط شوند، نقطه ذوب آنها پایین‌تر از نقطه ذوب هر یک از مواد مخلوط شده خواهد بود. با توجه به این مساله با مخلوط کردن مواد مختلف با نسبت‌های وزنی متفاوت، می‌توان به محدوده وسیعی از دماهای ذوب دست یافت که دارای کاربرد زیادی در سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی خورشیدی تا ذخیره‌سازهای سرمایشی در سیستم‌های تهویه مطبوع هستند. این مواد دارای قدرت بالایی در ذخیره‌سازی حرارتی بوده و اغلب برای کنترل دما به کار می‌روند. در گذشته از این گونه مواد جهت کاربردهای کاملاً تخصصی و در زمینه‌های خاص، مانند گرم‌نگهداشتن بعضی از واکنش‌ها در دمای بالا و یا جهت ذخیره گرما در نیروگاه‌ها استفاده می‌شد. امروزه با گسترش صنایع شیمیایی و تهیهٔ مواد مرکب جدید از این مواد به عنوان چاه حرارتی در صنایع الکترونیک، سیستمهای مخابراتی، آنتن‌های ماهواره‌ای، سیستم‌های حرارتی گلخانه‌ها، سیستم‌های عایق کاری و حرارتی ساختمان‌ها و ذخیره‌سازهای سرمایشی در سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود[۴].

همانطور که در بخش قبل به آن اشاره کرد، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده جهت کاهش مصرف انرژی از دو دیدگاه مورد توجه می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده که در سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی حرارتی بکار می‌روند، در هنگام روز انرژی حرارتی را از سیستم‌های الکترونیکی، مکانیکی و همچنین منابع طبیعی از جمله خورشید جذب کرده و دمای داخلی خود را در حدود معین و ثابتی تنظیم می‌کنند و در هنگام شب انرژی ذخیره شده را به محیط پیرامون خود پس می‌دهند. از سوی دیگر می‌توان از این مواد جهت ذخیره انرژی سرمایشی تولید شده از مولدهای تبخیری، تراکمی و جذبی استفاده نمود. استفاده از این مواد در ساختمان به طور کلی سبب کاهش مصرف انرژی و پایین آوردن ظرفیت دستگاههای تهویه مطبوع خواهد شد. از سوی دیگر با استفاده از این مواد در هزینه‌های تامین انرژی صرفه جویی‌های زیادی می‌شود، زیرا که برای کارکرد این سیستم‌ها فقط وجود اختلاف دما در شب و روز کافی بوده و نیازی به تامین انرژی توسط سیستم‌های دیگر نیست.

کاربرد این نوع سیستم‌های ذخیره کننده انرژی در ساختمان ابتدا در استرالیا و سپس به طور گسترده در تمام کشورهای پیشرفته جهان تولید و بهره برداری شد. از مزایای این سیستم می توان ایجاد شرایط مناسب آب و هوایی، کاهش اتلافات انرژی و ذخیره سازی انرژی را در محیط مورد نظر نام برد. مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی باید دارای خواص حرارتی (دمای تغییر فاز متناسب با کاربرد، گرمای نهان بالا و ضریب انتقال حرارت مناسب)، فیزیکی (چگالی بالا، فشار بخار پایین، تعادل فازی مطلوب و پایین بودن تغییر حجم)، شیمیایی (پایداری شیمیایی، سازگاری با ساختار مواد، غیرسمی و غیر قابل اشتعال)، جنبشی (نرخ کریستالیزه شده مناسب) و اقتصادی (در دسترس بودن و هزینه پایین) مناسبی باشند.

از مزایای مهم مواد تغییر فازدهنده عدم فاسد شدن این مواد به دلیل ساختار و منشا آبی آنهاست که این مساله باعث می‌شود این مواد در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز انرژی عمر بیشتری داشته باشند. از سوی دیگر آلودگی هوا یک مساله بسیار مهمی می‌باشد که اکثر کشورهای جهان با آن مواجه می‌باشند. کاربرد مواد تغییر فاز دهنده نمونه‌ای از روش‌های کاهش آلودگی می‌باشد. این مواد بیشتر دارای ترکیبات غیرآلی بوده و خاصیت شیمیایی کمتری نسبت به سایر فرایندهای انجام شده دارند. مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند به دو صورت بسته‌بندی و باز در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر این مواد به دلیل غیر قابل احتراق بودن و فاسد نشدن به راحتی در هر محیطی و با هرگونه شرایط آب و هوایی می‌توانند نگهداری و جابجا شوند.

۴- ساختار مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده از لحاظ ساختمانی به سه دسته مواد با ترکیبات آلی (ارگانیک[۱])، غیرآلی (غیر ارگانیک[۲]) و اوتکتیک‌ها[۳] دسته‌بندی می‌شوند. مواد تغییر فازدهنده با ترکیبات آلی (کربن‌دار) به دو دسته پارافینی و غیرپارافینی طبقه‌بندی می‌شوند[۵]. از مزایای ترکیبات آلی پارافینی می‌توان به ساختار شیمیایی پایدار، نقطه ذوب متناسب با محیط، حرارت نهان بالا، قابلیت بازیافت پذیری، غیر خورنده بودن و سازگار بودن با بیشتر مصالح ساختمانی اشاره کرد. هدایت حرارتی پایین، تغییر حجم زیاد در هنگام تغییر فاز و قابلیت اشتعال از معایب مهم این نوع مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد. کریستال‌های آبدار، نمک‌های مذاب نمونه‌ای از مواد با ترکیبات آلی غیرپارافینی می‌باشند. ظرفیت ذخیره انرژی بالاتر بر واحد حجم، ضریب انتقال حرارت بالا، ارزان بودن، غیرقابل اشتعال بودن از مزایای این مواد و نیاز به رساندن به دمای زیر نقطه انجماد جهت آغاز فرایند انجماد و خوردگی از معایب این مواد است.

مواد با ترکیبات غیرآلی یا معدنی بیشتر از مواد آلی معمول بوده و موادی هستند که دارای ترکیبات کربن (علی‌الخصوص هیدرات نمک) در ترکیب خود نیستند. این مواد گرمای نهان بالایی داشته و نسبت به مواد آلی ارزانتر

---

۱ Organic
۲ Inorganic
۳ Eutectic

بوده و غیر قابل اشتعالند. این مواد در خنک‌کاری‌های شدید و در پدیده‌هایی که تغییرات دمایی منظم ندارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. پایداری فیزیکی و شیمیایی، حرارت نهان در واحد حجم بزرگتر، هدایت حرارتی بالاتر، غیر قابل اشتعال بودن، قیمت ارزان (نسبت به ترکیبات آلی) و قابلیت بازیافت پذیری از مزایای این مواد می‌باشد. در کنار مزایای اشاره شده، این ترکیبات دارای معایبی نیز از قبیل خاصیت خوردگی با اکثر فلزات، امکان تجزیه شدن در حین تغییر فاز، بیش از حد سرد شدن و بی‌ثباتی دمایی می‌باشند. به هنگام انجماد باید مشکل سرد شدن بیش از حد مواد تغییر فاز دهنده، با هسته دار شدن و ترکیب کردن این مواد با مواد افزودنی هسته‌ای به طور کامل باید بررسی و حل شود. مواد افزودنی که دارای ساختمان کریستالی بوده و قابلیت حل بالایی را در ماده تغییر فاز دهنده دارا هستند، نسبت به سایر مواد افزودنی ترجیح داده می‌شوند. هیدروکربن‌هایی با چربی بالا، اسید، استر، الکل، هیدروکربن‌های آروماتیک، پلیمرها، فرئون و لاکتام نمونه‌ای از مواد با ترکیبات غیرآلی می‌باشند.

اوتکتیک‌ها نیز ترکیبی از دو یا چند جزء (آلی- آلی، آلی- غیرآلی و غیرآلی- غیرآلی) هستند که هر کدام از آنها به صورت متجانس ذوب و منجمد می‌شوند و مخلوطی از بلورهای اجزا را در طول تبلور تشکیل می‌دهند. اوتکتیک‌ها تقریباً بدون تفکیک ذوب و منجمد می‌شوند و جدا نمی‌گردند. این مواد دارای دانسیته ذخیره‌سازی بالاتری نسبت به مواد آلی هستند.

در هنگام انتخاب مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی، بعضی نکات و مشخصات ترمودینامیکی، شیمیایی و اقتصادی زیر باید مورد توجه قرار گیرد.

- دمای نقطه ذوب ماده ذخیره کننده باید در محدوده عملکرد و شرایط کاری مورد نظر باشد.
- حرارت نهان ذوب ماده ذخیره کننده در واحد جرم، باید به اندازه کافی بزرگ باشد.
- چگالی ماده ذخیره کننده باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا حجم و فضای کمتری را اشغال کند.
- ماده ذخیره کننده باید قابلیت هدایت حرارتی بالایی داشته باشد تا در اختلاف دماهای کوچک نیز امکان شارژ و تخلیه سیستم وجود داشته باشد.
- در هنگام فرایند تغییر فاز، باید تغییر حجم ماده ذخیره کننده کوچک باشد.
- در هنگام تغییر فاز هیچ‌گونه تغییر در ترکیب شیمیایی و ساختار ماده ذخیره کننده بوجود نیاید.
- غیر قابل اشتعال، غیر سمی، غیر خورنده و غیر قابل تجزیه باشد.
- ارزان قیمت و قابل دسترس باشد.

به دلیل مشکلات ذاتی مواد غیرآلی استفاده از مواد آلی مانند پارافین‌ها، اسیدهای چرب و پلی‌اتیلن گلیکول‌ها در حال فراگیر شدن است. این مواد در مقایسه با نمک‌های آبدار ظرفیت ذخیره گرمایی کمتری بر واحد حجم و هزینه به مراتب بالاتری دارند.

۵- ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختمان‌ها

در بحث ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در ساختمان‌ها دو دیدگاه در انتخاب مواد تغییر فاز دهنده وجود دارد. در صورتیکه هدف تامین بار گرمایشی ساختمان به صورت مستقیم باشد، استفاده از مواد با دمای ذوب ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس و در صورتیکه هدف تامین بار گرمایشی به صورت غیرمستقیم باشد، دمای ذوب ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس برای این مواد مناسب می‌باشد. موادی که به صورت مستقیم در داخل ساختمان استفاده می‌شوند، دارای دمای ذوب نزدیک به دمای آسایش ساکنین داخل ساختمان می‌باشد. با گرم شدن فضای داخل ساختمان، گرمای اضافی آن توسط مواد تغییر فاز دهنده جذب شده و این مساله سبب ذوب شدن این مواد می‌گردد. از سوی دیگر با پایین آمدن دما نیز این مواد با پس دادن انرژی ذخیره شده مجدداً منجمد گردیده و به حالت اول بر می‌گردند. به طور کلی در این مواد به جای استفاده از ظرفیت حرارتی، از گرمای نهان ذوب استفاده می‌شود. توان این مواد در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نسبت به سایر مصالح موجود بالا می‌باشد. با فرض اختلاف دمای ۱۵ درجه سلسیوس برای حداقل و حداکثر دمایی یک منطقه، یک کیلوگرم از این مواد حداقل معادل چهار کیلوگرم آب و یا ۲۰ کیلوگرم سنگ یا بتن می‌تواند انرژی حرارتی در خود ذخیره کند. با بکارگیری این مواد در بخش‌های مختلف ساختمان، علاوه بر کاهش مصرف انرژی، به دلیل کاهش نوسانات دمایی هوای داخل و باقی‌ماندن دمای هوای اتاق در شرایط مطلوب، شرایط راحتی افراد فراهم می‌گردد. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در مناطقی که اختلاف دمای روز و شب زیاد است، کارایی بیشتری دارد. در صورتیکه هدف استفاده غیرمستقیم از این مواد باشد، باید دمای ذوب آنها به دمای سیستم‌های گرمایشی ساختمان و همچنین آب گرم بهداشتی ساختمان نزدیک باشد.

در حال حاضر اغلب مواد تغییر فاز دهنده تجاری بکار رفته در ساختمان‌ها پارافین و نمک‌های آب دار می‌باشد. نمک‌های آب دار به دلیل ظرفیت بالای ذخیره انرژی گرمایی، ضریب انتقال حرارت بالا و هزینه‌های مناسب در مقایسه با پارافین‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. سولفات سدیم ($Na_2SO_4.10H_2O$) و کلرید کلسیم ($CaCl_2.6H_2O$) نمونه‌هایی از مواد با ترکیبات غیرآلی هستند که دارای نقطه ذوبی در حدود ۳۰ درجه سلسیوس بوده و به صورت مستقیم در فضاهای داخلی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سوی دیگر پارافین‌ها با دمای ذوب ۵۵ درجه سلسیوس و با داشتن اغلب خواص مورد نظر، یکی از مواد مطلوب برای ذخیره انرژی می‌باشند که به صورت غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه دمای آب گرم مورد نیاز در تاسیسات گرمایشی ۵۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس است لذا پارافین با نقطه ذوب ۵۵ درجه سلسیوس انتخاب مناسبی برای کاربرد در سیستم‌های ذخیره کننده دارد.

به طور کلی مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها به دو روش فعال[۱] و غیرفعال[۲] مورد استفاده قرار می‌گیرند[۶]. در روش غیرفعال از برخی انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشید استفاده شده و انرژی حاصل از آن ذخیره می‌گردد. در روش دیگر که به روش فعال معروف است از منابع گرمایشی و سرمایشی موجود در ساختمان‌ها جهت ذخیره انرژی استفاده می‌شود. در ادامه این دو روش به طور کلی توضیح داده شده است.

۵-۱- سیستم‌های ذخیره‌سازی غیرفعال

در سیستم‌های غیرفعال، مواد تغییز فاز دهنده انرژی را به طور مستقیم از منبع گرمایی دریافت نموده و سپس با تغییر شرایط آب و هوایی بدون واسطه آن را به محیط پس می‌دهند. در این نوع سیستم‌ها مواد تغییر فاز دهنده بخش‌هایی از جداره‌های پوسته خارجی ساختمان را تشکیل می‌دهند. این مواد در طی روز انرژی تابشی ناشی از نور خورشید را جذب و در خود ذخیره

[۱] Active
[۲] Passive

می‌نمایند و سپس در زمان مناسب با کاهش دما آن را به فضای داخل ساختمان منتقل می‌کنند[۷].

به طور کلی روش‌های مختلفی جهت ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و مصالح ساختمانی وجود دارد. مخلوط کردن مستقیم یک نمونه از روش‌های مهمی است که در آن مواد تغییر فاز دهنده بصورت مایع[۱]، پودر[۲] یا خمیر[۳] با مواد ساختمانی مانند گچ، سیمان، بتن و ... مخلوط می‌گردد. روش دیگری که در ترکیب مواد تغییر فاز دهنده و مصالح ساختمانی استفاده می‌شود، غوطه‌ور سازی می‌باشد. در این روش مصالح ساختمانی مانند گچ، آجر، سیمان و ... در مواد تغییر فاز دهنده مذاب غوطه ور می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده درون حفره‌های داخلی مصالح جذب می‌گردند. در شکل‌های ۲ تا ۴ نمونه‌ای از مواد تغییر فازدهنده در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

شکل ۲ مواد تغییر فاز دهنده با حالت مایع[۷]

شکل ۳ مواد تغییر فاز دهنده با حالت پودری[۷]

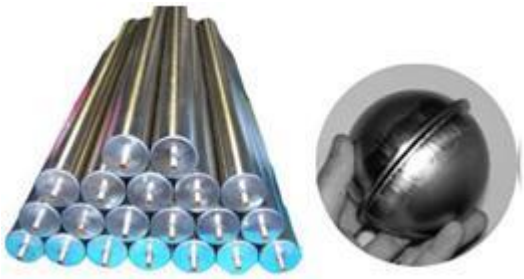
شکل ۴ مواد تغییر فاز دهنده با حالت خمیری[۷]

کپسوله کردن[۴] یا محصور کردن مواد تغییر فاز دهنده در مقیاس ماکرو و میکرو دو روش دیگری است که برای نگه‌داشتن این مواد استفاده می‌شود. در حالت ماکرو مواد تغییر فاز دهنده در یک محفظه کروی، استوانه‌ای، مکعب مستطیلی قرار داده شده و در داخل مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت میکرو نیز ذرات مواد تغییر فاز دهنده به صورت یک لایه بسیار نازک توسط فیلم پلیمری به شکل ثابت نگه داشته شده و درون مواد ساختمانی مثل گچ قرار داده می‌شود. در شکل‌های ۵ تا ۷ نمونه‌های مختلفی از مواد تغییر فازدهنده کپسوله شده در قالب‌های پلاستیکی، فلزی و انعطاف پذیر نشان داده شده که هر کدام از آنها در سیستم‌های مختلف ذخیره کننده استفاده می‌شود.

شکل ۵ مواد تغییر فاز دهنده ذخیره شده در قالب شکل‌پذیر[۷]

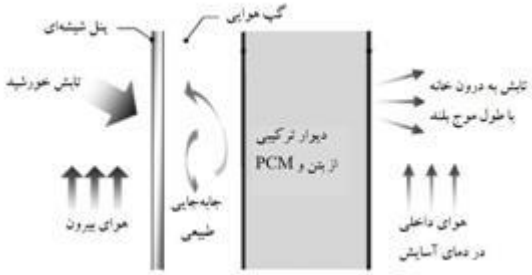
شکل ۶ مواد تغییر فاز دهنده ذخیره شده در قالب پلاستیکی[۷]

۱ Liquid
۲ Powder
۳ Rubber
۴ Encapsulated



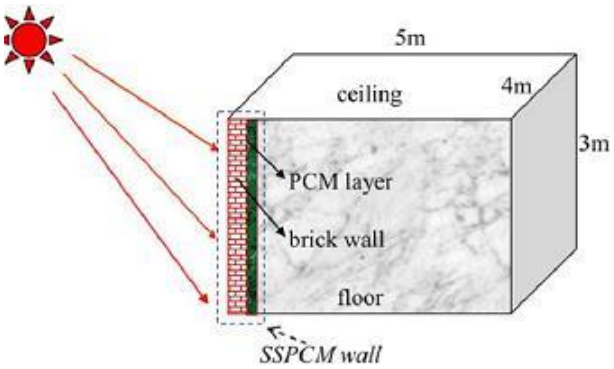
شکل ۷ مواد تغییر فاز دهنده ذخیره شده در قالب فلزی[۷]

دیوار ترومب[۱] نمونه‌ای دیگر از سیستم‌های ذخیره غیرفعال می‌باشد. این دیوار ترکیبی از مصالح بنائی و مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد که در ضلع جنوبی ساختمان با فاصله حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتری از یک دیوار شیشه‌ای قرار می‌گیرد[۸]. انرژی خورشیدی در طی روز از شیشه عبور کرده و با ذوب مواد تغییر فاز دهنده در این دیوار ذخیره می‌شود. در هنگام شب با کاهش دما این گرما به فضای داخل پس داده می‌شود که این مساله به نوبه خود سبب انجماد مواد تغییر فاز دهنده می‌شود. گرمای ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده با آزاد شدن در طول شب، دمای خانه را در شرایط آسایش نگه می‌دارد. در این سیستم اغلب با قرار دادن یک دریچه در بالای دیوار، بین جریان درون خانه و هوای محبوس بین پنل شیشه‌ای و دیوار یک جریان هوا ایجاد می‌کنند. (شکل ۸)



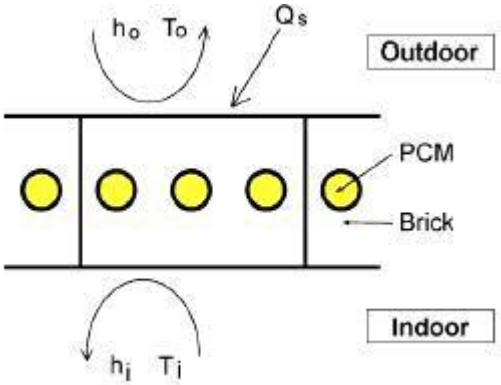
شکل ۸ نمایی از نحوه عملکرد دیوار ترومب[۸]

بلوک‌ها و دیوارهای پیش‌ساخته حاوی مواد تغییر فاز دهنده نوعی دیگر از سیستم‌های غیرفعال می‌باشند. دیوارهای پیش‌ساخته ارزان بوده و برای نگهداری مواد تغییر فاز دهنده گزینه مناسبی به شمار می‌روند. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که برای ایجاد شرایط آسایش، ۵ تا ۸ میلیمتر از مواد تغییر فاز دهنده در یک دیوار خارجی عملکردی معادل ۲۳ میلیمتر دیوار بتنی خواهد داشت. علاوه بر این مساله بازده دریافت انرژی خورشیدی در دیوارهای حاوی مواد تغییر فاز دهنده در حدود ۸۰ درصد است. این پیش‌ساخته اینرسی حرارتی بالا داشته و با وزن کم کارایی بالاتری نسبت به همان حجم دیوار بتن را دارا می‌باشند. در شکل ۹ نمونه‌ای از این نوع دیوارها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود لایه حاوی مواد تغییر فاز دهنده در سمت داخل ساختمان قرار داده شده است. این لایه‌ها حرارت جذب شده توسط دیوار در طی روز را در خود ذخیره کرده و با کاهش دما در هنگام شب انرژی را آزاد می‌کند.



شکل ۹ نمایی از دیوارهای پیش‌ساخته حاوی مواد تغییر فاز دهنده

سقف از دیگر جداره‌های خارجی مهم ساختمان می‌باشد که می‌تواند نقش مهمی در جذب و ذخیره‌سازی انرژی ایفا کند. با قرار گرفتن مواد تغییر فاز دهنده بین قالب بتنی و قالب بالای بام میزان جذب و ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سقف ساختمان نشان داده است.



شکل۱۰ نمایی از نحوه قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده در سقف ساختمان

کرکره‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده نمونه دیگر از سیستم‌های غیرفعال می‌باشد. این کرکره‌ها در بیرون از سطح پنجره قرار گرفته و در طی روز به سمت بیرون باز شده و انرژی خورشیدی را جذب می‌نمایند. در هنگام شب با بسته شدن کرکره‌ها مواد تغییر فاز دهنده انرژی ذخیره شده را به داخل منتقل می‌کنند. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از این نمونه سیستم‌های غیرفعال نشان داده شده است[۹].

شکل۱۱ کرکره های حاوی مواد تغییر فاز دهنده[۹]

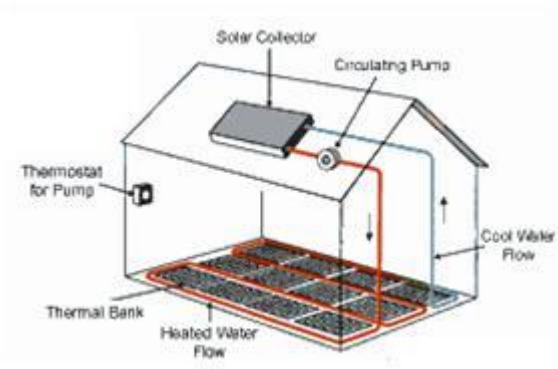
[۱] Trombe Wall

۵-۲- سیستم‌های ذخیره‌سازی فعال

در این روش دریافت انرژی از منابع موجود و ذخیره‌سازی آن در مواد تغییر فاز دهنده و انتقال آن به محیط به وسیله تجهیزات خارجی مناسبی (مانند پمپ، فن، لوله و ...) صورت می‌گیرد. سیستم‌های گوناگونی برای ذخیره‌سازی فعال وجود دارد که از آن جمله می‌توان پمپ گرمایی خورشیدی[۱]، گرمایش الکتریکی[۲]، کلکتور آبی[۳]، آب گرمکن خورشیدی و ... را نام برد.

۵-۲-۱- کاربرد در پمپ گرمایی خورشیدی

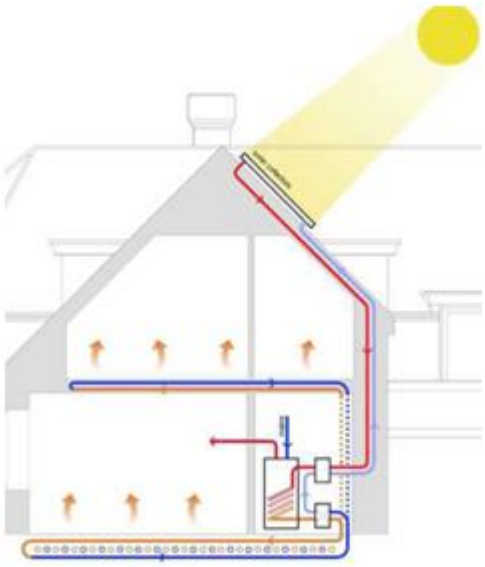
در شکل ۱۲ یک نمونه از سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی حرارتی با کاربرد گرمایش از کف، در یک ساختمان نشان داده شده است. در این سیستم مواد تغییر فاز دهنده در داخل محفظه‌های استوانه‌ای شکل و در کف ساختمان قرار داده می‌شوند. انرژی حرارتی خورشید توسط کلکتورهای حرارتی قرار گرفته در بالای ساختمان که محتوی آب می‌باشد، جذب شده و سپس آب گرم شده در آنها توسط یک پمپ به سمت محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده هدایت می‌گردد. حرارت موجود در آب گرم به مواد تغییر فاز دهنده منتقل شده و با ذوب این مواد در آنها ذخیره می‌شود. دمای مواد تغییر فاز دهنده در مدت زمان تغییر فاز و برای یک مدت طولانی ثابت می‌مانند. این مساله حتی در زمان خاموشی سیستم نیز برقرار خواهد بود. با فرا رسیدن شب و افزایش میزان مصرف انرژی مواد تغییر فاز دهنده شروع به پس دادن انرژی حرارتی ذخیره شده در خود نموده و بخش از بار حرارتی ساختمان را تامین می‌کنند. با از پس دادن انرژی ذخیره شده به محیط این مواد کم‌کم منجمد می‌گردند. استفاده از این سیستم سبب کاهش مصرف انرژی در ساختمان شده و این مساله از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. این فرآیند بسته به نوع مواد در نوسانات دمایی بالا و پایین ۲۱ درجه سلسیوس انجام می‌گیرد. از مزایای این سیستم می‌توان به راه‌اندازی ارزان، نصب آسان، بی‌خطربودن و عمر طولانی اشاره کرد[۱۰و۱۱]. در شکل ۱۳ نماهایی از نحوه نصب یک سیستم ذخیره کننده حرارتی در کف ساختمانهای مسکونی نشان داده شده است.



شکل ۱۲ شماتیک نحوه نصب یک سیستم ذخیره کننده حرارتی در ساختمان

شکل ۱۳ نمایی از نحوه قرارگیری استوانه های حاوی مواد تغییر فاز دهنده در یک سیستم ذخیره کننده حرارتی

نمونه دیگری از سیستم ذخیره کننده انرژی بر پایه پمپ گرمایی خورشیدی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این سیستم انرژی حرارتی ناشی از تابش خورشید علاوه بر گرم کردن آب بهداشتی ساختمان، جهت تامین گرمایش ساختمان در مواد تغییر فاز دهنده جذب می‌گردد. در هنگام شب و با کاهش دما مواد تغییر فاز دهنده انرژی ذخیره شده در روز را آزاد کرده و ساختمان را گرم می‌کنند. در شکل ۱۵ نمونه‌ای از لوله‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده که در کف ساختمان نصب می‌شوند، نشان داده شده است.



شکل ۱۴ سیستم ذخیره کننده انرژی بر پایه پمپ گرمایی خورشیدی

شکل ۱۵ نمونه‌ای از لوله‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده

۱ Solar heat pump
۲ Electrical Heating
۳ Water collector

۵-۲-۲- کاربرد در گرمایش الکتریکی

در این نوع از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی، زیر کف ساختمان بوسیله گرمکن‌های الکتریکی پوشانده شده و بر روی آنها لایه‌هایی از مواد تغییر فاز دهنده قرار می‌گیرد. با استفاده از جریان برق مواد تغییر فاز دهنده شارژ شده و انرژی آنها در مواقع اضطراری و قطع برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع سیستم‌ها به دلیل مصرف برق بالا در کشور ما مقرون به صرفه نمی‌باشند.

۵-۲-۳- کاربرد در آبگرمکن‌های خورشیدی

آبگرمکن‌های خورشیدی به منظور تهیه آب گرم لازم برای تامین آبگرم بهداشتی و همچنین سیستم‌های گرمایشی ساختمان به کار برده می‌شود. تناوب تابش خورشید در طول روز ذخیره انرژی حرارتی حاصل از آن را برای کاربرد انرژی خورشیدی ضروری می‌سازد. یکی از روش‌های رایج که برای ذخیره انرژی حرارتی تابشی خورشید به کار می‌رود، ذخیره گرمای حاصل از تابش خورشید به صورت افزایش دمای سیال ذخیره کننده که عمدتاً آب مصرفی است، در داخل تانک ذخیره آب گرمکن است. اشکال عمده در به‌کارگیری این روش برای ذخیره حرارت این است که با افزایش تعداد مصرف کنندگان به ناچار سطح جذب کننده و حجم مخزن باید افزایش یابد تا پاسخگوی نیاز مصرف کنندگان باشد. این امر علاوه بر افزایش هزینه آبگرمکن تولیدی، حجم و وزن تجهیزات را افزایش می‌دهد که مطلوب نیست. مشکل دیگری که معمولاً در استفاده از این نوع آبگرمکن وجود دارد افزایش دمای بی‌رویه آب گرم در ساعات پرتابش و هنگام کاهش نرخ مصرف است، به حدی که ممکن است دمای آب تا نزدیک دمای جوش برسد. افزایش دمای آب ذخیره شده و به تبع آن دمای آب سیکل در گردش علاوه بر اینکه در محدوده دمای تعریف شده مورد نیاز نیست، بازده حرارتی کلکتور را که عملاً به صورت یک مبدل حرارتی عمل می‌کند، کاهش می‌دهد و نرخ ذخیره انرژی تابشی بتدریج کند و سپس متوقف می‌شود. از دیگر معایب این آبگرمکن‌های خورشیدی عدم امکان استفاده از انرژی خورشیدی در شب می‌باشد. جهت استفاده بهینه از انرژی مازاد روزانه، می‌توان آن را در سیستمی ذخیره نموده و در شب از آن استفاده کرد.

استفاده از مبدل حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده یکی از روش‌های بهینه‌سازی انرژی و استفاده مناسب از انرژی خورشیدی می‌باشد. در صورتیکه در آبگرمکن‌های خورشیدی موجود سیستم اشاره شده اضافه گردد، راندمان حرارتی سیستم افزایش خواهد یافت. به کمک سیستم مذکور می‌توان مازاد انرژی روزانه را در شب که انرژی تابشی خورشیدی موجود نیست و یا در مواقع ابری به صورت بهینه استفاده نمود. در این سیستم‌ها با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب ۶۰ تا ۷۰ درجه در مخزن انرژی مازاد در طی روز جذب می‌گردد. ماده تغییر فازدهنده استفاده شده در این سیستم‌ها اغلب پارافین می‌باشد. برای استفاده از پارافین در داخل مخزن آب گرمکن باید آن را به شکل کپسول‌های محصور شده استفاده کرد. این مساله به دو دلیل صورت می‌گیرد اول اینکه از تماس مستقیم آنها با آب جلوگیری کرده و دوم اینکه سطح تماس با آب را افزایش داده و میزان انتقال حرارت را بالا برد. از بین هندسه های موجود کره بالاترین نسبت سطح به حجم را دارد و برای این کار مناسب است. جنس کپسول‌ها را نیز می‌توان پلی‌اتیلن یا فلزی در نظر گرفت. کپسول‌ها باید تا حد امکان مخزن آبگرمکن را پر نماید. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نمونه‌ای از آبگرمکن‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده نشان داده شده است[۱۲].

شکل ۱۶ نمایی از یک آبگرمکن خورشیدی با مخازن ذخیره

شکل ۱۷ نمایی از مخزن ذخیره حاوی مواد تغییر فازدهنده

۵-۲-۴- کاربرد در کلکتورهای آبی

در کلکتورهای آبی لوله‌های آب درون آن به وسیله لایه‌هایی از مواد تغییر فاز دهنده پوشانده شده است. در طی روز بخشی از انرژی خورشیدی تابیده شده به کلکتور آبی، توسط مواد تغییر فاز دهنده و بخش دیگر توسط آب درون لوله‌ها جذب می‌گردد. آب گرم شده در لوله‌ها جهت تامین بخشی از بار گرمایشی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هنگام شب و با کاهش دمای آب درون لوله‌ها، مواد تغییر فاز دهنده انرژی حرارتی جذب شده خود را به آب درون لوله‌ها منتقل کرده و آن را گرم می‌کنند.

۵-۲-۵- کاربرد در سیستم بازیافت انرژی

استفاده از انرژی گازهای گرم خارج شده از سیستم‌های حرارتی روش دیگری برای جذب انرژی گرمایی در سیستم‌های ذخیره کننده می‌باشد. استفاده از انرژی حرارتی گازهای داغ خروجی از توربین‌ها و میکروتوربین‌های گازی، دیزل ژنراتورها، پیل‌های سوختی دما بالا، موتورهای پیستونی، دودکش دیگ‌های حرارتی و ... می‌تواند یک روش مناسب برای جذب انرژی گازهای خروجی باشد. این مساله باعث افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی و کاهش نرخ بازگشت ناپذیری در آنها نیز خواهد شد. در نمونه‌های دیگر می‌توان از دمای هوای تخلیه شده در سیستم‌های اگزاست ساختمان‌ها نیز بهره برد.

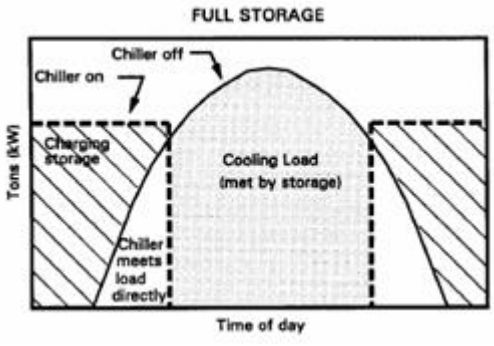
۶- ذخیره‌سازی انرژی برودتی در ساختمان‌ها

ذخیره‌سازی انرژی برودتی در مواد تغییر فاز دهنده یک روش جدید جهت کاربرد در سیستم‌های سرمایشی ساختمان‌ها می‌باشد. مولدهای تولید سرما در ساختمان‌ها اغلب بر اساس سه سیستم تراکمی، جذبی و تبخیری می‌باشند. مصرف برق بالا در سیستم‌های تراکمی و مصرف گاز بالا در

سیستم‌های جذبی مشکل عمده این دو نوع مولد سرما می‌باشد. سیستم‌های تبخیری نیز به دلیل راندمان کمتر، عدم کنترل دما و رطوبت و همچنین نامناسب بودن در مناطق با رطوبت بالا کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

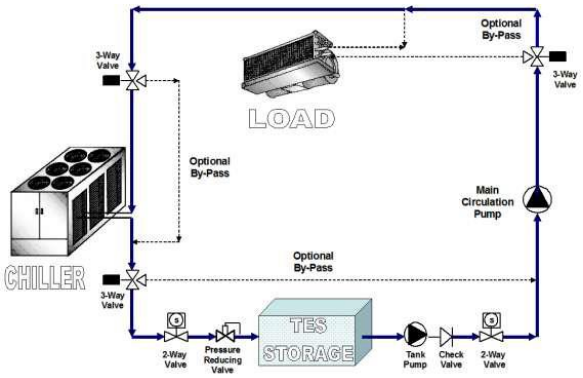
یکی از مهمترین سیستم‌های مولد سرما در جهان سیستم‌های تبرید تراکمی می‌باشند. استفاده از این نوع سیستم‌ها باعث افزایش مصرف برق در ساختمان‌ها و افزایش هزینه‌های مرتبط با آن می‌گردد. با استفاده از سیستم-های ذخیره کننده انرژی می‌توان زمانی که حداکثر انرژی الکتریکی جهت تامین سرمایش مورد نیاز است (زمان پیک مصرف) را به زمان دیگری که مقدار مصرف انرژی الکتریکی به حداقل می‌رسد، انتقال داد. با توجه به اینکه بیشتر سیستم‌های سرمایشی مانند چیلرهای تراکمی دارای مصرف برق بالا می‌باشند، این انتقال بار الکتریکی باعث صرفه‌جویی اقتصادی خواهد گردید. دلیل این مساله بالا بودن هزینه برق مصرفی در ساعات پیک مصرف می‌باشد و استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی سبب کاهش هزینه دیماند مصرفی خواهد شد. از سوی دیگر در سیستم‌های ذخیره‌کننده به دلیل توزیع و گسترش بار سرمایشی مورد نیاز در طول شبانه‌روز، از تجهیزات با توان کمتر و ابعاد و اندازه کوچک استفاده خواهد شد و این مساله باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه در سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری خواهد شد.

سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی بار برودتی اغلب به دو دسته ذخیره-سازی با ظرفیت کامل[۱] و ذخیره‌سازی با ظرفیت جزئی[۲] تقسیم‌بندی می-شوند. در سیستم‌های ذخیره‌سازی با ظرفیت کامل، کل بار سرمایشی مورد نیاز در زمان پیک مصرف به دوره زمانی غیر پیک منتقل می‌شود. به عبارت دیگر در طی ساعات غیر پیک مصرف که هزینه دیماند کاهش می‌یابد، سیستم تولید کننده برودت (چیلرها) با ظرفیت کامل کار کرده و انرژی سرمایشی تولید شده را در داخل سیستم ذخیره‌ساز انرژی و با انجماد مواد تغییر فاز دهنده ذخیره می‌نماید. با افزایش دما در طی روز و در دوره زمانی که مصرف انرژی الکتریکی به حداکثر رسیده و هزینه دیماند نیز بالاست، سیستم تولید کننده برودت خاموش بوده و کل بار سرمایشی مورد نیاز سیستم از سیستم‌های ذخیره کننده و با ذوب مواد تغییر فازدهنده حاصل می‌شود. این نوع سیستم‌ها بیشتر در مواقعی کاربرد دارد که دوره زمانی پیک مصرف شبکه توزیع برق کوتاه بوده و یا نرخ تعرفه مصرف برق در زمان پیک مصرف گران باشد. لازم به ذکر است که این سیستم در مواقعی ضروری که برق مجموعه قطع گردیده نیز قادر به تامین بار سرمایشی فضاها می‌باشد (شکل ۱۸)

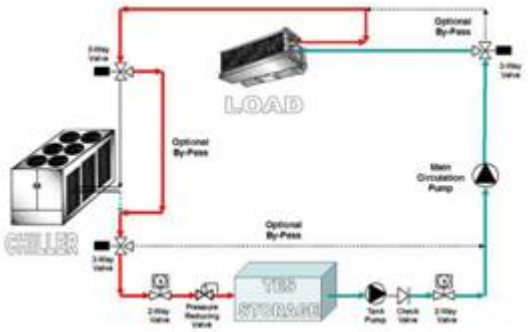


شکل ۱۸ سیستم ذخیره سازی انرژی با ظرفیت کامل[۱۳]

در شکل ۱۹ و ۲۰ دو نمونه از کارکرد چیلر با سیستم ذخیره کننده انرژی در دو حالت شارژ و دشارژ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود برودت تولید شده در چیلر در ساعات غیر پیک علاوه بر تامین بار سرمایشی فضاها، در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی جذب می‌گردد. در ساعات پیک مصرف و یا در مواقع قطع برق کل بار سرمایشی فضاها توسط سیستم ذخیره کننده انرژی تامین می‌گردد.



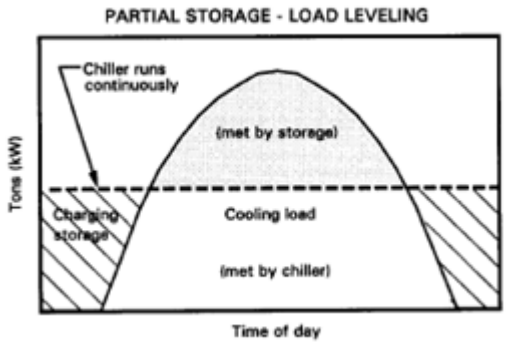
شکل ۱۹ شارژ سیستم ذخیره کننده انرژی[۷]



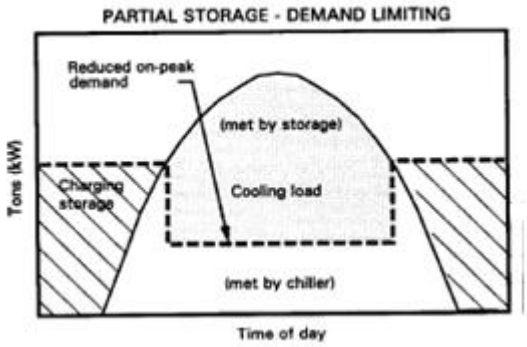
شکل ۲۰ دشارژ سیستم ذخیره کننده انرژی[۷]

در سیستم‌های ذخیره‌سازی با ظرفیت جزئی، چیلر بخشی از حداکثر بار سرمایشی مورد نیاز سیستم را تامین کرده و قسمت دیگری از بار توسط سیستم ذخیره کننده انرژی تامین می‌شود. این نوع سیستم‌ها به دو روش بار ثابت و بار متغیر قابل اجرا می‌باشند. در روش اول چیلر در کل مدت ۲۴ ساعت شبانه‌روز با ظرفیت کامل کار کرده و در این حالت اگر بار مورد نیاز بیشتر از ظرفیت چیلر باشد، بار اضافی توسط سیستم‌های ذخیره کننده تامین می‌شود. در زمانی که بار سرمایشی مورد نیاز کم باشد، سرمای اضافه تولید شده در چیلر به سیستم‌های ذخیره کننده فرستاده می‌شود تا در آنها ذخیره گردد. در این نوع سیستم ظرفیت چیلر و سیستم‌های ذخیره‌ساز دارای حداقل مقدار خود خواهند بود (شکل ۲۱). در روش دوم که به نام سیستم-های ذخیره‌سازی با ظرفیت جزئی و بار متغیر معروف است، در ساعات پیک مصرف چیلر با توان کمتری فعال بوده و بیشتر بار سرمایشی مورد نیاز از سیستم ذخیره‌ساز انرژی تامین می‌شود. در ساعات غیر پیک چیلر با ظرفیت کامل فعال بوده و سرمای تولید شده در سیستم ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌گردد (شکل ۲۲). در شکل ۲۳ نمونه‌ای از یک سیستم بار جزئی نشان داده است.

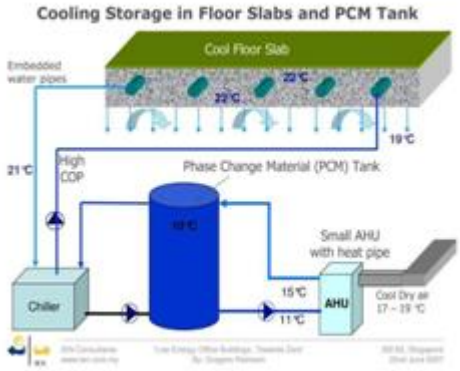
۱ Full storage
۲ Partial storage



شکل ۲۱ سیستم ذخیره سازی انرژی با ظرفیت جزئی با بار ثابت[۱۲]



شکل ۲۲ سیستم ذخیره سازی انرژی با ظرفیت جزئی از نوع بار متغیر[۱۲]

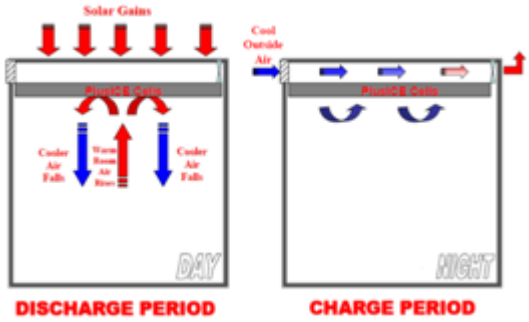


شکل ۲۳ سیستم ذخیره سازی انرژی با ظرفیت جزئی[۷]

خنک‌کاری مستقیم هوای داخل ساختمان در طول روز با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده یک روش بسیار مناسب برای تهویه فضاها می‌باشد. این سیستم اغلب در مناطقی که دارای روزهای گرم و شب‌های سرد می‌باشند، استفاده می‌شود. در این روش بسته‌های مواد تغییر فاز دهنده در سقف یا کف کاذب قرار داده شده و هوای سرد بیرون در طول شب از میان آنها عبور داده می‌شوند (شکل ۲۴ و ۲۵). مواد تغییر فاز دهنده با جذب انرژی برودتی هوای سرد بیرون منجمد شده و سپس در طول روز با گرم شدن هوا، این مواد ذوب گردیده و انرژی برودتی خود را به فضای داخل ساختمان منتقل می‌کنند. این روش باعث کاهش بار سرمایشی ساختمان در طول روز شده و ظرفیت دستگاه‌های تهویه مطبوع را پایین می‌آورد (شکل ۲۶).

شکل۲۴ نمایی از نحوه نصب مواد تغییر فاز دهنده در سقف کاذب ساختمان[۲]

شکل ۲۵ نمایی از نحوه نصب مواد تغییر فاز دهنده در سقف کاذب ساختمان[۶]



شکل ۲۶ نحوه خنک‌کاری فضاها با استفاده از انرژی برودتی هوای بیرون [۶]

۷- ملاحظات اقتصادی در بکارگیری سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی

اجرای سیستم‌های ذخیره کننده انرژی به دلیل پیچیده‌تر بودن عملکرد آنها نسبت به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی معمولی و همچنین نیاز به استفاده از نیروی‌های متخصص و مجرب در مراحل طراحی و نصب، اغلب از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. با توجه به موارد فوق استفاده از این نوع سیستم‌ها در مساله ممیزی انرژی ساختمان‌ها زمانی مطرح می‌باشد که شرایط زیر در ساختمان برقرار باشد:

- حداکثر بار سرمایشی و گرمایشی محاسبه شده به مقدار قابل توجهی بزرگتر از متوسط بار سرمایشی و گرمایشی باشد.
- اختلاف دمای محل قرارگیری ساختمان در طول شبانه‌روز زیاد باشد.

این مساله در شهرهای کویری که دارای روزهای گرم و شب‌های سرد می‌باشند، صدق می‌کند.

- استفاده از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی در ساختمان مقرون به صرفه‌تر از خرید تجهیزات مولد انرژی مانند دیگ و چیلر باشد.

- قیمت انرژی الکتریکی مصرفی در ساعات پیک شبکه تفاوت زیادی با ساعات دیگر داشته باشد.

- مقدار انرژی الکتریکی ارائه شده توسط شبکه محدود بوده و اضافه نمودن ترانسفورماتور مستلزم صرف هزینه زیادی است. این مساله در کارخانجات بزرگ صنعتی، ساختمان‌های تجاری و مسکونی که در مناطق گرم و شرجی قرار داشته و مصرف انرژی الکتریکی آنها برای تامین بار سرمایشی زیاد است، مناسب می‌باشد.

۸- جمع‌بندی

تمام تلاش‌های بشر در حوزه تهویه مطبوع در راستای رقم‌زدن شرایط آسایش انسان در محیط زندگی می‌باشد. این تلاش‌ها با صرف هزینه‌های هنگفت و مصرف مقادیر قابل توجهی از انرژی‌های تجدید ناپذیر و سوخت‌های فسیلی همراه بوده و این مساله به نوبه خود سبب کاهش منابع انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی می‌گردد. یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و آلایندگی-های زیست محیطی، مدیریت مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده و سیستم‌های ذخیره کننده انرژی از جمله مواردی می-باشند که در سال‌های اخیر اهمیت زیادی در مدیریت مصرف انرژی در ساختمان‌ها پیدا کرده‌اند. بحث ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و برودتی در ساعات غیر ضروری و استفاده از آنها در ساعات پیک مصرف یکی از روش‌های مهم در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌باشد. در این میان خورشید به عنوان یک منبع بی‌پایان دارای اهمیت زیادی در حوزه انرژی‌های نو می-باشد. کشور جمهوری‌اسلامی ایران نیز به لحاظ دارا بودن مناطق آفتاب‌خیز فراوان از فابلیت بالایی جهت استفاده از انرژی خورشیدی برخوردار است. مناسبترین مناطق جهت استفاده از این انرژی واقع در جنوب و مرکز کشور می‌باشد. با توجه به تغییرات آب و هوایی زیاد در کشور استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند تا حدود زیادی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های سیستمهای حرارتی بکار رفته در کشور باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه بیشتر مناطق کشور دارای اختلاف دمای بالا در طول روز و شب می‌باشند، می‌توان از این نوع سیستم‌های ذخیره کننده برای جذب انرژی برودتی در ساختمانها و کاهش مصرف برق نیز استفاده نمود.

۹- مراجع

[] پیرکندی جاماسب، "بررسی تاثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در بهینه‌سازی سیستمهای ذخیره‌کننده انرژی"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی، ۱۳۸۱.

[۲] قاسمی مجید، پیرکندی جاماسب، "بهبود خواص مواد تغییر فاز دهنده با افزودن ذرات نانو"، *هفدهمین کنفرانس سالانه و بین المللی مهندسی مکانیک*، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۸.

[۳] منصوری شبنم ، جبار محسن "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، خرداد ماه ۱۳۸۹.

[۴] پیرکندی جاماسب، لطفی حسن "مواد تغییر فاز دهنده"، *مجله علمی ترویجی مهندسی مکانیک*، شماره ۳۸، دی ماه ۱۳۸۳

[٥] Zhang QL, “Research on application and character of thermal performance of building envelope components with phase change material for thermal storage”, PhD Dissertation, Beijing: Department of Building Science in Tsinghua University, ۲۰۰۷.

[٦] Belen zelba, Jose M.Marin, Lusia Feabeza, Harald Mehling, “Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and application”, *Applied thermal eng* ۲۳, pp.۲٥۱-۲۸۳, ۲۰۰۳.

[۷] See: www.pcmproducts.net, ۲۰۱٤.

[۸] Farid, M., Khudhair, A.., Razack, S. and Hallaj, S., ”A review on phase change energy storage: materials and applications”, *Energy Conversion and Management*, Vol.٤٥, pp.۱٥۹۷-۱٦۱٥, ۲۰۰٤.

[۹]Buddhi D. Mishra HS, Sharma A.," Thermal performance studies of a test cell having a PCM window in south direction" *Annex ۱۷*, Indore, India, ۲۰۰۳.

[۱۰] "PCM Thermal Solutions guide Manual", ۱۱٦۳ E, Ogden Ave, Ste ۷۰٥-۳٤٥, Naperville, IL ٦۰٥٦۳, for more information see: www.pcm-solutions.com.

[۱۱] Khudhair, A.. and Farid, M., ” A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials”, *Energy Conversion and Management*, Vol.٤٥, pp.۲٦۳-۲۷٥, ۲۰۰٤.

[۱۲] یزدان شناس الیاس، خالصی دوست عبدالله، "مبدل حرارتی با مواد تغییر فازدهنده برای ذخیره انرژی خورشیدی"، *اولین کنفرانس سالانه انرژی پاک، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی*، کرمان، اسفند ۱۳۸۹.

[۱۳] نظری احمد، "بهینه سازی مصرف انرژی با استفاده از سیستم های ذخیره کننده انرژی"، *کنفرانس سراسری بهینه سازی مصرف انرژی*، ۱۳۸۶.