



مروری بر مطالعات اقتصادی (مبتنی بر هزینه انرژی) سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی

محمد امین مظاهری تهرانی^۱، محمد امین وزیری راد^{۲*}

۱- کارشناسی مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲- دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

* تهران، aminvazirad@ut.ac.ir

چکیده

در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی مناسب و تکنولوژی توسعه یافته بیش از سایر انواع تکنولوژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده کنندگان اصلی از تکنولوژی فتوولتائیک، کشورهای با پتانسیل تابش خورشیدی بالا هستند که عموماً دارای اقلیم گرمسیر می‌باشند. به دلیل اثر منفی افزایش دما بر بازدهی الکتریکی سلول‌های خورشیدی، سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی به منظور دفع حرارت از سلول و همچنین استفاده مفید از حرارت تلف شده توسعه یافته اند. مهمترین روش‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها، خنک‌سازی به وسیله آب، هوا، نانو سیالات، مواد تغییر فاز دهنده و محیط‌های متخلخل می‌باشد. اما بزرگترین چالش در استفاده از تکنولوژی فتوولتائیک-حرارتی افزایش هزینه تمام شده سیستم و متعاقباً افزایش هزینه انرژی تولید شده است. لذا در این مطالعه برآن شدیم تا تاثیر استفاده از راهکارهای متفاوت خنک‌سازی بر میزان افزایش هزینه انرژی سامانه‌های فتوولتائیک را بررسی کنیم.

واژگان کلیدی: فتوولتائیک حرارتی، هزینه انرژی، انرژی خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر



A Review on Economic Studies (Based on Cost of Energy) in Photovoltaic-Thermal Systems

Mohammad Amin Mazaheri Tehrani¹, Mohammad Amin Vaziri Rad^{2*}

1-MSc, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

2- PhD, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran

* Corresponding author: aminvazirirad@ut.ac.ir

Abstract

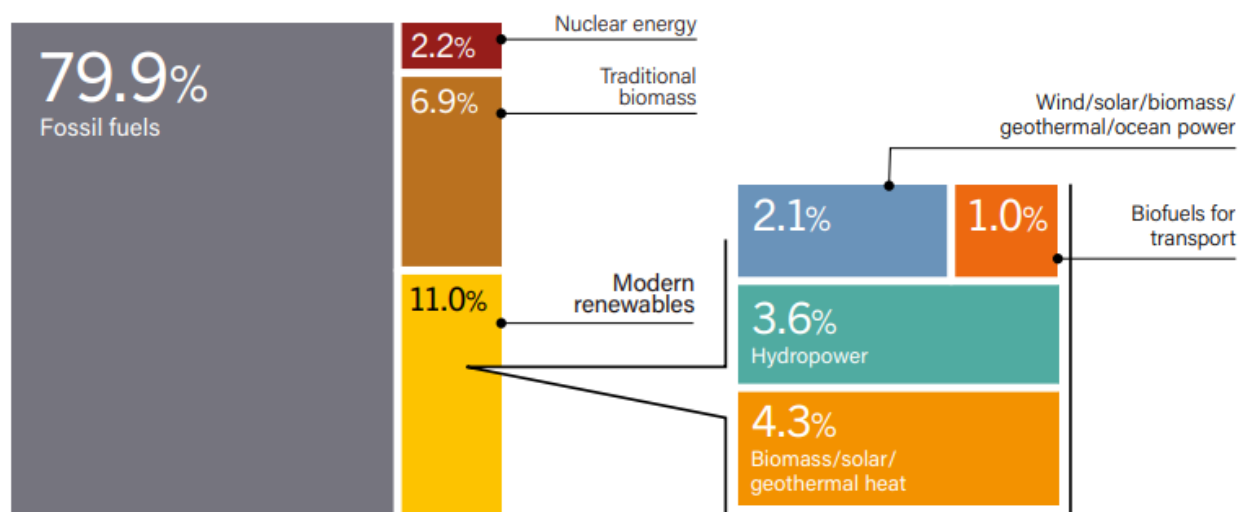
Among the all types of renewable energy, solar energy has received more attention than other types of renewable technologies due to its proper availability and developed technology. The main users of photovoltaic technology are countries with high solar radiation potential, which generally have a tropical climate. Due to the negative effect of temperature rise on the electrical efficiency of solar cells, photovoltaic-thermal systems have been developed to dissipate heat from the cell as well as make efficient use of the heat lost. The most important methods applied in these systems are cooling by water, air, nanofluids, phase change materials, and porous media. But the biggest challenge in using photovoltaic-thermal technology is to increase the capital cost of the system and consequently increase the final cost of energy. Therefore, in this study, we aimed to investigate the effect of using different cooling solutions on the increase in energy costs of photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic-thermal, Cost of Energy, Solar Energy, Renewable Energies

۱- مرور ادبیات

افزایش جمعیت و پیشرفت صنایع موجب رشد روز افزون مصرف انرژی شده است که به تبع آن نگرانی‌هایی جهانی از جمله در زمینه محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از آن‌ها و همچنین افزایش دمای کره‌ی زمین به وجود آمده است. این مشکلات در کنار توسعه روزافزون تکنولوژی‌های تجدیدپذیر موجب افزایش انگیزه بشر برای استفاده از انرژی‌های پاک شده است [۱]. انرژی‌های خورشیدی، بادی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، امواج و برق آبی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیری هستند که روند توسعه نسبتاً سریعی در سبد تولید انرژی جهانی دارند. این منابع انرژی معایب سوخت‌های فسیلی از جمله ایجاد آلودگی هوا که باعث گرمایش زمین و تاثیرات اقلیمی می‌شود را ندارند. از سوی دیگر انرژی‌های فسیلی مانند ذغال‌سنگ، نفت و گاز پایان پذیر بوده و بصورت بلند مدت قابل اتکاء نمی‌باشند. از این رو کشورهای مختلف اعم از پیشرفته و در حال توسعه، توجه فزاینده‌ای به انرژی‌های نوین جهت کاهش وابستگی به یک حامل انرژی و حفاظت هرچه بیشتر از محیط زیست و دستیابی به منابع انرژی پایدار معطوف داشته‌اند [۲].

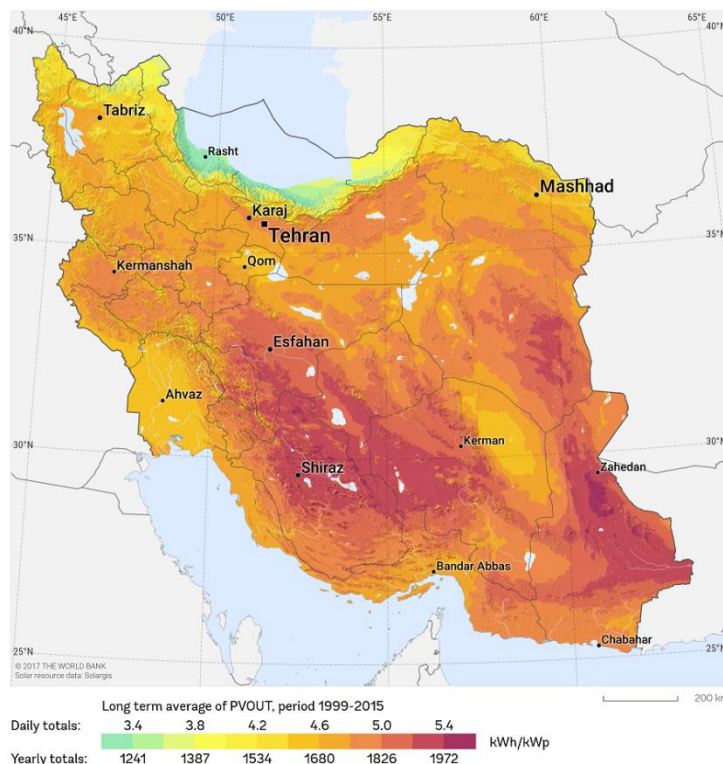
اگرچه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی جهان در حال حاضر اندک است، اما تولید و مصرف این نوع انرژی با سرعت زیادی در حال افزایش است. شکل (۱) سهم هر یک از منابع تجدیدپذیر از میزان کل انرژی تولید شده در سال ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد [۳]، این در حالی است که در ایران مطابق آخرین ترازنامه ملی انرژی منتشر شده در سال ۱۳۹۵، حدود ۵/۷ درصد نیروگاه‌های برق آبی و کمتر از ۰/۵ درصد نیروگاه‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی کشور سهمیه هستند و مابقی انرژی مورد نیاز توسط نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری و گازی توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. قلمرو انرژی‌های تجدیدپذیر به طور دائم در حال تغییر بوده و آینده این تغییرات نمایانگر کاهش هزینه‌ها و گسترش نفوذ آن در بازار انرژی دنیا و رسیدن به انرژی پایدار است [۴].



شکل (۱) سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از کل انرژی تولید شده جهان در سال ۲۰۱۸ [۳]

انرژی خورشیدی که در واقع سرمنشا تمامی اشکال انرژی در جهان محسوب می‌گردد به علت دسترسی پذیری بالا و فراگیر بودن، قابلیت گسترده، سهولت استفاده، عدم ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی و امنیت عرضه آن بیشتر از سایر انرژی‌های نوین مورد توجه قرار گرفته است.

از انرژی خورشیدی برای مقاصد مختلفی همچون تولید حرارت، الکتریسیته، گرمایش و سرمایش منازل مسکونی، تجاری و صنعتی استفاده و بهره برداری می‌گردد. مناطقی که بر روی کمر بند تابشی جهان قرار گرفته‌اند جهت تولید انرژی از خورشید ایده آل هستند. از چنین مناطقی می‌توان به ایالات جنوب غربی ایالات متحده آمریکا، کشورهای حوزه‌ی مدیترانه اروپا، خاورمیانه، خاور نزدیک، ایران، هند، پاکستان، چین و استرالیا اشاره داشت. شکل (۲) نشان دهنده پتانسیل بالای ایران برای استفاده از انرژی خورشید می‌باشد [۵].



شکل (۲) نقشه تابشی ایران در سال ۲۰۱۷ [۵]

ایران با دارا بودن بیش از ۳۰۰ روز آفتابی در سال که بیش از دو سوم آن دارای تابش ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع می‌باشد، پتانسیل بی‌نظیری به منظور بهره‌گیری از انرژی خورشیدی را دارا می‌باشد [۶]. مناطقی که به منظور بهره‌گیری از فناوری صفحات خورشیدی بسیار مستعد می‌باشند می‌بایست دارای تابش میانگین بیشتر از ۵۰۰ وات بر متر مربع باشند که اغلب شهرهای ایران به این منظور بسیار مناسب خواهند بود [۷].

گرمایش جهانی و قیمت‌های سرسام آور سوخت‌های فسیلی زمینه ساز پیشرفت‌های اساسی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و به خصوص پنل‌های خورشیدی شده است. در حال حاضر با فناوری روز دنیا در بهترین حالت، تنها ۱۳ الی ۲۱ درصد انرژی تابشی خورشید می‌تواند به الکتریسیته تبدیل گردد و مابقی انرژی تابشی به گرما تبدیل می‌شود.

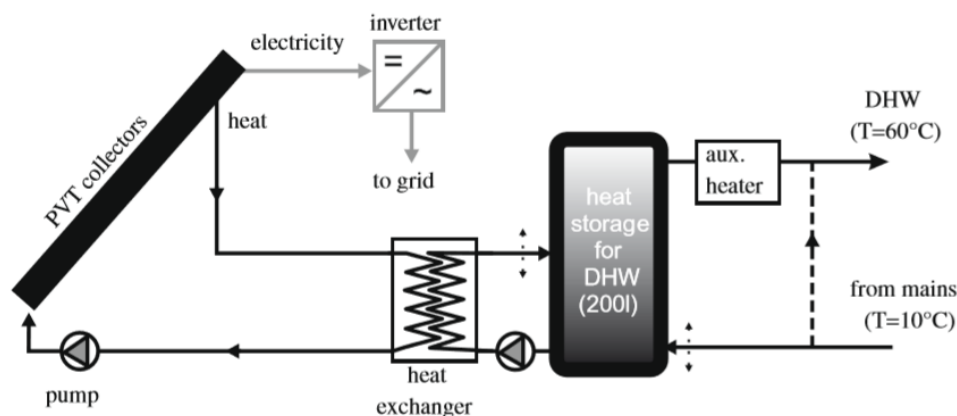
این حرارت عموماً توسط خود پنل خورشیدی جذب شده و باعث می‌شود تا دمای سامانه حتی تا بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالا رفته و از راندمان آن کاسته شود. به ازای هر درجه افزایش دمای سامانه راندمان آن ۰/۴ تا ۰/۵ درصد کاهش را به همراه خواهد داشت. بنابراین بسیاری از تحقیقات در سال‌های اخیر به سمتی پیش رفته‌اند که تأثیر حرارت جذب شده را به نوعی از خود سامانه منتقل کنند که منجر به توسعه سامانه‌های فتوولتائیک-حرارتی شده است [۸].

این فناوری ترکیبی، دارای عملکردی است که ابتدا خود صفحه خورشیدی تابش مرئی و فرا بنفش خورشید را تبدیل کرده و سپس یک ماده موثر در انتقال حرارت مانند هوا، آب، روغن‌های دارای خاصیت حرارتی و یا مواد تغییر فاز دهنده با جذب اشعه‌های

مادون قرمز و حرارت دفع شده توسط صفحه خورشیدی، دمای پنل را کنترل خواهد نمود [۹]. با وجود فعالیت‌های انجام شده، هنوز هم متغیرهای مختلفی در راستای ارتقا این سامانه‌ها در حال بررسی توسط محققان می‌باشد. مهمترین اهداف این مطالعات خنک‌سازی پنل‌ها (بهبود راندمان) و استفاده مطلوب‌تر از خاصیت حرارتی منتقل شده در کنار کاهش هزینه تمام شده سامانه می‌باشد زیرا تمامی انواع نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های فتوولتائیک متفاوت خصوصا در مناطق گرمسیر مانند ایران با معضل کاهش راندمان ناشی از افزایش دما روبرو هستند. تا کنون دانشمندان از روش‌های گوناگونی به منظور کاهش دمای ماژول‌های فتوولتائیک استفاده کرده‌اند که از جمله آنها خنک‌سازی با سیال (آب یا هوا) که اصطلاحا ماژول‌های فتوولتائیک حرارتی را شکل می‌دهند و همچنین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، ماژول‌های ترموالکتریک، نانوسیال‌ها، محیط‌های متخلخل و... نیز کاربرد بوده است. در این مطالعه بطور خلاصه به بررسی مطالعات اقتصادی انجام شده در این حیطه می‌پردازیم.

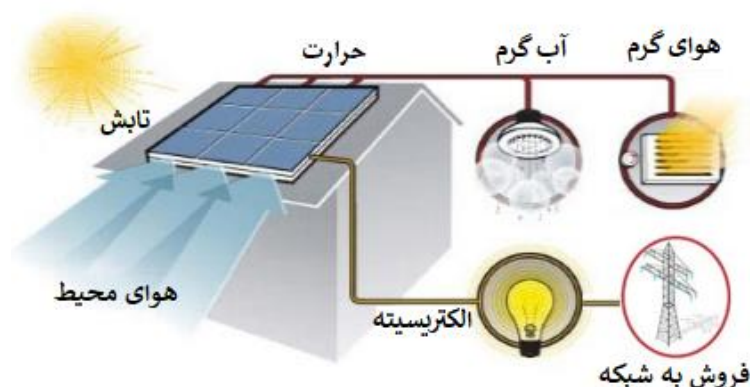
۲- معرفی فتوولتائیک-حرارتی

یک کلکتور فتوولتائیک-حرارتی شامل یک ماژول فتوولتائیک می‌باشد که صفحه‌ای جاذب حرارت^{۱۳} از پشت به آن متصل شده است. در آرایه‌های فتوولتائیک با افزایش دما از بازده الکتریکی کاسته می‌شود، در حقیقت پنل فتوولتائیک بخش کمی از تابش جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و مابقی آن بصورت انرژی حرارتی باعث بالا رفتن دمای پنل و ایجاد اثرات نامطلوب بر بازدهی و حتی طول عمر آن می‌شود. بنابراین صفحات جاذب حرارت در کلکتورهای فتوولتائیک-حرارتی دو کاربرد اساسی دارند که عبارتند از سرد کردن ماژول فتوولتائیک به منظور بهبود بازده الکتریکی و جمع‌آوری انرژی حرارتی به منظور جلوگیری از هدر رفت این انرژی به محیط. بازده نسبتا پایین سلول‌های فتوولتائیک در کنار هزینه بالای آن‌ها و فضای محدود جهت نصب سیستم‌های حرارتی و الکتریکی به صورت جداگانه، از مهمترین دلایل پیشرفت سامانه‌های ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی می‌باشند [۱۰]. شکل (۳) نشان دهنده شماتیک یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی با سیکل گردش جریان سیال بسته می‌باشد. شکل (۴) نیز نشان دهنده کاربردهای اصلی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی می‌باشد که شامل تامین آب و هوای گرم، تامین الکتریسیته و قابلیت فروش برق به شبکه است.



شکل (۳) شماتیک یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی [۱۱]

¹³ Thermal Absorber Plate



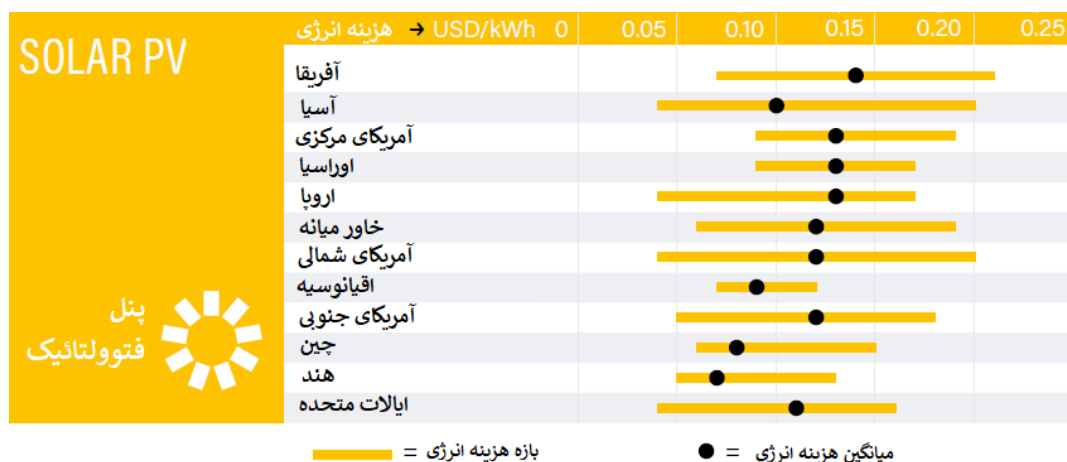
شکل ۴) شماتیک برخی از ویژگی های سامانه فتوولتائیک-حرارتی

۳- هزینه انرژی تکنولوژی فتوولتائیک

از منظر اقتصادی تکنولوژی فتوولتائیک دارای صرفه اقتصادی مناسبی نسبت به سایر انرژی های تجدید پذیر می باشد، یکی از فاکتورهای مقایسه اقتصادی انواع سامانه های تجدیدپذیر پارامتری به نام هزینه انرژی^{۱۴} می باشد که نشان دهنده مقدار هزینه انجام شده به ازای تولید یک کیلووات ساعت توان از سیستم انرژی می باشد. رابطه (۱) نشان دهنده فرمول محاسبه هزینه انرژی است [۱۲]:

$$COE = \frac{C_{ann.t}}{E_{served}} \quad (1)$$

در این رابطه $C_{ann.t}$ هزینه ها کل سالیانه و E_{served} مقدار انرژی تولید شده بر حسب کیلووات ساعت بر سال می باشد. این پارامتر وابسته به دو عامل اساسی بوده که عبارتند از هزینه تمام شده تکنولوژی^{۱۵} در سامانه و پتانسیل منبع انرژی^{۱۶} در منطقه. شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب مقدار هزینه انرژی تکنولوژی های فتوولتائیک خورشیدی و حرارتی خورشیدی را در مناطق مختلف جهان بر اساس گزارش جهانی انرژی های تجدیدپذیر نشان می دهند [۱۳].

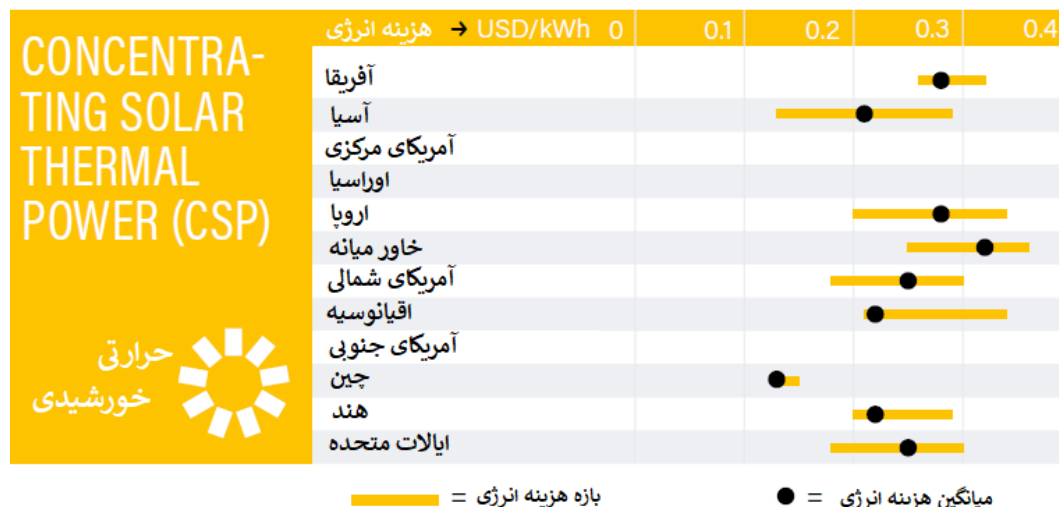


شکل ۵) هزینه انرژی تکنولوژی فتوولتائیک خورشیدی در مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۱۸ [۱۳]

¹⁴ Cost of Energy

¹⁵ Capital Cost

¹⁶ Resource Potential



شکل ۶) هزینه انرژی تکنولوژی حرارتی خورشیدی در مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۱۸ [۱۳]

همانطور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود در منطقه خاورمیانه به دلیل پتانسیل تابش خورشیدی بالا، علی‌رغم واردات تجهیزات اصلی تولید توان خورشیدی از سایر کشورها و تاثیر نرخ ارز، استفاده از انرژی فتوولتائیک به صرفه می‌باشد. در حقیقت تولید انرژی از سامانه‌های PV در منطقه خاورمیانه حدود ۰/۱۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت هزینه خواهد داشت. اما برای تکنولوژی حرارتی خورشیدی به دلیل بیشتر بودن تعداد تجهیزات مورد نیاز و پرمزینه‌تر بودن آن‌ها، صرفه اقتصادی نسبت به سایر مناطق افت می‌کند، به طوری که در حدود ۰/۴۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت هزینه انرژی نهایی این نوع از تکنولوژی‌ها خواهد بود. در حقیقت کشورهایی که علاوه بر داشتن پتانسیل مناسب تابشی، سازنده تجهیزات تولید توان سامانه‌های حرارتی خورشیدی هستند مانند چین، هند و ایالات متحده آمریکا بیشترین صرفه اقتصادی را برای این نوع از سامانه‌ها دارا می‌باشند [۱۳]. لازم به ذکر است در کشورهای خاورمیانه به دلیل هزینه پایین سوخت‌های فسیلی، هزینه انرژی در بخش برق نیروگاه‌های تولید توان بسیار پایین و در حدود حداکثر ۰/۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد، این موضوع به همراه نیاز به واردات تکنولوژی‌های تجدید پذیر باعث کاهش رقبت برای حرکت به سوی این نوع از انرژی‌ها شده است.

۴- مروری بر مطالعات مبتنی بر آنالیز اقتصادی ماژول‌ها صفحه تخت

آنالیز اقتصادی در کنار طراحی سامانه‌های PV/T متداول نبوده و معمولاً بیشتر به جنبه‌های بهبود بازدهی الکتریکی و حرارتی این سامانه‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه برخی از مطالعاتی که به جنبه‌های اقتصادی سامانه‌های خورشیدی پرداخته‌اند، بررسی خواهند شد. فرهنگیان^{۱۷} و همکاران [۱۴] طی مطالعه‌ای تجربی یک سیستم دهانه خورشیدی^{۱۸} متشکل از پنج صفحه فتوولتائیک ساختند و به منظور بهبود بازدهی از ترموالکتریک^{۱۹} جهت تولید توان از اختلاف دمای ایجاد شده بین سیال خنک‌کننده (جریان طبیعی هوا) و پشت پنل خورشیدی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد انرژی تولید شده نسبت به سیستم تک صفحه‌ای سه برابر افزایش می‌یابد در حالی که هزینه تولید انرژی تنها انرژی ۶۷ درصد افزایش یافته و معادل ۹/۴۳۲ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین حداکثر بازدهی سیستم به بیش از ۲۱ درصد رسید، اما افزایش دمای محیط تاثیر شدیدی بر کاهش بازدهی پنل و سامانه ترموالکتریک داشت.

¹⁷ Farhangian

¹⁸ Solar Cavity

¹⁹ Thermoelectric



خیمنز^{۲۰} و همکاران [۱۵] به بررسی اقتصادی سیستم متشکل از فتوولتائیک و سیستم‌های متمرکز کننده خورشیدی به همراه ذخیره‌ساز حرارتی پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد برای تامین بارهای الکتریکی کوچک، هزینه تمام شده تولید انرژی از سیستم مذکور معادل ۵۲/۴ سنت بر کیلووات ساعت خواهد بود که ۲ درصد از سیستم فتوولتائیک-باتری بیشتر است، اما با افزایش ظرفیت نصب تا ۵۰۰ کیلووات این سیستم حتی ارزان‌تر از سیستم فتوولتائیک-باتری نیز خواهد شد. همچنین بیان شد با توجه به نیاز کمتر این سیستم‌ها به باتری هزینه تمام شد در طول عمر مفید پروژه کاهش می‌یابد.

تابت^{۲۱} و همکاران [۱۶] در کشور امارات به مقایسه اقتصادی سیستم صفحه تخت خورشیدی و سیستم متمرکزکننده حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بصورت متوسط ۲۴ درجه سانتیگراد دما را کاهش می‌دهد و به دلیل بهبود عملکرد الکتریکی و ایجاد امکان استفاده از انرژی حرارتی ۲۸ درصد هزینه انرژی پایین‌تری نسبت به سامانه صفحه تخت خواهد داشت. ضمن اینکه هزینه انرژی سامانه متمرکز کننده به همراه PCM معادل ۱۸ سنت بر کیلووات ساعت و برای سامانه صفحه تخت معادل ۲۵ سنت بر کیلووات ساعت تخمین زده شد.

تهرانی^{۲۲} و همکاران [۱۷] با استفاده از یک تانک ذخیره پوسته و لوله که حجم آن به وسیله ماده تغییر فاز دهنده نمک هیدرات پر شده بود اقدام به آنالیز اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی سیستم متمرکزکننده خورشیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد اگر چه هزینه بالای تانک ذخیره‌سازی استفاده شده و مواد تغییر فاز دهنده به طور کلی هزینه تمام شده سیستم را افزایش دادند، اما نسبت به سیستم مخزن ذخیره‌ساز نمک مذاب که بصورت متداول در سامانه‌های حرارت خورشیدی استفاده می‌شود توانستند ۶۲ درصد کاهش هزینه نسبت به مقدار انرژی ذخیره شده ایجاد کنند.

بهاتارایی^{۲۳} و همکاران [۱۸] بر روی تاثیر هزینه انرژی برق شبکه^{۲۴} و سایز سیستم ذخیره‌سازی حرارت^{۲۵} برای مصارف خانگی بر دوره بازگشت سرمایه سیستم‌های فتوولتائیک و حرارتی-خورشیدی کار کردند. آن‌ها دریافتند هر چه هزینه انرژی در کشور بالاتر باشد، صرفه اقتصادی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک بالاتر می‌رود و دوره بازگشت سرمایه متعاقباً کاهش می‌یابد. بر این اساس کشور استرالیا که علاوه بر پتانسیل خورشیدی مناسب دارای بالاترین هزینه انرژی برق شبکه می‌باشد برای سیستم‌های فتوولتائیک مبتنی بر ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بالاترین صرفه را دارند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، بهیگی اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی سامانه‌های فتوولتائیک افزایش می‌یابد. با انجام مطالعه موردی در کشور کره جنوبی دریافتند اگر دوره بازگشت سرمایه نصب PV حدود ۵ سال برای سیستم‌های خانگی باشد با تبدیل سامانه به PV/T دوره بازگشت سرمایه به بیش از دو برابر افزایش می‌یابد.

باکر^{۲۶} و همکاران [۱۹] مطابق شکل (۷)، یک سامانه PV/T نصب شده بر بام خانه‌ای در کشور انگلستان که به وسیله کانال های جریان آب از پشت خنک و از سیال خروجی جهت نیاز آبگرم روزانه استفاده می‌شد را طراحی نمودند. این سامانه دمای آب را تا ۱۶ درجه سانتیگراد افزایش می‌داد و بازدهی حرارتی معادل ۲۰/۲۵ درصد داشت. هزینه انرژی تمام شده این سیستم با استفاده از نرم افزار EES بدست آمد که به دلیل فروش مازاد برق تولیدی به شبکه (شکل (۸)) معادل ۰/۰۷۷۸ یورو بر کیلووات ساعت تخمین زده شد که عدد مناسبی برای یک سامانه متصل به شبکه می‌باشد.

²⁰ Jiménez

²¹ Tabet

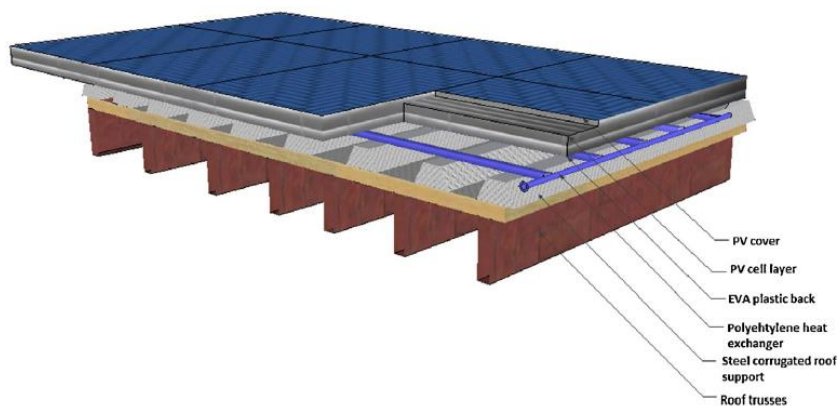
²² Tehrani

²³ Bhattarai

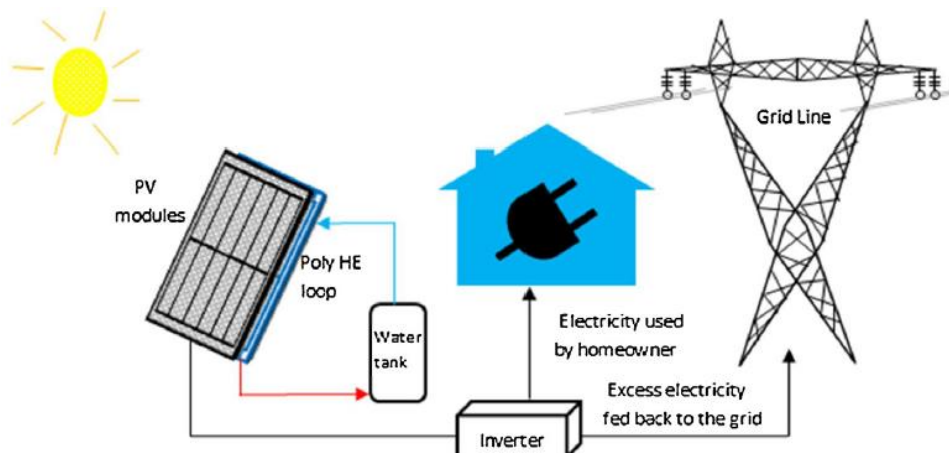
²⁴ Grid Power Cost

²⁵ Thermal Energy Storage System

²⁶ Buker



شکل ۷) سامانه فتوولتائیک-حرارتی طراحی شده برای بام منازل جهت تامین همزمان الکتریسیته و آبگرم مصرفی روزانه [۱۹]



شکل ۸) شماتیک یک سامانه فتوولتائیک-حرارتی متصل به شبکه به همراه فروش برق مازاد تولیدی به شبکه سراسری برق [۱۹]

گوئل و شارما^{۲۷} [۲] با مطالعه‌ای مروری اقدام به بررسی اقتصادی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر کردند، نتایج آن‌ها نشان داد، تنها برای مناطقی که فاصله آن‌ها بیش از ۵۰ کیلومتر با نزدیک‌ترین شبکه توزیع برق سراسری می باشد، توسعه سامانه‌های تجدید پذیر به صرفه‌تر از ساخت خطوط انتقال برق نیروگاهی جدید توسط دولت‌ها است. ضمن اینکه اظهار داشتند هزینه برق تولیدی در سیستم‌های تجدیدپذیر متصل به شبکه به شکل قابل توجهی پایین‌تر از سیستم‌های مستقل می‌باشد و همچنین سیاست‌ها و تسهیلات تشویقی دولت نقش اساسی جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر دارند.

الواعلی^{۲۸} و همکاران [۲۰] بصورت تجربی و عددی به مطالعه فنی و اقتصادی سامانه PV/T متصل به شبکه مبتنی برخنک سازی به وسیله سیال حاوی نانوذرات بهبود دهنده انتقال حرارت پرداختند. آن‌ها عنوان نمودند با توجه به اینکه ۸۶ درصد سامانه های PV/T در شهرها بصورت متصل به شبکه عمل می کنند، هیبرید سازی این سامانه‌ها با برق سراسری متداول‌تر از سامانه‌های PV/T با عملکرد مستقل است. نتایج آن‌ها نشان داد هزینه تمام شده انرژی سیستم مورد مطالعه ۰/۱۹۶ دلار بر کیلووات ساعت، زمان بازگشت سرمایه حدود ۸ سال و با بازدهی ۱۴/۵ درصد می‌باشد. ضمن اینکه استفاده از نانوذرات سیلیکون-کاربید موجب کاهش دمای پنل فتوولتائیک به مقدار ۲۸/۵ درجه‌ای و بیشتر از سیال آب شد.

در ادامه این مطالعه الواعلی و همکاران [۲۱] ذرات نانو PCM پارافین واکس را به سامانه PV/T مذکور اضافه کردند. برای اینکار بخش پشتی پنل توسط ذرات PCM پوشیده شد و ترکیب نانوذرات سیلیکون-کاربید داخل سیال آب در مجاری پشت پنل

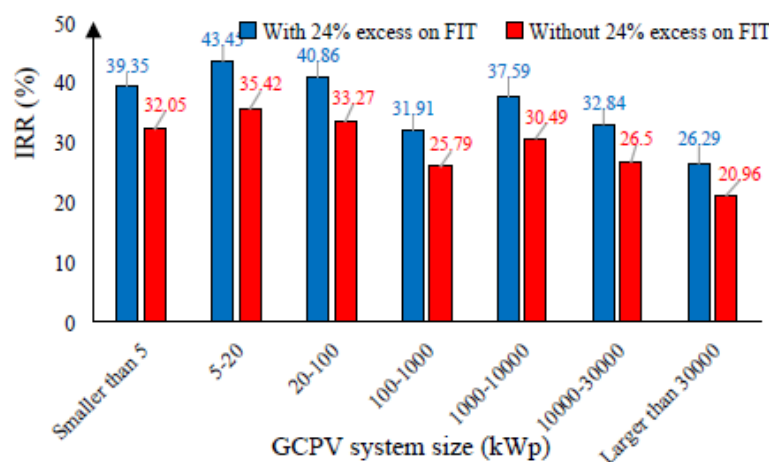
²⁷ Goel & Sharma

²⁸ Al-Waeli

به گردش درآمد. بازده الکتریکی سیستم با استفاده از PCM اندکی کاهش و معادل ۱۳/۷ درصد شد در حالی بازده حرارتی به ۷۲ درصد رسید. ضمن اینکه آنها ادعا کردند با این سیستم هزینه انرژی به ۰/۱۲۵ دلار بر کیلووات ساعت کاهش می‌یابد و دوره بازگشت سرمایه ۶ سال می‌گردد.

در مطالعه ای دیگر وزیری راد^{۲۹} و همکاران [۲۲] عنوان کردند، قیمت مواد اولیه ساخت فوم آلومینیوم صنعتی مورد استفاده در محیط های متخلخل سامانه های فتوولتائیک-حرارتی حدود ۴ یورو بر کیلوگرم است، همچنین قیمت فروش این مواد در بازار بر اساس ضخامت، میزان تخلخل و خلوص آلومینیوم مابین ۶۰ الی ۲۰۰ یورو بر متر مربع می باشد. در این مطالعه آنها با استفاده از براده های آلومینیوم دور ریز صنعتی هزینه مواد اولیه را به کمتر از ۱/۲ یورو بر کیلوگرم کاهش دادند. علاوه بر این نتایج آنها نشان داد این سیستم به همراه مواد تغییر فاز دهنده عملکرد موثری در کاهش دمای پنل و بهبود بازدهی آن خواهد داشت و در نهایت سامانه فتوولتائیک به همراه مواد تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل قیمت تمام شده ای حدود ۲۱۰۰ دلار خواهد داشت که نزدیک به دو برابر سامانه های فتوولتائیک می باشد. بنابراین همچنان نیازمند روش هایی نوین به منظور کاهش قیمت تمام شده ساخت سامانه های فتوولتائیک-حرارتی هستیم.

بخشی و ساده^{۳۰} [۲۳] به مطالعه تاثیر ظرفیت نصب شده فتوولتائیک متصل به شبکه در بازدهی اقتصادی پروژه پرداختند، مطابق شکل (۹) دریافتند، در صورت استفاده از پنل های ساخت داخل که دارای تسهیلات تشویقی (مانند قیمت تمام شده پایین تر پنل) در تعرفه ها هستند حدود ۳ سال و برای سایر سرمایه گذاری ها حدود ۵ سال دوره بازگشت سرمایه^{۳۱} طول خواهد کشید که البته این ارقام با توجه به در نظر گرفتن امکان فروش به شبکه با تعرفه های دولتی در نظر گرفته شده بود.



شکل ۹) نمودار میزان بازده داخلی (بازده سالانه پروژه) به ازای نصب ظرفیت های متفاوت فتوولتائیک در تهران [۲۳]

جدول (۱) نشان دهنده برخی دیگر از مطالعات اقتصادی انجام شده بر روی سامانه های فتوولتائیک به همراه معرفی نرم افزار بهینه سازی مورد استفاده و منطقه مورد مطالعه می باشد. این مطالعات اغلب با استفاده از نرم افزار های بهینه سازی انجام پذیرفته است که نشان می دهد هزینه تمام شده انرژی سامانه های فتوولتائیک ۱۲ الی ۴۰ سنت بر کیلووات ساعت می باشد، لذا همچنان به منظور قابل رقابت شدن با برق شبکه سراسری نیازمند بهبود می باشد که در این بین کاهش قیمت سیستم های ذخیره سازی انرژی مانند باتری ها نیز نقش مهمی خواهد داشت.

²⁹ Vaziri Rad

³⁰ Bakhshi & Sadeh

³¹ Internal Rate of Return

جدول ۱. مروری بر نتایج کلی تعدادی دیگر از مهمترین مطالعات انجام شده در زمینه بررسی اقتصادی سامانه‌های فتوولتائیک

منطقه مطالعه	نتیجه	نوع سیستم	نرم افزار مورد استفاده	رفرنس
کرمان (ایران)	هزینه انرژی به ترتیب برای سیستم ORC، PV-Battery و PV-ORC معادل ۰/۴۳۱، ۰/۳۵۶ و ۰/۳۷۶ \$/kWh ^{۳۲} ساعت می‌باشد.	مقایسه سیستم مستقل از شبکه سیکل اورگانیک رانکین به صورت تنها یا با پنل فتوولتائیک با سیستم پنل و باتری	HOMER	[۲۴]
۵ شهر (چین)	به ترتیب میانگین هزینه انرژی برای سیستم PV-Grid و PV-Battery-Grid معادل ۰/۰۹ و ۰/۱۲ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد.	مقایسه هزینه انرژی در حالت وجود و عدم وجود باتری برای یک سیستم متصل به شبکه فتوولتائیک	HOMER	[۲۵]
اصفهان (ایران)	سیستم PV/Battery حداقل هزینه انرژی را با ۰/۵۴۶ \$/kWh داشت که آنالیز حساسیت برای ایران بازه ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ \$/kWh را نشان داد.	بهینه‌سازی یک سامانه مبتنی بر توربین بادی و پنل فتوولتائیک بصورت مستقل از شبکه و با آلایندگی صفر ^{۳۳}	HOMER	[۲۶]
شمال غرب (چین)	هرچند هزینه احداث هر kW نیروگاه حرارتی بیش از دو برابر فتوولتائیک است اما با هزینه انرژی ۰/۱۷ الی ۰/۳۰ \$/kWh به صرفه است.	آنالیز اقتصادی انرژی تولیدی به وسیله نیروگاه حرارتی متمرکز کننده خورشیدی ^{۳۴} در کشور چین	GOPT	[۲۷]
رامسر و کرمان (ایران)	ظرفیت مشارکت PV و هزینه انرژی به ترتیب در رامسر معادل ۱۲ درصد و ۰/۳۸۳ \$/kWh و برای کرمان ۲۳ درصد و ۰/۱۹۹ \$/kWh بود.	بررسی سیستم متصل به شبکه فتوولتائیک بدون باتری در اقلیم‌های پرتابش و کم تابش خورشیدی ایران	MATLAB	[۲۸]
مولتان (پاکستان)	هزینه انرژی به ترتیب برای سامانه فتوولتائیک، تراف کالکتور و برق شبکه در پاکستان معادل ۰/۱۹۲، ۰/۲۷۳ و ۰/۱۶۰ \$/kWh می‌باشد.	مقایسه اقتصادی سامانه مستقل از شبکه فتوولتائی با سامانه حرارتی- خورشیدی تراف کالکتور ^{۳۵}	RETScreen	[۲۹]
سوهار (عمان)	استفاده از جهت یاب خورشیدی حدود ۲۰ درصد انرژی تولیدی را بهبود می بخشد و هزینه انرژی نهایی ۰/۱۹۶ \$/kWh خواهد شد.	یافتن سایز بهینه نصب باتری و پنل فتوولتائیک بصورت مستقل از شبکه برای اقلیم گرمسیر	MATLAB	[۳۰]
ایرلند شمالی	بهترین هزینه انرژی با شیب حدود ۳۰ درجه پنل خورشیدی معادل ۰/۳۸ الی ۰/۸۵ یورو به ازای هر کیلووات ساعت الکتریسیته خواهد بود.	بهینه‌سازی ظرفیت استفاده از اینورتر و سایز و شیب پنل خورشیدی به منظور یافتن اقتصادی ترین سیستم	TRNSYS	[۳۱]

³² Dollar per Kilowatt Hour

³³ Zero Emission

³⁴ Concentrating Thermal Power Plant

³⁵ Trough Collector



۵- بحث و نتیجه گیری

براساس مطالعات مرور شده نتیجه گرفته میشود، اگرچه سامانه های فتوولتائیک حرارتی موجب بهبود عملکرد ماژول های فتوولتائیک به وسیله کاهش دمای سطح آنها، بهبود بازدهی الکتریکی و ایجاد بازدهی حرارتی می شوند، اما هزینه انرژی تولید شده را به شکل قابل ملاحظه ای افزایش میدهند. این افزایش قیمت خصوصا برای سامانه های فتوولتائیک حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده، نانو سیالات و یا محیط های متخلخل صنعتی شدید تر بوده و به بیش از ۲۰ سنت بر کیلووات ساعت می رسد. اگرچه برا سامانه هایی که صرفا به شکل ساده ای با آب و یا هوا خنک میشوند هزینه انرژی بین ۱۲ الی ۲۰ سنت بر کیلووات ساعت بوده است که قابل رقابت با برق شبکه سراسری خصوصا در اروپا و آمریکا می باشد. البته به دلیل قیمت بسیار پایین برق شبکه سراسری در کشورهای غرب آسیا، خصوصا ایران این هزینه انرژی به صرفه نبوده که شاید یکی از مهمترین دلایل عدم توسعه سامانه های فتوولتائیک حرارتی در کشور باشد.

منابع

- [1] Toopshekan A, Youse H, Astaraei FR. Technical , economic , and performance analysis of a hybrid energy system using a novel dispatch strategy. *Energy* 2020;213:118850. doi:10.1016/j.energy.2020.118850.
- [2] S. Goel and R. Sharma, "Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. October 2016, pp. 1378-1389, 2017.
- [3] REN21, *Renewable Energy Police Network (REN).Renewables 2017: Global Status Report*. 2017.
- [4] Ministry of Energy of Iran, "Iran - National Energy Balance Sheet," *Electricity States and Informations*, 2016. [Online]. Available: isn.moe.gov.ir/.
- [5] SolarGIS, "Maps of Global horizontal irradiation, SolarGIS ©2017 GeoModelSolar s.r.o.," *Solar resource maps of Iran*, 2017. [Online]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/iran>.
- [6] سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق، "۲۰۱۹"، Iran energy ministry - وزارت نیرو
- [7] P. Alamdari, O. Nematollahi, and A. A. Alemrajabi, "Solar energy potentials in Iran: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 778-788, 2013.
- [8] Kasaeian A, Kouravand A, Vaziri Rad MA, Maniee S, Pourfayaz F. Cavity receivers in solar dish collectors: A geometric overview. *Renew Energy* 2021;169:53-79. doi:10.1016/j.renene.2020.12.106.
- [9] M. George, A. K. Pandey, N. Abd Rahim, V. V. Tyagi, S. Shahabuddin, and R. Saidur, "Concentrated photovoltaic thermal systems: A component-by-component view on the developments in the design, heat transfer medium and applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 186, no. February, pp. 15-41, 2019.
- [10] S. M. Sultan and M. N. Ervina Efzan, "Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications," *Sol. Energy*, vol. 173, no. June, pp. 939-954, 2018.
- [11] R. Santbergen, C. C. M. Rindt, H. A. Zondag, and R. J. C. van Zolingen, "Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PVT collectors," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 867-878, 2010.
- [12] Jahangir MH, Fakouriyan S, Amin M, Rad V. Feasibility study of on / off grid large-scale PV / WT / WEC hybrid energy system in coastal cities: A case-based research. *Renew Energy* 2020;162:2075-95. doi:10.1016/j.renene.2020.09.131.
- [13] REN21, "Advancing the global renewable energy transition: Highlights of the REN21 Renewables 2018 Global Status Report in perspective," *REN21 Renewables 2018 Glob. Status Rep.*, 2017.
- [14] O. Farhangian Marandi, M. Ameri, and B. Adelshahian, "The experimental investigation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric power generator solar cavity-receiver," *Sol. Energy*, vol. 161, no. August 2017, pp. 38-46, 2018.
- [15] J. A. Aguilar-Jiménez *et al.*, "Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy



- storage applied to isolated microgrids,” *Sol. Energy*, vol. 174, no. May, pp. 55–65, 2018.
- [16] K. Tabet Aoul, A. Hassan, A. H. Shah, and H. Riaz, “Energy performance comparison of concentrated photovoltaic – Phase change material thermal (CPV-PCM/T) system with flat plate collector (FPC),” *Sol. Energy*, vol. 176, no. October, pp. 453–464, 2018.
- [17] S. S. Mostafavi Tehrani, Y. Shoraka, K. Nithyanandam, and R. A. Taylor, “Shell-and-tube or packed bed thermal energy storage systems integrated with a concentrated solar power: A techno-economic comparison of sensible and latent heat systems,” *Appl. Energy*, vol. 238, no. October 2018, pp. 887–910, 2019.
- [18] S. Bhattarai, G. K. Kafle, S. H. Euh, J. H. Oh, and D. H. Kim, “Comparative study of photovoltaic and thermal solar systems with different storage capacities: Performance evaluation and economic analysis,” *Energy*, vol. 61, pp. 272–282, 2013.
- [19] M. S. Buker, B. Mempo, and S. B. Riffat, “Performance evaluation and techno-economic analysis of a novel building integrated PV/T roof collector: An experimental validation,” *Energy Build.*, vol. 76, pp. 164–175, 2014.
- [20] A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, “Nanofluid based grid connected PV/T systems in Malaysia: A techno-economical assessment,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 28, no. October 2017, pp. 81–95, 2018.
- [21] A. H. A. Al-Waeli, H. A. Kazem, M. T. Chaichan, and K. Sopian, “Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): Technical and economic study,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 11, no. April, pp. 213–230, 2019.
- [22] Amin M, Rad V, Kasaeian A, Mousavi S, Rajaei F. Empirical investigation of a photovoltaic-thermal system with phase change materials and aluminum shavings porous media. *Renew Energy* 2020;167:662–75. doi:10.1016/j.renene.2020.11.135.
- [23] R. Bakhshi and J. Sadeh, “Economic evaluation of grid-connected photovoltaic systems viability under a new dynamic feed-in tariff scheme: A case study in Iran,” *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 354–364, 2018.
- [24] M. H. Jahangir, S. A. Mousavi, and M. A. Vaziri Rad, “A techno-economic comparison of a photovoltaic/thermal organic Rankine cycle with several renewable hybrid systems for a residential area in Rayen, Iran,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, no. April, pp. 244–261, 2019.
- [25] C. Li, D. Zhou, and Y. Zheng, “Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China,” *Energy*, vol. 165, pp. 1352–1369, 2018.
- [26] M. Haratian, P. Tabibi, M. Sadeghi, B. Vaseghi, and A. Poustoudoz, “A renewable energy solution for stand-alone power generation: A case study of KhshU Site-Iran,” *Renew. Energy*, 2018.
- [27] E. Du, N. Zhang, B. M. Hodge, C. Kang, B. Kroposki, and Q. Xia, “Economic justification of concentrating solar power in high renewable energy penetrated power systems,” *Appl. Energy*, vol. 222, no. March, pp. 649–661, 2018.
- [28] S. Edalati, M. Ameri, M. Iranmanesh, H. Tarmahi, and M. Gholampour, “Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study,” *Energy*, vol. 114, pp. 923–934, 2016.
- [29] S. M. S. Sadati, F. U. Qureshi, and D. Baker, “Energetic and economic performance analyses of photovoltaic, parabolic trough collector and wind energy systems for Multan, Pakistan,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 844–855, 2015.
- [30] H. A. Kazem, T. Khatib, and K. Sopian, “Sizing of a standalone photovoltaic/battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar, Oman,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 108–115, 2013.
- [31] J. D. Mondol, Y. G. Yohanis, and B. Norton, “Optimising the economic viability of grid-connected photovoltaic systems,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 985–999, 2009.