



مروری بر فناوری های خنک سازی غیرفعال پنل فتوولتائیک (۲۰۲۰-۲۰۲۵): پیشرفت ها در مواد تغییر فاز دهنده

محمد خلیلی^۱، *، آرین عسگری^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

* اراک، صندوق پستی 38156-8-8349، پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: m-khalili@araku.ac.ir

چکیده

اتکای طولانی مدت بشر به سوخت های فسیلی و رشد سریع تقاضای انرژی، جهان را با بحران جدی مواجه ساخته و گذار فوری به منابع تجدیدپذیر برای کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی ضروری است. انرژی خورشیدی به دلیل پویایی و مقیاس پذیری جایگاهی ویژه یافته است. با این حال، افزایش دمای کاری ماژول های فتوولتائیک موجب افت بازده و کاهش عمر آن ها می شود. در این راستا، خنک سازی غیرفعال با PCM رویکردی نویدبخش است. پژوهش حاضر با جستجوی سیستماتیک در پایگاه های معتبر (نظیر ScienceDirect و IEEE) طی سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ انجام شد. پس از غربالگری، ۷۶ منبع شامل مقالات مروری و پژوهشی در حوزه هایی مانند پایداری سازی شکل و میکروکپسول سازی تحلیل و ۱۶ مطالعه شاخص برای مقایسه کمی انتخاب گردید. تمرکز این مرور بر نوع PCM، روش های یکپارچه سازی آن ها و میزان تأثیر بر کاهش دما و افزایش کارایی سامانه های فتوولتائیک بوده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از کامپوزیت های با رسانایی حرارتی بالا، ترکیب PCM با ساختارهایی نظیر پره ها یا ترموسیفون ها و طراحی های چند محفظه ای، عملکرد حرارتی را بهبود می بخشد؛ هر چند چالش هایی مانند نشت مواد و ملاحظات اقتصادی همچنان مطرح است و نیازمند توجه در توسعه های آتی این فناوری ها هستند.

کلیدواژه ها: فتوولتائیک، خنک سازی غیرفعال، مواد تغییر فاز دهنده PCM، بهینه سازی حرارتی، انرژی خورشیدی.

A review of passive cooling technologies for PV panels (2020-2025): Advances in phase change materials

Mohammad Khalili¹, *, Aryan Asgari²

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- B.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-8-8349, Arak, Iran, m-khalili@araku.ac.ir

Received: 13 October 2025 Accepted: 14 July 2026

Abstract

The long-term reliance of humanity on fossil fuels, along with the rapid growth in energy demand, has placed the world in a serious crisis, making an immediate transition to renewable energy sources essential to mitigate the impacts of climate change. Solar energy has gained a prominent position due to its dynamism and scalability. However, the increase in the operating temperature of photovoltaic modules leads to efficiency degradation and a reduction in their service life. In this context, passive cooling using PCM is considered a promising approach. The present study was conducted through a systematic search of reputable databases (such as ScienceDirect and IEEE) over the period from 2020 to 2025. Following the screening process, 76 sources, including review and research articles in areas such as shape stabilization and microencapsulation, were analyzed, and 16 representative studies were selected for quantitative comparison. This review focuses on the type of PCM, their integration methods, and their impact on temperature reduction and efficiency enhancement of photovoltaic systems. The results indicate that the use of high-thermal-conductivity composites, the integration of PCM with structures such as fins or thermosyphons, and multi-compartment designs improve thermal performance, although challenges such as material leakage and economic considerations remain and require attention in future developments of these technologies.

Keywords: Photovoltaic, Passive cooling, Phase change materials PCM, Thermal optimization, Solar energy.

1- مقدمه

بحران انرژی جهانی که ناشی از رشد تقاضا و اتکای دیرینه به سوخت‌های فسیلی است، به دلیل پیامدهای زیست‌محیطی شدید؛ مانند تغییرات اقلیمی، نیازمند یک گذار فوری به منابع تجدیدپذیر است [1]. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل مقیاس‌پذیری و پویایی، به‌عنوان یک راهکار کلیدی در راهبردهای جهانی کربن‌زدایی مطرح شده است [2، 3]. با این حال، دستیابی به حداکثر بازده و تحقق آینده‌ای پایدار، تنها از طریق توسعه و اتکا به فناوری‌های نوین خورشیدی امکان‌پذیر خواهد بود.

امروزه، بیشترین سهم پیشرفت در حوزه انرژی‌های خورشیدی، به لطف گسترش فناوری فتوولتائیک است که به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی تبدیل مستقیم نور خورشید به برق، نقشی اساسی ایفا می‌کند [4]. محبوبیت و پذیرش گسترده پنل‌های فتوولتائیک، ریشه در مزایای قابل توجه آن‌ها دارد. این پنل‌ها در زمان بهره‌برداری و با کمترین اثرات جانبی زیست‌محیطی، الکتریسته تولید می‌کنند، فاقد هزینه‌های جاری سوخت هستند و به حداقل نگهداری نیاز دارند [5].

استفاده از فناوری فتوولتائیک همچنان با چالش‌هایی در مسیر توسعه و مقیاس‌پذیری مواجه است. در میان این موانع، افزایش دمای پنل فتوولتائیک تحت تابش خورشید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های فنی مطرح می‌شود. تأثیر مخرب افزایش دمای کاری بر ماژول‌های فتوولتائیک دو بُعد اصلی دارد. نخست، کاهش بازده الکتریکی با افزایش دمای کاری ماژول و دوم، تنش حرارتی مداوم که فرایند تخریب مواد سازنده ماژول را تسریع کرده و از طول عمر عملیاتی سامانه می‌کاهد [6]. در نتیجه خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک، علاوه بر افزایش طول عمر پنل‌ها، بازده الکتریکی را نیز افزایش می‌دهد. راهکارهای مدیریت حرارتی برای پنل‌های فتوولتائیک که یکی از موضوعات اصلی پژوهش‌های گسترده است، به‌طور کلی به دودسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [7].

خنک‌سازی فعال با استفاده از انرژی خارجی و تجهیزات مکانیکی، گرما را با کارایی بالا دفع می‌کند، اما مصرف انرژی و پیچیدگی عملیاتی، کاربرد آن را به سامانه‌هایی با بار حرارتی شدید محدود می‌سازد. در مقابل، خنک‌سازی غیرفعال بدون نیاز به توان خارجی و با اتکا به پدیده‌های طبیعی مانند همرفت و تابش عمل می‌کند و به دلیل سادگی، هزینه پایین و قابلیت اطمینان بالا، راهبرد اصلی برای اکثر کاربردهای متداول است. با این حال، محدودیت اصلی روش‌های غیرفعال، کارایی پایین‌تر و وابستگی عملکردشان به شرایط محیطی است که ممکن است برای شرایط حرارتی شدید کافی نباشد.

در نهایت، انتخاب یک راهکار خنک‌سازی، وابسته به شرایط پنل فتوولتائیک است. اگرچه هر دو دسته روش‌های خنک‌سازی فعال و غیرفعال کارآمدی خود را به اثبات رسانده‌اند، اما نمی‌توان یک راهکار واحد را به‌عنوان بهترین گزینه مطلق معرفی نمود. در واقع، انتخاب فناوری بهینه به مجموعه‌ای از عوامل و محدودیت‌ها، از جمله ملاحظات اقتصادی، الزامات طراحی سامانه و شرایط زیست‌محیطی، بستگی دارد. کارایی بالاتر خنک‌سازی که توسط سامانه‌های فعال ارائه می‌شود، باید در برابر سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های انرژی بهره‌برداری قابل توجه آن سنجیده شود. در مقابل، صرفه اقتصادی بالای

روش‌های غیرفعال با ظرفیت خنک‌سازی محدودتر آن‌ها ارزیابی می‌گردد [8-10].

پژوهش حاضر بر مرور تحلیلی و سیستماتیک راهکارهای خنک‌سازی غیرفعال فتوولتائیک با محوریت PCM³ متمرکز است. در این راستا، با پیش دقیق پایگاه‌های استنادی معتبر در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، آخرین پیشرفت‌ها در حوزه‌هایی نظیر پایدارسازی شکل و میکروکپسول‌سازی گردآوری شده است. وجه تمایز این مطالعه، عبور از توصیف صرف مکانیزم‌ها و ارائه یک مقایسه تطبیقی کمی میان پیکربندی‌های مختلف است. بدین منظور، با ارزیابی دقیق میزان کاهش دما و ارتقای بازده الکتریکی در مطالعات شاخص، کارآمدترین ترکیبات و راهکارهای عملیاتی برای جهت‌دهی به پژوهش‌های آتی شناسایی و معرفی شده‌اند.

2- روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور ارائه یک مرور تحلیلی جامع و به‌روز بر رویکردهای خنک‌سازی غیرفعال مبتنی بر PCM در سیستم‌های فتوولتائیک، یک جستجوی سیستماتیک در منابع معتبر علمی صورت گرفت. در این راستا، پایگاه‌های داده استنادی و ناشران معتبر بین‌المللی شامل ScienceDirect (Elsevier)، IEEE Xplore، Wiley Online Library، Springer Link و Google Scholar به‌عنوان مراجع اصلی برای شناسایی مقالات انتخاب شدند. اگرچه تمرکز اصلی پژوهش بر جدیدترین پیشرفت‌ها در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ معطوف بود، اما به‌منظور پوشش کامل مبانی نظری و سیر تحول فناوری، مقالات کلیدی و بنیادین سال‌های قبل نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

برای دستیابی به نتایج دقیق و مرتبط، استراتژی جستجو با استفاده از ترکیبی از کلیدواژه‌های عمومی و تخصصی به زبان انگلیسی تدوین شد. بر اساس محتوای منابع شناسایی‌شده، کلیدواژه‌های جستجو شامل موارد زیر بودند:

- مفاهیم اصلی: Phase Change Material (PCM), Passive Cooling, Thermal Management, Energy Efficiency
- فناوری‌های مرتبط: Photovoltaic/Thermal (PV/T), Building Integrated Photovoltaics (BIPV)
- مواد و روش‌های پیشرفته: Shape-stabilized PCM, Microencapsulation, Nanoparticles/Nanofluids, Eutectic Mixtures

در مرحله اولیه جستجو، حدود ۱۳۰ عنوان مقاله بر اساس کلیدواژه‌های تعریف‌شده استخراج گردید. در ادامه، فرایند غربالگری انجام شد؛ ابتدا موارد تکراری حذف شدند و سپس با پیش عنوان و چکیده، مقالاتی که تمرکز اصلی آن‌ها بر روش‌های خنک‌سازی فعال یا سایر روش‌های غیرفعال بود، کنار گذاشته شدند.

در نهایت، پس از ارزیابی دقیق متن کامل آثار باقی‌مانده، تعداد ۷۶ مقاله به‌عنوان مجموعه نهایی منابع انتخاب شدند. این مجموعه شامل ترکیبی از مقالات مروری جهت تبیین وضعیت موجود فناوری و مقالات پژوهشی با رویکردهای تجربی و عددی است که به طور تخصصی جنبه‌های مختلف سیستم‌های PV-PCM، شامل پایدارسازی شکل^۲، میکروکپسول‌سازی^۳، مخلوط‌های یوتکتیک^۴ و راهکارهای بهبود انتقال حرارت را پوشش می‌دهند.

³ Microencapsulation⁴ Eutectic Mixtures¹ Phase-change material² Shape-stabilization

3- خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از PCM

تغییر فاز در شرایط عملکرد عادی سامانه رخ می‌دهد [21-23]. علاوه بر این، کارایی یک PCM با گرمای نهان ذوب آن تعریف می‌شود. بالابودن این مقدار بسیار مطلوب است، چرا که به معنای چگالی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بیشتر است و این امکان را فراهم می‌کند تا جرم کمتری از ماده بتواند مقدار زیادی حرارت را با حداقل تغییر دما جذب کند [24]. در نهایت، سومین عامل کلیدی، رسانایی حرارتی است که نرخ انتقال حرارت را تعیین می‌کند. رسانایی بالا برای جذب سریع حرارت از پنل فتوولتائیک و سپس دفع آن به محیط، امری ضروری است. باین‌حال، چالش اصلی این است که PCM ذاتاً رسانایی حرارتی پایینی دارند؛ محدودیتی که مانع انتقال مؤثر حرارت شده و کاربردهای عملی را محدود می‌سازد [25]. مجموعه این سه خاصیت، کارایی نهایی یک PCM را در تنظیم دمای کاری پنل‌های فتوولتائیک از طریق جذب و آزادسازی حرارت طی چرخه‌های روزانه مشخص می‌سازد. هرچند این سه ویژگی، معیارهای اصلی برای انتخاب PCM به شمار می‌روند، در این مطالعه ظرفیت حرارتی ویژه نیز به‌عنوان شاخصی مکمل در مقایسه مواد مختلف در نظر گرفته شده است.

3-2- دسته‌بندی PCMها

PCMها بر اساس ترکیب شیمیایی و مشخصات حرارتی‌شان، عموماً به سه خانواده اصلی آلی^۱، معدنی^۲ و مخلوط‌های یوتکتیک طبقه‌بندی می‌شوند که همگی از مکانیزم تغییر فاز جامد به مایع برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بهره می‌برند [26، 27]. در بخش آتی، این دسته‌بندی‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

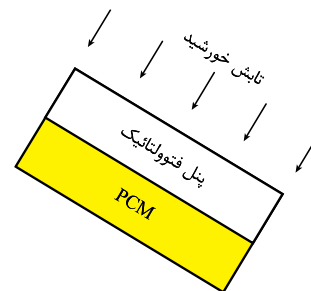
3-2-1- PCMهای آلی

PCMهای آلی نظیر پارافین‌ها و اسیدهای چرب، به دلیل قابلیت اطمینان و مجموعه‌ای از ویژگی‌های مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک دارند. از جمله مزایای آن‌ها می‌توان به پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، غیرسمی و غیر خوردنده بودن و همچنین هزینه پایین و دسترسی آسان اشاره کرد [28-33]. از منظر ترمودینامیکی نیز این مواد دارای دو مزیت کلیدی هستند: نخست، دچار ذوب متجانس می‌شوند، به این معنا که چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد، باعث جدایش فازی یا افت ظرفیت ذخیره‌سازی آن‌ها نمی‌شود. دوم، قابلیت خود هسته‌زایی^۳ مطلوبی دارند که از وقوع پدیده ابرسرمایش^۴ شدید در هنگام انجماد جلوگیری می‌کند [31].

PCMهای آلی با دو چالش عمده نیز روبرو هستند. محدودیت اصلی آن‌ها، رسانایی حرارتی ذاتاً پایین است که نرخ انتقال حرارت را کاهش داده و عملکرد سامانه را بدون به‌کارگیری راهکارهای بهبود، محدود می‌سازد. علاوه بر این، قابلیت اشتعال بسیاری از این مواد، ملاحظات ایمنی خاصی را ایجاد می‌کند [34-39]. در نتیجه، اگرچه این دسته از مواد تعادل مطلوبی از خواص را ارائه می‌دهند، اما پیاده‌سازی عملی آن‌ها اغلب مستلزم راهکارهای مهندسی برای غلبه بر چالش‌های انتقال حرارت ضعیف و خطرات ایمنی است.

تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که استفاده از مواد آلی در خنک‌سازی پنل فتوولتائیک مؤثر است و می‌تواند دمای سطح پنل‌ها را کاهش داده و بازده آن‌ها را افزایش دهد. به طور مثال، ال‌معار و همکاران [40] در یک بررسی تجربی، از محفظه‌هایی با قابلیت مونتاژ آسان و حاوی پارافین RT-42 برای

در میان روش‌های گوناگون خنک‌سازی غیرفعال، استفاده از PCM به‌عنوان یک راهکار بسیار امیدوارکننده برای کنترل دمای ماژول‌های فتوولتائیک مطرح شده است [11]. کارایی این روش ریشه در قابلیت منحصربه‌فرد این مواد در جذب مقادیر زیاد انرژی حرارتی دارد. این جذب در طی فرایند تغییر فاز از جامد به مایع رخ می‌دهد؛ فرایندی که در دمایی تقریباً ثابت اتفاق می‌افتد [12، 13]. در عمل، این روش مطابق شکل 1 با اتصال یک محفظه حاوی PCM به سطح پشتی ماژول فتوولتائیک محقق می‌شود. در ساعات اوج تابش خورشید، گرمای مازاد تولیدی در پنل، صرف ذوب شدن PCM می‌گردد. در این فرایند، انرژی حرارتی به‌صورت گرمای نهان ذوب در ماده ذخیره می‌شود و از افزایش بیش از حد دمای کاری پنل جلوگیری می‌کند. با کاهش دمای محیط در طول شب، PCM گرمای ذخیره‌شده را به محیط پیرامون پس می‌دهد و مجدداً به فاز جامد بازمی‌گردد تا برای چرخه حرارتی روز بعد آماده شود [14]. این روش با ایفای نقش به‌عنوان یک پایدارکننده حرارتی غیرفعال، نوسانات دمایی روزانه پنل را کنترل کرده و به بهبود بازده الکتریکی و افزایش طول عمر عملیاتی آن منجر می‌گردد [15].



شکل 1 نحوه به‌کارگیری PCM در خنک‌سازی غیرفعال پنل فتوولتائیک

پیاده‌سازی موفق یک سامانه خنک‌سازی مبتنی بر PCM، به دو عامل کلیدی بستگی دارد: اقلیم محلی و انتخاب دقیق ماده. برای عملکرد مؤثر سامانه، وجود نوسانات دمایی قابل‌توجه شبانه‌روزی الزامی است. دمای محیط در طول شب باید پایین‌تر از دمای تغییر فاز این ماده باشد تا ماده فرصت انجماد کامل و دفع گرمای نهان ذخیره‌شده را بیابد [16-18]. این الزام محیطی، انتخاب نقطه ذوب ماده را به مهم‌ترین عامل در فرایند طراحی تبدیل می‌کند. انتخاب یک PCM با نقطه ذوب مناسب، تضمین‌کننده یک چرخه روزانه کامل و قابل‌اتکا برای شارژ (ذوب) و تخلیه (انجماد) است که این امر برای بهینه‌سازی بازده کلی سامانه حیاتی است [18-20].

3-1- مشخصه‌های ترموفیزیکی PCM

عملکرد PCM در سامانه‌های حرارتی تحت تأثیر سه خاصیت ترموفیزیکی قرار دارد که مناسب بودن، ظرفیت ذخیره‌سازی و پاسخ‌دهی حرارتی آن را مشخص می‌کنند. معیار اصلی در انتخاب این مواد، دمای ذوب است که باید با دقت فراوان و متناسب با محدوده دمای کاری متداول ماژول فتوولتائیک و همچنین اقلیم محلی انتخاب گردد. برای اکثر کاربردها، این معیار، نقطه ذوبی در بازه ۲۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس را ایجاب می‌کند تا اطمینان حاصل شود که فرایند

³ Self nucleation

⁴ Supercooling

¹ Organic

² Inorganic

در بازه ۱۷ تا ۵۶ درجه سلسیوس تنظیم کرد. نکته قابل توجه آن بود که این ترکیبات، علی‌رغم کاهش دمای ذوب، همچنان ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بالایی (بین ۱۲۷/۲ تا ۲۰۴/۷ کیلوژول بر کیلوگرم) را برای کاربرد خنک‌سازی حفظ کردند که این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهای سفارشی ذخیره‌سازی انرژی در دماهای پایین مناسب می‌سازد.

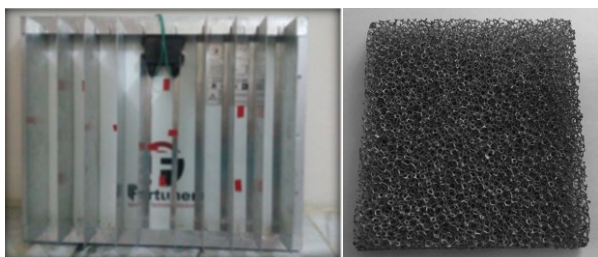
3-3- محدودیت‌ها و چالش‌های عملیاتی در استفاده از PCM

اگرچه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سامانه‌های فتوولتائیک یک راهبرد آینده‌دار برای مدیریت حرارتی محسوب می‌شود، اما پیاده‌سازی عملی این فناوری با چالش‌های عمده‌ای در حوزه مواد و بهره‌برداری روبرو است. خواص ذاتی بسیاری از PCM‌ها می‌تواند کارایی، قابلیت اطمینان و پایداری بلندمدت را تحت تأثیر قرار دهد. در این بخش، به بررسی عمیق موانع اصلی پرداخته می‌شود. این موانع شامل رسانایی حرارتی پایین، تغییر فاز ناقص، پایداری ماده، پدیده ابرسرمایش و خطر اشتعال‌پذیری هستند. علاوه بر این، راهکارهای نوینی که برای غلبه بر این چالش‌ها توسعه یافته‌اند نیز مورد بحث قرار خواهند گرفت.

3-3-1- رسانایی حرارتی ناکافی

یکی از محدودیت‌های مادی حیاتی که عملکرد بسیاری از مواد تغییرفازدهنده، به‌ویژه انواع آلی نظیر پارافین را تضعیف می‌کند، رسانایی حرارتی ذاتاً پایین آن‌هاست که مقداری در حدود 0/2 وات بر متر کلین دارد [45]. این ویژگی موجب گلوگاه حرارتی شده و جذب و دفع حرارت پل را محدود می‌کند. در تابش شدید، انتقال حرارت کند باعث گرادیان دمایی تند می‌شود؛ لایه مجاور پل داغ و ذوب می‌گردد، در حالی که بخش‌های دورتر جامد و منزوی مانده و در نتیجه ظرفیت مؤثر جذب حرارت سامانه کاهش می‌یابد [46].

برای غلبه بر چالش رسانایی حرارتی ناکافی PCM‌ها، راهکارهای مهندسی متعددی به کار گرفته می‌شود؛ از جمله این راهکارها می‌توان به تعبیه ساختارهای با رسانایی بالا، نظیر پره‌های فلزی^۱ یا ماتریس‌های متخلخل^۲ مانند فوم‌های فلزی و گرافیتی مطابق شکل 2 در توده PCM به‌منظور ایجاد مسیرهای کارآمدتر با رسانایی حرارتی بالا اشاره کرد [47-55]. به‌عنوان نمونه، مهدوی و همکاران [56] به‌صورت تجربی و عددی، تأثیر پیکربندی‌های مختلف پره (سوزنی، فنری و Y-شکل) را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیکربندی حاوی ۱۰۰ پره سوزنی، دمای ماژول را ۹ درجه کاهش داد، بازده را ۴٪ افزایش داد و ولتاژ مدار باز را ۰/۸ ولت بهبود بخشید.



شکل 2 استفاده از فوم فلزی و پره‌های فلزی در خنک‌سازی با PCM در راستای غلبه بر رسانایی حرارتی ناکافی [47، 48]

خنک‌سازی پل فتوولتائیک استفاده کردند. این روش، دمای متوسط ماژول را ۱۰ درجه سلسیوس کاهش داد و عملکرد توان آن را در مقایسه با نمونه مرجع به میزان ۵/۲۳٪ بهبود بخشید.

3-2-2- PCM‌های معدنی

PCM‌های معدنی که دسته اصلی دوم از PCM‌ها را تشکیل می‌دهند، عمدتاً شامل نمک‌های هیدراته و ترکیبات فلزی هستند. این مواد، به‌ویژه نمک‌های هیدراته (که جامداتی بلوری متشکل از نمک‌های معدنی و آب هستند)، به لحاظ نظری مزایای کلیدی متعددی نسبت به هم‌تا‌های آلی خود دارند [41]. از جمله این مزایا می‌توان به گرمای نهان ذوب بالاتر، رسانایی حرارتی به‌مراتب بیشتر (غالباً نزدیک به دوبرابر پارافین‌ها) و تغییرات حجمی کمتر در حین فرایند ذوب اشاره کرد [31]. با این وجود، علی‌رغم این خواص ترموفیزیکی، کاربرد عملی نمک‌های هیدراته به دلیل ذوب غیرمتجانس به‌شدت محدود شده است [41].

شواهد پژوهشی نشان می‌دهند که استفاده از مواد معدنی به‌عنوان ماده خنک‌کننده در پل فتوولتائیک می‌تواند انتقال حرارت را بهبود بخشد. به طور مثال، علی و همکاران [25] در یک مطالعه عددی، یک سامانه خنک‌کاری ترکیبی را با استفاده از نمک هیدراته معدنی (PCM-SP29EU) و خاک رس تبخیری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از PCM به‌تنهایی (در حالت PV/PCM)، دمای کاری سلول‌ها را ۹/۹ درجه سلسیوس کاهش داده و بازده را در مقایسه با یک پل متداول به میزان ۳٪ افزایش داد.

3-2-3- PCM‌های یوتکتیک

سومین دسته اصلی، PCM‌های یوتکتیک هستند. این مواد، مخلوط‌هایی مهندسی‌شده از دو یا چند جزء مانند ترکیبات آلی یا معدنی هستند که برای دستیابی به خواص حرارتی معین طراحی می‌شوند. ویژگی منحصربه‌فرد یک یوتکتیک، ذوب و انجماد آن در یک دمای واحد و کاملاً مشخص است؛ دمایی که از نقطه ذوب تمامی اجزای سازنده آن پایین‌تر است [41، 42]. مزیت اصلی این مواد در همین رفتار خاص نهفته است، چرا که امکان تنظیم دقیق دمای تغییر فاز را که با مواد تک‌جزئی قابل‌دستیابی نیست، فراهم می‌آورد [43]. خواص ترموفیزیکی یک مخلوط یوتکتیک، از جمله رسانایی حرارتی آن، به ترکیب و نسبت اجزای سازنده‌اش بستگی دارد و این خواص غالباً بهتر از PCM‌های آلی خالص هستند [41]. با این حال، این قابلیت سفارشی‌سازی معمولاً با یک چالش همراه است؛ مخلوط‌های یوتکتیک علی‌رغم ارائه نقطه ذوب دلخواه، اغلب دارای گرمای نهان ذوب به‌ازای واحد جرم کمتری نسبت به اجزای خالص خود هستند [43]. بنابراین، انتخاب آن‌ها یک تصمیم راهبردی است که در آن، نیاز به دمای کاری مشخص در مقابل هدف حداکثرسازی گرمای نهان ذوب، سنجیده می‌شود.

علی‌رغم چالش‌های مرتبط با PCM‌های یوتکتیک، این مواد به‌عنوان خنک‌کننده در پل‌های فتوولتائیک کاربرد دارند و نشان‌داده‌شده است که استفاده از آن‌ها می‌تواند دمای عملیاتی پل‌ها را کاهش داده و بازده انرژی آن‌ها را بهبود بخشد. به طور مثال، محققان در یک مطالعه مرتبط [44]، به تهیه و تحلیل PCM‌های یوتکتیک چندجزئی نوینی بر پایه اسیدهای چرب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تعداد اجزاء، می‌توان دمای ذوب را

² Porous matrix

¹ Metal fins

پدیده جدایش فازی که پیش‌تر به آن اشاره شد، با ته‌نشین شدن ذرات نمک سنگین‌تر از محلول، به تخریب تدریجی خواص ماده می‌انجامد و ظرفیت گرمای نهان و دمای انتقال فاز را در طول زمان تغییر می‌دهد [42، 43]. از جمله روش‌های متداول برای بهبود این پایداری چرخه‌ای بلندمدت، می‌توان به افزودن مواد غلیظ‌کننده برای افزایش گرانیوی یا ساخت کامپوزیت‌های پایدار شکل به‌منظور جلوگیری از جدایش فازی اشاره کرد [64].

3-3-3- پدیده ابرسرمایش و اشتعال‌پذیری

در نهایت، دو چالش کلیدی دیگر که مختص دسته‌های خاصی از مواد تغییر فازدهنده هستند، عبارت‌اند از پدیده ابرسرمایش و قابلیت اشتعال. ابرسرمایش به وضعیتی اطلاق می‌گردد که در آن، ماده تا دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد خود سرد می‌شود، بدون آنکه فرایند تبلور در آن آغاز گردد [65]. این عدم وقوع انجماد، مانع از آزادسازی گرمای نهان ذخیره‌شده می‌شود و در نتیجه، قابلیت اطمینان سامانه خنک‌سازی را به شدت تضعیف می‌کند [64، 66، 67]. برای مقابله با این مشکل، از عوامل هسته‌زا⁶ با ساختار شبکه‌ای مشابه با PCM استفاده می‌شود تا فرایند تبلور را تسریع کنند؛ در این میان، افزودنی‌های نانوساختار⁷ کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند [42]. در نقطه مقابل چالش تبلور در مواد معدنی، قابلیت اشتعال به‌عنوان یک ریسک ایمنی ذاتی در PCM‌های آلی نظیر پارافین مطرح است. این خطر به‌ویژه در کاربردهایی مانند فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان، اهمیت می‌یابد [36]. راهکار رایج، افزودن مواد کندسوزکننده⁸ است؛ اما این افزودنی‌ها غالباً خواص حرارتی ماده را تضعیف می‌کنند. برای نمونه در یک پژوهش، افزودن آمونیوم پلی‌فسفات ضمن کاهش نرخ آزادسازی حرارت و مهار دود، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی ماده را نیز به همراه داشت [42، 68].

3-4- راهبردهای تلفیق PCM با سامانه فتوولتائیک

در این بخش، تأثیر یکپارچه‌سازی PCM با پنل فتوولتائیک از طریق ارزیابی دو شاخص کلیدی کاهش دما و بهبود عملکرد الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحلیل با جمع‌بندی و تلفیق خلاصه‌ای از یافته‌های پژوهش‌های گوناگون در جدول ۱، تصویری جامع از کارایی این فناوری ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که مطالعات تجربی متعددی، این اثر خنک‌کنندگی را در شرایط اقلیمی متفاوت و با استفاده از انواع مختلف PCM کمی‌سازی کرده‌اند. تحلیل جامع پژوهش‌های انجام‌شده، نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی مواد تغییر فازدهنده با پنل فتوولتائیک یک راهبرد غیرفعال کارآمد برای مدیریت حرارتی پنل‌های فتوولتائیک است که به طور مداوم به بهبود عملکرد الکتریکی می‌انجامد. با این حال، مقیاس این بهبود به شدت متغیر است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که چشمگیرترین نتایج، نه از طریق کاربرد ساده PCM، بلکه از مسیر طراحی سامانه‌های پیشرفته کامپوزیتی و ترکیبی حاصل می‌شود. چالش اصلی که در موفق‌ترین مطالعات به آن پرداخته شده، رسانایی حرارتی ذاتاً پایین PCM است. در واقع، پیشرفت‌های اساسی در عملکرد، ارتباطی مستقیم با راهکارهای مهندسی مواد برای افزایش رسانایی حرارتی دارد.

یک راهبرد پیشرفته جهت بهبود خواص ماده تغییر فازدهنده که در سطح میکروسکوپی متمرکز است، استفاده از نانوسیالات¹ جهت بهبود کارایی PCM است. این رویکرد از طریق پراکنده ساختن نانوذرات با رسانایی بالا مانند نانولوله‌های کربنی²، گرافن³ و یا اکسیدهای فلزی در ماده پایه و ایجاد یک نانوکامپوزیت⁴ با خاصیت انتقال حرارت بهتر محقق می‌شود [18، 56]. به طور مثال، اورنگ‌زیب و همکاران [57] نشان دادند که افزودن تنها ۱٪ وزنی نانولوله کربنی به RT26 و روغن نارگیل، انتقال حرارت را به ترتیب تا ۶۴/۲۱٪ و ۳۳/۳۸٪ افزایش می‌دهد؛ بنابراین حتی مقادیر کم نانوذرات می‌توانند عملکرد حرارتی PCM را به‌طور چشمگیری بهبود دهند، هرچند میزان اثر به نوع ماده پایه وابسته است.

3-3-2- عدم تکمیل چرخه تغییر فاز و ناپایداری عملکرد

کارایی PCM به توانایی تغییر فاز آن بستگی دارد، اما رسانایی پایین و نوسانات محیطی می‌توانند باعث تغییر فاز ناقص و کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی شوند. این مشکل به‌ویژه در اوج تابش رخ می‌دهد، جایی که لایه مجاور پنل زودتر ذوب شده و پس از اتمام ظرفیت گرمای نهان، دمایش همچنان افزایش می‌یابد [17، 58]. چالش دیگر، انجماد ناقص است که در فاز دشارژ (شب) رخ می‌دهد. در صورتی که شرایط محیطی اجازه ندهد PCM تمام گرمای نهان ذخیره‌شده خود را دفع کرده و کاملاً به فاز جامد بازگردد، ظرفیت جذب حرارت آن برای روز آتی به شدت کاهش می‌یابد. تکرار این فرایند می‌تواند به افت تدریجی عملکرد سامانه در چرخه‌های متوالی منجر شود. در نتیجه، موفقیت کلی سامانه به یک تعادل دینامیکی میان جذب و دفع حرارت وابسته است [18، 59، 60]. عملکرد بلندمدت، پایداری و ایمنی عملیاتی یک سامانه خنک‌سازی، ارتباطی مستقیم با پایداری فیزیکی و شیمیایی ماده تغییر فازدهنده دارد. یکی از چالش‌های مداوم در استفاده از مواد تغییر فازدهنده، پدیده نشت در حین انتقال فاز جامد به مایع است که با انبساط حجمی ماده ارتباط دارد [28، 40]. برای جلوگیری مؤثر از این پدیده، PCM پایدار شکل⁵ با استفاده از دو راهبرد اصلی توسعه داده می‌شوند. راهبرد نخست، آغشته‌سازی ماده در یک محیط متخلخل است که در آن، ماتریس جامد به‌عنوان یک پشتیبان ساختاری از نشت جلوگیری می‌کند [41، 61، 62]. روش دوم که کاربرد گسترده‌تری دارد، کپسوله‌سازی⁶ است. در این روش، PCM به‌صورت فیزیکی درون یک پوسته محافظ نظیر میکروکپسول‌های پلیمری خنثی یا پوشش‌های مقاوم رزین اپوکسی قرار می‌گیرد. این پوسته، ماده را از برهم‌کنش با محیط اطراف مصون داشته و پایداری آن را تضمین می‌کند [15، 18، 63].

پایداری بلندمدت سامانه‌های خنک‌سازی، افزون بر ملاحظات مکانیکی، به چالش‌های شیمیایی نظیر خوردگی و تخریب ذاتی وابسته است. نمک‌های هیدراته علی‌رغم ظرفیت بالای ذخیره انرژی، خاصیت خوردندگی شدیدی بر فلزات متداول دارند و استفاده از مواد مقاوم به خوردگی یا پوشش‌های محافظ را ضروری می‌سازند که خود منجر به افزایش هزینه سامانه می‌شود [64].

پایداری ذاتی خود PCM نیز برای حفظ عملکرد در طول هزاران چرخه ذوب و انجماد، امری حیاتی است [17]. به‌عنوان نمونه، در PCM‌های معدنی،

⁶ Encapsulation
⁷ Nucleating agents.
⁸ Nanoparticles
⁹ Flame retardant

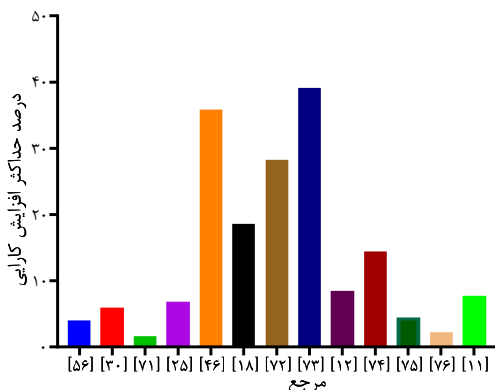
¹ Nanofluids
² Carbon nanotube
³ Graphene
⁴ Nanocomposite
⁵ Form stable

جدول 1 خلاصه‌ای از نتایج پژوهش‌ها در زمینه خنک‌سازی با PCM

مرجع	نوع PCM، دمای ذوب	روش	شرایط محیطی	یکپارچه‌سازی	کاهش دما (°C)	افزایش کارایی	توضیحات
[56]	RT35-HC (34-36)	تجربی+ عددی	آزمایشگاهی داخلی تابش 1000W/m^2 ، دمای محیط 30°C	PCM پشت پنل + پره سوزنی، فتری	9 (با 100 پره سوزنی)	4% بازده	پره سوزنی مؤثرترین و عملی‌ترین.
[69]	RT26 (26) RT35 (35) RT42 (42)	عددی	تابش 1200W/m^2 ، دمای محیط 20°C	لایه‌های PCM در پشت پنل	حفظ دمای 40	مدت خنک‌سازی 33%+	چیدمان صعودی دما ذوب را کند کرد.
[70]	RT28HC (25-29)	تجربی	اسپلیت، کرواسی. آوریل-جولای ۲۰۱۹	8 محفظه کوچک PCM	0/3 (27/2→27/5)	10/7% توان	چند محفظه بهتر از تک محفظه (2/5%).
[30]	پارافین (47)	تجربی	سامسون، ترکیه آزمایشگاهی. دمای محیط 21°C	PCM + لوله ترموسیفون ^۱ بسته	5/4 (49/5→54/9)	6% بازده	برتری سیستم PCM+ترموسیفون.
[71]	پارافین (ذکر نشده)	تجربی	تابش 1000W/m^2 ، دمای محیط $7/3^\circ\text{C}$	حفره 30 میلی‌متری پشت پنل	33/94 (سطح جلو)	1/63% بازده، 1/35W	زمان خنک‌شدن طولانی‌تر.
[25]	PCM-SP29EU (29-31)	عددی	اسوان، مصر. داده‌های هواشناسی ۲۰۲۳-۲۰۱۴	PCM + رس متخلخل تبخیری	9/9 با PCM، 15/2، ترکیبی، 17/2 رس تنها	3% (PCM)، 5/9% (ترکیبی)، 6/9% بازده و 8/8% توان (رس)	رس تنها بهترین خنک‌سازی؛ ترکیبی بهترین بازپراخت اقتصادی.
[46]	RT44 (43) CERROLOW (46)-117	عددی	امارات. دمای محیط 40°C ، تابش 1000W/m^2	MPCM + OPCM	59/6 اوج	35/8% میانگین	ضخامت بیشتر عملکرد بهتر.
[18]	RT35(35) RT42(42)	تجربی	آزمایشگاهی با شبیه‌ساز خورشیدی. تابش 1000W/m^2	PCM در فوم گرافیت + پوشش اپوکسی	32 (RT35) 27 (RT44)	18/5% (RT35)، 10/9% (RT44)	اپوکسی جلوی نشی را گرفت.
[72]	پارافین (52-45)	تجربی+ عددی	کالیکوت، هند. تابش 750W/m^2	PCM پشت پنل + پره موج‌دار	38/6 اوج، زاویه 0°	28/15% بازده، 1/58W	4 پره بهینه؛ در زاویه کم بهتر.
[73]	پارافین (48)	تجربی	جنوب عراق (سوق الشیوخ). آب‌وهوای گرم و خشک. تابش 1030W/m^2	PCM + براده آهن	8 میانگین	39% بازده، 33% توان	افزودن براده، عملکرد را ۲۳٪ بهبود داد.
[12]	PEG 1000 (33-39)	تجربی	کورتنول، هند. تابش حدود 950W/m^2	PCM + نانوذرات آلومینا/اسیلیکا ^۲	9 میانگین، 17/18%	8/1% بازده، 8/4% توان	آلومینا 20٪ وزنی بهترین.
[74]	RT42 (38-43)	تجربی	قنا، مصر. تابستان. تابش 809W/m^2 ، دمای محیط 39°C	PCM پشت پنل (1-3 سانتی‌متر) + زاویه 15 تا 30 درجه	نامشخص (تساویر حرارتی)	14/4% بازده، 15/8% توان	بهترین حالت: 3 سانتی‌متر و 30° .
[75]	PW/EG (41/5)	تجربی+ عددی	چنگدو، چین. ۸-۹ جولای ۲۰۲۲. دمای میانگین 33°C	PCM + لوله U شکل	5/86 اوج	4/53% بازده	برتری سیستم ترکیبی PCM/HP.
[40]	RT42 (42)	تجربی	شهر طهران، عربستان سعودی. تابش تا 1000W/m^2 ، دمای محیط $36/2^\circ\text{C}$ ، باد 24m/s	6 محفظه آلومینیومی کوچک	10 میانگین	5/23% توان	جایگزینی آسان PCM، RT28 ضعیف عمل کرد.
[76]	پارافین-تتراکان-	تجربی+ عددی	شیامن، چین. ۱۱ آوریل ۲۰۲۲	PCM + لوله حرارتی ضربانی	8/1 اوج	2/3% بازده	مؤثرتر از PCM تنها.

¹ Thermosiphon
² Aluminium silicate

[11]	CaCl ₂ ·6H ₂ O (31)	عددی	شبه‌سازی عددی. تابش 800W/m ² . دمای اولیه 25C°	PCM + پره مسی	16/11 (بهترین حالت، 11 پره)	7/70% بازده	تعداد پره مهم‌تر از طول.	گرافیت (44)



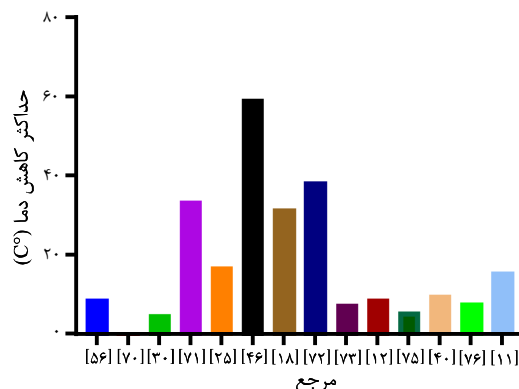
شکل 4 حداکثر افزایش کارایی گزارش شده در خنک‌سازی با PCM بر اساس مراجع گردآوری شده در جدول 1

بررسی عملکرد PCM در اقلیم‌های گوناگون نشان می‌دهد که کارایی این مواد به شدت به تطابق نقطه ذوب آن‌ها با شرایط دمایی محیط وابسته است [12, 56, 69]. بر اساس نتایج استخراج شده، انتخاب نقطه ذوب در محدوده‌ای حدود ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دمای محیط در گرم‌ترین ساعات روز، رویکردی بهینه برای حفظ پایداری حرارتی سامانه است [69]. بر این مبنا، در اقلیم‌های گرم، مطالعات به سمت استفاده از پارافین‌ها و ترکیبات آلی با نقطه ذوب بالا (معمولاً بالای ۳۷ درجه سانتی‌گراد) متمایل شده‌اند [30, 71, 72, 74]. این موضوع در پژوهشی در عربستان گزارش شده است [40]؛ جایی که PCM نوع RT-42 عملکرد قابل‌قبولی نشان داد، در حالی که RT-28 به دلیل ذوب زود هنگام، تأثیر کمتری بر بهبود سیستم داشت. همچنین در چین از پارافینی با بازه ذوب 37/5 تا 42/5 درجه سانتی‌گراد بهره برده شد [71] و در امارات ساختار چندلایه شامل RT44 مورد بررسی قرار گرفت [46]. در مصر نیز مطالعاتی بر روی سامانه هیبریدی متشکل از PCM و خاک رس متخلخل انجام شده است [25].

در مقابل، در اقلیم‌های معتدل و مدیترانه‌ای مانند کرواسی، پارافین‌هایی با نقطه ذوب پایین‌تر (در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) عملکرد مناسب‌تری ارائه می‌دهند؛ به‌طوری که کارایی مطلوب RT28HC در این شرایط گزارش شده است [70].

از منظر اقتصادی، هزینه اولیه PCM و محفظه‌های نگهدارنده همچنان به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی مطرح است [11, 56]. در این راستا، راهکارهایی نظیر استفاده از ضایعات صنعتی (مانند براده‌های آهن [73])، علاوه بر تقویت رسانایی که در بخش قبل به آن اشاره شد، موجب تعدیل هزینه‌های ساخت نیز می‌گردد. همچنین در پژوهش صورت گرفته در مصر [25]، گزارش شد که استفاده از سامانه خنک‌کننده PV/PCM می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را از حدود ۱۸ سال به 8/2 سال کاهش دهد. علاوه بر این، طراحی ماژولار پیشنهاد شده [70] که پیش‌تر مزایای فنی آن ذکر شد، از نظر اقتصادی نیز با

به‌عنوان نمونه، ایجاد کامپوزیت‌های پایدار شکل از طریق نفوذ دادن PCM به ماتریس‌های با رسانایی بالا نظیر فوم گرافیتی [18] یا ترکیب PCM آلی با لایه‌های PCM فلزی [46] به ترتیب منجر به کاهش دمای قابل‌توجه ۳۲ و ۵۹/۶ درجه سلسیوس شده است. به همین ترتیب، استفاده از افزودنی‌های کم‌هزینه مانند ضایعات براده آهن [73] و یکپارچه‌سازی پره‌های داخلی [72] یا ترموسیفون [30]، مسیرهای رسانشی مؤثری را برای تقویت انتقال حرارت فراهم می‌آورد. فراتر از بهبود خواص ماده، پیکربندی نوآورانه سامانه نیز نقشی حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد و بهره‌وری منابع ایفا کرده است. رویکردهای نوینی همچون استفاده از چندین محفظه PCM کوچک‌تر [70]، ضمن دستیابی به افزایش توان ۱۰/۷ درصدی، مصرف PCM را تا ۴۷٪ نسبت به ساختارهای تک محفظه‌ای سنتی کاهش داده است. به طور مشابه، لایه‌بندی راهبردی PCM‌های مختلف برای افزایش مدت‌زمان خنک‌کاری [69]، نشان‌دهنده حرکت به‌سوی طراحی‌های هوشمندانه‌تر است. علاوه بر این، پژوهش‌ها به چالش‌های اجرایی نیز می‌پردازند؛ از جمله می‌توان به جلوگیری موفق از نشت PCM با پوشش‌های اپوکسی [18]، شناسایی مسائل واقعی مانند خنک‌کاری غیریکنواخت در پنل‌های شیب‌دار [74] و اثبات توجه اقتصادی طرح‌ها با دوره‌های بازگشت سرمایه کوتاه اشاره کرد. به‌منظور ترسیم تصویر روشن‌تر از نتایج کلیدی پژوهش‌های جدول ۱، داده‌های مربوط به شاخص‌های اصلی عملکرد به‌صورت گرافیکی در شکل‌های 3 و 4 ارائه شده‌اند. در شکل 3، بیشینه کاهش دمای پنل حاصل از به‌کارگیری PCM در مطالعات مختلف نمایش داده شده است. به دنبال آن، شکل 4 بیشینه افزایش بازده الکتریکی گزارش شده در همان مراجع را نشان می‌دهد و امکان مقایسه بصری آن‌ها را فراهم می‌سازد.



شکل 3 حداکثر کاهش دمای گزارش شده در خنک‌سازی با PCM بر اساس مراجع گردآوری شده در جدول 1

اقتصادی پروژه است. هدف اصلی در این مقاله مروری، تحلیل و ارزیابی رویکرد بهره‌گیری از مواد تغییر فاز دهنده در خنک‌سازی غیرفعال پنل فتوولتائیک بود. در این راستا، عملکرد روش‌های گوناگون، با در نظر گرفتن تنوع در شرایط عملیاتی، مواد به کار رفته و متغیرهای محیطی، به صورت جامع مورد مطالعه قرار گرفت. میزان اثربخشی هر یک از این راهکارها در کاهش دمای پنل فتوولتائیک نیز به تفصیل گزارش شد. یافته‌های بنیادین حاصل از این پژوهش در زمینه خنک‌سازی با PCM را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- پژوهش‌ها نشان می‌دهند که خنک‌سازی غیرفعال با مواد تغییر فاز دهنده، راهبردی مؤثر برای کاهش دمای پنل‌های خورشیدی و در نتیجه، بهبود بازده الکتریکی و توان خروجی آن‌هاست.
- قابل توجه‌ترین بهبودها در عملکرد، در کاربردهای ساده PCM یافت نمی‌شوند، بلکه در سامانه‌های پیشرفته و ترکیبی به دست می‌آیند.
- پیکربندی‌های نوآورانه سامانه خنک‌سازی با PCM، از جمله طراحی‌های چند محفظه‌ای و لایه‌بندی، دارای پتانسیل چشمگیری جهت بهینه‌سازی استفاده از مواد و طولانی‌تر کردن دوره سرمایش مؤثر هستند.
- پژوهش‌های اخیر در حوزه خنک‌سازی با PCM، حاکی از تمرکز فزاینده بر چالش‌های اجرایی است. این مطالعات به موضوعاتی نظیر ارائه راه حل برای نشت PCM، شناسایی مشکلات عملکردی مانند خنک‌سازی غیریکنواخت و ارزیابی صرفه اقتصادی از طریق تحلیل بازگشت سرمایه و به کارگیری مواد کم هزینه می‌پردازند.
- یک همبستگی قوی بین بهبود عملکرد و جبران رسانایی حرارتی پایین PCM مشاهده می‌شود. راهکارهای مؤثر در این زمینه شامل توسعه کامپوزیت‌های بسیار رسانا و یکپارچه‌سازی مسیرهای ساختاری انتقال حرارت (مانند پره‌ها یا لوله‌های حرارتی) است.

4-1- چشم‌انداز آینده

در جمع‌بندی نهایی، باید اشاره کرد که ارزیابی و مقایسه شرایط اقتصادی، محیطی و عملکردی این روش‌ها به دلیل استاندارد نبودن معیارهای سنجش، کاری دشوار است. با استناد به نتایج به دست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که سامانه‌های مبتنی بر عملکرد ترکیبی که از ترکیب چند روش بهره می‌برند، بیشترین پتانسیل را در زمینه خنک‌سازی پنل فتوولتائیک خواهند داشت. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده، تأثیر بلندمدت فناوری‌های خنک‌سازی غیرفعال را در چرخه‌های زمانی طولانی به دقت مورد بررسی قرار دهند و دوام این سامانه‌ها را در شرایط گوناگون محیطی و عملیاتی تحلیل نمایند.

5- مراجع

- [1] F. Bayrak, A. Gönül, and M. Camci, Thermal management of photovoltaic panels using configurations of spray cooling systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 274, p. 126656, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126656.
- [2] J. Cousse, Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 145, p. 111107, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111107.
- [3] J. E. Carlisle, S. L. Kane, D. Solan, and J. C. Joe, Support for solar energy: Examining sense of place and utility-scale development in

کاهش قابل توجه مصرف آلومینیوم و ماده تغییر فاز دهنده، توجیه‌پذیری طرح را دوچندان می‌کند. از این‌رو، راهکارهایی به منظور کاهش هزینه و افزایش توجیه‌پذیری اقتصادی پیشنهاد شده است که جمع‌بندی آن‌ها برای دسته‌های مختلف PCM در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 مقایسه مزایا، معایب و کاربرد دسته‌های مختلف PCM

دسته PCM	نوع مواد	مزایا	معایب	کاربرد
آلی	پارافین، RT-42، RT-28، PEG-1000	پایدار، غیر خورنده، ارزان، بدون ابرسرمایش	رسانایی حرارتی پایین، اشتعال‌پذیری برخی انواع	کاربردهای خانگی و تجاری، اقلیم معتدل تا گرم
	نمک‌های هیدراته	گرمای نهان بالا، رسانایی بهتر از پارافین	خورندگی، جدایش فازی، ابرسرمایش	کاربردهای صنعتی با اولویت ذخیره انرژی بالا
	PCM + کامپوز براده آهن، PCM + گرافیت، منبسط‌شده PCM، نانو PCM	رسانایی بسیار بالا، پایداری شکل، پاسخ سریع	هزینه بالاتر، کاهش حجم PCM، وزن بیشتر	تابش خورشیدی شدید، سیستم‌های CPV
معدنی	PCM + لوله، حرارتی، PCM + خنک‌کننده، تبخیری	راندمان خنک‌کاری بالا، خنک‌سازی مداوم، بازگشت سرمایه بهتر	پپیچیدگی، نیاز به آب، وزن و حجم زیاد	نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ، مناطق گرم و خشک
	هیبریدی			

از منظر ارزیابی قابلیت صنعتی‌سازی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که راهکارهای ساده‌تر با قابلیت نصب بر روی پنل‌های موجود، شانس بیشتری برای تولید انبوه دارند [40، 74]. در این زمینه، محفظه‌های آلومینیومی ماژولار [40، 70] به دلیل سهولت تعویض و کامپوزیت‌های فرم‌پایدار [18، 75] به دلیل حذف خطر نشتی، پتانسیل صنعتی بالایی دارند. در مقابل، سیستم‌های پیچیده‌تر مانند لوله‌های حرارتی ضربانی [76] یا ساختارهای چندلایه پیشرفته [46]، اگرچه کارآمد هستند، اما به دلیل پیچیدگی ساخت و هزینه بالا، در کوتاه‌مدت برای ورود به بازار انبوه با چالش مواجه خواهند بود.

به‌طور کلی، یافته‌های این حوزه نشان می‌دهد که آینده خنک‌سازی غیرفعال پربازده برای فتوولتائیک‌ها، وابسته به توسعه سامانه‌های بهینه‌سازی شده و چندجزئی است. این سامانه‌ها ظرفیت گرمای نهان PCM را با مکانیزم‌های انتقال حرارت تقویت‌شده به صورت هم‌افزا ترکیب می‌کنند.

4- نتیجه‌گیری

یافته‌ها مؤید آن است که کاهش دمای عملکردی پنل فتوولتائیک، عاملی کلیدی در بهینه‌سازی راندمان و افزایش طول عمر مفید سامانه به شمار می‌رود. با این حال، هیچ راهکار خنک‌سازی واحدی وجود ندارد که برای تمام سامانه‌های فتوولتائیک بهینه باشد. در واقع، انتخاب روش خنک‌سازی مؤثر، تابعی از متغیرهای متعددی از جمله نوع فناوری سامانه، شرایط اقلیمی و ملاحظات

- [19] S. Preet, A review on the outlook of thermal management of photovoltaic panel using phase change material, *Energy and Climate Change*, Vol. 2, p. 100033, 2021, doi: 10.1016/j.egycc.2021.100033.
- [20] P. Tatsidjoudoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 327–349, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.025.
- [21] Y. Maleki, F. Pourfayaz, and M. Mehrpooya, Experimental study of a novel hybrid photovoltaic/thermal and thermoelectric generators system with dual phase change materials, *Renewable Energy*, Vol. 201, pp. 202–215, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.11.037.
- [22] G. Alva, L. Liu, X. Huang, and G. Fang, Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 693–706, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.021.
- [23] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-68557-9.
- [24] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, pp. 1597–1615, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- [25] M. G. Ali, H. Hassan, K. Thu, T. Miyazaki, and S. A. Nada, Energy and economic evaluation of thermal regulation of PV panels using a hybrid phase change material-evaporative clay cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 279, p. 127600, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127600.
- [26] A. Fallahi, G. Guldenotps, M. Tao, S. Granados-Focil, and S. Van Dessel, Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 1427–1441, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161.
- [27] Z. A. Al-Absi, M. H. Mohd Isa, and M. Ismail, Phase change materials (PCMs) and their optimum position in building walls, *Sustainability*, Vol. 12, No. 4, p. 1294, 2020, doi: 10.3390/su12041294.
- [28] V. A. Lebedev and A. E. Amer, Limitations of using phase change materials for thermal energy storage, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 378, No. 1, p. 012044, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012044.
- [29] M. Karkri, M. Lachheb, F. Albouchi, S. B. Nasrallah, and I. Krupa, Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 88, pp. 183–192, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.068.
- [30] E. Özbaş, A novel design of passive cooler for PV with PCM and two-phase closed thermosyphons, *Solar Energy*, Vol. 245, pp. 19–24, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.072.
- [31] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 2, pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [32] M. K. Rathod and J. Banerjee, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 246–258, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.022.
- [33] T. Khadiran, M. Z. Hussein, Z. Zainal, and R. Rusli, Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 916–928, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.081.
- [34] N. K. Sharma, M. K. Gaur, and C. S. Malvi, Application of phase change materials for cooling of solar photovoltaic panels: A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, pp. 6759–6765, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.127.
- [35] F. S. Javadi, H. S. C. Metselaar, and P. Ganesan, Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review, *Solar Energy*, Vol. 206, pp. 330–352, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.106.
- California, *Energy Research & Social Science*, Vol. 3, pp. 124–130, 2014, doi: 10.1016/j.erss.2014.07.006.
- [4] K. Xiang, H. Wu, C. Zhang, G. Chen, X. Jiang, and S. Xie, A dual-functional cooling system for enhancing photovoltaic thermal management and energy harvesting, *Solar Energy*, Vol. 299, p. 113711, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113711.
- [5] O. A. A. M. Ibrahim, S. A. Kadhim, and M. K. S. Al-Ghezi, Photovoltaic panels cooling technologies: Comprehensive review, *Archives of Thermodynamics*, Vol. 44, No. 4, pp. 581–617, 2023, doi: 10.24425/ather.2023.149720.
- [6] K. T. Alao, S. I. U. H. Gilani, K. Sopian, T. O. Alao, and Z. Aslam, A comprehensive review of radiative cooling technologies and their integration with Photovoltaic (PV) systems: Challenges, opportunities, and future directions, *Solar Energy*, Vol. 292, p. 113445, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113445.
- [7] S. Nižetić, A. M. Papadopoulos, and E. Giamia, Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques, *Energy Conversion and Management*, Vol. 149, pp. 334–354, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.022.
- [8] H. A. Kazem, A. A. Al-Waeli, M. T. Chaichan, K. Sopian, A. A. Ahmed, and W. I. W. N. Roslam, Enhancement of photovoltaic module performance using passive cooling (Fins): A comprehensive review, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 49, p. 103316, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103316.
- [9] M. Lebbi, K. Touafek, A. Benchatti, L. Boutina, A. Khelifa, M. T. Baissi, and S. Hassani, Energy performance improvement of a new hybrid PV/T Bi-fluid system using active cooling and self-cleaning: Experimental study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 182, p. 116033, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116033.
- [10] N. A. S. Elminshawy, A. Osama, A. M. Saif, and G. M. Tina, Thermo-electrical performance assessment of a partially submerged floating photovoltaic system, *Energy*, Vol. 246, p. 123444, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123444.
- [11] C. Zhang, N. Wang, H. Xu, Y. Fang, Q. Yang, and F. K. Talkhoncheh, Thermal management optimization of the photovoltaic cell by the phase change material combined with metal fins, *Energy*, Vol. 263, p. 125669, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125669.
- [12] M. A. Sheik, M. K. Aravindan, N. Beemkumar, P. K. Chaurasiya, R. Jilte, S. Shaik, and A. Afzal, Investigation on the thermal management of solar photo voltaic cells cooled by phase change material, *Journal of Energy Storage*, Vol. 52, p. 104914, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104914.
- [13] J. H. C. Hendricks and W. G. J. H. M. van Sark, Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 21, No. 4, pp. 620–630, 2013, doi: 10.1002/pip.1240.
- [14] H. Shakibi, S. Afzal, A. Shokri, and B. Sobhani, Utilization of a phase change material with metal foam for the performance improvement of the photovoltaic cells, *Journal of Energy Storage*, Vol. 51, p. 104466, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104466.
- [15] A. Poudhar and A. Ghosh, Phase change materials for energy efficiency in photovoltaic systems and buildings: A review, *Journal of Building Engineering*, Vol. 104, p. 112360, 2025, doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112360.
- [16] M. M. Islam, A. K. Pandey, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, Recent progresses and achievements in photovoltaic-phase change material technology: A review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, pp. 177–204, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.07.075.
- [17] S. Aneli, R. Arena, A. Gagliano, and V. A. Doria, Transient analysis of photovoltaic module integrated with phase change material (PCM), *Tecnica Italiana-Italian Journal of Engineering Science*, Vol. 64, No. 2–4, pp. 186–192, 2020, doi: 10.18280/ti-ijes.642-409.
- [18] S. Nishad, Z. Ahmad, and I. Krupa, Enhancement of photovoltaic module performance by thermal management using shape-stabilized PCM composites, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 273, p. 112948, 2024, doi: 10.1016/j.solmat.2024.112948.

- shell and tube thermal energy storage unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 176, p. 115409, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115409.
- [52] M. E. Nakhchi, M. Hatami, and M. Rahmati, A numerical study on the effects of nanoparticles and stair fins on performance improvement of phase change thermal energy storages, *Energy*, Vol. 215, p. 119112, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119112.
- [53] F. Xue, Y. Lu, X. Qi, J. Yang, and Y. Wang, Melamine foam-templated graphene nanoplatelet framework toward phase change materials with multiple energy conversion abilities, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 365, pp. 20–29, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.02.023.
- [54] B. Kurşun, M. Balta, and K. Karabulut, Exploring the impact of inner and middle channel geometries on the melting rate of PCM-metal foam composition in a triplex tube heat exchanger, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 51, p. 102621, 2024, doi: 10.1016/j.tsep.2024.102621.
- [55] J. Li, Z. R. Abdulghani, M. N. Alghamdi, K. Sharma, H. Niyas, H. Moria, and A. Arsalanloo, Effect of twisted fins on the melting performance of PCM in a latent heat thermal energy storage system in vertical and horizontal orientations: Energy and exergy analysis, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 219, p. 119489, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119489.
- [56] A. Mahdavi, M. Farhadi, M. Gorji-Bandpy, and A. Mahmoudi, A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 252, p. 123519, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123519.
- [57] M. Aurangzeb, F. Noor, A. Qamar, A. N. Shah, P. Kumam, Z. Shah, and M. Shutaywi, Investigation of enhancement in the thermal response of phase change materials through nano powders, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 29, p. 101654, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2021.101654.
- [58] Z. Fan, R. Gao, and S. Liu, Thermal conductivity enhancement and thermal saturation elimination designs of battery thermal management system for phase change materials based on triply periodic minimal surface, *Energy*, Vol. 259, p. 125091, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.125091.
- [59] M. C. Browne, B. Norton, and S. J. McCormack, Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, pp. 762–782, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.050.
- [60] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, J. Sarwar, and B. Norton, Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates, *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 264–276, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.02.003.
- [61] P. Zhang, Y. Cui, K. Zhang, S. Wu, D. Chen, and Y. Gao, Enhanced thermal storage capacity of paraffin/diatomite composite using oleophobic modification, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 279, p. 123211, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123211.
- [62] Y. Liu, J. Zheng, Y. Deng, F. Wu, and H. Wang, Effect of functional modification of porous medium on phase change behavior and heat storage characteristics of form-stable composite phase change materials: A critical review, *Journal of Energy Storage*, Vol. 44, p. 103637, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103637.
- [63] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, and M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 531–542, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
- [64] J. Sun, Q. Dong, H. Wu, L. Tong, L. Wang, Y. Grosu, and Y. Ding, Review of salt hydrates materials in phase change heat storage and thermochemical heat storage: mechanism, optimization method and application, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 278, p. 127291, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127291.
- [65] A. Safari, R. Saidur, F. A. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 905–919, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.272.
- [36] A. Shahsavari, M. Moradvandi, and N. Azimi, Experimental study on ultrasonic-assisted PCM cooling: A novel approach to photovoltaic panel performance improvement, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 265, p. 125642, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125642.
- [37] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1675–1695, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [38] Z. M. Png, X. Y. D. Soo, M. H. Chua, P. J. Ong, A. Suwardi, C. K. I. Tan, J. Xu, and Q. Zhu, Strategies to reduce the flammability of organic phase change materials: A review, *Solar Energy*, Vol. 231, pp. 115–128, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.11.057.
- [39] A. Mahdavi, M. A. Erfani Moghaddam, and A. Mahmoudi, Simultaneous charging and discharging of multi-tube heat storage systems using copper fins and Cu nanoparticles, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 27, p. 101343, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101343.
- [40] A. Al Miaari and H. M. Ali, Technical method in passive cooling for photovoltaic panels using phase change material, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 49, p. 103283, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103283.
- [41] B. M. Diaconu, M. Cruceru, and L. Angheliescu, A critical review on heat transfer enhancement techniques in latent heat storage systems based on phase change materials. Passive and active techniques, system designs and optimization, *Journal of Energy Storage*, Vol. 61, p. 106830, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106830.
- [42] M. Sun, T. Liu, H. Sha, M. Li, T. Liu, X. Wang, G. Chen, J. Wang, and D. Jiang, A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications, *Journal of Energy Storage*, Vol. 68, p. 107713, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107713.
- [43] P. Singh, R. K. Sharma, A. K. Ansu, R. Goyal, A. Sari, and V. V. Tyagi, A comprehensive review on development of eutectic organic phase change materials and their composites for low and medium range thermal energy storage applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 223, p. 110955, 2021, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110955.
- [44] H. Ke, Phase diagrams, eutectic mass ratios and thermal energy storage properties of multiple fatty acid eutectics as novel solid-liquid phase change materials for storage and retrieval of thermal energy, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 1319–1331, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.158.
- [45] G. Asefi, T. Ma, and R. Wang, Parametric investigation of photovoltaic-thermal systems integrated with porous phase change material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 201, p. 117727, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117727.
- [46] Y. Sheikh, M. Jasim, M. Qasim, A. Qaisieh, M. O. Hamdan, and F. Abed, Enhancing PV solar panel efficiency through integration with a passive Multi-layered PCMs cooling system: A numerical study, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 23, p. 100748, 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100748.
- [47] A. A. Farhan and D. J. Hasan, An experimental investigation to augment the efficiency of photovoltaic panels by using longitudinal fins, *Heat Transfer*, Vol. 50, No. 2, pp. 1748–1757, 2021, doi: 10.1002/htj.21951.
- [48] A. Bhattacharya, PCM-metal foam composite systems for solar energy storage, In *Solar Energy: Systems, Challenges, and Opportunities*, Singapore: Springer, pp. 207–234, 2019, doi: 10.1007/978-981-15-0675-8_11.
- [49] M. M. El Idi and M. Karkri, Heating and cooling conditions effects on the kinetic of phase change of PCM embedded in metal foam, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 21, p. 100716, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100716.
- [50] N. Prasanth, M. Sharma, R. N. Yadav, and P. Jain, Designing of latent heat thermal energy storage systems using metal porous structures for storing solar energy, *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, p. 101990, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101990.
- [51] H. Xu, N. Wang, C. Zhang, Z. Qu, and M. Cao, Optimization on the melting performance of triplex-layer PCMs in a horizontal finned

- [66] Y. Gao, Y. Zhao, X. Wang, M. Mohit, M. Xu, and A. P. Sasmito, Review of supercooling suppression of phase change materials based on nanoparticles, *Thermochimica Acta*, Vol. 745, p. 179936, 2025, doi: 10.1016/j.tca.2025.179936.
- [67] P. Dixit, V. J. Reddy, S. Parvate, A. Balwani, J. Singh, T. K. Maiti, A. Dasari, and S. Chattopadhyay, Salt hydrate phase change materials: Current state of art and the road ahead, *Journal of Energy Storage*, Vol. 51, p. 104360, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104360.
- [68] L. Li, G. Wang, and C. Guo, Influence of intumescent flame retardant on thermal and flame retardancy of eutectic mixed paraffin/polypropylene form-stable phase change materials, *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 428–434, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.103.
- [69] J. M. Mahdi, H. I. Mohammed, and P. Talebizadehsardari, A new approach for employing multiple PCMs in the passive thermal management of photovoltaic modules, *Solar Energy*, Vol. 222, pp. 160–174, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.044.
- [70] S. Nizetić, M. Jurčević, D. Čoko, and M. Arıcı, A novel and effective passive cooling strategy for photovoltaic panel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 145, p. 111164, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111164.
- [71] Z. Xu, Q. Kong, H. Qu, and C. Wang, Cooling characteristics of solar photovoltaic panels based on phase change materials, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 41, p. 102667, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2022.102667.
- [72] K. S. Unnikrishnan, K. Santhosh, and B. Rohinikumar, Experimental and numerical analysis of PV-PCM integrated with novel shaped corrugated fins, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 50, p. 102562, 2024, doi: 10.1016/j.tsep.2024.102562.
- [73] A. A. Ali, D. A. Lafta, S. W. Noori, F. Abdulmir, and F. L. Rashid, Innovative materials integrated with PCM for enhancing photovoltaic panel efficiency: An experimental investigation, *Journal of Energy Storage*, Vol. 102, p. 114258, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.114258.
- [74] H. M. Maghrabie, A. S. A. Mohamed, A. M. Fahmy, and A. A. Abdel Samee, Performance enhancement of PV panels using phase change material (PCM): An experimental implementation, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 42, p. 102741, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102741.
- [75] X. Zhou, X. Cao, Z. Leng, X. Zhou, and S. Liu, Study on the temperature control performance of photovoltaic module by a novel phase change material/heat pipe coupled thermal management system, *Journal of Energy Storage*, Vol. 64, p. 107200, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107200.
- [76] C. Yang, Q. Tao, J. Zheng, L. Qiu, Y. Chen, H. Yan, Y. Min, and Y. Fan, Thermal evaluation of photovoltaic panels combined pulsating heat pipe with phase change materials: Numerical study and experimental validation, *Energy and Buildings*, Vol. 303, p. 113806, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113806.