

مروری بر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای بهینه سازی مصرف انرژی

نسرين عزتی مغانلو

الهه سلیمانی

هادی غائبی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
nasrin_ezzati.student@uma.ac.ir

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
soleymaniiii74@gmail.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
hghaebi@uma.ac.ir

چکیده

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده PCM ها به عنوان یک راه حل نوین برای ذخیره سازی انرژی گرمایی در سال های اخیر توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده است. این مواد به دلیل ویژگی های منحصر به فردی که در جذب و ذخیره انرژی دارند، می توانند در حوزه های مختلفی از جمله ساختمان ها، سیستم های انرژی خورشیدی، قطعات الکترونیکی و حتی خودروها مورد استفاده قرار گیرند. در واقع، PCM ها به عنوان موادی با ظرفیت بالای ذخیره سازی گرما در دماهای مشخص، می توانند به کاهش نیاز به انرژی در بسیاری از کاربردها کمک کنند. در این مقاله مروری به بررسی و تحلیل ویژگی های ترموفیزیکی PCM ها، انواع مختلف آن ها، مزایا و معایب استفاده از این مواد و همچنین کاربردهای مختلف آن ها و معیارهای انتخاب PCM مناسب برای کاربرد های مختلف، چرخه عمر و امکان استفاده مجدد از PCM ها، پرداخته شده است. علاوه بر این، در پایان این بخش، مدل های مختلف ذخیره سازی گرمایی با استفاده از PCM ها و چگونگی بهینه سازی این سیستم ها در شرایط مختلف اقلیمی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: مواد تغییر فاز دهنده، بهینه سازی، انرژی، مدل های ذخیره سازی گرمایی، ویژگی های ترموفیزیکی، کاربردهای PCM ها.

A review of the use of phase change materials to optimize energy consumption.

N. Ezzati Moghanlou

E. Soleymani

H. Ghaebi*

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

The use of phase change materials (PCMs) as a novel solution for thermal energy storage has attracted the attention of many researchers and industrialists in recent years. Due to their unique properties in absorbing and storing energy, these materials can be used in various fields including buildings, solar energy systems, electronic components and even automobiles. In fact, PCMs, as materials with high heat storage capacity at certain temperatures, can help reduce energy requirements in many applications. This review article examines and analyzes the thermophysical properties of PCMs, their different types, the advantages and disadvantages of using these materials, as well as their various applications, and the criteria for selecting suitable PCMs for different applications, life cycle, and reusability of PCMs. In addition, at the end of this section, various thermal storage models using PCMs and how to optimize these systems in different climatic conditions are examined.

Keywords: phase change material, optimization, energy, Thermal Energy Storage Models, Thermo-physical Properties, Applications of PCMs

۱- مقدمه

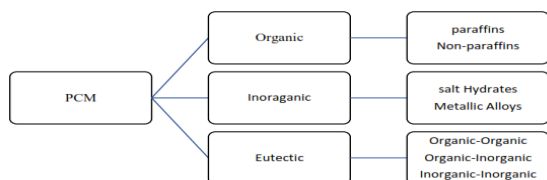
مورد نیاز مورد استفاده قرار گیرد [۳]. در مقایسه با سایر روش های ذخیره سازی گرمایی مانند مخازن سنگ دما یا سیستم های گرمایی سنتی استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) به دلیل بهره گیری از گرمای نهان قابلیت ذخیره انرژی بیشتری در حجم واحد ارائه می دهد، امکانی که در فضاهای محدود اهمیت زیادی دارد [۴]. با این حال، سیستم های محسوس از لحاظ بلوغ فناوری، هزینه اولیه کمتر و دوام بیشتر در چرخه کاری (چند هزار چرخه) مقرون به صرفه تر هستند [۴]. بررسی های اخیر نشان داده اند که روش های ترکیبی (نهان + محسوس) می توانند نقاط قوت هر دو را به کار گیرند؛ اما یکی از چالش های اصلی PCM ها، رسانایی گرمایی پایین و لزوم بهبود انتقال گرما از طریق افزودنی های هادی یا طراحی ساختاری ویژه است [۵]. همچنین هزینه های بالاتر PCM ها نسبت به ذخیره سازی حسی و مشکلات پایداری چرخه ای در کاربرد بلندمدت از موانع اصلی محسوب می شوند. در نهایت، انتخاب بین PCM و روش های سنتی بستگی به

در دهه های اخیر، اهمیت ذخیره سازی انرژی گرمایی به دلیل تقاضای روزافزون برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و نیاز به بهبود کارایی این منابع، بسیار افزایش یافته است. یکی از روش های مؤثر در ذخیره سازی انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده PCM ها است. PCM ها قادرند انرژی را در هنگام تغییر فاز از جامد به مایع و بالعکس ذخیره و در زمان های مورد نیاز آزاد کنند. این ویژگی باعث می شود که استفاده از PCM ها در ذخیره سازی انرژی گرمایی یک گزینه جذاب و کارآمد باشد [۱]. استفاده از PCM ها می تواند به کاهش مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش کمک کند و باعث بهینه سازی شرایط دمایی داخلی شود [۲]. ذخیره سازی انرژی گرمایی به فرآیند ذخیره سازی انرژی در قالب گرما اشاره دارد که می تواند در زمان های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hghaebi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰



شکل ۱- دسته بندی PCM

۱-۲- انواع PCMها

پارافینها (Paraffins)

مواد آلی [25] (Paraffins, Fatty Acids) (Organic) به عنوان یکی از پرکاربردترین دسته‌های مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، شامل پارافین‌ها، چربی‌ها و استرها هستند.

پارافین‌ها گروهی از هیدروکربن‌های اشباع با ساختار خطی هستند که به دلیل پایداری شیمیایی، غیرسمی بودن، و مقاومت در برابر اکسیداسیون، به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمایی به کار می‌روند [۱۹، ۲۰].

اسیدهای چرب (Fatty Acids)

اسیدهای چرب ترکیباتی آلی با زنجیره طولانی هستند که معمولاً از منابع طبیعی و تجدیدپذیر مانند گیاهان و حیوانات استخراج می‌شوند [۱۰].

مزایا: این مواد شامل دسترسی آسان، که ناشی از تولید صنعتی گسترده آن‌هاست، و همچنین غیرسمی بودن و ایمنی زیست‌محیطی آن‌هاست، که استفاده از آن‌ها را برای کاربردهای خانگی و صنعتی مناسب می‌سازد. پایداری شیمیایی و گرمایی بالا نیز از دیگر ویژگی‌های برجسته این مواد است که امکان استفاده طولانی‌مدت و بازیابی گرمایی مکرر را فراهم می‌کند [۱۷، ۱۸].

معایب: یکی از اصلی‌ترین نقاط ضعف آن‌ها رسانایی گرمایی پایین است که می‌تواند بر سرعت انتقال گرما و عملکرد کلی سیستم تأثیر بگذارد. حجم‌گیری در حین تغییر فاز از دیگر مشکلات این مواد است که ممکن است نیاز به طراحی خاص برای جبران این مسئله داشته باشد. همچنین، هزینه نسبتاً بالای تولید برخی از این مواد، به‌ویژه در مقایسه با مواد غیرآلی، می‌تواند مانعی برای استفاده گسترده‌تر آن‌ها باشد [۲۱].

۱-۲-۲- مواد غیرآلی (هیدرات نمک)

مواد غیرآلی (Inorganic PCM) این مواد معمولاً شامل نمک‌ها، آلایدهای فلزی و مواد معدنی هستند. از رایج‌ترین مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی محسوب می‌شوند. این مواد معمولاً ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی بالاتری دارند. مواد معدنی شامل نمک‌های هیدراته و فلزات هستند که ظرفیت گرمایی نهان بالایی دارند [۷، ۱۸].

مزایا: مواد غیرآلی، مانند هیدرات‌های نمکی، به دلیل ظرفیت گرمایی نهان بالا و هزینه کمتر نسبت به مواد آلی، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی محسوب می‌شوند. این مواد قادرند حجم بیشتری از انرژی را در حین تغییر فاز جذب و آزاد کنند، که این ویژگی برای سیستم‌هایی با نیاز به چگالی انرژی بالا بسیار مهم است. علاوه بر این، مواد غیرآلی به دلیل فراوانی در طبیعت و هزینه

الزامات کاربردی از جمله محدودیت فضا، محدوده دمای کاری، هزینه مجاز و طول عمر مورد انتظار دارد.

۱-۱- دلایل اهمیت این مقاله

اهمیت ذخیره‌سازی انرژی: در عصر کنونی با توجه به تغییرات اقلیمی و بحران انرژی در سطح جهانی، ذخیره‌سازی انرژی به‌ویژه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی اهمیت پیدا کرده است. از این‌رو، استفاده از مواد PCM برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی می‌تواند راهکاری مناسب برای کاهش مصرف انرژی و حفظ منابع طبیعی باشد [۱، ۲]. پتانسیل بالای مواد PCM: این مواد قادرند انرژی زیادی را در حجم کم ذخیره کنند و در دماهای خاص تغییر فاز دهند که این ویژگی‌ها آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای مختلف تبدیل کرده است [۶]. پیشرفت‌های فناوری در این زمینه: طی سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه توسعه و بهبود مواد PCM صورت گرفته است [۷، ۸]. ضرورت تحقیقات بیشتر: علی‌رغم پیشرفت‌های موجود، بسیاری از مشکلات مربوط به کارایی، هزینه‌ها، و اثرات زیست‌محیطی مواد PCM هنوز برطرف نشده است. این تحقیق به هدف پر کردن شکاف‌های علمی موجود و ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی استفاده از این مواد در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی صورت می‌گیرد [۹، ۱۰].

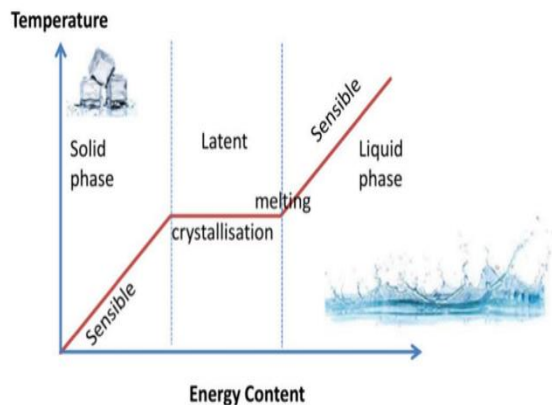
۲-۱- ویژگی‌ها و مکانیسم عملکرد PCMها

PCMها در دو مرحله عملکرد دارند: در مرحله اول، زمانی که دما به حد معینی می‌رسد، ماده از حالت جامد به مایع تبدیل می‌شود و انرژی گرمایی را جذب می‌کند (فرآیند ذوب شدن). در مرحله دوم، هنگامی که دما پایین می‌آید، ماده از حالت مایع به جامد باز می‌گردد و انرژی گرمایی آزاد می‌شود (فرآیند انجماد). این ویژگی موجب می‌شود که PCMها به‌طور مؤثری به‌عنوان ذخیره‌کننده‌های انرژی گرمایی عمل کنند [۸].

۲- تعریف و طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

مواد تغییر فاز دهنده Phase Change Materials (PCM) موادی هستند که توانایی ذخیره و آزاد کردن انرژی را از طریق تغییر فاز خود از حالت جامد به مایع و بالعکس دارند. این ویژگی آن‌ها را به یکی از گزینه‌های اصلی ذخیره‌سازی انرژی گرمایی تبدیل کرده است. در طول فرآیند تغییر فاز، انرژی به صورت گرما جذب یا آزاد می‌شود، به این معنا که این مواد می‌توانند انرژی را در دماهای خاصی ذخیره کرده و در هنگام نیاز آن را آزاد کنند [۱۱، ۱۲، ۱۳]. PCMها همچنین دارای پایداری شیمیایی و گرمایی بالایی هستند که امکان استفاده مکرر از آن‌ها را در چرخه‌های مختلف ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی فراهم می‌کند [۱۴]. مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند بر اساس دما، کاربردها و ویژگی‌های فیزیکی خود به دسته‌های مختلفی تقسیم شوند. PCMها معمولاً به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۱۵، ۱۶].

آن‌ها تغییر کند، می‌توانند به‌طور موثری نوسانات دمایی را کاهش داده و انرژی را در زمان‌هایی که بیشتر نیاز است، آزاد کنند [۲۶]. بنابراین، گرمای نهان، به عنوان یکی از خصوصیات کلیدی PCM، به آن‌ها این قابلیت را می‌دهد که انرژی گرمایی را با کارایی بالا ذخیره و آزاد کنند و نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیندهای ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی ایفا می‌کند.



شکل ۲- انرژی ذخیره شده به صورت محسوس و نهان [۲۶].

۲-۳- رسانایی گرمایی و تأثیر آن بر عملکرد PCM

رسانایی گرمایی یکی از ویژگی‌های مهم مواد در فرآیندهای ذخیره‌سازی انرژی است. این ویژگی تعیین می‌کند که چگونه گرما از یک نقطه به نقطه دیگر در ماده انتقال می‌یابد. در مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، رسانایی گرمایی تأثیر مستقیمی بر سرعت جذب و آزادسازی انرژی گرمایی دارد. PCMها معمولاً به دلیل تغییر فازهای آن‌ها و ذخیره یا آزادسازی گرما در فرآیندهای تغییر فاز، به رسانایی گرمایی بالایی نیاز ندارند. با این حال، رسانایی گرمایی پایین‌تر می‌تواند به این معنی باشد که فرآیندهای جذب و آزادسازی گرما در PCMها کندتر انجام می‌شود [۲]. در مقابل، مواد با رسانایی گرمایی بالا می‌توانند گرما را سریع‌تر جذب و آزاد کنند، که می‌تواند در بعضی از کاربردهای خاص مفید باشد. با این حال، این افزایش سرعت در جذب و آزادسازی انرژی می‌تواند باعث کاهش زمان ذخیره‌سازی و کاهش کارایی در برخی از طراحی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شود؛ به عبارت دیگر، در PCMها نیاز به تعادلی میان رسانایی گرمایی و گرمای نهان وجود دارد تا فرآیند ذخیره‌سازی انرژی به صورت بهینه و با کارایی بالا انجام شود. برای بهبود عملکرد PCMها، ممکن است ترکیب‌هایی از مواد با رسانایی گرمایی بالا و پایین استفاده شود. این مواد می‌توانند به طور مؤثرتر انرژی را ذخیره کرده و به زمان‌بندی مناسبی برای آزادسازی گرما برسند. در بسیاری از کاربردها، تلاش بر این است که رسانایی گرمایی PCMها به حدی برسد که بتوانند انرژی را با سرعت و کارایی بالا جذب و ذخیره کنند، بدون اینکه سرعت تغییر فاز آن‌ها تحت تأثیر قرار گیرد [۲۷].

به طور کلی، رسانایی گرمایی یکی از پارامترهای حیاتی در انتخاب PCM مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی است و باید به دقت در طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته شود.

تولید پایین‌تر، انتخابی اقتصادی‌تر برای پروژه‌های بزرگ مقیاس هستند [۲۱].

معایب پایداری شیمیایی و گرمایی پایین‌تر از معایب عمده مواد غیرآلی است. این مواد ممکن است در اثر چرخه‌های مکرر گرمایش و سرمایش دچار تغییرات شیمیایی شوند که منجر به کاهش عملکرد در طول زمان می‌شود. همچنین، مشکلات خوردگی در تعامل با تجهیزات فلزی و نفوذپذیری به رطوبت از دیگر چالش‌هایی هستند که می‌توانند کارایی و دوام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را کاهش دهند [۲۱].

۱-۱-۲- مواد هیبرید (ترکیب مواد آلی و غیرآلی)

مواد هیبرید، ترکیبی از مواد آلی و غیرآلی، برای بهره‌گیری از مزایای هر دو نوع PCM طراحی شده‌اند. این مواد به دلیل بهبود کارایی و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. [۸، ۲۱].

مزایا: این مواد به دلیل بهبود کارایی و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ترکیب مواد آلی و غیرآلی می‌تواند ویژگی‌هایی مانند ظرفیت گرمای نهان بالا، پایداری گرمایی مناسب، و رسانش گرمایی بهتر را در کنار هم ارائه دهد. به علاوه، این ترکیب‌ها می‌توانند نقاط ضعف هر یک از مواد پایه را جبران کنند، به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به عملکرد قابل اطمینان در طول چرخه‌های مکرر گرمایش و سرمایش وجود دارد [۲۲].

معایب: مواد هیبرید با پیچیدگی‌های بیشتر در فرایند تولید و طراحی همراه هستند. انتخاب نسبت بهینه مواد آلی و غیرآلی و دستیابی به ترکیب یکنواخت و پایدار نیازمند تحقیقات گسترده و فرآیندهای پیچیده است. همچنین، هزینه تولید این مواد معمولاً بالاتر از مواد منفرد آلی یا غیرآلی است. این چالش‌ها می‌توانند محدودیت‌هایی در استفاده گسترده از مواد هیبرید ایجاد کنند [۲].

۳- خواص ترموفیزیکی PCMها

خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) نقش کلیدی در عملکرد آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی دارد. مهم‌ترین این خصوصیات شامل دمای تغییر فاز، ظرفیت گرمای نهان، رسانایی گرمایی، پایداری شیمیایی و خواص مرتبط با چگالی است [۲۳].

۱-۳- گرمای نهان و اثر آن در ذخیره‌سازی انرژی

گرمای نهان، که به آن انرژی نهان یا انرژی پنهان نیز گفته می‌شود، مقدار انرژی است که برای تغییر فاز یک ماده بدون تغییر دمای آن صرف می‌شود. هنگامی که PCM از حالت جامد به مایع یا برعکس تغییر فاز می‌دهد، انرژی به شکل گرمای نهان جذب یا آزاد می‌شود. در فرآیند ذخیره‌سازی انرژی، گرمای نهان به PCM اجازه می‌دهد تا مقدار زیادی انرژی گرمایی را در دمای ثابت جذب یا ذخیره کند [۲۴، ۲۵].

اثر گرمای نهان در ذخیره‌سازی انرژی به خصوص در کاربردهایی مانند سیستم‌های گرمایی خورشیدی ساختمان‌های سبز و سیستم‌های تهویه مطبوع برجسته است. از آنجایی که PCMها می‌توانند مقادیر زیادی انرژی را در خود ذخیره کنند بدون اینکه دمای

۳-۳- دمای تغییر فاز و چگونگی انتخاب آن برای کاربردهای مختلف

دمای تغییر فاز (Phase Change Temperature) یکی از ویژگی‌های مهم در انتخاب مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای کاربردهای مختلف است. دما تعیین می‌کند که در چه دمایی ماده از حالت جامد به مایع یا بالعکس تغییر فاز می‌دهد [۲۴، ۲۸].

برای انتخاب دمای تغییر فاز مناسب، ابتدا باید دمای عملیاتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی یا کاربرد خاص تعیین شود؛ به عبارت دیگر، باید دمایی که مواد و محیط در آن قرار دارند، به‌طور دقیق مشخص شود. PCM باید در دمایی تغییر فاز کند که با دمای محیط یا فرایندهای گرمایی سیستم هماهنگ باشد تا انرژی را به‌طور مؤثر ذخیره و آزاد کند [۲، ۱].

نکته دیگر در انتخاب دمای تغییر فاز، نیاز به دقت در انتخاب محدوده دمایی است که PCM در آن می‌تواند عملکرد بهینه‌ای داشته باشد. مواد تغییر فاز دهنده معمولاً دارای یک محدوده دمایی مشخص برای تغییر فاز هستند. به عنوان مثال، دمای تغییر فاز ممکن است طیفی از دماهای مختلف باشد که به دلیل خاصیت گرمای نهان و ویژگی‌های ترمودینامیکی ماده در نظر گرفته می‌شود [۲۹].

۳-۴- پایداری شیمیایی و گرمایی

پایداری شیمیایی و گرمایی یکی از ویژگی‌های کلیدی در انتخاب مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای کاربردهای مختلف است. این ویژگی‌ها تأثیر مستقیم بر عملکرد طولانی‌مدت و کارایی PCM در فرایندهای ذخیره‌سازی انرژی دارند و نقش مهمی در انتخاب ماده مناسب برای هر سیستم ایفا می‌کنند [۳۰].

پایداری شیمیایی به توانایی PCM در حفظ ساختار شیمیایی خود در طول زمان و در شرایط مختلف محیطی اشاره دارد. مواد تغییر فاز دهنده باید بتوانند در طول چرخه‌های متعدد تغییر فاز، بدون تجزیه یا تغییرات شیمیایی عمده، عملکرد خود را حفظ کنند. این پایداری شیمیایی از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا تجزیه یا تغییرات شیمیایی می‌تواند منجر به کاهش کارایی ذخیره‌سازی انرژی و حتی آسیب به سیستم شود. در این راستا، انتخاب مواد تغییر فاز دهنده‌ای که در برابر اکسیداسیون، هیدرولیز و دیگر واکنش‌های شیمیایی مقاوم باشند، ضروری است [۳۱].

پایداری گرمایی نیز به توانایی PCM در تحمل دماهای مختلف و شرایط گرمایی بدون تغییر خواص ترمودینامیکی اشاره دارد. این ویژگی به‌ویژه در مواد غیرآلی و مواد هیبریدی که به دماهای بالا نیاز دارند، اهمیت دارد. برخی از PCMها ممکن است در معرض دماهای بالا قرار بگیرند که می‌تواند منجر به تغییرات فازی نامطلوب، کاهش گرمای نهان یا حتی تجزیه مواد شود. در چنین شرایطی، PCM باید بتواند در دماهای بالا و پایین به‌طور مؤثر عمل کند و پس از چندین چرخه تغییر فاز، عملکرد خود را حفظ کند [۳۲].

در نتیجه، پایداری شیمیایی و گرمایی از ارکان اساسی برای انتخاب مواد PCM به‌شمار می‌روند که تضمین‌کننده عملکرد بهینه و پایدار در طول زمان و در شرایط متغیر محیطی هستند.

۴- چرخه عمر و امکان استفاده مجدد از PCMها

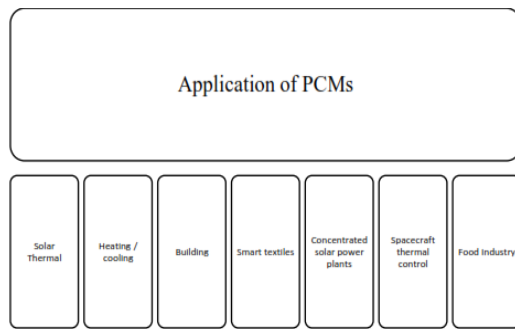
چرخه عمر و امکان استفاده مجدد از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) از جنبه‌های مهم در ارزیابی عملکرد و کارایی این مواد در ذخیره‌سازی انرژی هستند. این ویژگی‌ها نه تنها بر هزینه و کارایی بلندمدت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تأثیر می‌گذارند، بلکه به‌طور مستقیم با پایداری و حفظ خواص PCM در طی مدت زمان طولانی مرتبط هستند. چرخه عمر PCM به معنای تعداد دفعاتی است که ماده می‌تواند فرآیند تغییر فاز (ذوب و انجماد) را بدون کاهش کارایی و خواص ترمودینامیکی خود تکرار کند. مواد تغییر فاز دهنده باید در برابر فرایندهای گرمایی متعدد مقاوم باشند و در هر چرخه تغییر فاز، توانایی ذخیره و بازیابی انرژی را به‌طور مؤثر حفظ کنند. به‌طور معمول، PCMها در طی استفاده مکرر ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند اکسیداسیون، تجزیه شیمیایی یا تغییرات ساختاری قرار گیرند، که می‌تواند باعث کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی و اثرگذاری منفی بر عملکرد آنها شود [۱۶].

امکان استفاده مجدد از PCMها در بسیاری از سیستم‌ها، به‌ویژه در سیستم‌های انرژی خورشیدی و ذخیره‌سازی گرمایی، از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده مجدد از PCMها نه تنها هزینه‌های سیستم را کاهش می‌دهد، بلکه موجب افزایش کارایی و پایداری طولانی‌مدت سیستم می‌شود. برای اطمینان از قابلیت استفاده مجدد، PCMها باید ویژگی‌های پایداری گرمایی و شیمیایی مناسبی داشته باشند تا پس از هر چرخه تغییر فاز، خواص آنها تغییرات عمده‌ای پیدا نکند. در این راستا، انتخاب مواد با ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی و پایداری مناسب در برابر شرایط مختلف گرمایی از اهمیت زیادی برخوردار است. در بسیاری از کاربردها، PCMها می‌توانند پس از استفاده مجدد برای چندین دوره انرژی ذخیره کنند و از این طریق به‌طور مؤثر در کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرایندهای گرمایشی و سرمایشی کمک کنند. برای مثال، در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی، PCMها می‌توانند انرژی ذخیره‌شده در طول روز را برای استفاده در شب یا در زمان‌هایی که نیاز به انرژی گرمایی وجود دارد، فراهم کنند. این توانایی استفاده مجدد از PCMها، به‌ویژه در حوزه‌های انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان یک مزیت بزرگ شناخته می‌شود [۲].

در نهایت، طراحی و انتخاب PCMهای با چرخه عمر طولانی و قابلیت استفاده مجدد بالا، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های کلی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شود و به‌طور گسترده‌تری در بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر مؤثر باشد.

۵- معیارهای انتخاب PCM مناسب

انتخاب مواد تغییر فاز دهنده (PCM) مناسب به عوامل متعددی بستگی دارد که شامل خواص گرمایی، شیمیایی، مکانیکی و اقتصادی است. مهم‌ترین ویژگی‌های گرمایی که باید در انتخاب PCM در نظر گرفته شود، دمای تغییر فاز مناسب، ظرفیت گرمایی بالا و رسانایی گرمایی مطلوب است. برای کاربردهای خاص، PCM باید بتواند در محدوده دمای عملکرد سیستم، انرژی گرمایی زیادی را ذخیره کند و نرخ انتقال گرما بالایی داشته باشد. در صورت پایین بودن رسانایی



شکل ۲- کاربردهای مختلف PCMها

۵-۲- کاربردهای PCMها در سیستم‌های ذخیره‌سازی

انرژی

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی دارند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای PCMها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (TES) است. این سیستم‌ها با استفاده از گرمای نهان مواد، انرژی را در طی فرآیند تغییر فاز ذخیره و آزاد می‌کنند. در سیستم‌های خورشیدی، PCMها به عنوان مخازن ذخیره‌سازی گرمایی برای جذب و ذخیره انرژی خورشیدی در طول روز و آزادسازی آن در شب یا هنگام کاهش تابش خورشید به کار می‌روند [۲۶].

در سیستم‌های تهویه مطبوع و گرمایش ساختمان‌ها، PCMها می‌توانند به کاهش مصرف انرژی کمک کنند. در تجهیزات الکترونیکی، PCMها برای مدیریت گرما و جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد به کار می‌روند. همچنین، این مواد در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ، مانند باتری‌های گرمایی، برای بهبود کارایی و پایداری انرژی استفاده می‌شوند. کاربردهای دیگر شامل پوشاک هوشمند، محفظه‌های عایق‌بندی گرمایی و سیستم‌های انتقال گرما است. این گستردگی کاربردها، PCMها را به یکی از اجزای کلیدی در سیستم‌های مدرن ذخیره‌سازی انرژی تبدیل کرده است [۳۱].

۵-۳- ساختمان‌ها

در صنعت ساختمان‌سازی، مواد تغییر فاز دهنده (PCM) نقش حیاتی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری گرمایی ایفا می‌کنند. استفاده از PCMها برای گرمایش و سرمایش فضای ساختمان‌ها به دلیل هزینه سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی محبوب شده است. در مناطق بسیار سرد یا گرم، مصرف انرژی الکتریکی در طول روز و شب تا حدی به دلیل تقاضای متفاوت برای گرمایش یا سرمایش بسیار متفاوت است.

این مواد می‌توانند در عناصر مختلف ساختمانی مانند دیوارها، سقف‌ها، و کف‌ها به کار گرفته شوند تا با ذخیره‌سازی و آزادسازی گرما، دما را در محدوده مطلوب حفظ کنند [۱۶]. با این حال، ملاحظات طراحی خاص، به ویژه برای تهویه یک ساختمان برای استفاده مؤثر از PCM ضروری است.

PCMهای آلی مانند اسید چرب پس از چرخه‌های ذوب و انجماد خاصی بوی تند می‌دهد. همچنین، هنگام استفاده از PCMها در ساختمان‌ها، اقدامات ایمنی خاصی باید در نظر گرفته شود؛ زیرا ممکن

گرمایی، می‌توان با افزودن موادی مانند نانوذرات، این ویژگی را بهبود بخشید [۱۸].

پایداری شیمیایی و فازی PCM نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. مواد باید در طول چرخه‌های متعدد تغییر فاز، خواص گرمایی و ساختاری خود را حفظ کنند و دچار جدایش فاز نشوند. ایمنی و مسائل زیست‌محیطی نیز در انتخاب PCM اهمیت دارند؛ مواد باید غیرسمی و غیرقابل اشتعال باشند تا برای انسان و محیط‌زیست ایمن باشند [۲۸].

از نظر مکانیکی، PCM باید استحکام کافی برای تحمل شرایط محیطی را داشته باشد و در عین حال، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. دسترسی آسان به مواد و هزینه پایین آن‌ها می‌تواند تأثیر زیادی در انتخاب نهایی داشته باشد. همچنین، سازگاری PCM با مواد دیگر در سیستم و عدم ایجاد خوردگی یا تخریب نیز باید مدنظر قرار گیرد. در برخی کاربردها، لزجت و رفتار جریان PCM در حالت مایع نیز مورد توجه قرار می‌گیرد [۲۷].

به طور کلی، PCM مناسب باید ترکیبی از خواص مطلوب و عملکرد قابل اطمینان را ارائه دهد تا نیازهای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را برآورده کند.

۵-۱- معیارهای انتخاب PCM بر اساس کاربرد

انتخاب یک ماده تغییر فاز دهنده (PCM) مناسب برای یک کاربرد خاص به عوامل متعددی بستگی دارد که باید با دقت مورد ارزیابی قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین معیارها، سازگاری PCM با شرایط محیطی و نوع کاربرد است. به عنوان مثال، دمای تغییر فاز ماده باید با محدوده دمایی کاربرد هماهنگ باشد. برای کاربردهایی که در دماهای بالا یا پایین کار می‌کنند، انتخاب ماده‌ای که پایداری گرمایی مناسب داشته باشد ضروری است. همچنین، مقاومت ماده در برابر اکسیداسیون و واکنش‌های شیمیایی با محیط نقش کلیدی در عملکرد بلندمدت آن ایفا می‌کند [۲۹].

هزینه‌ها یکی دیگر از معیارهای کلیدی است. در پروژه‌هایی با بودجه محدود، PCMهای ارزان‌تر ممکن است ترجیح داده شوند، اما باید تعادل میان هزینه و کارایی برقرار شود. به علاوه، کارایی بلندمدت و چرخه عمر PCM از دیگر عوامل مهم هستند. ماده‌ای که توانایی حفظ عملکرد خود را در چرخه‌های مکرر گرمایش و سرمایش دارد، معمولاً گزینه بهتری است. معیارهای دیگر شامل رسانش گرمایی برای انتقال سریع‌تر گرما، گرمای نهان بالا (برای ذخیره‌سازی انرژی بیشتر)، و سهولت در تولید و استفاده هستند. در نهایت، سازگاری زیست‌محیطی و ایمنی ماده، به‌ویژه برای کاربردهای حساس، باید در نظر گرفته شود تا از بروز مشکلات زیست‌محیطی یا خطرات ایمنی جلوگیری شود [۳۰].

است مواد آلی در شرایط خاص آتش بگیرند.

۵-۴- سیستم‌های خورشیدی

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در سیستم‌های خورشیدی نقش کلیدی در بهبود ذخیره‌سازی و بهره‌وری انرژی گرمایی ایفا می‌کنند. این مواد قادرند انرژی گرمایی تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی را ذخیره کرده و در زمان نیاز، به‌ویژه در شب یا در شرایط آب‌وهوایی ابری، آزاد کنند. در سیستم‌های خورشیدی گرمایی، PCMها می‌توانند به‌عنوان بخشی از مخازن ذخیره‌سازی گرما به کار روند. این مخازن انرژی خورشیدی جذب‌شده در طول روز را به‌صورت گرمای نهان در PCM ذخیره می‌کنند. یکی از مزایای استفاده از PCM در این سیستم‌ها، توانایی آن‌ها در ذخیره مقادیر زیادی انرژی در حجم کوچک است. همچنین، دمای تغییر فاز این مواد می‌تواند به‌گونه‌ای انتخاب شود که با شرایط عملکرد سیستم خورشیدی تطبیق داشته باشد و بازدهی کلی را افزایش دهد. این کاربرد، PCMها را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه سیستم‌های انرژی پایدار و کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی تبدیل کرده است [۲۶].

۵-۵- قطعات الکترونیکی

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در مدیریت گرما قطعات الکترونیکی نقش بسیار مؤثری ایفا می‌کنند. این مواد با ذخیره‌سازی و آزادسازی گرما از طریق تغییر فاز، می‌توانند دمای قطعات را در محدوده‌ای ایمن نگه دارند. در دستگاه‌های الکترونیکی، تولید گرمای زیاد می‌تواند به کاهش کارایی، افزایش استهلاک، و کاهش عمر مفید قطعات منجر شود. PCMها با جذب گرمای تولیدشده توسط قطعات در هنگام عملکرد و ذخیره آن به‌صورت گرمای نهان، از افزایش بیش از حد دما جلوگیری می‌کنند. سپس این گرما را به‌آرامی در شرایطی که سیستم خاموش است یا در حالت کم‌کار قرار دارد، آزاد می‌کنند. این کاربردها به بهبود پایداری گرمایی، کاهش نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده فعال، و در نهایت افزایش عمر مفید قطعات الکترونیکی کمک می‌کنند [۳۲].

۵-۶- خودروها

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در صنعت خودروسازی کاربردهای متعددی دارند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استفاده در پیش‌گرمایش موتور، مدیریت گرما و بهبود کارایی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی است. این مواد به دلیل توانایی ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در دماهای مشخص و آزادسازی آن در زمان‌های بعدی، در بهبود عملکرد خودروها به‌ویژه در شرایط آب و هوایی سرد و گرم بسیار مؤثر هستند. در فصول سرد سال، پیش‌گرمایش موتور با استفاده از PCMها می‌تواند زمان لازم برای گرم‌شدن موتور را کاهش دهد. این مواد با جذب گرما از سیستم‌های دیگر یا محیط اطراف و ذخیره‌سازی آن در طول شب یا قبل از شروع به کار خودرو، به‌محض روشن‌شدن موتور، گرما را آزاد کرده و دمای موتور را سریع‌تر به سطح مطلوب می‌رسانند. همچنین، PCMها در سیستم‌های تهویه و سرمایش خودروها نیز کاربرد دارند. با ذخیره‌سازی گرمای اضافی از داخل کابین در ساعات گرم روز، این مواد می‌توانند در ساعات بعدی که دما کاهش می‌یابد، گرما را آزاد کرده و

در نتیجه به حفظ دمای مطلوب داخلی کمک کنند [۳۴].

۶- مدلسازی و شبیه‌سازی سیستم‌های حاوی PCM

مدلسازی و شبیه‌سازی سیستم‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به‌منظور تحلیل رفتار گرمایی این مواد و بررسی کارایی آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در انواع کاربردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فرآیند می‌تواند شامل مدل‌های عددی پیچیده‌ای باشد که در آن‌ها ویژگی‌های فیزیکی و ترموفیزیکی PCMها شبیه‌سازی می‌شود تا عملکرد سیستم‌ها در شرایط مختلف دما و زمان پیش‌بینی شود. مدلسازی PCMها معمولاً به‌صورت ترکیبی از مدل‌های انتقال گرما (همرفت، رسانش، تابش) و تغییر فاز مواد انجام می‌شود. این مدل‌ها به‌طور دقیق نحوه ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی در طی فرآیند تغییر فاز (ذوب و انجماد) را نشان می‌دهند. یکی از رایج‌ترین روش‌های مدلسازی PCM، استفاده از معادلات انرژی و مدل‌های فاز تغییر یافته است که معمولاً برای تعیین دما و زمان تغییر فاز در هر نقطه از سیستم کاربرد دارند. که در نهایت به بهینه‌سازی طراحی‌ها و افزایش کارایی سیستم‌ها کمک می‌کند [۳۵، ۳۶].

۶-۱- مدل‌سازی انتقال گرما در سیستم‌های PCM

مدلسازی انتقال گرما در سیستم‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) نقش اساسی در تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها در ذخیره‌سازی انرژی دارد. فرآیند انتقال گرما در سیستم‌های PCM معمولاً شامل سه مکانیسم اصلی است: رسانش گرمایی، همرفت و تابش. این سه مکانیسم باید به‌طور همزمان در مدل‌های عددی در نظر گرفته شوند تا رفتار دقیق سیستم‌های PCM در طی فرآیند تغییر فاز شبیه‌سازی شود. برای مدلسازی انتقال گرما در PCMها، ابتدا معادله انرژی برای هر بخش از سیستم باید حل شود. معادله انرژی به‌طور عمومی به‌صورت معادله‌ای در نظر گرفته می‌شود که تغییرات دما، زمان و موقعیت را به‌طور همزمان در نظر می‌گیرد. این معادله معمولاً به‌صورت معادله انتقال گرما گذرا از نوع گرادیان دما است که باید برای مواد PCM و در شرایط مختلف دما و زمان حل شود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای مدلسازی انتقال گرما در سیستم‌های PCM، استفاده از روش‌های عددی مانند روش‌های اجزاء محدود (FEM)، حجم محدود (FVM) یا تفاضل محدود (FDM) است [۳۷].

۶-۲- شبیه‌سازی عملکرد PCMها در شرایط محیطی مختلف

شبیه‌سازی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده (PCMها) در شرایط محیطی مختلف یکی از ابزارهای ضروری برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر PCM است. این شبیه‌سازی‌ها به ما این امکان را می‌دهند که رفتار PCMها را در دماهای مختلف، تحت شرایط اقلیمی گوناگون و در طی زمان‌های متفاوت تغییر فاز بررسی کنیم. در شبیه‌سازی عملکرد PCMها، ابتدا باید ویژگی‌های ترموفیزیکی مواد مورد توجه قرار گیرد. این ویژگی‌ها معمولاً از داده‌های تجربی به‌دست می‌آیند و برای شبیه‌سازی در شرایط مختلف محیطی از آن‌ها استفاده می‌شود. دمای محیط یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است

روش اجزاء محدود (FEM) یا روش تفاضلات محدود (FDM) حل می‌شوند [۴۴،۴۵،۴۶].

یکی از چالش‌های عمده در مدل‌سازی عددی PCMها، مدل‌سازی دقیق تغییر فاز است. در این فرایند، ماده در دمای خاصی از مایع به جامد تبدیل می‌شود یا بالعکس، که معمولاً با استفاده از تابع گرمای نهان به‌طور عددی مدل‌سازی می‌شود. این تغییر فاز، همزمان با انتقال گرما، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی روی راندمان سیستم تأثیر بگذارد. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر، گاهی از مدل‌های ترکیبی استفاده می‌شود که علاوه بر مدل‌سازی گرمایی، فرآیندهای مکانیکی، نظیر انبساط گرمایی یا انقباض مواد در طی تغییر فاز، را نیز در نظر می‌گیرند [۴۷]. در نهایت، مدل‌سازی‌های عددی و شبیه‌سازی‌های گرمایی ابزاری قدرتمند برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد PCMها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند و می‌توانند به‌طور مؤثری در تحقیقات و توسعه این مواد کاربردی استفاده شوند.

۷- نتایج و تحلیل‌ها

در بخش نتایج و تحلیل‌ها، بررسی داده‌های بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های PCMها (مواد تغییر فاز دهنده) صورت می‌گیرد. هدف اصلی این بخش ارائه تحلیل دقیق از عملکرد مواد تغییر فاز در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف این مواد بر کارایی سیستم است. این نتایج به‌طور کلی شامل ارزیابی تغییرات دما، زمان ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی، راندمان سیستم‌های گرمایی، و میزان پایداری و ظرفیت ذخیره‌سازی PCMها در شرایط مختلف می‌باشند. [۴۸،۴۹]

در ابتدا، تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به وضوح نشان دهد که هر نوع PCM تحت شرایط مختلف چگونه به تغییرات دما واکنش نشان می‌دهد و چطور انرژی را ذخیره و آزاد می‌کند. برای مثال، در سیستم‌های خورشیدی، PCMها می‌توانند انرژی گرمایی را در طول روز ذخیره کرده و در طول شب آن را آزاد کنند. این تحلیل به ما کمک می‌کند که تأثیر تغییر فاز مواد مختلف را بر زمان‌های ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی بهتر درک کنیم [۵۰]. به علاوه، از آنجایی که فرآیند تغییر فاز PCMها می‌تواند به‌صورت غیرخطی و با تأخیر زمانی اتفاق بیفتد، مدل‌سازی دقیق این رفتار در سیستم‌ها به بهینه‌سازی عملکرد کمک می‌کند. [۵۱،۵۲]

در شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های گرمایی می‌توانند داده‌هایی چون میزان انتقال گرما، تغییرات دما در طول زمان، و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی انرژی PCMها را برای کاربردهای مختلف ارائه دهند. با مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های تجربی، می‌توان صحت مدل‌های عددی را بررسی کرده و به‌طور مداوم این مدل‌ها را برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر و بهتر بهبود بخشید. تحلیل‌های حاصل از این داده‌ها همچنین می‌تواند به ما دیدگاه‌هایی درباره پایداری گرمایی و شیمیایی PCMها بدهد. به‌طور مثال، ممکن است PCMهایی که در دماهای بالاتر به کار می‌روند در معرض تجزیه یا تغییرات فیزیکی باشند که بر عملکرد آنها در بلندمدت تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، ارزیابی رفتار طولانی‌مدت و پایداری PCMها در طی چرخه‌های متعدد ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی برای کاربردهای عملی ضروری است. علاوه بر این، مقایسه انواع مختلف PCMها از نظر

که تأثیر زیادی بر عملکرد PCM دارد، زیرا تغییرات دمای محیط می‌تواند زمان و کارایی فرآیند تغییر فاز را تغییر دهد. برای شبیه‌سازی، معمولاً از روش‌های عددی مانند اجزاء محدود (FEM) یا حجم محدود (FVM) برای مدل‌سازی انتقال گرما و تغییر فاز استفاده می‌شود [۳۹،۳۸].

در این شبیه‌سازی‌ها، باید تغییرات دما به‌صورت دقیق در طی زمان محاسبه شود تا بتوان روند تغییر فاز PCM را مدل‌سازی کرد. همچنین در شرایط محیطی متغیر، عواملی چون دمای روز و شب، تغییرات فصلی، رطوبت هوا، یا حتی تابش خورشید نیز تأثیر زیادی بر عملکرد PCMها خواهند داشت. این مدل‌ها می‌توانند به طراحان کمک کنند تا بهترین نوع PCM را برای استفاده در کاربردهای خاص انتخاب کنند [۴۰].

۶-۳- مدل‌سازی‌های تجربی

مدل‌سازی‌های تجربی برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده (PCMها) به عنوان یکی از روش‌های کاربردی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شناخته می‌شود. در این نوع مدل‌سازی، به‌جای استفاده از مدل‌های تحلیلی پیچیده یا شبیه‌سازی‌های عددی، از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها و مشاهدات در شرایط واقعی برای شبیه‌سازی رفتار PCMها استفاده می‌شود. مدل‌سازی تجربی بر اساس اندازه‌گیری‌های دقیق و آزمون‌های میدانی استوار است. این مدل‌ها معمولاً به‌دنبال تعیین پارامترهایی مانند دمای تغییر فاز، ظرفیت گرمای نهان، زمان ذوب و انجماد، و ویژگی‌های گرمایی مواد تحت شرایط مختلف هستند. داده‌های تجربی می‌توانند از آزمایش‌های مستقیم روی نمونه‌های PCM در آزمایشگاه یا از مطالعات عملی در شرایط محیطی واقعی به‌دست آیند. این مدل‌ها معمولاً به‌صورت روابط ریاضی و تجربی یا نمودارهای تجربی ارائه می‌شوند که رفتار PCMها را در شرایط خاص دما، فشار و رطوبت نشان می‌دهند [۴۱،۴۲].

یکی از مزایای اصلی مدل‌سازی‌های تجربی این است که می‌توانند به‌طور مستقیم به مقایسه عملکرد مواد مختلف در شرایط واقعی پرداخته و به‌دنبال شناسایی مواد با بهترین عملکرد برای کاربردهای خاص باشند [۴۳].

با این حال، مدل‌سازی تجربی معمولاً محدود به شرایط خاصی است که در آن آزمایش‌ها انجام شده‌اند و ممکن است قادر به پیش‌بینی عملکرد PCM در شرایط خارج از آن شرایط نباشد؛ بنابراین، این روش اغلب به‌عنوان مکمل شبیه‌سازی‌های عددی یا مدل‌های تحلیلی استفاده می‌شود تا یک تحلیل جامع‌تر از رفتار PCMها تحت شرایط مختلف به‌دست آید.

۶-۴- مدل‌سازی‌های عددی و شبیه‌سازی‌های گرمایی

با استفاده از روش‌های عددی مانند حل معادلات دیفرانسیل و استفاده از الگوریتم‌های مختلف، می‌توان فرایندهای پیچیده‌ای همچون ذوب و انجماد PCMها را در شبیه‌سازی‌ها به دقت مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی عددی در سیستم‌های PCM معمولاً به صورت شبیه‌سازی‌های گرمایی انجام می‌شود که در آن رفتار دمایی و تغییرات گرمایی مواد در طول زمان تحلیل می‌شود. برای این کار، معادلات انتقال گرما و تغییر فاز در PCMها به‌وسیله روش‌های عددی مانند

عملکرد در شرایط مختلف محیطی، همچون دماهای بالا و پایین، رطوبت، و فشار می‌تواند نشان دهد که کدام نوع PCM در کاربردهای خاص مؤثرتر است. برای مثال، PCMهای آلی مانند پارافین‌ها ممکن است در دماهای پایین‌تر عملکرد بهتری داشته باشند، در حالی که مواد غیرآلی مانند هیدرات‌های نمکی ممکن است برای دماهای بالا مناسب‌تر باشند. [۵۳، ۵۴].

در نهایت، تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از تست‌ها و شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از PCMها کمک کرده و راه‌حلی برای بهبود راندمان، کاهش هزینه‌ها، و افزایش طول عمر این سیستم‌ها ارائه دهد.

۷-۱- چالش‌های استفاده از PCMها

چالش‌ها و موانع استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCMها) می‌توانند تأثیر زیادی بر کاربرد و توسعه آن‌ها در صنایع مختلف داشته باشند. یکی از اصلی‌ترین مشکلات در استفاده از PCMها، مسائل مربوط به تولید و ذخیره‌سازی این مواد است. فرآیند تولید PCMها ممکن است پیچیده و پرهزینه باشد و همچنین، ذخیره‌سازی این مواد به دلیل نیاز به شرایط خاص دمایی و محیطی ممکن است دشوار باشد. پایداری دمایی و حفظ خواص PCMها در طول زمان یکی دیگر از مشکلات است. این مواد ممکن است در شرایط مختلف تحت تأثیر تغییرات دمایی و عوامل محیطی قرار گیرند و عملکرد آن‌ها به مرور زمان کاهش یابد. حفظ خواص ترموفیزیکی PCMها در طول چرخه‌های دمایی مختلف از جمله چالش‌هایی است که نیاز به تحقیق و بهبود فناوری‌های موجود در این زمینه دارد [۵۵، ۵۶، ۵۷].

۸- نتیجه‌گیری

مواد تغییر فاز دهنده PCMها به‌عنوان یک فناوری نوآورانه در ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، پتانسیل زیادی برای بهبود کارایی سیستم‌های انرژی دارند. این مواد می‌توانند با ذخیره‌سازی و بازیابی انرژی در هنگام نیاز، کمک زیادی به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها در بسیاری از کاربردها مانند ساختمان‌ها، سیستم‌های خورشیدی، و خودروها بکنند. با این حال، برای استفاده گسترده‌تر از PCMها، چالش‌هایی همچون هزینه‌های تولید، مسائل پایداری و طراحی، و محدودیت‌های عملکردی آن‌ها باید برطرف شود. بهبود خواص PCMها از موضوعات مهمی است که باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. همچنین، مدل‌سازی دقیق‌تر و شبیه‌سازی‌های محیطی می‌توانند به بهبود درک ما از نحوه عملکرد PCMها در شرایط واقعی کمک کنند. در نهایت، با توسعه و بهبود فناوری‌های تولید و استفاده از PCMها، این مواد می‌توانند نقش کلیدی در بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و ارتقاء کارایی سیستم‌های مختلف ایفا کنند.

مواد تغییر فاز دهنده (PCMها) تأثیرات زیادی در بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی دارند. با ذخیره‌سازی انرژی در هنگام تغییر فاز و آزادسازی آن در زمان نیاز، PCMها به تنظیم دما و کاهش نوسانات گرمایی کمک می‌کنند. این ویژگی باعث بهبود بهره‌وری انرژی در کاربردهای مختلف مانند ساختمان‌ها، سیستم‌های خورشیدی، خودروها و قطعات الکترونیکی می‌شود. استفاده از PCMها منجر به

کاهش نیاز به انرژی‌های اولیه مانند برق برای سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی می‌شود، که موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. همچنین PCM با چگالی ذخیره گرمایی بالاتر منجر به کاهش اندازه یا حجم مخزن ذخیره، علاوه بر طیف وسیعی از دمای عملیاتی انعطاف پذیر می‌شود. با این حال، کاربرد تجاری در مقیاس بزرگ PCMهای گرمای نهان هنوز محدود است و دوام آن کمتر از مواد گرمایی محسوس است. بنابراین هرچند PCMها پتانسیل بالایی برای استفاده در ذخیره‌سازی انرژی دارند، اما همچنان نیاز به تحقیقات بیشتری برای بهبود انتخاب و عملکرد آن‌ها وجود دارد. تحقیقات باید بر روی انتخاب مواد با ویژگی‌های مناسب، بهبود پایداری گرمایی و شیمیایی PCMها، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و کاهش هزینه‌ها متمرکز شوند. همچنین، نیاز به مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری برای پیش‌بینی عملکرد PCMها در شرایط مختلف محیطی و عملیاتی وجود دارد تا بتوان به صورت بهینه از آن‌ها در کاربردهای مختلف استفاده کرد.

در نهایت از آنجایی که تمرکز این مقاله بیشتر بر جنبه‌های ترموفیزیکی و مکانیکی مواد بوده و سایر ابعاد همچون تحلیل‌های اقتصادی، ارزیابی چرخه عمر، اثرات زیست‌محیطی و الزامات سیاست‌گذاری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با رویکردهای مرور نظام‌مند و فراتحلیل کمی، به مقایسه‌ی دقیق‌تر نتایج مطالعات بپردازند و در کنار بررسی‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و صنعتی‌سازی در مقیاس واقعی را نیز مدنظر قرار دهند.

۹- مراجع

- [1] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews. 2009 Feb 1;13(2):318-45.
- [2] Liang J, Zhang X, Ji J. Hygroscopic phase change composite material—a review. Journal of Energy Storage. 2021 Apr 1;36:102395..
- [3] Garg HP, Mullick SC, Bhargava VK. Solar thermal energy storage. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [4] Arslan M, Ghaffar E, Sohail A, Pallonetto F, Waseem M. Comprehensive examination of thermal energy storage through advanced phase change material integration for optimized building energy management and thermal comfort. Energy and Built Environment. 2025 Mar 27.
- [5] Mao S, Liu Y, Wu X, Zhang L, Chen J, Zhou T. Thermal energy storage performance, application and challenge of phase change materials: A review. Energy Storage and Saving. 2025 Jul 1.
- [6] Solé A, Miró L, Barreneche C, Martorell I, Cabeza LF. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013 Oct 1;26:425-36.
- [7] Farid M, Khudhair AM, Razack SA, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. Thermal energy storage with phase change materials. 2021 Jul 25:4-23..
- [8] Pielichowska K, Pielichowski K. Phase change nanomaterials for thermal energy storage. nanotechnology for energy sustainability. 2017 Feb 1:459-84.
- [9] Saffari Tabalvandani M, Piselli C, Gracia Cuesta AD, Pisello AL, Cotana F, Cabeza LF. Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM).

- applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019 Feb 1;129:491-523.
- [29] Fan LW, Fang X, Wang X, Zeng Y, Xiao YQ, Yu ZT, Xu X, Hu YC, Cen KF. Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials. *Applied Energy*. 2013 Oct 1;110:163-72.
- [30] Liu C, Rao Z, Zhao J, Huo Y, Li Y. Review on nanoencapsulated phase change materials: preparation, characterization and heat transfer enhancement. *Nano Energy*. 2015 Apr 1;13:814-26.
- [31] Elsarrag E. Occupant productivity and office indoor environment quality: a review of the literature.
- [32] Zhou D, Zhao CY, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied energy*. 2012 Apr 1;92:593-605.
- [۳۳] رحمانیان کوشکی، حسین، رحمانیان، سعید. بررسی عددی مدیریت گرمایی باتری لیتیوم- یون با استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده و فوم فلزی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۳؛ ۵۴(۳): ۱۳۲-۱۳۳
- [34] Marin P, Saffari M, de Gracia A, Zhu X, Farid MM, Cabeza LF, Ushak S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*. 2016 Oct 1;129:274-83.
- [35] Qiu Z, Ma X, Li P, Zhao X, Wright A. Micro-encapsulated phase change material (MPCM) slurries: Characterization and building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Sep 1;77:246-62.
- [36] Marin P, Saffari M, de Gracia A, Zhu X, Farid MM, Cabeza LF, Ushak S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*. 2016 Oct 1;129:274-83.
- [37] Oro E, De Gracia A, Castell A, Farid MM, Cabeza LF. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*. 2012 Nov 1;99:513-33.
- [38] Yu K, Liu Y, Yang Y. Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: Preparation, characterization and effect on the thermophysical properties. *Applied Energy*. 2021 Jun 15;292:116845.
- [39] Yang H, Zou Y, Cui H. Advancements and challenges in enhancing salt hydrate phase change materials for building energy storage: Optimization methodologies and mechanisms. *National Science Open*. 2024 May 1;3(3):20230056.
- [40] Togun H, Sultan HS, Mohammed HI, Sadeq AM, Biswas N, Hasan HA, Homod RZ, Abdulkadhim AH, Yaseen ZM, Talebizadehsardari P. A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: different hybrid techniques for the enhancement. *Journal of Energy Storage*. 2024 Feb 15;79:109840.
- [41] Umair MM, Zhang Y, Iqbal K, Zhang S, Tang B. Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage-A review. *Applied energy*. 2019 Feb 1;235:846-73.
- [42] Mohamed SA, Al-Sulaiman FA, Ibrahim NI, Zahir MH, Al-Ahmed A, Saidur R, Yılbaş BS, Sahin AZ. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Apr 1;70:1072-89.
- [43] Pielichowski K, Pielichowska K. Thermal analysis of polymeric materials. *Methods and Developments*. 2022;1.
- [44] Wang Q, Wu C, Wang X, Sun S, Cui D, Pan S, Sheng H. A review of eutectic salts as phase change energy storage materials in the context of concentrated solar power. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023 May 15;205:123904.
- [45] Lindon JC, Tranter GE, Koppenaal D. *Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry*. Academic Press; 2016 Sep 22.
- [10] Kumar R, Thakur AK, Gupta LR, Gehlot A, Sikarwar VS. Advances in phase changing materials in solar thermal energy storage and applications.
- [11] Cabeza LF, Tay NS, editors. *High-temperature thermal storage systems using phase change materials*. Academic Press; 2017 Nov 27.
- [12] Mehling H, Cabeza LF. Heat and cold storage with PCM. *Heat and mass transfer*. 2008 Aug 15;15:11-55.
- [13] Sharshir SW, Joseph A, Elsharkawy M, Hamada MA, Kandeal AW, Elkadeem MR, Thakur AK, Ma Y, Moustapha ME, Rashad M, Arıcı M. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. *Energy and buildings*. 2023 Apr 15;285:112908.
- [14] Khudhair AM, Farid M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Thermal energy storage with phase change materials*. 2021 Jul 25:162-75.
- [15] Dincer I, Rosen MA. *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons; 2011 Jun 24.
- [16] Farid M, Khudhair AM, Razack SA, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Thermal energy storage with phase change materials*. 2021 Jul 25:4-23.
- [17] Mitran RA, Ioniță S, Lincu D, Berger D, Matei C. A review of composite phase change materials based on porous silica nanomaterials for latent heat storage applications. *Molecules*. 2021 Jan 5;26(1):241.
- [18] Zhang C, Yang Y, Liu X, Mao M, Li K, Li Q, Zhang G, Wang C. Mobile energy storage technologies for boosting carbon neutrality. *The Innovation*. 2023 Nov 13;4(6).
- [19] Ali HM, Rehman TU, Arıcı M, Said Z, Duraković B, Mohammed HI, Kumar R, Rathod MK, Buyukdaglı O, Teggat M. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2024 Jan 1;100:101109.
- [۲۰] بروجردیان، اشکان، نعمتی، حسین، سلاجی، احسان. روش نوینی جهت بررسی آزمایشگاهی ذوب نامقید پارافین بر اساس تکنیک پردازش تصویر و مقایسه با نتایج مدلسازی عددی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۳؛ ۵۴(۱): ۱۲۱-۱۲۹.
- [21] Elalfy DA, Gouda E, Kotb MF, Bureš V, Sedhom BE. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2024 Jul 1;54:101482.
- [22] De Gracia A, Cabeza LF. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*. 2015 Sep 15;103:414-9.
- [23] Wiltshire KH, Brodte EM, Wilson A, Lemke P. The Expedition PS102 of the research Vessel POLARSTERN to the Atlantic Ocean in 2016.
- [24] Li C, Li Q, Ding Y. Investigation on the thermal performance of a high temperature packed bed thermal energy storage system containing carbonate salt based composite phase change materials. *Applied Energy*. 2019 Aug 1;247:374-88.
- [25] Wei G, Wang G, Xu C, Ju X, Xing L, Du X, Yang Y. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Jan 1;81:1771-86.
- [26] Elias CN, Stathopoulos VN. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia*. 2019 Mar 1;161:385-94.
- [27] Lin Y, Jia Y, Alva G, Fang G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2018 Feb 1;82:2730-42.
- [28] Nazir H, Batool M, Osorio FJ, Isaza-Ruiz M, Xu X, Vignarooban K, Phelan P, Kannan AM. Recent developments in phase change materials for energy storage

- [46] Lawag RA, Ali HM. Phase change materials for thermal management and energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*. 2022 Nov 25;55:105602.
- [47] Ling Z, Zhang Z, Shi G, Fang X, Wang L, Gao X, Fang Y, Xu T, Wang S, Liu X. Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Mar 1;31:427-38.
- [48] Junaid MF, ur Rehman Z, Čekon M, Čurpek J, Farooq R, Cui H, Khan I. Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications. *Energy and Buildings*. 2021 Dec 1;252:111443.
- [۴۹] ادیبی طوسی، سید سینا، گشایشی، حمیدرضا، زحمتکش، ایمان، نجاتی، وحید. ارزیابی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با نانو مواد تغییر فازدهنده هیبریدی تحت میدان مغناطیسی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۲؛ ۵۳(۱): ۱۳-۲۲.
- [50] Samykano M. Role of phase change materials in thermal energy storage: Potential, recent progress and technical challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Aug 1;52:102234.
- [51] Asgharian H, Baniasadi E. A review on modeling and simulation of solar energy storage systems based on phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2019 Feb 1;21:186-201.
- [52] Song M, Niu F, Mao N, Hu Y, Deng S. Review on building energy performance improvement using phase change materials. *Energy and Buildings*. 2018 Jan 1;158:776-93.
- [53] Salunkhe PB, Shembekar PS. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012 Oct 1;16(8):5603-16.
- [54] Di Bari R, Horn R, Nienborg B, Klinker F, Kieseritzky E, Pawelz F. The environmental potential of phase change materials in building applications. A multiple case investigation based on life cycle assessment and building simulation. *Energies*. 2020 Jun 12;13(12):3045.
- [55] Bianco N, Fragnito A, Iasiello M, Mauro GM, Mongibello L. Multi-objective optimization of a phase change material-based shell-and-tube heat exchanger for cold thermal energy storage: experiments and numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2022 Oct 1;215:119047.
- [56] Joulin A, Younsi Z, Zalewski L, Lassue S, Rousse DR, Cavrot JP. Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release. *Applied Energy*. 2011 Jul 1;88(7):2454-62.
- [57] Zukowski M. Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications. *Energy Conversion and Management*. 2007 Jan 1;48(1):155-65.