DOR: 20.1001.1.24234931.1400.8.1.1.5
Archive of SID

مقاله

سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۰، صفحات ۱- ۱۲

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۸

راهکارهای پایدار صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های گلخانه با استفاده از فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر

احسان سرلکی[۱]، غلامرضا چگینی[۲*]، ایمان مرزبان[۱]، حمیدرضا بخشی[۱]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* تهران، صندوق پستی: ۳۳۹۱۶۵۳۷۵۵، پست الکترونیکی: chegini@ut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، بررسی جامعی بر راهکارهای پایدار صرفه‌جویی انرژی با استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در گلخانه‌ها ارائه شده است. به منظور کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌ها، پس از ارزیابی و شناخت کلی و دقیق از سامانه‌های موجود در گلخانه‌ها، مسائلی مانند مصرف انرژی کل، فناوری‌هایی با هزینه مناسب و با بازده انرژی بالا و همچنین سازگار با محیط زیست، به طور دقیق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. فناوری‌های مورد نظر در چارچوب اهداف این تحقیق به طور کلی راهکارهای مبتنی بر فناوری‌های تجدیدپذیر و پایدار مانند ماژول‌های فتوولتائیک (PV)، جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی، سامانه‌ها و جمع کننده‌های ترکیبی PV/T، تکنیک‌های مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی زیرزمینی و پمپ‌های حرارتی با بازده انرژی بالا هستند. یافته‌های حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که تا ۸۰ درصد صرفه‌جویی در انرژی را می‌توان با بکارگیری فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر حاصل نمود.

کلیدواژگان: انرژی‌های تجدیدپذیر، گلخانه‌ها، گرمایش، سرمایش، ذخیره انرژی.

The Sustainable Energy Saving Solutions for Greenhouse Systems using Renewable Energies Technologies

Ehsan Sarlaki[1], Gholamreza Chegini[2*], Iman Marzban[1], Hamidreza Bakhshi[1]

1- Ph.D. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 3391653755 Tehran, Iran, chegini@ut.ac.ir

Received: 06 July 2019 Accepted: 07 June 2020

Abstract

In this study, a comprehensive review on sustainable solutions for energy saving in greenhouse systems using renewable energies technologies is presented. Afterward the brief and concise assessment and identify of existing greenhouse systems and in order to notable reductions of energy consumption in greenhouses, topics such as total energy consumption; cost-effective, energy-efficient as well as environmentally friendly technologies are analyzed in detail. The technologies considered within the scope of this research are mainly renewable and sustainable based solutions such as photovoltaic (PV) modules, solar thermal collectors, hybrid PV/T collectors and systems, phase change material (PCM) and underground based heat storage techniques and energy-efficient heat pumps. The findings from the research reveal that up to 80% energy saving can be achieved through utiliztion of renewable energies technologies.

Keywords: Renewable Energies, Greenhouses, Heating, Cooling, Energy storage.

www.SID.ir

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

Archive of SID

۱- مقدمه

امروزه به دلیل کمبود ذخایر انرژی، صرفه‌جویی در انرژی بیش از پیش اهمیت یافته است. با توجه به افزایش قیمت انرژی و مشکلات زیست محیطی مانند گرمایش کره زمین، کاهش لایه اوزون و تغییرات اقلیمی، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور گسترده‌ای برای کاهش مصرف کل انرژی جهان و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر که هنوز تحت تأثیر سوخت‌های فسیلی قرار دارد، کاربرد یافته‌اند [۱]. با این حال، گزارش‌های اخیر نشان می‌دهند که انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند تنها حدود ۱۴ درصد از کل تقاضای انرژی را تامین کنند [۲]. در این راستا، اقدامات موثر بیشتری برای کاهش مصرف انرژی جهانی و تثبیت انتشار کربن ضرورت دارد. راهکارهای صرفه‌جویی در انرژی از اهمیت بالایی در تمام بخش‌ها از حمل و نقل گرفته تا ساختمان‌ها برخوردار است [۱]. این سناریو برای بخش گلخانه نیز بسیار مهم است زیرا گلخانه‌ها در حال حاضر نقش مهمی در مصرف انرژی کل دارند. نیاز روزافزون انرژی در بخش گلخانه، یک مسئله مهم در برداشت پایدار محصولات می‌باشد. مواد پوششی متداول که در ساخت گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حال حاضر دارای ضریب عایق حرارتی ضعیفی هستند، به‌طوریکه ۲۰ تا ۴۰ درصد از تلفات انرژی در گلخانه‌های متداول ناشی از پوشش نامناسب است [۳]. رشد بالای مسائل زیست محیطی چالش دیگری از گلخانه‌هاست زیرا بیشتر آنها بر اساس سوخت‌های فسیلی مدیریت می‌شوند. ۳۰ درصد از تولید گازهای گلخانه‌ای و ۴۰ از مصرف انرژی در جهان مربوط به گلخانه‌هاست [۴]. این موضوع، محققان و دانشمندان را تشویق می‌کند تا منابع جایگزین انرژی، فناوری‌های سازگار با محیط زیست و راهکارهای صرفه‌جویی در انرژی را جستجو کنند.

عوامل موثری بر تقاضای انرژی در گلخانه مانند شرایط آب و هوای بیرون گلخانه، مواد پوششی گلخانه، روشنایی، خاک، ارتفاع، شرایط باد یا گونه‌های گیاهی کشت شده وجود دارد [۵]. در مناطقی با اقلیم مدیترانه‌ای، اکثر گلخانه‌ها با یک سیستم تهویه مجهز شده‌اند و از هیچ گونه واحد گرمایشی استفاده نمی‌کنند. با این حال، محیط داخلی بدون کنترل، حتی در مدت زمان کوتاهی که در معرض چنین شرایطی قرار می‌گیرند، بر رشد گیاه در گلخانه تاثیر می‌گذارد [۳۴]. در بسیاری از نقاط جهان، تابش مستقیم خورشید به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی برای گرمایش و سرمایش محسوب می‌شود. تابش سالانه آفتاب می‌تواند به ۳۲۸۸ کیلو وات ساعت در هر متر مربع در بعضی نقاط جهان برسد. یک گلخانه متداول به طور متوسط سالانه ۱ لیتر سوخت به ازای هر متر مربع مصرف می‌کند [۶]. به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی گلخانه‌ها، استفاده از انرژی خورشیدی با هزینه پایین و سازگار با محیط زیست ضروری به نظر می‌رسد. استفاده مناسب از انرژی که می‌تواند توسط منابع انرژی پایدار مانند پمپ‌های گرمایی، جمع کننده‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره انرژی دریافت شود، به نظر می‌رسد که در گرمایش و سرمایش گلخانه‌ها نوید دهنده باشند [۶].

فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در گلخانه‌ها برای تامین گرمایش، سرمایش، تهویه و روشنایی به شیوه‌ای سازگار با محیط زیست بسیار مورد توجه هستند [۷]. در این راستا برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی، افزایش عملکرد و آنالیز پارامتری آنها، تلاش شده است تا حداکثر بازده را در مناطق مختلف داشته باشند. آنالیز ترمودینامیکی سیستم‌های تجدیدپذیر نیز در متن توجه برای ارزیابی عملکرد چنین فناوری‌هایی است. گلخانه‌ها علاوه بر گرمایش و سرمایش، برای حفظ محیط مطلوب رشد گیاه، باید توانایی انتقال نور، تهویه مناسب، هزینه‌های ساخت کم و مصرف حرارتی پایینی داشته باشند [۸]. در این تحقیق، راهکارهای تأمین انرژی با استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برای سیستم‌های گلخانه‌ای متداول ارزیابی و طیف گسترده‌ای از فناوری‌های مورد استفاده در گلخانه برای کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی و تحلیل خواهند شد.

۲- فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در گلخانه‌ها

در این بخش، راهکارهای مهم و کاربردی برای تأمین انرژی تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست برای گلخانه‌های متداول مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. ابتدا هر فناوری به طور جداگانه برای ارزیابی و درک بهتر مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس یافته‌های هر فناوری خلاصه شده‌اند.

۲-۱- ماژول‌های فتوولتائیک

تولید انرژی از ماژول‌های فتوولتائیک ساده‌ترین راه برای تولید الکتریسیته به طور مستقیم از نور خورشید برای گلخانه‌ها است. با این حال، بازده تبدیل انرژی ماژول‌های فتوولتائیک پایین است. آخرین تحقیقات نشان داده است که بازده تبدیل انرژی ماژول‌های فتوولتائیک به میزان ۲۵-۱۰ درصد برای نوع Si، ۱۸-۲۸ درصد برای نوع GaAs، ۱۹-۱۷ درصد برای نوع فیلم نازک[۱] ۱۰ درصد برای نوع a-Si، ۱۲-۹ درصد برای نوع فتوشیمیایی و ۸ تا ۱۱ درصد برای نوع ارگانیک است [۶]. لازم به ذکر است که این بازده‌ها بسیار حساس به دمای سلول است. پس از دریافت انرژی حرارتی بیش از حد، بازده پس از مدتی کاهش می‌یابد [۶]. بنابراین، تلاش‌های مختلفی به منظور کاهش دمای سلول به منظور استحصال انرژی با بازده بالا از خورشید در حال انجام است.

۲-۱-۱- ماژول‌های فتوولتائیک متداول

ماژول‌های فتوولتائیک متداول دارای مزایای مانند سهولت دسترسی، پایداری در شرایط شدید اقلیمی، بهبود بازده و قیمت مقرون به صرفه هستند [۱۰]. آنها به طور مستقیم نور خورشید را به دلیل اثر فتوولتائیک به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و این انرژی را می‌توان به طور مستقیم برای دستگاه‌های DC و یا از طریق تبدیل با اینورترها برای دستگاه‌های AC استفاده کرد و همچنین گزینه‌ای برای ذخیره در باتری‌ها دارند [۱۱]. انرژی ذخیره شده در داخل باتری سپس برای استفاده هر وسیله در گلخانه که نیاز به الکتریسیته دارد مانند لامپ، بخاری، کولر، پمپ یا سایر وسایل الکتریکی استفاده می‌شود. جدا از انواع نیمه هادی‌های مختلفی که به عنوان مواد نیمه هادی استفاده می‌شوند، حدود ۳۶ و ۵۵ درصد از ماژول‌های فتوولتائیک موجود در بازار، به ترتیب مونو (m-Si) و پلی سیلیکون (p-Si) هستند [۶]. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، ماژول‌های فتوولتائیک m-Si و p-Si به طور گسترده‌ای برای تولید انرژی پاک در گلخانه‌ها استفاده می‌شوند [۸]. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که ماژول‌های فتوولتائیک در ارائه دمای مطلوب در داخل گلخانه‌ها و نیز صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار کربن مناسب هستند. جدول ۲ توسعه فتوولتائیک‌ها همراه با محدوده بازده برای فناوری‌های مختلف سلول را نشان می‌دهد. تقریبا تمام انواع فناوری‌های سلولی برای تعیین شرایط مطلوب آزمون گردیده و در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بالاترین میزان بازده ماژول‌های فتوولتائیک موجود در بازار به نوع چندین اتصال[۲] تعلق دارد [۸]. با این حال، این نوع گران بوده و به طور کلی، به ندرت در گلخانه‌ها استفاده

[۱] chalcogenide

[۲] multi-junction

www.SID.ir

Archive of SID

می‌شود [۱۲]. کاربردهای گلخانه‌ای ماژول‌های فتوولتائیک متداول اکثرا برای استفاده الکتریسیته به عنوان بخاری و روشنایی است. با این حال در بیشتر موارد، تولید الکتریسیته وابسته به آرایه فتوولتائیک، بازده ماژول مورد استفاده و موقعیت جغرافیایی است. همانطور که قبلا ذکر شد، ماژول‌های فتوولتائیک به طور چشمگیری دمای سلول به ویژه در مناطق با شدت تابش خورشیدی را افزایش می‌دهند [۱۳]. برای کشورهای چهار فصل، میانگین دمای بین دمای ماژول فتوولتائیک و دمای محیط حدود ۱۸ درجه سلسیوس است. برای مثال در شرایط اقلیمی ایتالیا، بیشترین دمای این ماژول در تابستان به ۷۶ درجه سلسیوس و کمترین دما در زمستان به ۲۵ درجه سلسیوس می‌رسد. بنابراین، استفاده از سیستم‌های سرمایش غیرفعال یا فعال برای کاهش دمای عملیاتی ماژول‌های فتوولتائیک در گلخانه‌ها توصیه می‌شود. محققان تأکید کرده‌اند که بیش از ۵۰ درصد تابش ورودی خورشید به گرما تبدیل شده که موجب می‌شود دمای ماژول به ۵۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط برسد [۱۴].

جدول ۱- انواع فتوولتائیک مورد استفاده در گلخانه‌ها برای گرمایش، سرمایش و روشنایی [۸].

نوع فتوولتائیک	کشور	یافته‌ها
Semi-transparent c-Si	هند	بیشترین تولید انرژی الکتریکی ۱/۹ کیلو وات ساعت به ازای هر روز است.
Semi-transparent c-Si, spherical solar micro cells	ژاپن	خروجی پیک توان ۵۴۰ میلی وات برای شدت خورشید ۱۲۲۳ وات بر متر مربع. بازده تبدیل ۴/۵ درصد است.
c-Si solar cells	هند	پیک توان ۳۸۲۵ وات است.
c-Si solar cells	هند	صرفه جویی انرژی الکتریکی سالیانه ۱۱۸۵ کیلو وات ساعت است. ضریب تولید الکتریسیته ۲/۰۴ است.
m-Si solar cells	ایتالیا	صرفه جویی انرژی تقریبا برای سرمایش تابستان ۳۰ درصد و برای گرمایش زمستان ۱۱ درصد است.
m-Si solar cells	هلند	انرژی الکتریکی سالیانه انتظار می‌رود که ۲۹ کیلو وات ساعت به ازای هر متر مربع باشد. بازده تبدیل انرژی سیستم ۱۱ درصد است.
p-Si solar cells	ترکیه	الکتریسه کل بر اساس مصرف انرژی ۸/۱ کیلو وات ساعت در هر روز است. ۳۴/۵۵ درصد از سلول‌های فتوولتائیک و مابقی از شبکه فراهم می‌شود. دمای درون گلخانه تا ۱۹/۸ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد.
Multi c-Si solar cells	ایتالیا	تولید الکتریسیته سالیانه ۱۰۷۸۸۵ کیلو وات ساعت است. بازده تبدیل کلی سیستم فتوولتائیک ۱۱/۴ است. دمای متوسط سالیانه درون گلخانه ۱۹/۸ درجه سلسیوس و بین ۱۲ تا ۳۰ درجه سلسیوس قرار دارد.
a-Si thin film	اسپانیا	تولید الکتریسیته ۸/۲۵ کیلو وات ساعت در هر متر مربع با پوشش سقف ۹/۷۹ درصد است.
a-Si solar cells	ژاپن	آرایه‌های فتوولتائیک ردیفی ۴/۰۸ گیگا ژول در هر سال الکتریسیته تولید می‌کنند. تولید انرژی الکتریسیته از سلول‌های فتوولتائیک برای استفاده در تولیدات گلخانه‌ای پایدار مناسب است.

جدول ۲- بازده ماژول‌های فتوولتائیک مورد استفاده در گلخانه‌ها تحت شرایط آزمون استاندارد [۵، ۸].

نوع	بازده (درصد)	نوع	بازده (درصد)
c-Si	۲۵/۰ ± ۰/۵	InGaP/GaAs/InGaAs	۳۷/۹ ± ۱/۲
Multi c-Si	۲۰/۸ ± ۰/۶	a-Si/nc-Si/nc-Si	۱۳/۴ ± ۰/۴
Thin-film cell	۲۱/۲ ± ۰/۴	a-Si/nc-Si (thin-film cell)	۱۲/۷ ± ۰/۴
Thin-film submodule	۱۰/۵ ± ۰/۳	a-Si/nc-Si (thin-film submodule)	۱۱/۷ ± ۰/۴
Organic thin-film	۲۲/۱ ± ۰/۳	Si (amorphous)	۱۰/۲ ± ۰/۳
Organic (submodule)	۹/۵ ± ۰/۷	Si (nano-crystalline)	۱۱/۴ ± ۰/۳
CIGS (cell)	۲۰/۵ ± ۰/۶	GaAs (thin-film)	۲۸/۸ ± ۰/۹
CIGS (submodule)	۱۸/۷ ± ۰/۶	GaAs (multi-crystalline)	۱۸/۴ ± ۰/۵
CdTe (cell)	۲۱/۰ ± ۰/۴	InP (crystalline)	۲۲/۱ ± ۰/۷

۲-۱-۲- ماژول‌های فتوولتائیک متمرکز کننده[۱]

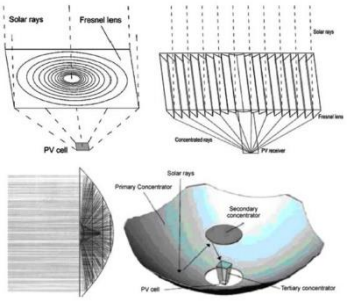
با توجه به مشکلات بازده تبدیل انرژی در ماژول‌های فتوولتائیک متداول، آرایه‌های فتوولتائیک بزرگتری برای پاسخ به تقاضای انرژی گلخانه‌ها مورد نیاز است. کشاورزانی که برای تاسیس سیستم‌های فتوولتائیک بزرگ با چالش مساحت مواجه هستند مجبور به استفاده از سقف گلخانه شده‌اند و این وضعیت سبب بروز مشکلاتی مربوط به نور از قبیل تلفات رنگ و اندازه کوچکتر محصولات شده است [۱۵]. بنابراین، ماژول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا تولید الکتریسیته بیشتری را از مساحت‌های کوچکتر دریافت کنند. چندین متمرکزکننده در گلخانه‌ها مانند لنزهای فرنسل[۲] و متمرکز کننده‌های سهموی[۳] استفاده می‌شوند (شکل ۱). این متمرکزکننده‌ها دارای مزایا و معایب فراوانی هستند. مزیت اصلی ماژول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده کاهش اندازه سیستم با توان خروجی برابر و هزینه کمتر است [۱۶]. با توجه به افزایش بازده، ماژول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده فضای زیادی را از اشغال نمی‌کنند. نسبت تمرکز[۴] در ماژول‌های فتوولتائیک با تمرکز بالا بیش از ۱۰۰ است که به معنی ۱۰۰ بار ورودی بیشتر نور خورشید به درون ماژول است [۸]. از سوی دیگر، اگر ماژول‌های فتوولتائیک به خوبی کنترل نشوند، مسئله بیش‌گرمایی[۵] برای ماژول‌های فتوولتائیک متمرکز کننده وجود

[۱] Concentrating PV modules
[۲] Fresnel lenses
[۳] parabolic trough concentrators
[۴] concentration ratio
[۵] overheating

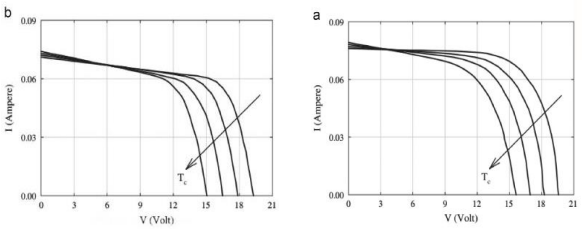
www.SID.ir

Archive of SID

خواهد داشت [۱۷]. از پژوهش‌های قبلی به خوبی روشن است که دمای ماژول فتوولتائیک می‌تواند در دمای محیط ۲۰ درجه سلسیوس و شدت خورشید ۱۰۰۰ وات بر متر مربع به ۱۲۰ درجه سلسیوس برسد. برای شرایط شدید اقلیمی مانند خاورمیانه در تابستان (۵۰ درجه سلسیوس)، دمای ماژول فتوولتائیک بیش از ۲۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. چنین دمای بالایی می‌تواند باعث کاهش بازده انرژی و توان خروجی شود که در شکل ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. متمرکز کننده‌های مورد استفاده در گلخانه‌ها در جدول ۴ آورده شده‌اند. متوسط دمایی که برای یک ماژول فتوولتائیک مناسب است، حدود ۸۰ درجه سلسیوس است. اگر دمای ماژول افزایش یابد، آسیب دائمی می‌تواند اتفاق بیفتد یا ممکن است ماژول فتوولتائیک دیگر کار نکند. بنابراین، یک فناوری سرمایش مناسب برای ماژول‌های فتوولتائیک به ویژه برای مناطق گرمسیری مورد نیاز است [۳۵]. تلاش‌های زیادی برای بازیابی حرارت پسماند ماژول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده و استفاده از آن به عنوان منبع گرما در گلخانه شده است [۱۸]. چنین تلاش‌هایی نه تنها باعث افزایش بازده الکتریکی ماژول‌های فتوولتائیک، بلکه باعث کاهش نیاز گرمایشی نیز شده‌اند.



شکل ۱- دستگاه‌های متمرکز کننده رایج مورد استفاده در گلخانه‌ها [۳۱].



(ب) (الف)

شکل ۲- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) برای (الف) ماژول‌های فتوولتائیک m-Si و (ب) p-Si برای شدت خورشیدی ۲۰۰ وات بر متر مربع و دمای سلول فتوولتائیک (Tc) ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سلسیوس [۳۲].

جدول ۳- اثر دما بر بازده تبدیل ماژول‌های فتوولتائیک [۳۳].

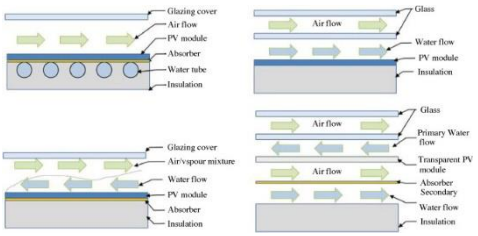
شدت اولیه تابش خورشیدی (وات بر متر مربع)	بازده تبدیل الکتریکی	
	دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس)	دمای محیط (۵۰ درجه سلسیوس)
۲۰۰	۱۴/۱۲	۱۱/۸۹
۴۰۰	۱۳/۰۱	۱۰/۸۵
۶۰۰	۱۱/۹۶	۹/۸۶
۸۰۰	۱۰/۹۷	۸/۷۹
۱۰۰۰	۹/۹۵	۷/۹۵

جدول ۴- انواع متمرکزکننده مورد استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک متمرکزکننده در گلخانه‌ها [۸، ۳۳].

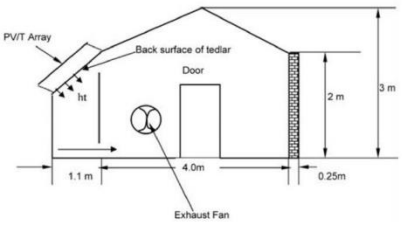
متمرکز کننده	دمای گلخانه (درجه سلسیوس)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	بازده حرارتی (درصد)
لنزهای فرنسل خطی	۱۷/۲ - ۲۸/۸	۱۰	۶۹/۶
لنزهای فرنسل نقطه‌ای	۲۰/۸ – ۳۱/۲	۹	۷۱/۷
شیشه‌های مقعر یا انحنادار	۱۷/۵ – ۱۹/۵	نامشخص	۶۵

۲-۱-۳- ماژول‌های ترکیبی حرارتی-فتوولتائیک[۱] (PV/T)

دوره بازگشت سرمایه[۲] ماژول‌های فتوولتائیک متداول در گلخانه‌ها بالاست. در این راستا، ماژول‌های ترکیبی PV/T جایگزین مناسبی هستند زیرا آنها هم تولید انرژی حرارتی و هم الکتریسیته دارند [۱۹]. یک نمونه از ماژول فتوولتائیک خنک شونده با آب[۳] در شکل ۳ نشان داده شده است [۶]. به طور کلی، ساختار یک PV/T به ترتیب شامل یک ماژول فتوولتائیک، چاهک گرمایی، تهویه و عایق‌بندی است. مطالعات متعددی برای بهبود بازده ماژول‌های فتوولتائیک از طریق کاهش دمای سلول با استفاده از سیستم تهویه مطبوع و آب انجام شده است. ماژول‌های PV/T برای گلخانه‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶]. به عنوان مثال، محققان به صورت نظری و آزمایشگاهی گلخانه‌ای را با سیستم PV/T بررسی کردند (شکل ۴). نتایج آنها نشان داد که بازیابی سالانه اتلاف گرما از ماژول‌های فتوولتائیک ۱۲/۸ کیلووات ساعت است [۶]. صرفه‌جویی سالانه انرژی الکتریسیته نیز ۷۱۶ کیلو وات ساعت گزارش شد که بسیار قابل توجه می‌باشد. جدول ۵ مقایسه‌ای پژوهش‌هایی که برای سرمایش در شرایط اقلیمی مختلف انجام شده است را نشان می‌دهد. از جدول می‌توان نتیجه گرفت که ماژول‌های PV/T خنک شونده با آب برای کاهش دمای ماژول در شرایط شدید اقلیمی بسیار مناسب هستند [۶]. از سوی دیگر، سیستم‌های خنک شونده با هوا[۴] در اقلیم‌های معتدل بسیار مقرون به صرفه‌تر هستند [۸]. یکی دیگر از مزایای ماژول‌های PV/T خنک شونده با هوا، ساده بودن سیستم است که در شکل ۵ نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۳- طرحواره یک ماژول فتوولتائیک PV/T خنک شونده با آب [۸].



شکل ۴- ماژول‌های PV/T مورد استفاده در یک گلخانه [۸].

[۱] Photovoltaic/thermal (PV/T) modules
[۲] Payback periods
[۳] water based PV module
[۴] air based PV module

www.SID.ir
www.jrenew.ir..... /..... info@jrenew.ir

Archive of SID

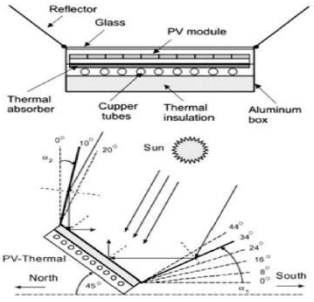
جدول ۵- مقایسه فناوری‌های PV/T مورد استفاده در گلخانه‌ها [۱، ۳، ۸، ۱۲، ۱۷].

ماژول PV/T	کشور	خنک کننده	یافته‌ها
دارای مساحت سطح ۰/۶۰۵ متر مربع، ۷۵ وات	هند	آب	صرفه جویی سالیانه انرژی الکتریکی ۷۱۶ کیلو وات ساعت است. بازیابی سالیانه حرارت پسماند ۱۲/۸ کیلو وات ساعت است. بازده اکسرژی ماژول PV/T برای گلخانه ۴ درصد است.
۸ ماژول فتوولتائیک متصل به صورت ردیفی	هند	هوا	۷ تا ۸ درجه سلسیوس افزایش دمای گلخانه در طول روز و شب فصل گرما ناشی از بازیابی حرارت پسماند است. بازده سالیانه اکسرژی گلخانه ۵/۵ درصد است. انرژی حرارتی سالیانه حدود ۲۴۷۲۹ کیلو وات ساعت است. اکسرژی حرارتی سالیانه حدود ۱۰۰۶ کیلو وات ساعت است. صرفه جویی سالیانه انرژی الکتریکی ۸۰۵/۹ کیلو وات ساعت است.
دارای مساحت سطح ۱۰/۵۳ متر مربع، ۱۲۰۰ وات	هند	آب	انرژی سالیانه حرارتی کلی ۲۹۱۵۷ کیلو وات ساعت است. صرفه جویی سالیانه انرژی الکتریکی ۱۱۸۵ کیلو وات ساعت است. اکسرژی حرارتی سالیانه ۱۳۶۶ کیلو وات ساعت است.
ماژول فتوولتائیک نیمه شفاف با مساحت سطح پوشش ۰/۶ متر مربع	هند	هوا	انرژی حرارتی سالیانه ۴۸۰/۸۱ کیلو وات ساعت است. انرژی الکتریکی سالیانه ۴۶۹/۸۷ کیلو وات ساعت است. ۵ تا ۶ درجه سلسیوس افزایش در دمای داخلی گلخانه برای یک روز معمولی در زمستان در دهلی نو وجود دارد. بازده حرارتی ۴۲ درصد و بازده الکتریکی ۸/۴ درصد است.
ماژول فتوولتائیک نیمه شفاف با مساحت سطح ۰/۶۴۸ متر مربع، ۲۸۰ وات	هند	آب	انرژی حرارتی کلی روزانه ۲۰/۵ کیلو وات ساعت است. دوره بازگشت سرمایه ۳/۷۴ و ۴/۱ سال به ترتیب برای شرایط دارای بار و بدون بار است.

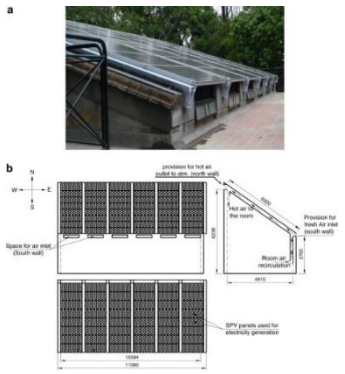
۲-۱-۴- ماژول‌های ترکیبی حرارتی-فتوولتائیک متمرکزکننده[1](CPV/T)

ماژول‌های ترکیبی حرارتی-فتوولتائیک متمرکزکننده (CPV/T) اغلب برای گلخانه‌هایی ترجیح داده می‌شوند که در آن دسترسی به الکتریسیته مانند مناطق روستایی وجود ندارد یا گران است. ادغام یک متمرکزکننده در یک سیستم PV/T بهبود خروجی انرژی حرارتی و الکتریسیته را به همراه دارد (جدول ۶). اجزای یک CPV/T در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۱].

سیستم جمع‌کننده می‌تواند ثابت و یا نور خورشید را برای بازده بیشتر ردیابی کند. استفاده از بازتاب دهنده[2]در لبه ماژول PVT، نور خورشید را از تمام جهات می‌تواند بر روی سطح ماژول انعکاس دهد. تاثیر چنین متمرکزکننده‌هایی بر خروجی حرارتی و الکتریکی در مقایسه با ماژول‌های PV/T متداول قابل مقایسه است که در شکل ۷ نشان داده شده است [۶]. سیستم‌های CPV/T را می‌توان با لنزهای فرنسل به جای انعکاس دهنده‌های متداول به منظور خروجی انرژی حرارتی و الکتریکی بیشتر طراحی کرد (شکل ۸). این سیستم‌ها بسیار فشرده‌تر هستند، بنابراین به راحتی می‌توانند بر روی سقف گلخانه‌ها نصب گردند. سیستم‌های CPV/T در اکثر موارد قادر به تامین انرژی الکتریکی و حرارتی مناسب برای گلخانه‌ها حتی در شرایط شدید اقلیمی می‌باشند [۶].



شکل ۶- یک نوع سیستم CPV/T مورد استفاده در گلخانه [۱۷].



شکل ۵- نمایی از یک ماژول PV/T خنک شونده با هوا و ثابت شده بر روی سقف (الف) و جزئیات بازیابی حرارت پسماند از ماژول‌های فتوولتائیک (ب) [۸].

جدول ۶- مقایسه فناوری‌های CPV/T مورد استفاده در گلخانه‌ها [۲۲].

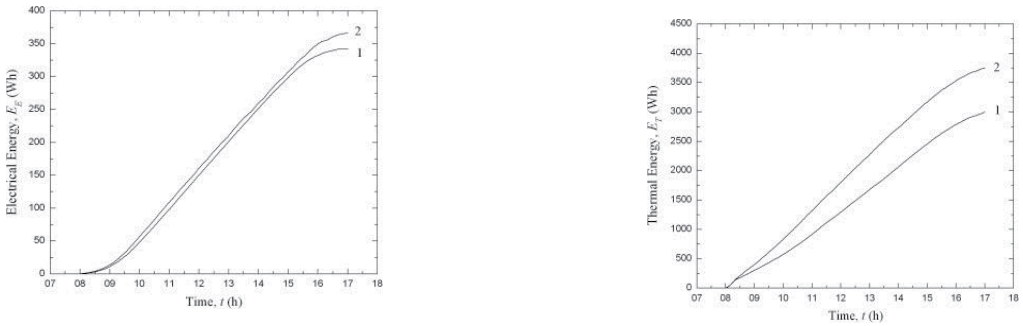
ماژول PV/T	کشور	خنک کننده	یافته‌ها
ماژول فتوولتائیک با لنزهای فرنسل خطی	هلند	آب	انرژی الکتریکی سالیانه ۲۹ کیلو وات ساعت در هر متر مربع است. انرژی حرارتی سالیانه ۵۱۸ مگاژول در هر متر مربع است. سیستم ردیاب نیاز به تنها کمتر از ۲ درصد تولید انرژی الکتریکی کل سالیانه دارد.
ماژول فتوولتائیک با لنزهای فرنسل نقطه‌ای	کره جنوبی	آب	بازده نوری ۷۱/۷ درصد است. دوره بازگشت سرمایه سیستم ۹ سال است.
ماژول فتوولتائیک با لنزهای فرنسل خطی	کره جنوبی	آب	بازده نوری ۶۹/۶ درصد است. دوره بازگشت سرمایه سیستم ۱۰ سال است.
ماژول فتوولتائیک با منعکس کننده سهموی	هلند	آب	انرژی الکتریکی سالیانه ۲۰ کیلو وات ساعت در هر متر مربع است. انرژی حرارتی سالیانه ۱۶۱ مگاژول در هر متر مربع است.

[1] Concentrating PV/T modules

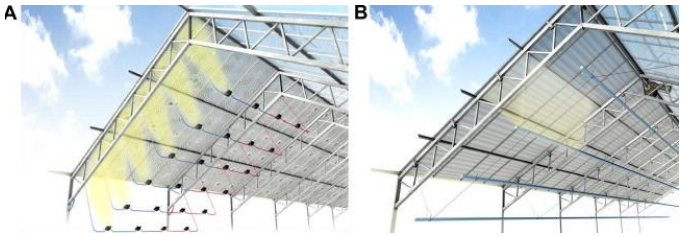
[2] Reflector

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- انرژی حرارتی (راست) و انرژی الکتریکی (چپ) در طی یک روز برای یک ماژول PV/T بدون انعکاس دهنده (۱) و با انعکاس دهنده (۲) [۸].



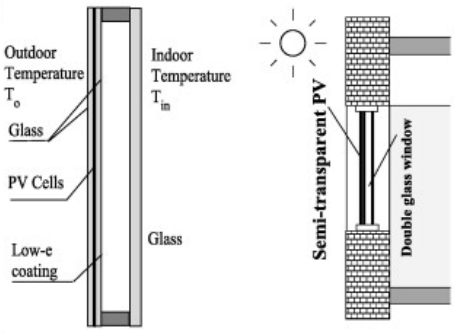
شکل ۸- تجهیز سقف گلخانه با (الف) لنزهای فرنسل نرمال (نقطه‌ای) و ماژول‌های PV/T و (ب) لنزهای فرنسل خطی و ماژول‌های PV/T [۱].

۲-۱-۵- خلاصه یافته‌ها از کاربرد ماژول‌های فتوولتائیک در گلخانه‌ها

از بررسی مقالات مربوطه می‌توان دریافت که ماژول‌های فتوولتائیک برای تامین تقاضای انرژی گلخانه‌ها (گرمایش، سرمایش، تهویه و روشنایی) مناسب هستند. با این حال، بیش‌گرمایش ماژول‌های فتوولتائیک یک چالش بزرگ است که باید حل شود. دمای سلول در فصل تابستان برای مناطق با اقلیم معتدل ۵۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط است. بازده تبدیل انرژی و توان خروجی ماژول‌های فتوولتائیک در صورت عدم استفاده از سیستم‌های سرمایش مناسب، بطور قابل توجهی با افزایش دمای سلول کاهش می‌یابد. این تأثیرات در شرایط شدید اقلیمی بسیار جدی‌تر است. با این حال، ماژول‌های فتوولتائیک با یک واحد سرمایش به خوبی مدیریت می‌شوند و قادر به تامین انرژی الکتریکی و حرارتی در گلخانه‌ها می‌باشند. ماژول‌های فتوولتائیک اغلب روی سقف گلخانه‌ها نصب می‌شوند تا فضای اشغال شده توسط آرایه‌ها را به حداقل برساند. هنگام استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک متداول، نور مرئی که به گلخانه منتقل می‌شود، بسته به ضریب عبوردهی، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نور ناکافی و سایه‌اندازی بر روی گیاهان بر کیفیت و طعم گیاه تأثیر می‌گذارد. ماژول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده، صرفه جویی مکان را به طور قابل توجهی فراهم کرده و می‌توانند مسائل مربوط به روشنایی را در گلخانه حل کنند. با این حال باید توسط یک سیستم سرمایشی مناسب کنترل شوند. از این منظر، ماژول‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف[۱] می‌توانند یک راهکار مناسب باشند. برای محافظت ماژول‌های فتوولتائیک از گرد و خاک و بیش‌گرمایش، آنها با یک قاب شیشه‌ای شفاف پوشیده می‌شوند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ماژول‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف دارای بازده الکتریکی بهتری نسبت به ماژول‌های فتوولتائیک غیرشفاف هستند. این پدیده به این دلیل است که یک ماژول فتوولتائیک نیمه‌شفاف، نور ورودی خورشید را بسته به ضریب عبوردهی[۲] نور انتقال می‌دهند. از این رو، ماژول‌های فتوولتائیک گرمای بیش از حد را تجربه نمی‌کنند، به طوریکه حتی در شرایط اقلیم دینامیکی، بازده نسبتا پایدارتری خواهند داشت. ماژول‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف a-Si می‌توانند انرژی را تا ۳۰ درصد ذخیره کنند که بسیار قابل توجه است. همچنین بر این نکته تاکید شده است که صرفه‌جویی انرژی در گرمایش، ۳۱ درصد می‌تواند از طریق ماژول‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف به دست آید. مواد پوششی که در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند مقادیر مناسب U-value را ندارند (جدول ۷).

جدول ۷- عملکرد مواد مورد استفاده در ماژول‌های فتوولتائیک برای استفاده در گلخانه‌ها [۶].

ماده	انتقال نور	انتقال سولار	مقدار U-value
پنل پلی کربنات	۰/۷۲	۰/۶۹	۱/۸۴
سیستم متداول شیشه دو جداره	۰/۸۱	۰/۷۲	۲/۷
سیستم متداول شیشه دو جداره با مقدار پوششی کم (low-e coating)	۰/۷۴	۰/۵۲	۱/۷
سیستم شیشه دو جداره پر شده با آرگون با مقدار پوششی کم (low-e coating)	۰/۷۴	۰/۴۳	۱/۱



شکل ۹- طرحواره یک فتوولتائیک نیمه شفاف با شیشه دوجداره [۶].

[۱] semi-transparent PV modules

[۲] transmissivity factor

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش مقدار U-value در مواد پوششی مورد استفاده در گلخانه‌ها برای کاهش تقاضای انرژی گلخانه‌ها اهمیت داشته و شیشه فتوولتائیک با تهویه طبیعی در این راستا پیشنهاد می‌شود. ثابت شده است که شیشه فتوولتائیک دو جداره با تهویه طبیعی در مقایسه با سیستم شیشه‌ای جاذب تک جداره متداول می‌تواند مصرف انرژی تهویه مطبوع را تا ۲۸ درصد کاهش دهد. شیشه فتوولتائیک دارای مزایایی است که در آنها طیف نور عبوری تقریبا با نور برخوردی یکسان است و یک عایق خوب گرما برای گلخانه‌هاست زیرا انتقال حرارت توسط تابش کاهش می‌یابد. شکل ۹ یک شیشه فتوولتائیک برای استفاده در گلخانه‌ها را نشان می‌دهد. این طراحی می‌تواند به طور قابل توجهی بیش‌گرمایش را کاهش داده و باعث کاهش نیاز سرمایش شود. پوشش کم باعث افزایش مقدار U-value در شیشه می‌شود، زیرا بخش اعظمی از تابش امواج بلند، بازتاب می‌یابد. با استفاده از این روش، بازده تبدیل انرژی ماژول‌های فتوولتائیک به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با انتخاب بازه مناسب برای مقدار U-value شیشه‌های فتوولتائیک دو جداره، نیاز گرمایش نیز می‌تواند کاهش یابد. به طور کلی، ماژول‌های فتوولتائیک نیمه شفاف گزینه مناسبی برای گلخانه‌ها هستند. آنها طول عمر بیش از ۲۰ سال دارند و هزینه‌های نگهداری ناچیزی دارند.

۲-۲- جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی[۱]

یک جمع کننده حرارتی خورشیدی به عنوان واحدی تعریف می‌شود که گرما را با جذب تابش خورشید جمع می‌کند. انرژی تابش خورشید به شکل تابش الکترومغناطیسی از طول موج مادون قرمز (طولانی) تا نور فرابنفش (کوتاه) است. امروزه جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی به عنوان ماژول‌های آب گرم خورشیدی شناخته می‌شوند. با این وجود، به نام‌های مختلفی مانند جمع کننده سهموی خطی[۲]، برج‌های خورشیدی[۳]یا بخاری‌های هوای خورشیدی[۴]نیز نامیده می‌شوند. جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی را می‌توان با یا بدون متمرکزکننده طراحی کرد [۲۲]. جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی متمرکزکننده معمولا از سیستم‌های پیچیده‌ای برای تولید الکتریسیته از طریق گرمایش یک سیال کاری برای راه‌اندازی یک توربین متصل به ژنراتور الکتریکی استفاده می‌کنند. از سوی دیگر، جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی و تجاری برای گرمایش فضا و نیز به طور گسترده‌ای در گلخانه ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳].

۲-۲-۱- جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی صفحه مسطح[۵]

استفاده از جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی صفحه مسطح در گلخانه‌ها عمدتا به منظور کاهش بارهای گرمایشی است تا اینکه یک راهکار باشد. این عمل را می‌توان با بازده حرارتی نامطلوب محصولات‌شان در بازار توضیح داد. با این حال، به دلیل هزینه کم در چندین کاربرد استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، محققان عملکرد حرارتی یک گلخانه را با ۱۰ جمع کننده‌های خورشیدی آبی صفحه مسطح که در آن از مواد تغییر فاز دهنده[۶](PCM) به عنوان ذخیره کننده انرژی حرارتی استفاده شد، مورد بررسی قرار دادند (شکل ۱۰). نتایج نشان دادند که سیستم پیشنهادی می‌تواند از ۱۸ تا ۲۳ درصد کل نیاز روزانه انرژی حرارتی گلخانه را به مدت ۴-۳ ساعت در مقایسه با سیستم گرمایش متداول تامین کند [۲۴]. در پژوهش دیگری محققان امکان استفاده از انرژی حرارتی زمینی برای گرمایش و سرمایش گلخانه‌ها را ارزیابی کردند [۲۵]. یک جمع کننده خورشیدی صفحه مسطح به مساحت ۲/۱۸ متر مربع، ۲۰۰ لیتر مخزن ذخیره آب گرم و ۲۰۰ لیتر مخزن ذخیره آب سرد برای کنترل دمای گلخانه در ۲۰ درجه سلسیوس در ۱۰ متر مکعب استفاده شد. نتایج نشان دادند که سیستم هنوز نیاز به برق از شبکه دارد، اما این امیدواری وجود دارد که به اندازه کافی شرایط مناسب را برای گیاهی مانند فلفل فراهم کند.

شکل ۱۰- گلخانه‌ای مجهز به جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی صفحه مسطح و خطوط لوله گردش هوا [۸].

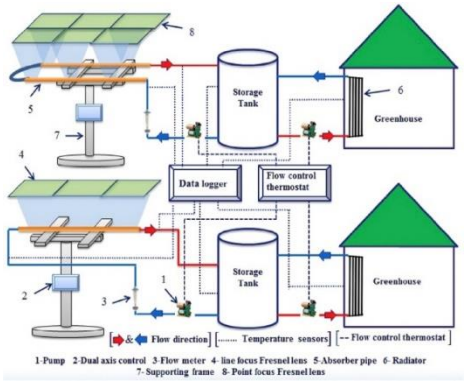
۲-۲-۲- جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی متمرکزکننده

لنز فرنسل یکی از رایج‌ترین متمرکزکننده‌های مورد استفاده در جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی است. هزینه پایین و سهم آن در بازده حرارتی، لنز فرنسل را برای کاربردهای گلخانه‌ای جذاب می‌کند [۶]. همچنین توسط محققان تأیید شده است که جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی لنز فرنسل در مقایسه با جمع کننده‌های غیر متمرکز، از لحاظ بازده، خروجی حرارتی و دوره گردش کار بهتر عمل می‌کنند [۶]. به عنوان مثال، محققان دو گلخانه مجهز به لنزهای فرنسل خطی و نقطه‌ای[۷]را بررسی کردند (شکل ۱۱). هر دو جمع کننده خورشیدی دارای ردیاب‌های خورشیدی دو محوره[۸]بودند تا اطمینان حاصل شود که نور خورشید به طور دقیق توسط جمع کننده خورشیدی به صورت عمودی ردیابی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که جمع کننده حرارتی خورشیدی مجهز به لنز فرنسل نقطه‌ای دارای عملکرد ۷ تا ۱۲ درصدی نسبت به جمع کننده حرارتی خورشیدی مجهز به لنز فرنسل خطی است [۸]. علاوه بر این، از نظر دسترسی انرژی در واحد سطح و همچنین بازده حرارتی، جمع کننده حرارتی خورشیدی مجهز به لنز فرنسل نقطه‌ای نسبت به جمع کننده حرارتی خورشیدی مجهز به لنز فرنسل خطی عملکرد بهتری داشت (شکل ۱۲). بازده حرارتی جمع‌کننده حرارتی خورشیدی متمرکزکننده می‌تواند با استفاده از سیستم‌های ردیاب خورشیدی افزایش یابد [۶]. محققان از لنزهای فرنسل خطی در یک گلخانه که دارای سامانه انرژی فتوولتائیک بود، استفاده کردند [۸]. این ردیاب در داخل شیشه دو جداره قرار داده شد تا لنز را از گرد و غبار و شرایط آب و هوایی محافظت کند. لنزهای فرنسل خطی کل سقف گلخانه را پوشش می‌دهند. این سیستم قادر است سالانه انرژی الکتریکی ۲۹ کیلو وات بر مترمربع و انرژی حرارتی تا ۵۱۸ مگا ژول بر متر مربع تولید کند. علاوه بر این، در تحقیقات ذکر شده است که سیستم الکتریکی برای سیستم ردیابی، نیاز به انرژی کمتر از ۲ درصد انرژی سالانه را دارد.

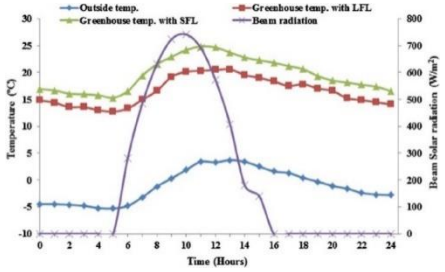
[۱] Solar Thermal Collectors
[۲] Solar Parabolic Troughs
[۳] Solar Towers
[۴] Solar Air Heaters
[۵] Flat plate solar thermal collectors
[۶] Phase change material
[۷] Linear and spot Fresnel lenses
[۸] dual-axis solar trackers

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱- طرحواره لنزهای فرنسل نقطه‌ای و خطی در ترکیب با جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی [۶].



شکل ۱۲- تغییرات دمای روزانه داخل یک گلخانه مجهز به لنزهای فرنسل نقطه‌ای و خطی در ترکیب با جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی [۱۷].

۲-۲-۳- خلاصه کاربرد جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی در گلخانه‌ها

جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی متمرکزکننده را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای دریافت انرژی در دمای بالا دانست که این مورد با استفاده از جمع کننده‌های صفحه مسطح قابل دستیابی نیست. به دلیل خروجی بالاتر دمایی، می‌توان آنها را برای گرمایش گلخانه مناسب‌تر دانست. از میان دستگاه‌های متمرکزکننده، لنز فرنسل به دلیل دقت بالا، بازده لیزری عالی و هزینه کمتر، مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد. کشف لنزهای فرنسل پلی متیل متاکرلات[۱](PMMA) باعث تغییر و تحول صنعت لنز و صنعت انرژی خورشیدی به دلیل بهبود شاخص شکست و پایداری حرارتی آن شده است. به طور عمده، لنزهای فرنسل را می‌توان از نظر نسبت تمرکز مانند نقطه تمرکز و خط تمرکز به ترتیب با نسبت‌های تمرکز بالاتر و پایین‌تر طبقه‌بندی کرد. در مقالات لنزهای فرنسل با تمرکز نقطه‌ای برای کاربردهای انرژی حرارتی ترجیح داده می‌شوند، زیرا اندازه گیرنده کوچک آنها باعث کاهش تلفات حرارت می‌شود. برای گلخانه‌ها، یک لنز فرنسل با گیرنده ردیاب تک یا دو محوره می‌تواند به راحتی انرژی حرارتی مورد نیاز برای گرمایش فضا را تامین کند. لنزهای فرنسل همچنین می‌توانند با ماژول‌های PV/T به منظور کاربردهای چند منظوره ترکیب شوند. محققان، از یک لنز فرنسل خطی روی سقف یک گلخانه استفاده کردند تا تابش مستقیم خورشید را بر روی یک ماژول PV/T به منظور تولید توان الکتریکی و حرارت تمرکز دهند. در مقایسه با جمع کننده‌های غیر متمرکزکننده، متوسط بازده حرارتی لنزهای فرنسل و دیگر جمع کننده‌های متمرکزکننده، به دلیل نسبت تمرکز بالاتر و تلفات حرارتی کمتر، بیشتر است. هنگام مقایسه عملکرد و هزینه یک جمع کننده لنز فرنسل با یک جمع کننده سهموی، سیستم لنز فرنسل بهترین گزینه از نظر هزینه و انرژی در دسترس است. تراکم توان خطی، بر حسب کیلو وات بر هر متر طولی از گیرنده برای جمع کننده سهموی نزدیک به ۵ کیلو وات بر متر در حالیکه برای گیرنده‌های فرنسل بین ۱۰ تا ۱۵ کیلو وات بر متر است. مقدار بیشتر انرژی در دسترس در واحد روزنه جمع کننده‌های لنز فرنسل به دلیل سیستم ردیاب دو محوره آنها نسبت به ردیاب تک محوره جمع کننده سهموی است.

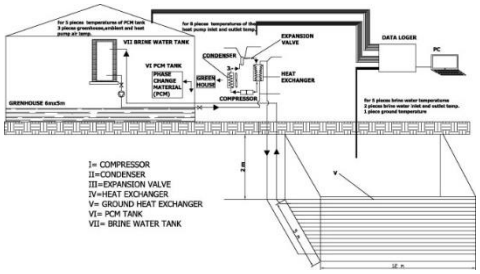
[۱] polymethyl methacrylate

۲-۳- ذخیره انرژی حرارتی

عوامل زیادی در گلخانه وجود دارند که باید برای رشد مطلوب گیاه مورد توجه قرار گیرند. شرایط آب و هوایی در گلخانه باید به طور مداوم برای کنترل نیازهای محیطی گیاه حفظ شوند. بنابراین، پایداری دمایی و رطوبت در داخل گلخانه‌ها ضرورت دارد. در این راستا، فناوری‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی نه تنها برای کاهش تقاضای انرژی حرارتی گلخانه‌ها بلکه همچنین برای پایدارسازی شرایط مطلوب برای محیط گلخانه مورد توجه قرار می‌گیرند. بازده ذخیره انرژی حرارتی به شدت تحت تاثیر مواد ذخیره‌کننده و مخزن مورد استفاده قرار دارد. محققان از مواد ذخیره‌کننده مختلفی مانند هوا، آب و PCM استفاده کرده‌اند [۲۶]. سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی معمولا با استفاده از مخزن‌های ذخیره‌سازی عایق‌بندی شده برای حفظ مقدار انرژی حرارتی در روز و شب استفاده می‌شوند [۲۸].

۲-۳-۱- مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای ذخیره انرژی حرارتی

ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از PCMها برای گرمایش گلخانه‌ها به سال ۱۹۸۰ باز می‌گردد. اغلب PCMهای مورد استفاده شامل $CaCl_2.6H_2O$، $Na_2SO_2.10H_2O$ و Paraffin هستند [۶]. PCMها در کاربردهای گلخانه بسیار با اهمیت هستند زیرا بازه ضریب عملکرد[۲](COP) مناسبی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی دارند. محققان از کلسیم کلرید هگزا هیدرات به عنوان یک PCM در یک گلخانه با سطح ۳۰ متر مربع استفاده کردند (شکل ۱۳). آزمایشات انجام شده نشان دادند که COP سیستم کلی در بازه ۲ تا ۳/۵ قرار دارد که مناسب است [۸]. PCMها نیز در ترکیب با جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بتوانند بازده سیستم را بهبود ببخشند. به عنوان مثال، بخاری‌های هوای خورشیدی در ترکیب با PCM قادر به تامین ۱۸ تا ۲۳ درصد کل نیاز روزانه انرژی حرارتی یک گلخانه برای ۴-۳ ساعت است [۶]. محققان مشاهده کردند که استفاده از PCM در گلخانه می‌تواند دمای داخلی را در سطح ۱۵ درجه سلسیوس در شب حفظ کند در حالیکه دما در خارج به ۸ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد [۶]. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، بخاری‌های هوای خورشیدی در ترکیب با PCM نیز در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. نتایج نشان داده است که دمای داخلی گلخانه را می‌توان با هزینه‌های کمتری با استفاده از یک PCM مناسب کنترل کرد (جدول ۸).

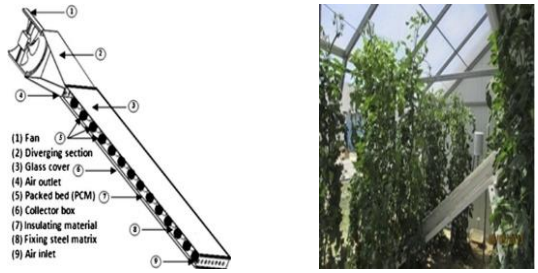


شکل ۱۳- یک گلخانه مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و اجزای آن [۱۴].

[۲] coefficient of performance

www.SID.ir

Archive of SID



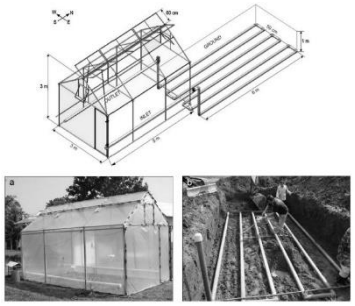
شکل ۱۴- بخاری‌های خورشیدی خنک شونده با هوا در ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده برای یک گلخانه [۸].

جدول ۸- خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در گلخانه‌ها [۱۷].

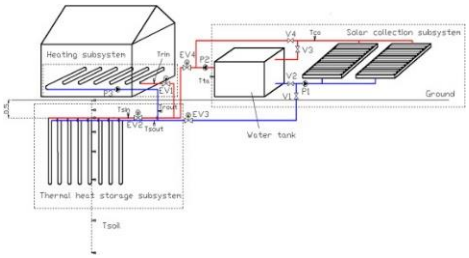
ماده	نقطه ذوب (درجه سلسیوس)	گرمای نهان (کیلو ژول بر کیلوگرم	ظرفیت گرمایی ویژه (کیلو ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)
Capsule (AC27)	۲۷	۱۹۲/۶	۲/۲۲ (مایع)- ۱/۴۲ (جامد)	۱۷۱۰ (مایع)- ۱۵۳۰ (جامد)	۰/۵۸ (مایع)- ۱/۰۵ (جامد)

۲-۳-۲- استفاده از خاک به عنوان ذخیره کننده انرژی حرارتی

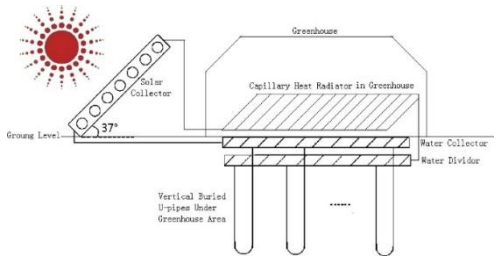
علاوه بر کاربرد PCM در گلخانه‌ها، خاک نیز در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده می‌شود، زیرا ویژگی‌های خاص زیادی دارد. خاک دارای توانایی ذخیره انرژی حرارتی در طول سال به یک روش منظم است. از خاک به عنوان مبدل حرارتی برای کاهش دمای داخلی گلخانه‌ها استفاده می‌کنند. خاک همچنین به عنوان یک چاهک گرما برای کاربردهای پمپ گرمایی استفاده می‌شود. علاوه بر این، خاک دارای پتانسل خوبی برای ذخیره انرژی حرارتی تولیدشده توسط جمع کننده‌های خورشیدی است [۲۰]. در اقلیم‌های گرمسیری که در آن نیاز سرمایشی بالاست، مبدل‌های حرارتی زمینی به طور گسترده‌ای به عنوان یک روش سرمایش غیرفعال استفاده می‌شوند که بسیار کم هزینه و سازگار با محیط زیست هستند. محققان عملکرد سرمایشی یک سیستم لوله زمینی افقی[۱] (HETS) را برای یک گلخانه بررسی کردند (شکل ۱۵). HETS با طول ۳۸/۵ متر به عمق ۱ متر حفر شد. حداکثر COP در تابستان بیشتر از فصل زمستان و روزهای آفتابی به ترتیب ۳/۵۶، ۲/۰۴ و ۰/۷۷ گزارش شد. بازده سرمایش HETS در تابستان ۷۴/۸۴ درصد بود [۲۰]. در پژوهش دیگری عملکرد حرارتی یک سیستم گرمایش خورشیدی با ذخیره انرژی زیرزمینی فصلی برای استفاده در گلخانه تحلیل شد [۶]. جزئیات سیستم ذخیره انرژی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این سیستم ذخیره انرژی، ۴۹۷۰ متر مکعب خاک زیرزمینی برای ذخیره حرارت تولیدشده از جمع کننده‌های خورشیدی در فصل‌های غیر گرمایش از طریق مبدل‌های حرارتی U-tube، استفاده می‌کند. نتایج نشان دادند که این سیستم قادر به ذخیره انرژی ۳۳۱/۹ گیگا ژول در فصل بدون گرماست و ۲۰۸/۹ گیگا ژول از این انرژی در گرمایش فضای گلخانه استفاده می‌شود. COP الکتریکی کل سیستم ۸/۷ محاسبه شد که حتی بهتر از سیستم گرمایش پمپ حرارتی متداول است. محققان عملکرد حرارتی سیستم ذخیره کننده حرارتی خورشیدی فصلی با خاک را برای گلخانه از طریق نرم افزار شبیه‌سازی سیستم‌های گذرا-ترنسیس[۲] (TRNSYS) شبیه‌سازی کردند [۸]. طرح کلی سیستم در شکل ۱۷ آورده شده است. این سیستم از U-pipe جاسازی‌شده در زمین و متصل به یک جمع‌کننده خورشیدی استفاده می‌کند. زیرمجموعه گرمایش گلخانه، رادیاتورهای مویرگی[۳] است. نتایج نشان داد که ۹۲/۸ درصد از انرژی حرارتی در مخزن آب زیرزمینی تلف شده که باعث تلفات انرژی سالانه ۱۲/۷ درصد می‌شود. شکل ۱۸ مقایسه‌ای از مقادیر دمای خاک با و بدون ذخیره انرژی حرارتی را نشان می‌دهد.



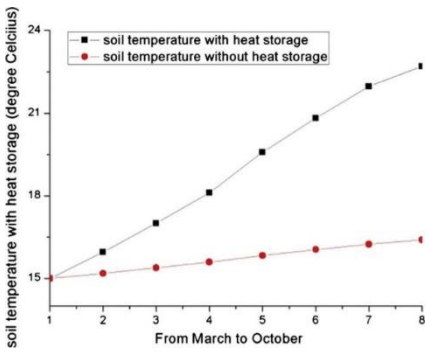
شکل ۱۵- یک سیستم لوله زمینی افقی در (الف)- گلخانه و (ب)- حین اجرا [۶].



شکل ۱۶- یک سیستم گرمایش خورشیدی با ذخیره سازی انرژی حرارتی فصلی [۸].



شکل ۱۷- طرح واره سیستم حرارتی خورشیدی فصلی با ذخیره کننده خاک [۳۰].



شکل ۱۸- مقایسه دمای خاک با و بدون ذخیره سازی انرژی حرارتی [۳۰].

[۱] horizontal earth tube system
[۲] Transient Systems Simulation
[۳] Capillary Radiators

www.SID.ir

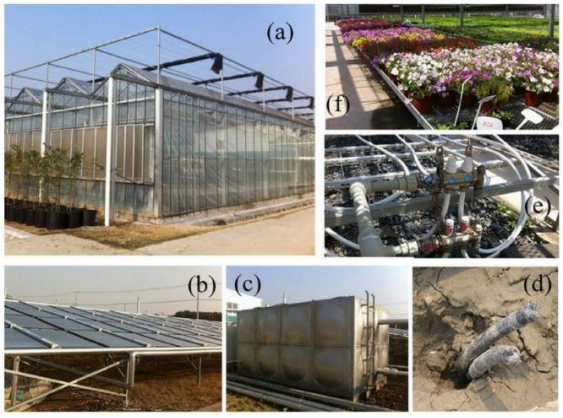
Archive of SID

۲-۳-۳- بخاری‌های خورشیدی خنک شونده با هوا برای ذخیره انرژی حرارتی

بخاری‌های هوای خورشیدی[۱] به طور گسترده‌ای در گلخانه‌ها همراه با PCM برای اهداف ذخیره سازی انرژی استفاده می‌شوند. برای شرایط شدید اقلیمی بخاری‌های هوای خورشیدی همراه با PCM می‌توانند دمای هوای داخلی گلخانه را ۱۵ درجه سلسیوس حفظ کنند که برای کشت گوجه فرنگی ایده آل است [۲۸]. نتایج آنها نشان داد که این سیستم می‌تواند ۳۱ درصد از نیاز گرمایش را در شبانه روز تامین کند. در پژوهش دیگری محققان نشان دادند که جمع کننده‌های هوای خورشیدی به کمک PCM می‌توانند بازده کلی سیستم را برای حفظ دمای گلخانه در دمای ۱۵ درجه سلسیوس افزایش دهد، در حالیکه دمای بیرون ۸ درجه سلسیوس است [۶].

۲-۳-۴- بخاری‌های خورشیدی خنک شونده با آب[۲] برای ذخیره انرژی خورشیدی

آب به عنوان یک ماده ذخیره ساز انرژی حرارتی در گلخانه به علت ویژگی‌های خاص سیالی آن استفاده می‌شود. آب در هنگام گرم شدن تغییرات شیمیایی ندارد. آب معمولا به عنوان ماده هادی از جمع کننده خورشیدی به سمت مبدل حرارتی U-tube در گلخانه از طریق مخزن ذخیره سازی حرارتی استفاده می‌شود. یک مثال برای این کاربرد در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۸]. بیش از ۶۲ درصد از حرارت ذخیره شده برای گرمایش فضا از طریق چنین سیستمی در دسترس است.



شکل ۱۹- جمع کننده آبی خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی حرارتی [۶].

۲-۳-۵- خلاصه یافته‌ها از کاربرد ذخیره انرژی حرارتی در گلخانه‌ها

سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با خاک قادر به حفظ دمای گلخانه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشند که برای اکثر گیاهان ایده‌آل است. مبدل حرارتی در درون خاک حفاری شده[۳] و در اطراف دیواره‌های گلخانه (مبدل حرارتی دفن مویرگی[۴] قرار داده می‌شوند. مبدل‌های حرارتی زمینی[۵](EAHE) برای استفاده در گلخانه‌ها بسیار مناسب هستند. محققان نشان داده‌اند که کاهش دمای داخلی در ۲/۸ درجه سلسیوس در ساعات اوج تابستان وجود دارد [۲۹]. انتظار می‌رود که گلخانه‌های دارای EAHE دارای توانایی کاهش تقاضای سرمایش ۳۰ درصدی در اوج پیک در فصل تابستان باشند به طوریکه محققان گزارش داده‌اند که دمای گلخانه را می‌توان در دمای ۱۵-۱۳ درجه سلسیوس حتی در زمستان از طریق سیستم ذخیره انرژی فصلی زیرزمینی با خاک حفظ کرد [۳۰]. یافته‌ها نشان می‌دهند که حفاری گودال تا عمق مشخصی، دمای پایدارتری در گلخانه ایجاد کرده که حتی تحت تاثیر دمای محیط قرار نمی‌گیرد. سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی فصلی، ظرفیت کافی برای ذخیره و تامین انرژی مورد نیاز برای گرمایش فضا در گلخانه را دارد. در یک عمق مشخص، خاک در طول سال دارای دمای پایداری است. در آزمایشی مشخص شد که دمای خاک در عمق ۱۰ متر در دمای ۱۷/۵ درجه سلسیوس پایدار است [۳۰]. مشاهده شده است که ظرفیت گرمایی خاک لخت تقریبا برابر با ۱۴/۴ وات بر متر مربع است. با این حال، انرژی ذخیره شده به علت هدایت تلف می‌شود. مقدار تلفات سالیانه گرما در خاک حدود ۱۲/۷ درصد است [۶]. از اینرو، عایق‌بندی به منظور کاهش تلفات گرمایی در چنین مواردی ضروری است. لوله‌کشی هنوز هم یک فرایند پر هزینه در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی با خاک است. برخلاف روش‌های حفر گودال‌های متداول، انتقال لوله به خاک می‌تواند به عنوان روش جایگزین برای کاهش هزینه‌های مذکور انجام شود. روش انتقال لوله تنها با استفاده از یک لوله فلزی تک جداره به عنوان یک روش جایگزین برای حلقه U لوله، پیشنهاد می‌شود.

۲-۴- پمپ حرارتی

پمپ‌های حرارتی به علت مزایای خاصی که توسط فناوری‌های دیگر ارائه نمی‌شوند، در گلخانه‌ها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. پمپ‌های حرارتی هنگامیکه هوا سرد و یا در شب مورد نیاز است به عنوان یک دستگاه گرمایش یا برای تامین سرمایش در گلخانه‌ها هنگامیکه هوا خیلی گرم است مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. علاوه بر این، پمپ‌های حرارتی نیز می‌توانند برای کنترل رطوبت نسبی هوا در گلخانه استفاده شوند. از بررسی مقالات مشخص است که پمپ‌های حرارتی برای حفظ پایداری دما در گلخانه‌ها مناسب هستند.

۲-۴-۱- پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی

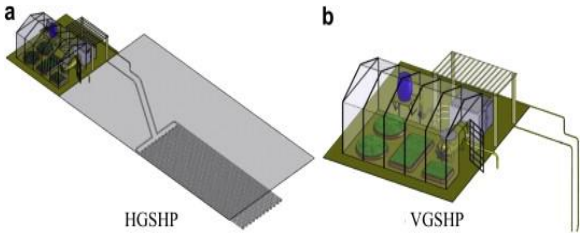
پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی[۶] برای کشاورزان در گلخانه‌ها پیشنهاد می‌شوند. شکل ۲۰ نصب لوله‌های مبدل حرارتی با منبع زمینی را به صورت افقی نشان می‌دهد. نصب لوله‌های مبدل حرارتی با منبع زمینی نیز می‌تواند به صورت عمودی انجام شود [۳۰]. مقایسه عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایشی در گلخانه‌هایی که از پمپ حرارتی عمودی با منبع زمینی[۷](VGSHP) و پمپ حرارتی افقی با منبع زمینی[۸](HGSHP) استفاده می‌کنند، در شکل ۲۱ آورده شده است. هر دو سیستم عمودی و افقی بر روی دو گلخانه شیشه‌ای با اندازه یکسان نصب شده‌اند و هر کدام دارای مساحت ۳۰ متر مربع هستند. HGSHP تا عمق ۲ متر، در حالیکه VGSHP تا عمق ۶۰ متر حفاری شدند. دومین سیستم پمپ حرارتی از مبرد R-22 استفاده می‌کند و برای جلوگیری از انجماد پمپ گردش کرده و ۲۵ تا ۳۰ درصد مخلوط اتیلن گلیکول-آب در آن استفاده می‌شود. از نتایج تجربی، مقادیر COP برای HGSHP و VGSHP به ترتیب ۳/۳ و ۳/۵ گزارش شدند. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که VGSHP بیشتر از HGSHP مناسب است. با این حال، به این نکته بایستی اشاره داشت که هزینه نصب VGSHP بیشتر از HGSHP است.

[۱] Solar air heaters
[۲] Solar water heaters
[۳] backfilled
[۴] capillary buried heat exchanger
[۵] Earth–air heat exchangers
[۶] Ground source heat pumps
[۷] Vertical ground source heat pump
[۸] Horizontal ground source heat pump

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲۰- گلخانه و مبدل‌های حرارتی زمینی حفر شده به عمق ۲ متر [۸].



شکل ۲۱- گلخانه با مبدل حرارتی افقی و عمودی [۸].

پمپ‌های حرارتی با منبع خورشیدی و زمینی[۱] را می‌توان برای گرمایش و هم سرمایش در مناطق با اقلیم‌های مختلف استفاده کرد [۸]. محققان سیستم‌های پمپ حرارتی به کمک خورشید[۲] را با ذخیره انرژی حرارتی فصلی در مخازن سطحی بررسی کردند [۶]. آنها گزارش دادند که دمای انتقال مخزن ذخیره‌سازی و COP سالیانه برای چنین سیستم‌هایی که امکان ذخیره فصلی انرژی در مخزن سطحی با عمق دفن کم دارند، بسیار چشمگیر است. محققان یک دستگاه ذخیره انرژی حرارتی را که با یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی ترکیب شده بود برای گرمایش استفاده کردند و آنالیز انرژی و اکسرژی را در این سیستم انجام دادند [۸]. آنها نشان دادند که COP پمپ حرارتی و بازده اکسرژی با افزایش طول واحد ذخیره کننده انرژی حرارتی کاهش می‌یابند. هنگامیکه ذخیره انرژی حرارتی شارژ می‌شود، صرفه‌جویی انرژی الکتریکی بیش از ۵۰ درصد می‌شود. محققان نشان دادند که سیستم ترکیبی یک پمپ حرارتی زمین گرمایی با جمع کننده حرارتی خورشیدی برای گرمایش مناسب است [۸]. محققان یک مدل ترکیبی پمپ حرارتی زمین گرمایی با جمع کننده حرارتی خورشیدی را آنالیز کردند که این سیستم به یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی برای تامین بار گرمایی و آب داغ خانگی نیاز داشت. نتایج نشان دادند که متوسط بهره‌وری سالانه برای گرمایش محیط تا میزان ۲۶ درصد افزایش می‌یابد [۸]. سیستم ترکیبی مزایای خاصی دارد. از نظر اقتصادی و فنی مناسب بوده و می‌تواند به جای سیستم‌های متداول استفاده شود [۶]. محققان یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی در ترکیب با جمع کننده خورشیدی را با ذخیره فصلی ارائه دادند [۶]. ذخیره سازی در فصل‌های غیر گرما انجام و در تابستان زمین به عنوان یک منبع برای استخراج گرما از ساختمان استفاده شد. در زمستان، جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی اولویت بیشتری نسبت به پمپ‌های حرارتی دارند و ساختمان توسط سیستم ترکیبی گرم می‌شود. گرمای استخراج شده از خاک توسط پمپ حرارتی حدود ۷۵ درصد از حرارت ذخیره شده توسط ذخیره سازی فصلی خورشیدی را تامین می‌کند. بازده انرژی و اکسرژی سیستم‌های پمپ حرارتی با منبع زمینی به عنوان تابعی از عمق برای فصل گرما بررسی شد [۶]. نتایج نشان داد که با افزایش عمق منبع گرما (زمین) برای فصل گرما، بازده انرژی و اکسرژی افزایش می‌یابد.

۲-۴-۲- خلاصه یافته‌ها از کاربرد پمپ‌های حرارتی در گلخانه‌ها

سیستم‌های پمپ حرارتی با سیستم‌های متداول گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع[۳] (HVAC) از نظر هزینه، بازه COP و دوره بازگشت سرمایه قابل رقابت هستند. به همین دلیل، پمپ‌های حرارتی در کاربردهای مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش بسیار مورد توجه می‌باشند. پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی به علت هزینه‌های عملیاتی کمتر و بازه COP بیشتر بطور گسترده‌ای در گلخانه‌ها نسبت به پمپ‌های حرارتی متداول استفاده می‌شوند. بیشترین مصرف انرژی سیستم‌های پمپ حرارتی مربوط به کمپرسور است که حدود ۸۴ درصد کل مصرف توان را مصرف می‌کند. از اینرو، بازده کمپرسور باید برای کاهش مصرف انرژی در اولویت باشد. بعضی از عوامل تاثیرگذار بر بازده پمپ حرارتی شامل چرخه یخزایی[۴] اتلاف ناشی از شروع و توقف (عملیات غیر پیوسته)، اتلاف در بار جزئی، پیچیدگی ناشی از مبدل حرارتی بین کندانسور و تبخیرکننده، تغییرات با دمای خارجی، مخلوط سیال مبرد، اثر حداکثر دما، اثر بخار در ورودی به تبخیر کننده و بازده موتور پمپ حرارتی هستند.

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برای گلخانه‌ها بررسی شدند. برخی از یافته‌های حاصل از پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ✓ ماژول‌های فتوولتائیک نیمه شفاف می‌توانند به‌عنوان یک ماده پوشش دهنده سقف در گلخانه‌ها برای مقاصد چند منظوره استفاده شوند. چنین موادی نور طبیعی کافی را انتقال داده و همچنین تولید الکتریسیته را به طرز موثری تامین می‌کنند، زیرا دمای سلول از محدوده خاصی تجاوز نمی‌کند. الکتریسیته تولید شده می‌تواند برای روشنایی، آبیاری و سیستم‌های پمپ حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.
- ✓ استفاده مناسب از ذخیره انرژی حرارتی فصلی از طریق مبدل‌های حرارتی عمودی زمینی به راحتی می‌تواند نیاز گرمایشی گلخانه‌ها را در مناطق با اقلیم‌های مختلف پاسخ دهد. برای چنین کاربردی، پلی اتیلن می‌تواند انتخاب مناسبی از ماده‌ای عایق با هدایت حرارتی و هزینه کم باشد.
- ✓ سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی می‌توانند نیاز گرمایش و سرمایش گلخانه‌ها را با هزینه‌ای مناسب فراهم کنند. این سیستم‌ها معمولا مقادیر COP بیش از ۳ دارند که خیلی قابل توجه است.
- ✓ مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند در گلخانه‌ها به منظور کاهش هزینه‌های گرمایش فضا در ترکیب با جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی برای بهبود انرژی حرارتی سیستم، مورد استفاده قرار گیرند که در مناطق با اقلیم شدید بسیار زیاد است.
- ✓ دوره بازگشت سرمایه سیستم‌های گلخانه‌ای از نظر صرفه‌جویی در انرژی از ۴ تا ۸ سال بسته به نوع انرژی مورد استفاده و داده‌های آب و هوایی متفاوت است.

[۱] Solar and ground coupled heat pumps
[۲] Solar aided heat pump
[۳] Heating, Ventilation and Air-Conditioning
[۴] defrost cycle

www.SID.ir

Archive of SID

- ✓ پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که نیاز گرمایش، ۷۰ تا ۸۰ درصد یک گلخانه متداول را تشکیل می‌دهند، در حالیکه الکتریسیته ۱۰ تا ۱۵ درصد و حمل و نقل سوختی (برای تراکتور، کامیون و سایر وسایل نقلیه) بقیه را تشکیل می‌دهد. نقش تقاضای گرمایشی در مصرف انرژی کل را می‌توان با ویژگی‌های ساختاری ضعیف و مقاومت حرارتی نامناسب مواد پوششی مورد استفاده در سیستم‌های گلخانه‌ای متداول توضیح داد. بنابراین، راهکارهای پایدار برای رفع این مشکلات، استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برای کاهش مصرف انرژی در بخش گلخانه‌ای و توقف انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با آنهاست.

مراجع

[1] Ahamed, M.D., Guo, H., Tanino, K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses, *Biosystems Engineering*, 178: 9-33. 2019.

[2] Anifantis, A.S., Colantoni, A., Pascuzzi, S. Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating. *Renewable Energy*, 103, 115–127. 2017.

[3] Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., Lazaar, M., Farhat., A. Experimental study of an air conditioning system to control a greenhouse microclimate. *Energy Conversion and Management*, 79, 543-553. 2014.

[4] Sarlaki, E. and Hassan-Beygi, R. Production potentials and technical barriers facing the development and utilization of renewable energies in Iran. *Journal of renewable and new energy*, 6(1): 14-25. 2018 (In Persian).

[5] Cossu, M., Cossu, A., Deligios, P. A., Ledda, L., Li Zh., Fatnassi, H., Poncet C., Yano A. Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 822–834. 2018.

[6] Cuce, E. Development of innovative window and fabric technologies for low-carbon buildings. Ph.D. Thesis, The University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom, 2014.

[7] Cuce, E., Cuce P. M., Young, C.H. Energy saving potential of heat insulation solar glass: Key results from laboratory and in-situ testing, *Energy*, 97, 369-380. 2016.

[8] Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34-59. 2016.

[9] Cuce, P.M., Cuce, E. Toward cost-effective and energy-efficient heat recovery systems in buildings: Thermal performance monitoring. *Energy*, 137: 487–494. 2017.

[10] Esen, M., & Yuksel, T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, 65, 340-351. 2013.

[11] Esmaeli, H. and Roshandel, R. Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions, *Renewable Energy*, 145, 1255-1265. 2019.

[12] Ghasemi, H. M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. Solar energy conservation in greenhouse: Thermal analysis and experimental validation. *Renewable Energy*, 96, 509-519. 2016.

[13] Ghoulem, M., Moueddeb, K.El., Nehdi, E., Boukhanouf, R., Calautit, J. K. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121-150. 2019.

[14] Gilli, C., Kempkes, F., Munoz, P., Montero, J.I., Giuffrida, F., Baptista, F.J., Stepowska, A., Stanghellini, C. Potential of different energy saving strategies in heated greenhouse, *Acta Horticulturae*. pp. 467–474. 2017.

[15] Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., Roshandel, R. A novel integrated framework to evaluate greenhouse energy demand and crop yield production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 487-501. 2018.

[16] Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., Roshandel, R. A comparative study on the environmental impact of greenhouses: A probabilistic approach, *Science of The Total Environment*, 675, 560-569. 2019.

[17] Hassanien, R., Hassanien, E., Li, Ming., Lin W. D. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. 2016.

[18] Mahdavi, S., Sarhaddi, F., Hedayatizadeh, M. Energy/exergy based-evaluation of heating/cooling potential of PV/T and earth-air heat exchanger integration into a solar greenhouse, *Applied Thermal Engineering*, 149, 996-1007. 2019.

[19] Marucci, A., Zambon, I., Colantoni, A., Monarca, D. A combination of agricultural and energy purposes: Evaluation of a prototype of photovoltaic greenhouse tunnel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1178-1186. 2018.

[20] Mehrpooya, M., Hemmatabady, H., Ahmadi, M. H. Optimization of performance of Combined Solar Collector-Geothermal Heat Pump Systems to supply thermal load needed for heating greenhouses, *Energy Conversion and Management*, 97, 382-392. 2015.

[21] Mesmoudi, K., Meguellati, Kh., Bournet, P.E. Thermal analysis of greenhouses installed under semi-arid climate. *International Journal of Heat and Technology*, 35 (3), 474-486. 2017.

[22] Panwar, N.L. Kaushik, S.C. Kothari, S. Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,15(8): 3934-3945. 2011.

[23] Semple, L., Carriveau, R., Ting, D.S.K. Assessing heating and cooling demands of closed greenhouse systems in a cold climate. *International Journal of Energy Research*, 41(13): 1903-1913. 2017.

[24] Sethi, V.P., Sumathy, K., Lee, C., Pal, D.S. Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: a review on heating technologies, *Solar Energy*, 96, 56–82. 2013.

[25] Sharaf, O. Z., Orhan, M. F. Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II – Implemented systems, performance assessment, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1566-1633. 2015.

[26] Singh, D., Basu, C., Meinhardt-wollweber, M., & Roth, B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 139-147. 2015.

[27] Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S.F., Rohani, A., Matloobi, M., Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*, 3, 157–174. 2016.

[28] Taki, M., Rohani, A., Rahmati-Joneidabad, M. Solar thermal simulation and applications in greenhouse, *Information Processing in Agriculture*, 5(1): 83-113. 2018.

[29] Xu, J., L. i. Y, Wang, R.Z., Liu, W. Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy*, 67(1), 63-73. 2014.

[30] Yanoa, A., and Cossu, M. Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 116–137. 2019.

[31] Chemisana, D. Building integrated concentrating photovoltaics: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1): 603–11. 2011.

[32] Cuce, E., Cuce, PM., Bali, T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Appled Energy,* 111: 374–82. 2013.

[33] Wu, Y., Eames, P., Mallick, T., Sabry, M. Experimental characterisation of a Fresnel lens photovoltaic concentrating system. *Solar Energy,* 86 (1): 430–40. 2012.

[34] Sarlaki, E., Kermani, A. M., Kianmehr, M. H., Marzban, I. Application of Green Chemistry Metrics and Process Intensification Technologies in Sustainable Biodiesel Production. *Green chemistry and sustainable process*, 1(2), 1-20. 201۹. (In Persian).

[35] Sarlaki, E., Hassanbeigi, R., Paghaleh, A.S., Mirsaeedghazi, H. Biodiesel purification and refining technologies with the emphasis on membrane separation processes. Iranian journal of mechanical engineering, 26 (5), 11-130. 2017. (In Persian).

www.SID.ir