DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.1.9.6

سال هفتم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۹، ص ص ۷۴- ۸۳

فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۰۴

مروری بر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای خنک سازی پنل های خورشیدی

سحر غفاریان[۱*]، حسین یوسفی [۲]، محمد یاراحمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی سیتم های انرژی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش کنترل و دینامیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

* صندوق پستی تهران، ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

مطرح بودن مسائل توسعه پایدار و گرمایش جهانی و رو به اتمام بودن منابع سوخت های فسیلی،استفاده از انرژی خورشیدی را بیش از پیش حائز اهمیت کرده است. یکی از روش های استفاده از این منبع انرژی لایزال پنل های فتوولتائیک میباشند. یکی از ضعف های این پنل ها، کاهش بازده الکتریکی آن در اثر افزایش دمای آن میباشد، به طوری که با هر ۱ درجه ی کلوین افزایش دمای عملیاتی آن بازده ی این پنل ها ۰٫۵٪ کاهش پیدا میکند . روش‌های مختلفی برای کنترل کردن دمای این پنل ها وجود دارد که از میان آنها ذخیره سازی انرژی گرمایی ازطریق مواد تغییر فاز دهنده از اهمیت بیشتری برخوردار است. مواد تغییر فاز دهنده به ترکیبات آلی یا معدنی گفته می‌شود که قابلیت جذب و ذخیره‌سازی مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را از طریق گرمای نهان ذوب دارند. با توجه به کارایی و قابلیت بالای مواد تغییر فاز دهنده در ذخیره سازی انرژی، استفاده از این مواد در سال‌های اخیر در جهت خنک سازی پنل های فتوولتائیک مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان قرار گرفته است. در همین راستا مقاله ی حاضر به مطالعه مروری تحقیقات و مطالعات انجام شده در این زمینه نیز پرداخته است. با توجه به تاثیر قابل ملاحظه مواد تغییر فاز دهنده در کنترل دمای پنل های فتوولتائیک و به دنبال آن افزایش بازده حرارتی و الکتریکی این پنل ها، این مواد میتوانند راهکار مناسبی برای بهبود عملکرد پنل های فتوولتائیک نیز باشند.

کلیدواژگان: مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره‌سازی انرژی، پنل های فتوولتائیک،ساختمان

Review on using of Phase Change Material (PCM) for Photovoltaic (PV) cooling

Sahar Ghafarian[1*], Hossein Yousefi[2], Mohammad Yarahmadi[3]

1- MSc Student in Energy System Engineering, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

3- MSc Student in Mechanical Engineering, Department of Control and Dynamic, K.N Toosi University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran,Hosseinyousefi@ut.ac.ir

Abstract

In the light of importance of sustainabile development, global warming as well as mortality of Fossil fuel correspondingly using of solar energy be more and more important. Photovoltaiv panel is an application of solar energy resource. A weakness of Photovoltaic panel is efficiency reduction caused by temperature increase. The efficiency of photovoltaic panel decreases by approximately 0.5% per Kelvin. There are different methods to PV thermal regulation, which the use of Phase change material is more important one. Organic or inorganic compounds that are capable of absorbing and storing large amounts of heat energy are called phase-change materials. Due to the high efficiency and high capicity of phase-change materials in energy storage systems, the use of these materials in recent years has attracted many developed countries. Accordingly, this paper reviewd studies about using PCMs for PV thermal regulation. Considering to the considerable enhancement of the PV performance via application the PCM, the PCMs can be a appropriate solution for the PV performance enhancement.

Keywords: Phase Change Material, Energy Storage, Photovoltaic panel, Building

۱- مقدمه

محدودیت منابع سوخت های فسیلی و همچنین آسیب های زیست محیطی استفاده از این سوخت ها باعث شده تا تحقیق در مورد کاربرد های انرژی های تجدید پذیر در سال های اخیر از اهمیت ویژه ای برخوردار شوند. در این میان انرژی خورشیدی، با توجه به پتانسیل بالای بالقوه، اهمیت بیشتری پیدا می کند[۱].

از آنجا که ساختمان ها سهم عظیمی در مصرف انرژی الکتریکی دارند؛ باید با بررسی روش های دریافت انرژی خورشیدی در ساختمان ها به ارائه راهکارهای اجرایی جهت مدیریت انرژی خورشیدی در معماری بناها پرداخت .استفاده از سیستم های فتوولتائیک در ساختمان به صورت مستقل از شبکه و متصل به شبکه میتواند تمام یا بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز روزانه ساختمان را تامین کند. سیستم های فتوولتائیک را می توان در ساختمان ها یا بام ها، پنجره های سقفی، آتریوم ها، نماها، سایبان ها و غیره ادغام و یکپارچه کرد. [۲].

سیستم های فتوولتائیک نیز راهکاری برای استفاده از انرژی خورشید برای تولید الکتریسیته و همچنین در صورتی که پنل حرارتی فتوولتائیک استفاده شود برای تولید آب گرم و گرمایش در ساختمان ها می باشد. یکی از ضعف های این سیستم های فتوولتائیک این میباشد که با افزایش دمای عملیاتی آن بازده آن نیز کاهش میابد. به طوری که به ازای هر ۱ درجه ی کلوین افزایش دمای آن، بازده ان ۰,۵٪ کاهش میابد [۳]. روش های متفاوتی برای رفع این مشکل تا کنون ارائه شده است که احسان عبدی علمی و همکاران[۴] نیز به مرور روش های متفاوت خنک سازی پنل های فتوولتائیک نیز پرداخته اند. از طرفی،در جدول۱ به این روش ها و مزایا و معایب هر کدام از آنها پرداخته شده است.

جدول ۱. روش های خنک سازی پنل خورشیدی و معایب و مزایای آنها[۵]

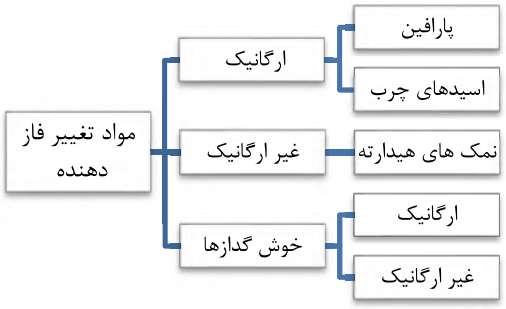
معایب	مزایا	روش خنک سازی
-انتقال حرات پایین -با تجمع گرد و غبار بر روی سطح پنل انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. -وابسته به سرعت و جهت باد -ضریب انقال حرارت و ذخیره حرارتی پایین هوا -جریان جرمی پایین -کاهش دمای محدود	-هزینه ی مناسب -نیاز به نگهداری ندارد -نصب آسان -عمر طولانی -بدون صدا -بدون مصرف الکتریسیته -انتقال حرارت منفعل	انتقال حرارت طبیعی هوا
- هزینه‌ی اولیه‌ی بالا -مصرف الکتریسیته بالا -هزینه ی نگهداری دارد -سر و صدا دارد - نصب مشکل نسبت به انتقال حرارت طبیعی هوا	-انتقال حرارت بیشتر نسبت به انتقال حرارت طبیعی -مستقل از جهت و سرعت باد -حجم بیشتری را در مقایسه با انتقال حرارت طبیعی میتواند خنک کند -کاهش دمای بیشتر در مقایسه با انتقال حرارت طبیعی	انتقال حرارت اجباری هوا
-هزینه‌ی سرمایه گزاری بالا - هزینه ی نگهداری بالا در مقایسه با انتقال حرارت اجباری هوا -مصرف الکتریسیته بیشتر در مقایسه با انتقال حرارت اجباری هوا - عمر کمتر در مقایسه با انتقال حرارت اجباری هوا به علت فرآیند خوردگی	-انتقال حرارت بیشتر در مقایسه با دو روش بالا -حجم بیشتر خنک سازی د رمقایسه با دو روش بالا -ذخیره حرارتی بیشتر و ضریب انتقال حرارتی بالاتر آب در مقایسه با هوا -کاهش دمای بیشتر	سرمایش از طریق گردش آب
-انتقال حرارت پایین -تجمع گرد و غبار -وابسته به جهت و سرعت باد	-هزینه ی کم -نصب آسان -انتقال حرارت منفعل	لوله های گرمایی
-انتقال حرارت وابسته به شرایط محیط -سیستم فعال -نیازمند به الکتریسیته -هزینه بالا -بدون ظرفیت ذخیره ی گرما -به یک حذف کننده‌ی گرما از طرف قسمت گرمتر نیاز دارد برای خنک‌سازی بهتر	-بدون صدا -ابعاد کوچک -نصب آسان -هزینه ی نگهداری پایین -انتقال حرارت از جسم جامد -بدون اجزای متحرک	ترمو الکتریک ها
-هزینه‌ی بالا -بعضی از مواد تغییر فاز دهنده سمی هستند. -بعضی از مواد تغییر فاز دهنده اشتعال پذیر هستند -بعضی از مواد تغییر فاز دهنده به شدت خاصیت خوردندگی دارند -دفع آنها پس از اتمام دوره‌ی عمر آنها ممکن است با مشکلاتی همراه باشد.	-بدون صدا -بدون هزینه ی نگهداری -بدون نیاز به نقل و انتقال حرارت -انتقال حرارت منفعل -انتقال حرارت بیشتر در مقایسه با انتقال حرارت اجباری آب و هوا -جذب بالاتر حرارت به علت گرمای نهان -حدف حرارت به صورت هم دما -بدون مصرف الکتریسیته	مواد تغییر فاز دهنده

باتوجه به جدول فوق و بررسی مزایا و معایب هر کدام از روش های مطرح شده برای کنترل دمای پنل های خورشیدی و مقایسه ی آنها با یکدیگر مواد تغییر فاز دهنده در این میان میتوانندراهکار مناسبی برای خنک سازی پنل های خورشیدی باشند.که در ادامه توضیحاتی در رابطه با ساختار این مواد و همچنین انواع آنها و سپس کاربرد انها برای کنترل دمای پنل های فتوولتائیک پرداخته شده است.

مواد تغییر فاز دهنده نیز موادی هستند که میتوانند با استفاده از گرمای نهان خود گرما در خود ذخیره کنند. این مواد گرما را دریافت میکنند و پس از رسیدن به نقطه‌ی ذوب یا نقطه‌ی گذار گرمای دریافت شده را صرف تغییر فاز می‌کنند و ذوب می‌شوند. پس از مدتی که اختلاف حرارت با منبع از بین رفته، این مواد برای به جامد تبدیل شدن گرمای دریافت شده را به محیط یا منبع گرمایی سابق که حالا غیر فعال است پس می‌دهند.

این مواد به سه دسته ی ارگانیک، غیر ارگانیک و خوش گداز ها تقسیم می‌شوند که در جدول زیر با جزئیات نشان داده شده اند:

جدول۲ . دسته بندی مواد تغییر فاز دهنده[۶]



در سالهای اخیر مطالعات زیادی در زمینه ی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده و از طرفی دیگر پنل های خورشیدی و راه وروش های کنترل دمای انها انجام شده است. که از این بین میتوان به مقالات مروری Brownوهمکاران [۷]دررابطه با کنترل دمای پنل های فتوولتائیک با ایتفاده از مواد تغییر فازدهنده در سال ۲۰۱۵، بررسی ترکیبی از لحاظ انرژی و محیط زیستیه بهبود عملکرد پنل های خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده از Royo و همکاران[۸] در سال۲۰۱۶، مواد تغییر فاز دهنده‌ی بهبود یافته توسط فناوری نانو برای استفاده ی بهتر در ساختمان ها Ma و همکاران[۹] در سال ۲۰۱۶ و مطالعات کاربردآب و مواد تغییر فاز دهنده برای بهبود عملکرد پنل های خورشیدی [۱۰]Preet اشاره کرد. از این رو باتوجه به اهمیت این تکنولوژی در کنترل دمای پنل های فتولتائیک و پژوهش های انجام شده تا کنون توسط محققان در سرتاسر جهان در ادامه سعی بر آن است که به مروری بر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در کنترل دمای پنل های فتوولتائیک مخصوص ساختمان پرداخته شود.

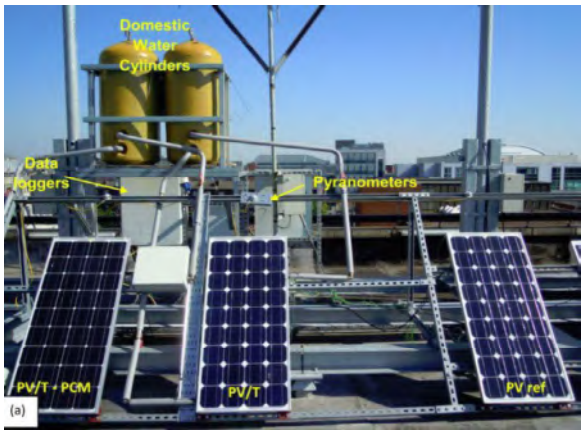
۲- خنک سازی پنل های فتوولتائیک با استفاده از موادتغییر فاز دهنده

۲-۱ تجربیات آزمایشگاهی

Parkو همکاران با مقایسه ی عملکرد الکتریکی یک پنل فتوولتائیک ساده و یک پنل فتوولتائیک مجهز به مواد تغییر فاز دهنده[۱]به صورت آزمایشگاهی نشان دادند که اضافه کردن مواد تغییر فاز دهنده به پنل باعث کاهش دمای پنل به اندازه ی ۵ سانتی‌گراد و متعاقبا افزایش بازده ی تولید الکتریسیته پنل به اندازه ی ۳/۱٪ می‌شود[۱۱].

Sharma و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز با در آزمایشگاه نشان دادند که با افزودن مواد تغییر فاز دهنده به پنل فتوولتائیک و پنل فتوولتائیک متمرکزکننده[۲]می‌توان دمای پنل فتوولتائیک متمرکز را به میزان ۵/۲ درجه ی سانتی‌گراد کاهش داد. همچنین آنها دریافتند که در پنل فتوولتائیک متمرکز کننده بهبود عملکرد بیشتری با افزودن مواد تغییر فاز دهنده به آن دیده می‌شود، چنانکه این افزایش در پنل فتوولتائیک معمولی به اندازه‌ی ۱۰٪ و برای پنل فتوولتائیک متمرکزکننده این مقدار به ۱۵,۹٪ می‌رسد[۱۲].

Browne وهمکاران مقایسه ای بین یک پنل فتوولتائیک حرارتی[۳]و یک پنل فتوولتائیک حرارتی که لوله های آب در پشت آن از میان مواد تغییر فاز دهنده عبور داده شده بودند[۴]انجام دادند. که این مقایسه در آب و هوای ساحلی شهر ایرلند نشان داد زمانی که مواد تغییر فاز دهنده به پشت پنل خورشیدی اضافه می‌شوند آب عبور داده شده از میان مواد تغییر فاز دهنده نسبت به زمانی که مواد تغییر فاز دهنده وجود ندارند تقریبا ۶ درجه ی سانتی گراد دمای بیشتری دارد. این در حالی است که بازده حرارتی پنل بهبود یافته بین ۲۰تا۲۵٪ می‌باشد علاوه بر این کاربرد مواد تغییر فاز دهنده مزیت دیگری نیز داشت که این پتانسیل را داشت آب گرم را در زمانی طولانی تر و در بازه ی زمانی بیشتر در دسترس قرار دهد[۱۴][۱۳].



شکل ۱.مقایسه ی پنل خورشیدی معمولی، حرارتی و حرارتی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده[۱۳]

سید رضا موسوی بایگی و همکاران[۱۵] نیز در کاری آزمایشگاهی به طراحی و ساخت یک سامانه خنک کننده برای پنل های فتوولتائیک با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتیجتا آزمایشات آنها نشان داد که با افزودن مواد

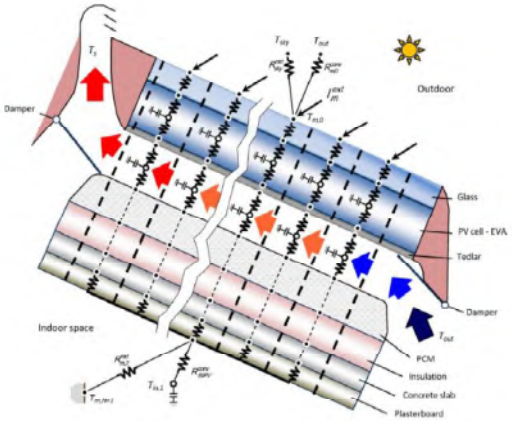
1.Photovoltaic-Phase Change Material (PV-PCM)
2.Concentrated Photovoltaic (CPV)
3.Photovoltaic Thermal (PVT)

4.Photovoltaic Thermal-Phase Change Material(PVT-PCM)

تغییر فاز دهنده به پنل فتوولتائیک بازده پنل فتوولتائیک ۸ درصد افزایش یافته است.

۲-۲ مدلسازی مواد تغییر فاز دهنده

Buonomono و همکاران با استفاده از مدلسازی پنل فتوولتائیک ساده و پنل فتوولتائیک حرارتی به کار رفته در سقف یک ساختمان نزدیک به انرژی صفر در نرم افزار متلب به تاثیر مواد تغییر فاز دهنده در افزایش بازده پنل خورشیدی در فصول متفاوت سال پرداختند. نتایج آنها حاکی از ان است که با اضافه کردن مواد تغییر فاز دهنده کارایی پنل فتوولتائیک ۴/۲٪ و کارایی پنل فتوولتائیک حرارتی به میزان ۸/۱٪ افزایش یافته است[۱۶].

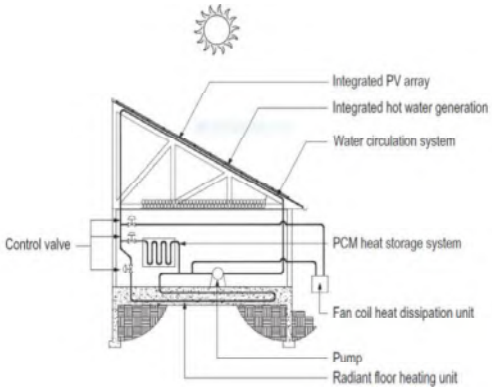


شکل۲. پنل فتوولتائیک حرارتی به کار رفته در ساختمان مدل شده توسط Buonomano [16]

Stropnik و Stritih به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی در نرم افزار ترانسیس به مقایسه‌ی عملکرد الکتریکی پنل فتوولتائیک معمولی و پنل فتوولتائیک مجهز به مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. انها به صورت تجربی دریافتند که در شرایط آب و هوایی اسلوانی دمای پنل فتوولتائیک دارای مواد تغییر فاز دهنده در بهترین حالت ۳۵ درجه سانتی گراد کمتر از پنل فتوولتائیک تنها می‌باشد. از طرفی نتایج شبیه سازی آنها بیانگر این است که تولید الکتریسیته پنل خورشیدی در یک دوره ی یک ساله با کاربرد مواد تغییر فاز دهنده به اندازه ی ۷/۳٪ افزایش پیدا می‌کند[۱۷].

۲-۳ بررسی اقتصادی

یکی از مشکلات مواد تغییر فاز دهنده هزینه بالای آن می‌باشد. در سال ۲۰۱۱، Hendricks و همکاران با در نظر گرفتن مواد تغییر فاز دهنده به عنوان یک انتخاب برای کنترل کردن دمای پنل خورشیدی به تحلیل اقتصادی آن پرداختند. آنها مشاهده کردند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده منجر به افزایش بازده ی پنل به اندازه ی ۱-۳٪ می‌شود، که این تغییر با در نظر گرفتن هزینه های اضافی مواد تغییر فاز دهنده از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. دوره ی برگشت سرمایه گزاری برای این تغییر طی آزمایشات آنها درسال ۲۰۱۱ بین ۱۰-۲۰ سال به دست آمد، که این دوره ی بازگشت قابل قبول نبود. آنها پیشنهاد دادند در صورتی که از مواد تغییر فاز دهنده به صورت دو منظوره برای گرمایش و سرمایش هوای داخل ساختمان یا کاربردهای دیگر استفاده شود، مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند گزینه ی مناسبی برای کاربرد در ساختمان و کنترل دما به همراه پنل های خورشیدی باشند[۱۸]. همانطور که Yin و همکاران در سال ۲۰۱۳ با کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در یک سیستم ترکیبی چند منظوره در ساختمان، نشان دادند که از مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند اقتصادی باشند. همانطور که در شکل* دیده می‌شود، سیستم پیشنهادی آنها در فصول سرد سال با ذخیره کردن گرمای موجود درآب عبور داده شده از پشت پنل توسط مواد تغییر فاز دهنده قادر است که در شب این گرما را به فضای داخل خانه منتقل کند و در فصول گرم سال مواد تغییر فاز دهنده با دریافت گرمای آب عبور داده شده از سقف و پشت پنل به کاهش بار سرمایشی در تابستان کمک میکند[۱۹].

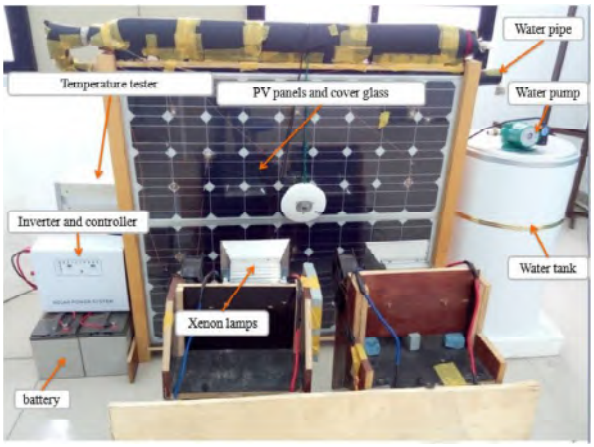


شکل۳. سیستم ترکیبی خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و پنل فتوولتائیک برای ساختمان[۱۹]

در تحقیقاتی دیگر توسط Plytaria و همکاران در سالهای ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ که کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در یک سیستم گرمایش ازکف به همراه تانک ذخیره ی حرارت و هیت پمپ در ترکیب با سه نوع کلکتور حرارتی ساده، پنل فتوولتائیک حرارتی و ترکیبی از هر دوی آنها با هم مقایسه گردید. نتایج به دست آمده ازتحقیقات آنها نشان داد که با استفاده مواد تغییر فاز دهنده برای گرمایش از کف ساختمان بار حرارتی ساختمان ۴۰٪ افزایش می‌یابد که دوره ی بازگشت سرمایه‌ی این سیستم پیشنهاد شده بین ۹ تا ۲۲ سال بسته به نوع سیستم می‌باشد. از طرفی به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده برای گرمایش از کف ساختمان هزینه ها را تا ۲۰٪ می‌تواند کاهش دهد[۲۱][۲۰].

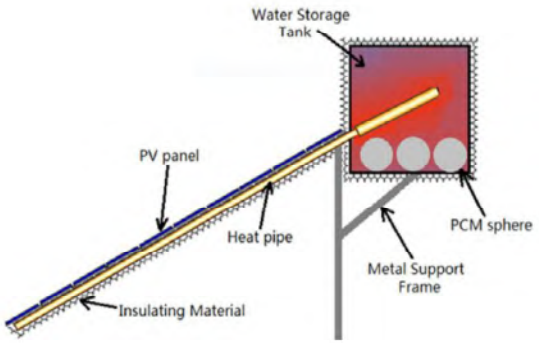
علاوه بر نوع کاربرد مواد تغییر فاز دهنده پارامترهای دیگری نیز بر اقتصادی بودن یا نبودن استفاد از این مواد تاثیر دارد که یکی از این پارامتر ها میزان دمای محیط و تابش خورشید می‌باشد. به گونه ای که در سال ۲۰۱۴، Hasan و همکاران طی بررسی های خود نشان دادند که کاربرد مواد تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای پنل در آب و هوای ایرلند، در صورتی که این کاربرد در آب و هوای پاکستان و مناطقی مانند آن می‌تواند مقرون به صرفه باشد. چرا که در پاکستان هزینه ای که برای این سیستم شد، تقریبا نصف سودی به دست آمده از آن بود[۲۲]. از طرفی Buonomano و همکاران طی یک آنالیز اقتصادی از کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در یک ساختمان نزدیک به انرژی صفر در آب و هوای مدیترانه ای نیز به این نتیجه رسیدند که استفاده از این مواد برای خنک سازی پنل های خورشیدی و همچنین پنل های خورشیدی حرارتی نیز از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر نمی‌باشد[۱۶].

Wang و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز به تجزیه و تحلیل بازده حرارتی و الکتریکی یک پنل خورشیدی بهبود یافته به لوله های حرارتی و مواد تغییر فاز دهنده[۱]مطابق با شکل زیر در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آزمایشات آنها نشان داد که در شرایطی با مقدار تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع و جریان آب ۶۰۰ لیتر بر ساعت بازده‌ی سیستم مد نظر آنها ۲۵/۵٪ بیشتر است در مقایسه با یک پنل فتوولتائیک حرارتی مخصوص به ساختمان. با این حال باید در نظر گرفت که طی برآورد اقتصادی آنها، هزینه‌ی سیستم جدید آنها۵۲٪ نیز بیشتربه دست آمد[۲۳].



شکل ۴.پنل فتوولتائیک حرارتی بهبود یافته با مواد تغییر فاز دهنده[۲۳]

Sweidanو همکاران در سال ۲۰۱۶ سیستمی را پیشنهاد دادند متشکل از پنل فتوولتائیک به همراه لوله های حرارتی و مواد تغییر فاز دهنده که میتوان سیستم پیشنهادی آنها را در شکل* مشاهده کرد. نتایج برآمده از آنالیز های اقتصادی آنان نشان داد که سیستم مذکور از لحاظ اقتصادی با دوره ی برگشت ۱۳/۷ سال قابل توجیه می‌باشد.[۲۴]



شکل ۵. شماتیکی از سیستم پیشنهادشده متشکل از پنل فتوولتادیک و لوله های حرارتی و تانک ذخیره ی دارای مواد تغییر فاز دهنده[۲۴]

پارامتر دیگر تاثیر گزار بر تحلیل اقتصادی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده برای خنک سازی پنل خورشیدی، قیمت فروش برق به شبکه می‌باشد. Japs و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند که در بازار برق اتحادیه اروپا به علت بالاتر بودن قیمت برق در قبل از ظهر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده اقتصادی می‌باشد در صورتی که اگر بر اساس کل روز بخواهیم اقتصادی بودن برق به دست آمده از کاربرد این مواد را ارزیابی کنیم، نتایج چندان جالبی نخواهیم گرفت[۲۶][۲۵].

۲-۴ بهینه سازی

۲-۴-۱ سطح تماس

هر جه سطح تماس مواد تغییر فاز دهنده برای انتقال حرارت از پنل فتوولتائیک بیشتر باشد، انتقال حرارت بهتر صورت گرفته و منجر به پایین ماندن دمای پنل فتوولتائیک برای زمان بیشتری میشوند. در سال ۲۰۰۴، Hung و همکاران، نشان دادند مه با افزایش سطح تماس برای انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده از طریق قرار دادن فین در جعبه ی حاوی مواد تغییر فاز دهنده در پشت پنل بهبود در عملکرد حرارتی آن حاصل می‌گردد. فین ها از طریق یکنواخت کردن دمای داخل مواد تغییر فاز دهنده منجر به ثابت ماندن دمای آن در مدت زمان بیشتری می‌شوند.**[۲۷]**

۲-۴-۲ دمای گذار

دمای گذار یا دمای نقطه ذوب در مواد تغییر فاز دهنده به صورت آن دمایی تعریف می‌شود که مواد تغییر فاز دهنده پس رسیدن به آن دما تغییر فاز خود را آغاز می‌کنند و پس از آن دما انتقال حرارت منجر به افزایش دمای آن نمی‌شود. دمای گذار تاثیر به سزایی در دمایی که پنل به آن می‌رسد دارد. Hung و همکاران در پژوهش خود نتیجه گرفتند که برای ثابت نگه داشتن دمای سطح پنل فتوولتائیک مجهز به مواد تغییر فاز دهنده در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد باید از مواد تغییر فاز دهنده ای استفاده کرد که دمای گذار آن باید از دمای محیط بالاتر باشد و از ۲۵ درجه‌ی سانتی گراد پایین تر باشد[۲۷].

Parkوهمکاران دمای ذوب بهینه در شرایط آب و هوایی کره شمالی را ۲۹۸ کلوین اعلام کردند با هر زاویه ای که پنل نصب شده باشد[۱۱].

Waqasو Ji نیز در مقاله ی خود اظهار داشتند که در صورتی که دمای مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در پشت پنل خورشیدی تقریبا معادل با میانگین دمای ماکزیمم محیط در طول تابستان باشد بیشتری بهره دهی بر حسب بازده و کاهش دما را در طول سال خواهد داشت[۲۸].

۲-۴-۳ رسانش گرمایی مواد تغییر فاز دهنده

Japs و همکاران طی یک مقایسه بین کاربرد دونوع متفاوت از مواد تغییر فاز دهنده نشان دادند که مواد تغییر فاز دهنده با رسانش گرمایی بالاتر عملکرد بهتری درکنترل دمای پنل فتوواتائیک دارند[۲۶][۲۵].

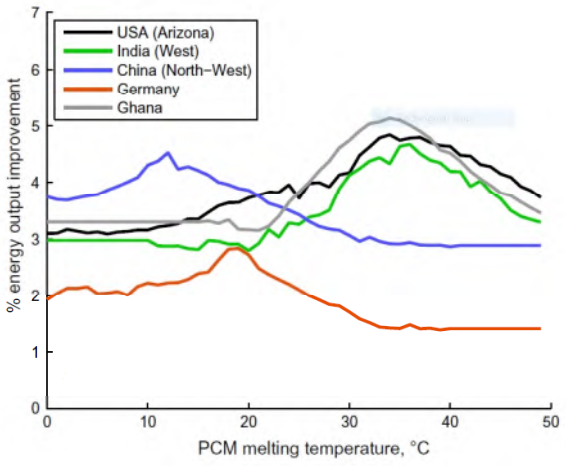
۲-۴-۴ تابش خورشید و دمای محیط

Parkو همکاران علاوه بر بررسی تاثیر اضافه کردن مواد تغییر فاز دهنده به پنل های فتوولتائیک، نقطه ی بهینه ی تابش خورشید، دما، ضخامت و دمای نقطه ی ذوب مواد تغییر فاز دهنده را برای شرایط آب و هوایی کره شمالی یافتند. آنها اظهار داشتند که در ماه اکتبر که تابش خورشید بیشتر است پنل فتوولتائیک به همراه مواد تغییر فاز دهنده عملکرد بهتری دارد[۱۱].

۱.□□□□ □□□□-□uilding Integrated Photovoltaic-Phase Change Material(HP-BIPVT-PCM)

آزمایشاتی نیز در عربستان سعودی صورت گرفت که بیانگر این هستند که با کاربرد مواد تغییر فاز دهنده برای کنترل دمای پنل خورشیدی تولید الکتریسیته پنل خورشیدی به اندازه ی ۷/۲٪ در زمان پیک و ۵/۵٪ به صورت میانگین روزانه توسط مواد تغییر فاز دهنده افزایش یافته است[۲۹].

Smith وهمکاران تحقیقاتی انجام دادند که اثباتی بر این قضیه می‌باشد که زمانی که تابش خورشید و دمای محیط بالا باشد، عملکرد مواد تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای پنل فتوولتائیک بهبود می‌یابد. آنها با استفاده از مدلسازی کارایی مواد تغییر فاز دهنده را مناطق مختلف جهان سنجیدند و نهایتا به این نتیجه رسیدند که درمناطقی مانند مکزیک و شرق آفریقا تولید الکتریسیته پنل سالانه به اندازه ی ۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین در مناطقی مانند عربستان سعودی، آمریکای مرکزی و جنوبی، آسیای جنوبی، اندونزی و بخش های زیادی از آفریقا این پارامتر بیشتر از ۵٪ می‌باشد. این درحالی است که به طور مثال در اروپا این رقم بین ۲٪ تا ۵٪ می‌باشد. آنها همچنین رابطه‌ی بین دمای بهینه‌ی نقطه‌ی ذوب موادتغییر فاز دهنده را اینگونه تعریف کردند که بیشترین دمای نقطه‌ی ذوب بهینه مواد تغییر فاز دهنده با میانگین بالاترین دماهای یک منطقه مطابقت دارد[۳۰].



شکل ۶. تغییرات بهبود تولید انرژی در پنل های فتوولتائیک بهبود یافته با مواد تغییر فاز دهنده در نقاط مختلف جهان نسبت به تغییرات دمای نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده[۳۰]

۲-۴-۵ نوع مواد تغییر فاز دهنده

جمعی از محققان به مقایسه تاثیر پنج نوع مواد تغییر دهنده متفاوت با ویژگی های متفاوتی مانند رسانش گرمایی، دمای نقطه‌ی ذوب و چگالی بر کنترل دمای پنل فتوولتائیک و افزایش کارایی آن پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده مورد آزمایش آنها این مواد بودند: پارافین وکس[1] کاپریک-لاریک اسید[2] کاپریک-پالمیتیک اسید[3] کلسیم کلرید ۶ آبه[4] و یک نوع مخلوط صنعتی[5] که از میان آنها کلسیم کلرید ۶ آبه و کاپریک-پالمیتیک اسید بهترین نتایج را نشان دادند. به گونه ای که؛ توانستند دمای سطح جلوی پنل را به اندازه ی ۳۰ دقیقه در ۱۸ درجه ی سانتی گراد پایین تر ثابت نگه دارند. از طرفی، کلسیم کلرید۶ آبه قادر بود که در مدت زمانی بیشتر از ۵ ساعت دمای سطح جلوی پنل را تا ۱۰ درجه ی سانتی گراد پایین تر حفظ کند زمانی که تابش خورشید به میزان ۱۰۰۰ وات بر متر مربع بود. علاوه بر اینها آنها یادآور شدند که رسانش گرمایی جعبه پشت پنل فتوولتائیک نیز تاثیر به سزایی در عملکرد مواد تغییر فاز دهنده کاپریک-لاریک اسید و کاپریک-پالمیتیک اسید دارد[۳۱].

۲-۴-۶ ضخامت مواد تغییر فاز دهنده

هر جه ضخامت مواد تغییر فاز دهنده افزایش یابد کاهش دما توسط آن در سیستم های فتوولتائیک دارای مواد تغییر فاز دهنده بیشتر دیده می‌شود.

Indartonoو همکاران تاثیر مواد تغییرفازدهنده با سه ضخامت متفاوت بر کاهش دمای سلول خورشیدی در شرایط آب و هوایی اندونزی با تابش خورشید۴٫۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز به صورت عددی و آزمایشگاهی مقایسه کردند. بین سه ضخامت ۵۰/۸ ، ۷۶/۲ و ۱۰۲ میلی‌متر از مواد تغییر فاز دهنده بهترین عملکرد حرارتی در ضخامت ۱۰۲ میلی‌متر مشاهده شد جایی که ۹/۶ درجه‌ی سانتی گراد دمای پنل کاهش پیدا کرد که منجر به افزایش تولید برق و بازده پنل به اندازه ی ۲۳/۸٪ و ۲/۱ ٪ به ترتیب شد[۳۲].

از طرفی نتایج به دست آمده از مقایسات Emam و همکاران حاکی از آن است که با افزایش ضخامت مواد تغییر فاز دهنده، زمان ذوب شدن کامل آن نیز افزایش می‌یابد[۳۳].

۲-۴-۷ نرخ تمرکز در پنل های فتوولتائیک متمرکز کننده

پنل های فتوولتائیک متمرکز کننده نیز نوعی از پنل های فتوولتائیک می‌باشند که به علت تمرکز بالای اشعه های خورشید بر سطح آن، افزایش دمای قابل توجهی در آن اتفاق میافتد. از این رو کنترل دمای این نوع پنل های فتوولتائیک از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو محققان به تحلیل اثر نرخ تمرکز بر دمای پنل فتوولتائیک متمرکز کننده که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته است، پرداخته اند. آنها با استفاده از داده های به دست آمده به این نتیجه رسیدند که هرچه نرخ تمرکز بالاتر باشد، کاهش دما توسط مواد تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده به این صورت بودند که در نرخ تمرکز ۵ و در ضخامت ۲۰۰میلی‌متر از مواد تغییر فاز دهنده دمای سلول خورشیدی از ۱۸۰درجه‌ی سانتی‌گراد به ۳۸ درجه‌ی سانتی‌گراد رسیده است، این در حالی است که زمانی که نرخ تمرکز ۲۰ بود با ضخامت هم اندازه از مواد تغییر فاز دهنده، دمای پنل فتوولتائیک متمرکز کننده از ۵۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۶۴ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافته است[۳۴].

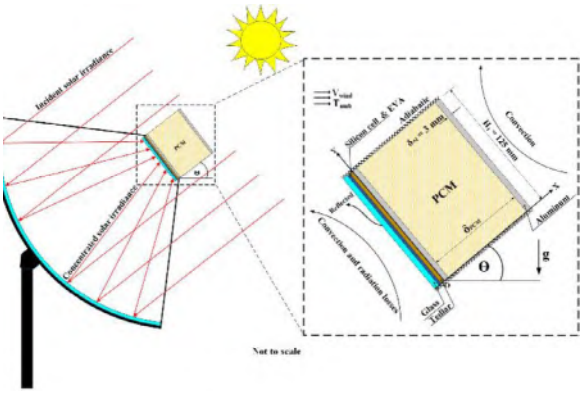
در مطالعه ای دیگر انها بیان کردند که با افزایش نرخ تمرکز در پنل های فتوولتائیک متمرکز کننده نورخورشید، زمان ذوب شدن کامل مواد تغییر فاز دهنده نیز کاهش می‌یابد[۳۳].

۲-۴-۸ زاویه‌ی شیب[7] پنل فتوولتائیک

1.Paraffin wax(RT20)
2.Eutectic mixture of capric-lauric acid(C-L)
3.Eutectic mixture of capric-palmitic acid(C-P)
4.Pure salt hydrate($CaCl_2.6H_2O$)
5.Commercial blend(SP22)

6.Concentration ratio
7.Inclination angle

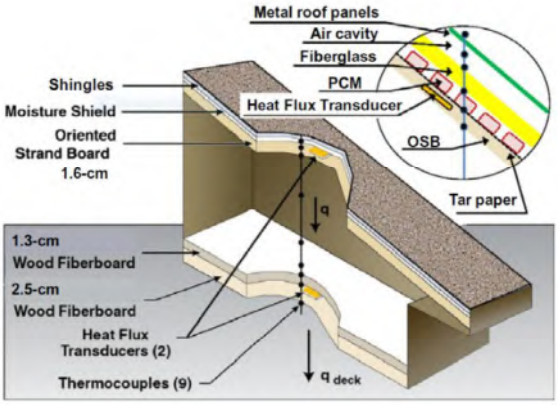
یکی دیگر از پارامترهای تاثیر گزار بر عملکرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم های فتوولتائیک زاویه قرار گیری پنل می‌باشد.Emam و همکاران به بررسی این اثر پنل های فتوولتائیک متمرکزکننده مجهز به مواد تغییر فاز پرداختند. آنها عملکرد پنل را در زاویه های بین ۴۵- درجه تا ۹۰ درجه ارزیابی کردند و دریافتند که پنل در زاویه‌ی ۴۵ درجه علاوه بر این که بیشترین کاهش دما را دارد، سطح پنل نیز تقریبا دمای یکنواختی دارد که این عامل باعث جلوگیری از گرمایش موضعی در سطح پنل می‌شود و این جریان ادامه دارد تا جایی که تمام مواد تغییر فاز دهنده به طور کامل ذوب می‌شوند. در حالی که در زاویه ۴۵-بازده الکتریکی پنل آهسته آهسته کاهش می‌یابد[۳۳].



شکل ۷.شماتیکی از پنل فتوولتائیک متمرکز کننده مجهز به مواد تغییر فاز دهنده[۳۳]

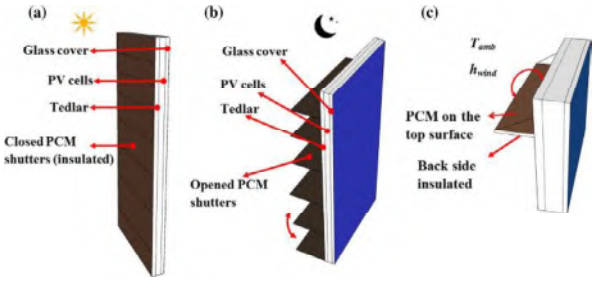
۵-۲ نوآوری

در سال ۲۰۱۲، ترکیب بندی از پنل فتوولتائیک به همراه مواد تغییر فاز دهنده در سقف ارائه شد که قابلیت این را داشت که در فصل زمستان ۳۰٪ کاهش در بار حرارتی و در فصل تابستان ۵۵٪ در بار سرمایش را نتیجه دهد. این ترکیب بندی در شکل* نشان داده شده است[۳۵].



شکل ۸. شماتیکی از ترکیب بندی پیشنهاد شده با استفاده از پنل خورشیدی و مواد تغییر فاز دهنده[۳۵]

Waqas و Ji در سال ۲۰۱۷ سیستمی را طراحی و مدلسازی کردند که در پشت پنل فتوولتائیک، مواد تغییر فاز دهنده در داخل پره های چرخان جای گرفته بودند. این پره ها در طی روز بسته اند و به پشت پنل خورشیدی چسبیده اند در صورتی که در شب هنگام این پره ها باز می‌شوند تا سطح انتقال حرارت آنها با هوای اطراف بیشتر شود و زودتر به حالت جامد در بیایند. نتایج مدلسازی آنها نشان داد که با استفاده از این نوآوری دمای پنل می‌تواند از ۶۴ درجه ی سانتی‌گراد به ۴۲ درجه‌ی سانتی گراد کاهش یابد و همچنین در زمان پیک گرمایی در تابستان ۹٪ افزایش در بازده در آب و هوای گرم و مرطوب منتج گردد. این سیستم در شکل* نشان داده شده است[۲۸].



شکل ۹. پنل فتوولتائیک مجهز به مواد تغییر فازدهنده در پره های چرخان[۲۸]

۳- نتیجه‌گیری

یکی از سیاست‌های مهم بخش انرژی در کشور، جایگزینی منابع تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی و استفاده از سوخت‌های با صرفه و مطابق با استانداردهای محیط‌زیست می‌باشد. به همین دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همانند انرژی خورشیدی به جای سوخت‌های فسیلی مد نظر سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت قرار گرفته‌است. با توجه به کارایی بالای مواد تغییر فازدهنده در ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از آنها در سامانه‌های ذخیره کننده انرژی از انرژی خورشیدی، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان می-باشد.

مقاله‌ی مروری حاضر ضمن معرفی مواد تغییر فاز دهنده به عنوان موادی که با استفاده از گرمای نهان خود دارای پتانسیل دخیره ی گرمایی می‌باشند و مقایسه‌ی استفاده از آن برای خنک سازی پنل های خورشیدی با روش های مرسوم دیگر به مزایا و معایب این روش خنک سازی نیز پرداخته است.

که از این بین میتوان به اقتصادی نبودن آن با توجه به نتایج تعدادی از مقالات اشاره کرد. البته نتایج تعدادی دیگر از دانشمندان حاکی از آن است که در بعضی شرایط و با رعایت پارامترهایی که منجر به بهینه سازی عملکرد مواد تغییر فاز دهنده می‌شوند، استفاده از آنها نیز میتواند مقرون به صرفه باشد.

یکی از مهم ترین پارامتر ها برای بهینه سازی عملکرد موادتغییر فاز دهنده و متعاقبا اقتصادی شدن آن شرایط و مکان استفاده از آن می‌باشد. به این گونه که نتایج مطالعات دانشمندان نشان می‌دهد در شرایط آب و هوایی گرم و با تابش خورشید بالا استفاده از این مواد نیز از لحاظ اقتصادی و کارایی در وضعیت خوبی می‌باشد.

با توجه به اینکه کشور ایران دارای مناطقی گرم و خشک با تابش خورشید زیاد می‌باشد، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای تنظیم دمای پنل های فتوولتائیک و چه بسا کاربردهای چند منظوره از آن در بخش ساختمان و یا دیگر موارد میتواند منفعت های زیادی برای سرمایه گزاران و دولت ها از جمله استفاده بهینه تر از انرژی خورشیدی داشته باشد.

از این رو پیشنهاد می‌شود که به مطالعه و بررسی عملکرد آن به همراه پنل های فتوولتائیک در مناطق گرم و خشک ایران پرداخته شود.

مراجع

[1] F. Jafarkazemi and A. A. Zargar, “Effect of design parameters on thermal efficiency of a flat plate solar collector,” pp. 1–8.

[2] “Environmental , Social and Economic Effects of Photovoltaic Cells Performed in Administrative Building (Case Study : Ilam City),” pp. 56–66.

[3] A. Machniewicz, D. Knera, and D. Heim, “Effect of transition temperature on efficiency of PV/PCM panels,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1684–1689, 2015.

[٤] ا.عبدی علمی و آ.میر عبداله لواسانی، مروری بر روش ها و کارهای انجام شده در زمینه خنک سازی پنل های فتوولتائیک در جهت افزایش راندمان الکتریکی پنل.2017 ,vol. 2 ,”

[5] A. Hasan, J. Sarwar, H. Alnoman, and S. Abdelbaqi, “Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate,” *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 417–429, Apr. 2017.

[6] S. Sharma, A. Tahir, K. S. Reddy, and T. K. Mallick, “Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 149, pp. 29–39, 2016.

[7] M. C. Browne, B. Norton, and S. J. McCormack, “Phase change materials for photovoltaic thermal management,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 762–782, 2015.

[8] P. Royo, V. J. Ferreira, A. M. López-Sabirón, and G. Ferreira, “Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials,” *Energy*, vol. 101, no. 2016, pp. 174–189, 2016.

[9] Z. Ma, W. Lin, and M. I. Sohel, “Nano-enhanced phase change materials for improved building performance,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1256–1268, 2016.

[10] S. Preet, “Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 791–807, 2018.

[11] J. Park, T. Kim, and S. Leigh, “ScienceDirect Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions,” *Sol. Energy*, vol. 105, pp. 561–574, 2014.

[12] S. Sharma, N. Sellami, A. Tahir, K. S. Reddy, and T. K. Mallick, “Enhancing the performance of BICPV systems using phase change materials,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1679, no. 2015, 2015.

[13] M. C. Browne, K. Lawlor, A. Kelly, B. Norton, and S. J. M. Cormack, “Indoor Characterisation of a Photovoltaic/ Thermal Phase Change Material System,” *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 163–171, 2015.

[14] M. C. Browne *et al.*, “Assessing the thermal performance of phase change material in a photovoltaic / thermal system,” vol. 91, pp. 113–121, 2016.

[١٥] ر.موسوی بایگی و م.صدرعاملی، طراحی و ساخت یک سامانه خنک کننده برای افزایش راندمان پنل های فتوولتائیک به کمک مواد تغییر فاز”.

[16] A. Buonomano, G. De Luca, U. Montanaro, and A. Palombo, “Innovative technologies for NZEBs: An energy and economic analysis tool and a case study of a non-residential building for the Mediterranean climate,” *Energy Build.*, vol. 121, no. 2016, pp. 318–343, 2016.

[17] R. Stropnik, “Increasing the ef fi ciency of PV panel with the use of PCM,” vol. 97, pp. 671–679, 2016.

[18] 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,” 2011.

[19] H. M. Yin, D. J. Yang, G. Kelly, and J. Garant, “Design and performance of a novel building integrated PV/thermal system for energy efficiency of buildings,” *Sol. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 184–195, 2013.

[20] M. T. Plytaria, E. Bellos, C. Tzivanidis, and K. A. Antonopoulos, “Financial and energetic evaluation of solar-assisted heat pump underfloor heating systems with phase change materials,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, no. June 2018, pp. 548–564, Feb. 2019.

[21] M. T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, and K. A. Antonopoulos, “Energetic investigation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with and without phase change materials,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, no. July, pp. 626–639, Oct. 2018.

[22] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, and B. Norton, “Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) System through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics,” *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1318–1331, 2014.

[23] Z. Wang, J. Zhang, Z. Wang, W. Yang, and X. Zhao, “Experimental investigation of the performance of the novel HP-BIPV/T system for use in residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 130, pp. 295–308, 2016.

[24] A. Sweidan, N. Ghaddar, and K. Ghali, “Optimized design and operation of heat-pipe photovoltaic thermal system with phase change material for thermal storage,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, 2016.

[25] E. Japs, S. Peters, G. Sonnenrein, and S. Krauter, “Energy-economic comparison of photovoltaic modules equipped with a layer of conventional and improved phase-change material,” *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2014*, pp. 1348–1352, 2014.

[26] E. Japs, G. Sonnenrein, S. Krauter, and J. Vrabec, “Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market,” *Sol. Energy*, vol. 140, pp. 51–59, 2016.

[27] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, “Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2715–2733, 2004.

[28] A. Waqas and J. Ji, “Thermal management of conventional PV panel using PCM with movable shutters – A numerical study,” *Sol. Energy*, vol. 158, no. August, pp. 797–807, 2017.

[29] A. Hasan, H. Alnoman, and Y. Rashid, “Impact of integrated photovoltaic-phase change material system on building energy efficiency in hot climate,” *Energy Build.*, vol. 130, pp. 495–505, 2016.

[30] C. J. Smith, P. M. Forster, and R. Crook, “Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling,” *Appl. Energy*, vol. 126, pp. 21–28, 2014.

[31] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, and B. Norton, “Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1601–1612, 2010.

[32] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, I. O. P. Conf, and I. P. Address, “Simulation and Experimental Study on Effect of Phase Change Material Thickness to Reduce

Temperature of Photovoltaic Panel," vol. 012049.

[33] M. Emam, S. Ookawara, M. Ahmed, S. Ookawara, and M. Ahmed, "Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system," *Sol. Energy*, vol. 150, pp. 229–245, 2017.

[34] M. Ahmed, "PERFORMANCE ENHANCEMENT OF CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM," pp. 1–10, 2017.

[35] J. KoŚny, K. Biswas, W. Miller, and S. Kriner, "Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2504–2514, 2012.