



ارزیابی عملکرد فنی-اقتصادی یک سیستم هایبرید فتوولتائیک با متمرکزکننده و سیکل رانکین آلی برای تولید همزمان برق و حرارت

یونس نوراللهی^۱، حسین یوسفی^۱، رحیم ملتمس^{۲*}، کیانوش چوبینه^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
* rahim.moltames@ut.ac.ir ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱ تهران

چکیده

برای استفاده بیشتر از تابش خورشیدی، از متمرکزکننده‌های اپتیکی استفاده می‌شود که این کار در کنار مزیت استفاده بیشتر از تابش خورشید، معایبی نیز دارد. یکی از معایب بزرگ و اصلی این روش، بالا رفتن بیش از حد دمای پنل به علت متمرکز شدن تابش بر روی آن است. برای کاهش دمای پنل‌های خورشیدی از فناوری خنک‌سازی به وسیله یک سیال عامل (معمولاً آب) استفاده می‌شود. دمای سیال عامل پس از خنک‌سازی بالا رفته و می‌توان از حرارت آن در فصول سرما برای مصارف گرمایشی و در فصول گرما برای تولید الکتریسیته از طریق فناوری سیکل رانکین آلی استفاده نمود که این کار راندمان کلی سیستم را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. کارکرد کلی سیستم به این گونه است که ابتدا قسمتی از تابش متمرکز خورشید در پنل فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل شده و مابقی انرژی به صورت حرارتی است که قسمتی از آن توسط انتقال حرارت همرفت و تابش از خود سیستم به محیط ساطع شده و بقیه حرارت توسط سیال عامل در فصول سرما به سیستم گرمایشی و در فصول گرما جهت تولید الکتریسیته از پنل به سیکل رانکین آلی منتقل می‌شود که این حرکت سیال باعث چرخش توربین و تولید الکتریسیته می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که برای هزینه سرمایه‌گذاری سیکل رانکین به میزان ۲۰۰۰ دلار بر کیلووات مقدار زمان برگشت سرمایه ۳.۵۸ سال و برای هزینه سرمایه‌گذاری سیکل رانکین به میزان ۳۵۰۰ دلار بر کیلووات مقدار زمان برگشت سرمایه ۵.۸۱ سال به دست می‌آید.

کلیدواژه‌گان: انرژی خورشیدی، تحلیل فنی-اقتصادی، سیکل رانکین آلی، انرژی‌های تجدیدپذیر

Techno-economic Performance Analysis of a Hybrid Concentrated Photovoltaic/Thermal Combined with Organic Rankine Cycle (CPV/T-ORC) system for Simultaneous Generation of Power and Heat

Younes Noorollahi¹, Hossein Yousefi¹, Rahim Moltames^{2*}, Kianoosh Choubineh²

1- Associate Professor, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- PhD Student, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, rahim.moltames@ut.ac.ir

Received: 15 September 2021 Accepted: 16 December 2021

Abstract

Using the solar concentrating systems leads to an increase in the solar power radiation hitting the Photovoltaic (PV) panel surface which in turn increases the power generated by PVs. However, the concentrated radiation, on the other hand, raises the PV panel temperature, decreasing its operational efficiency. Cooling techniques (usually water) are used in these systems to reduce the PV operating temperature. In this way, the temperature of the operating fluid rises after cooling the PV panel and its heat can be used for heating purposes in cold seasons and to generate electricity in hot seasons through Organic Rankine Cycle (ORC) technology, which significantly increases the overall efficiency of the combined system. This paper aims to investigate the technical and economic aspects of a hybrid Concentrated Photovoltaic Thermal / Organic Rankine Cycle (CPV/T-ORC) system for simultaneous generation of power and heat in the summer and winter seasons. The results of the analysis show that for the ORC investment cost of 2000\$/kW, the return on investment is 3.58 years and for the ORC investment cost of 3500\$/kW, the return on investment is 5.81 years.

Keywords: Solar energy, techno-economic analysis, organic Rankine cycle, renewable energy



۱- مقدمه

توسط سلول فتوولتائیک مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل شده و مابقی به صورت حرارت توسط سیال عامل به سیکل رانکین آلی منتقل می‌شود. مطالعات آنها نشان داد که برای دماهای پایین سیال در ورودی خنک‌کن و دماهای بالا برای سلول فتوولتائیک چندپیوندی، راندمان تبدیل انرژی الکتریکی سیکل رانکین آلی به بیش از ۱۳.۴۴ درصد می‌رسد. راندمان کلی سیستم پیشنهادی آنها به میزان حدوداً ۸.۸ درصد بیشتر از سیستم‌های فتوولتائیک متمرکزکننده معمول است. گوچانگ و همکارانش سیستم سیکل رانکین آلی کوپل شده با سیستم فتوولتائیک و متمرکزکننده را از نظر ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه آنها مشخص کرد که سیال در خروجی اواپراتور با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد بهترین شرایط کارکردی است. فرانسیسکو کالیس سیستم مشابهی را طراحی و از نظر اقتصادی و انرژی مورد ارزیابی قرار داد [۱۰]. شبیه‌سازی وی نشان داد که انرژی الکتریکی تولیدی سالانه سیستم مورد مطالعه آنها ۸ درصد نسبت به سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده که در آن از سیکل رانکین آلی استفاده نمی‌شود، بیشتر است. با این حال، هزینه سرمایه‌گذاری برای طراحی آن به میزان ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. تحلیل حساسیت انجام شده توسط وی نشان می‌دهد که اقتصاد سیستم به شدت وابسته به هزینه سرمایه‌گذاری سیکل رانکین آلی بوده و بیشترین تأثیر را در اقتصادی نبودن سیستم داشته است. در همان سال کانستنتین و همکارانش سیستم فتوولتائیک بدون متمرکزکننده کوپل شده با سیکل رانکین آلی را مورد مطالعه قرار می‌دهند [۱۱]. پنج نوع طراحی مختلف از سیکل رانکین آلی در مطالعه آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. سلول فتوولتائیک از نوع کادمیوم سولفید بهترین نوع سلول و سیال ان-بوتان بهترین سیال کارکردی سیکل رانکین آلی انتخاب شدند. کارلو و همکاران [۱۲] یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکز/سیکل رانکین آلی را برای استفاده‌های صنعتی مدل‌سازی کرده و از شبکه‌های عصبی مصنوعی در ارزیابی خود استفاده کردند. نتایج سالانه آنها نشان می‌دهد که سیستم قادر است تقاضای مورد نیاز را از آوریل تا سپتامبر به طور کامل تأمین کند. در این مدت، تولید بیش از تقاضا نیز می‌تواند به شبکه فروخته شود. در نهایت، این سیستم به عنوان یک راه‌حل ایده آل برای استفاده‌های صنعتی از نگاه انرژی معرفی می‌شود.

با توجه به اهمیت موضوع، در این مقاله یک سیستم هیبرید فتوولتائیک با متمرکزکننده و سیکل رانکین آلی از فنی فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ابتدا روش‌های مدل‌سازی سیستم و روابط حاکم بر اجزاء سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این رابطه، قوانین اول و دوم ترمودینامیک بسیار حائز اهمیت است. برای مدل‌سازی سیستم ثوابت و مفروضاتی به کار گرفته می‌شود که در بخش روش‌شناسی این ثوابت و مفروضات شرح داده می‌شوند. پس از تشریح کامل روش‌های مورد استفاده، نتایج بدست آمده از ارزیابی سیستم ارائه می‌شود. در این رابطه، پارامترهای عملکردی سیستم همچون توان تولیدی و انرژی سالانه تولیدی، تحلیل حساسیت پارامترهای عملکردی و تغییرات آنها نسبت به تغییرات ورودی‌ها، و در نهایت اقتصاد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش‌شناسی

مدل هندسی کلی سیستم (شکل ۱) شامل یک سیستم فتوولتائیک با متمرکزکننده است که با سیستم سیکل رانکین آلی کوپل شده است. کارکرد کلی سیستم به این گونه است که ابتدا قسمتی از تابش متمرکز خورشید در پنل فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. مابقی انرژی به صورت

افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و نگرانی‌ها در رابطه با افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی، عمده عواملی‌اند که استفاده از منابع جایگزین انرژی را ضروری‌تر می‌سازند. از میان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به عنوان یک جایگزین مطمئن و در دسترس، از ظرفیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. یکی از فناوری‌هایی که می‌تواند جهت استفاده از این انرژی عظیم مورد استفاده قرار گیرد، فناوری سلول‌های فتوولتائیک است [۱]. سلول فتوولتائیک یک وسیله نیم‌رساناست که به صورت مستقیم و بدون ابزار چرخشی و تبدیل حرارت، نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. عدم نیاز به ابزار مکانیکی و متحرک در این فناوری باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بالا بودن طول عمر پنل‌ها می‌گردد. در کنار این مزایا، این فناوری تبدیل انرژی را بدون هیچ گونه انتشار آلاینده گلخانه‌ای و دیگر گازها و نیز بدون تولید هیچ نوع صدایی انجام می‌دهد. سیستم‌های فتوولتائیک در هر ابعاد و ظرفیتی (از میلی وات تا مگاوات) ساخته می‌شوند و در هر زمانی قابلیت ارتقاء ظرفیت برای این سیستم‌ها موجود است. برای استفاده بیشتر از تابش خورشیدی توسط پنل‌های خورشیدی، از متمرکزکننده‌های اپتیکی استفاده می‌شود. سیستم‌های متمرکزکننده خورشیدی از آینه‌ها یا لنزها با مساحت زیاد برای متمرکز کردن نور خورشید بر روی مساحت کوچکی از سلول‌های خورشیدی تشکیل شده‌اند. برای به کارگیری متمرکزکننده‌ها، از دنبال‌کننده‌های تک محوره یا دو محوره برای دنبال کردن حداکثر توان خورشیدی در طول روز و سال استفاده می‌شود [۲]. متمرکزکننده‌ها در کنار مزیت استفاده بیشتر از تابش خورشید، معایبی نیز دارند. یکی از معایب بزرگ و اصلی این روش، بالا رفتن دمای پنل [۳] به علت متمرکز شدن تابش بر روی آن بوده که این افزایش دما باعث افت شدید راندمان کاری سلول‌ها می‌گردد [۴]. لذا از سیستم‌های خنک‌کننده برای کاهش دمای سلول استفاده می‌شود. عمل خنک کردن سلول‌های فتوولتائیک به دو صورت فعال و غیرفعال صورت می‌گیرد [۵]. در روش غیرفعال از پره‌هایی با ضریب انتقال حرارت بالا استفاده می‌شود که عمل خنک‌کاری از طریق انتقال حرارت پنل از پره‌ها به محیط و در نتیجه کاهش محسوس دمای پنل‌ها انجام می‌گیرد. در روش فعال از یک سیال خنک‌کننده (عمدتاً هوا یا آب) برای کاهش دمای پنل‌ها استفاده می‌شود. سیال خنک‌کننده در لوله‌های تعبیه شده در پشت پنل با نیروی پمپ یا فن به حرکت درآمده و حرارت پنل را به خود جذب می‌کند. مزیت استفاده از این روش امکان استفاده از حرارت سیال در مصارف گرمایشی است. به طوری که می‌توان سیال عامل را بعد از جذب حرارت پنل‌ها به محیط ساختمان انتقال داده و از حرارت این سیال به عنوان انرژی حرارتی برای گرمایش ساختمان استفاده نمود [۶]. در این میان، یکی نوع فناوری در حال توسعه است که به بررسی امکان تولید برق همزمان با استفاده از ترکیب فناوری سلول‌های فتوولتائیک با متمرکزکننده و سیکل رانکین ارگانیک می‌پردازد [۷]. ترکیب این دو فناوری از طرفی باعث کاهش دمای پنل خورشیدی شده و از طرفی باعث تولید برق جداگانه از حرارت مازاد می‌شود.

ژانگ و همکارانش یک سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده با قدرت جمع‌کنندگی بالا کوپل شده با سیکل رانکین آلی مقیاس کوچک طراحی کردند [۸]. آنها مدل کاملی از جریان سیال در میکروکانال بر اساس قانون پایستگی جرم، انرژی و تکانه توسعه دادند. سیستم آنها شامل یک سلول فتوولتائیک چند پیوندی است که تابش خورشید به وسیله متمرکزکننده کروی با قدرت جمع‌کنندگی بالا روی آن متمرکز می‌شود. قسمتی از تابش



در n_{inv} در رابطه بالا راندمان اینورتر است که مقدار که مقدار آن در این مقاله ۹۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. قسمتی از توان تابشی فرودی به سیستم به توان الکتریکی تبدیل شده و مابقی به صورت توان حرارتی ظاهر می‌شود که مقدار آن طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_{Th} = Q_{pv}(1 - n_{pv}) \quad (5)$$

از این توان حرارتی تولیدی در سیستم، قسمتی به وسیله تابش ناشی از دمای بالاتر سیستم نسبت به محیط و انتقال حرارت همرفتی تلف شده و قسمتی به سیکل رانکین آلی تحویل داده می‌شود (شکل ۲) که طبق رابطه زیر نوشته می‌شود:

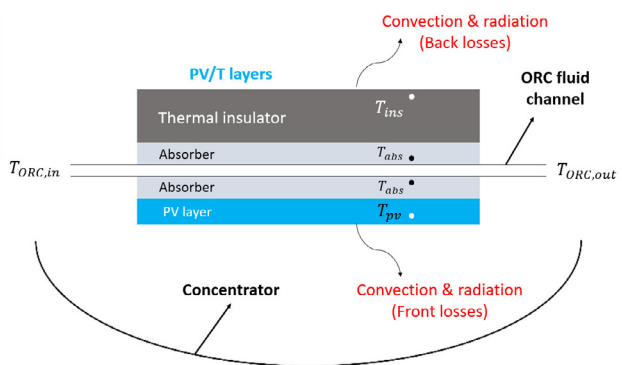
$$Q_{Th} = Q_{orc} + Q_{rad} + Q_{conv} \quad (6)$$

در رابطه بالا، Q_{orc} توان حرارتی ورودی به سیکل ORC است. توان حرارتی همرفتی و تابشی حاصل از دمای بالاتر سیستم فتوولتائیک نسبت به محیط آن به ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$Q_{conv} = h_{pv}A_{pv}(T_{pv} - T_a) + h_{ins}A_{pv}(T_{ins} - T_a) \quad (7)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon_{pv}A_{pv}\sigma(T_{pv}^4 - T_a^4) + \varepsilon_{ins}A_{pv}\sigma(T_{ins}^4 - T_a^4) \quad (8)$$

که در آن h_{ins} و h_{pv} به ترتیب ضرایب انتقال حرارت از سطح پنل و صفحه عایق، ε_{ins} و ε_{pv} ضرایب گسیلندگی سطح پنل و صفحه عایق و T_{pv} و T_{ins} دمای پنل و صفحه عایق هستند.

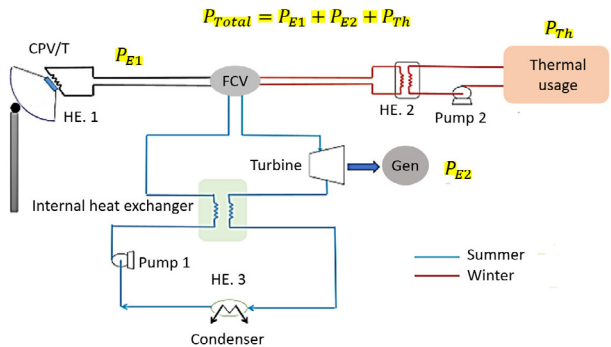


شکل ۲ لایه‌های به کار رفته در سیستم PV/T

برای به دست آوردن دمای لایه‌های مختلف به کار رفته در سیستم لازم است از یک مدل موازنه انرژی در طول سیستم استفاده شود. با توجه به ضخامت لایه‌ها، دما در طول هر یک از لایه‌ها تقریباً ثابت است لذا می‌توان از مدل موازنه انرژی صفر بعدی برای شبیه‌سازی استفاده کرد. موازنه انرژی حول هر یک از لایه‌های به کار رفته در سیستم PVT به صورت زیر است:

• موازنه انرژی حول پنل فتوولتائیک:

حرارتی است که قسمتی از آن توسط انتقال حرارت همرفت و تابش از خود سیستم به محیط ساطع شده و بقیه حرارت توسط سیال عامل از پنل به سیکل رانکین آلی منتقل می‌شود. جهت استفاده هرچه بیشتر از توان حرارتی ورودی به سیکل حاصل از ارزیابی حرارت سیستم فتوولتائیک، از یک ریکوپراتور برای پیش گرم کردن سیال قبل از ورود به سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. نکته قابل ملاحظه در این سیستم استفاده حرارت پشت پنل به عنوان انرژی گرمایی برای مصارف گرمایشی در فصول سرماست.



شکل ۱ شماتیک کلی سیستم فتوولتائیک متمرکز ترکیب شده با سیکل رانکین آلی میزان ضریب جمع‌کنندگی متمرکزکننده در ابتدای طراحی سیستم یک مقدار اولیه ثابت در نظر گرفته می‌شود. این مقدار در ادامه و طی تحلیل حساسیتی که برای این ضریب صورت خواهد گرفت، تغییر می‌کند. برای تحلیل سیستم فتوولتائیک در یک حالت استاندارد، تابش خورشید برابر با ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. بازدهی پنل فتوولتائیک با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{pv} = n_{pv-ref} [1 - \beta_{ref}(T_{pv} - T_{ref}) + \lambda \log_{10} G] \quad (1)$$

در رابطه بالا، n_{pv} بازدهی کاری پنل فتوولتائیک، n_{pv-ref} بازدهی نامی پنل فتوولتائیک، β_{ref} ضریب افت توان پنل فتوولتائیک، T_{ref} دمای مرجع برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد، T_{pv} دمای کاری پنل فتوولتائیک، λ ثابت تابش خورشید و G توان تابشی خورشید هستند. مقدار عبارت آخر رابطه بالا در سیستم‌های دارای ضریب جمع‌کنندگی بالا خیلی کم بوده و از آن صرف نظر می‌شود. لذا رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۱۳]:

$$n_{pv} = n_{pv-ref} [1 - \beta_{ref}(T_{pv} - T_{ref})] \quad (2)$$

محاسبه توان تابشی فرودی بر روی سطح پنل برای بدست آوردن توان تولیدی پنل فتوولتائیک ضروری است. توان تابشی فرودی بر روی سطح پنل با رابطه زیر داده می‌شود [۱]:

$$Q_{pv} = GCn_{optical}A_{pv} \quad (3)$$

در این رابطه $n_{optical}$ ضریب بازتاب سیستم متمرکزکننده، G تابش خورشید، A_{pv} مساحت پنل فتوولتائیک، و C ضریب جمع‌کنندگی هستند. با توجه به میزان تابش فرودی بر روی پنل، توان تولیدی پنل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{pv} = Q_{pv}n_{pv}n_{inv} \quad (4)$$

1. <https://www.aimscorp.net/10000-Watt-Power-Inverter.html>

اقتصادی شدن این فرآیند منجر شود. برای تحلیل عملکردی سیکل رانکین آلی نیاز است تمام مشخصات ترمودینامیکی تمام نقاط در سیکل محاسبه گردند. همان گونه که بخش قبل نیز اشاره شد، دمای نقطه ۱ در سیکل به میزان ۱۰ درجه از دمای پنل فتوولتائیک کمتر خواهد بود. جهت افزایش راندمان ترمودینامیکی سیکل دمای خروجی کندانسور به یک مقدار پایین (۳۰ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته می‌شود. گرمای منتقل شده به سیکل از سیستم فتوولتائیک برابر با مقدار بدست آمده برای Q_{orc} است که از حل معادلات بخش فتوولتائیک با متمرکز کننده بدست آمده و با استفاده از آن، دبی سیال عامل سیکل را نیز می‌توان محاسبه نمود:

$$Q_{orc} = \dot{m}_{orc}(h_1 - h_6) \quad (15)$$

راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ به میزان ۸۵ درصد و راندمان ریکوپراتور (η_{rec}) به میزان ۰.۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. استفاده از ریکوپراتور در مجموع توان خالص تولیدی سیکل را افزایش می‌دهد. دمای سیال قبل از ورود به سیستم فتوولتائیک به میزان ۱۰ درجه از دمای سیال در خروجی توربین کمتر خواهد بود که با رابطه زیر قابل بیان است (از افت فشار در طول ریکوپراتور صرف نظر می‌شود):

$$T_5 = T_2 - \Delta T_{pp} \quad (16)$$

این میزان اختلاف دما، اختلاف دمای نقطه پینچ (ΔT_{pp}) نامیده می‌شود که کمتر بودن این اختلاف دما باعث بهبود عملکرد سیکل می‌شود ولی از طرف دیگر هزینه و پیچیدگی طراحی مبدل را افزایش می‌دهد. میزان حرارت منتقل شده در ریکوپراتور به سیالی که دمای پایین‌تری دارد از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\eta_{rec} = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_3} \quad (17)$$

راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ به ترتیب طبق روابط (۱۸) و (۱۹) قابل محاسبه‌اند:

$$\eta_{Turbine,ise} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,s} - h_1} \quad (18)$$

$$\eta_{Pump,ise} = \frac{h_4 - h_{5,s}}{h_4 - h_5} \quad (19)$$

در اغلب سیستم‌های سیکل رانکین آلی، پمپ برای کنترل دبی جرمی جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کنترل سرعت چرخش موتور الکتریکی پمپ از یک اینورتر استفاده می‌شود. در پمپ‌های جابجایی مثبت، نرخ انتقال جریان سیال مستقیماً به سرعت چرخش موتور مرتبط است در حالی که در پمپ‌های گریز از مرکز، نرخ انتقال جرمی سیال همچنین به ارتفاع یا فشار پمپ نیز وابسته است. توان مصرفی پمپ طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$P_{pump} = \dot{m}_{orc} \frac{h_5 - h_4}{\eta_{pump}} \quad (20)$$

که در آن η_{pump} راندمان پمپ بر حسب درصد است. برای سیستم‌های رانکین آلی کوچک مقیاس، استفاده از توربین یا همان اکسپندر از نوع

$$m_{pv} c_{p,pv} \frac{dT_{pv}}{dt} = h_{pv} A_{pv} (T_a - T_{pv}) + \varepsilon_{pv} A_{pv} \sigma (T_a^4 - T_{pv}^4) + A_{pv} \frac{(T_{abs} - T_{pv})}{R_{pv-abs}} + Q_{Th} \quad (9)$$

• موازنه انرژی حول صفحه جاذب:

$$m_{abs} c_{p,abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = A_{pv} \left(\frac{T_{pv} - T_{abs}}{R_{pv-abs}} \right) + A_{pv} \left(\frac{T_{ins} - T_{abs}}{R_{abs-ins}} \right) - Q_{orc} \quad (10)$$

• موازنه انرژی حول صفحه عایق:

$$m_{ins} c_{p,ins} \frac{dT_{ins}}{dt} = A_{pv} \left(\frac{T_{abs} - T_{ins}}{R_{abs-ins}} \right) + h_{ins} A_{pv} (T_a - T_{ins}) + \varepsilon_{ins} A_{pv} \sigma (T_{sky}^4 - T_{ins}^4) \quad (11)$$

دمای آسمان در رابطه بالا طبق رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۴]:

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (12)$$

• موازنه انرژی حول سیال خنک‌کن:

$$m_{fl} c_{p,fl} \frac{dT_{fl}}{dt} = \dot{m}_{r245fa} (h_{in} - h_{out}) + Q_{orc} \quad (13)$$

در روابط بالا C_p ظرفیت حرارتی، m جرم و R مقاومت حرارتی هر یک از لایه‌های به کار رفته در سیستم PV/T است. در نقطه طراحی و با صرف نظر از حالت گذرا می‌توان دمای هر یک اجزای به کار رفته در سیستم را در طول یک ساعت ثابت در نظر گرفت. لذا طرف چپ معادلات موازنه انرژی حول لایه‌ها صفر خواهد بود. ضریب انتقال حرارتی (h) برای هر دو طرف ماژول یکسان در نظر گرفته شده و با رابطه زیر بیان می‌شود [۱] (از انتقال حرارت از لایه‌ها صرف‌نظر می‌شود):

$$h = 2.8 + 3 V_{wind} \quad (14)$$

که در آن V_{wind} سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است. دمای پنل فتوولتائیک در حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای سیال خنک‌کن خروجی خواهد بود. حل معادلات بخش موازنه انرژی از طریق الگوریتم حل تکراری منجر به تعیین دمای تمامی اجزای به کار رفته در سیستم خواهد شد. با مشخص شدن دمای اجزا، می‌توان اتلافات حرارتی از سیستم به محیط را مشخص کرده و نهایتاً توان حرارتی ورودی به سیکل رانکین آلی و نیز دمای سیال در ورودی توربین را محاسبه نمود. مرحله بعد، تحلیل فنی سیستم سیکل رانکین آلی است که به کمک آن توان الکتریکی تولیدی سیکل با توجه به توان حرارتی ورودی و دمای کاری آن محاسبه می‌گردد.

در فرآیند تبدیل حرارت به الکتریسیته، راندمان تبدیل انرژی برای دمای منبع حرارت پایین‌تر از ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به صورت غیراقتصادی پایین است [۱۵]. اگرچه استفاده از سیستم‌های سیکل رانکین آلی می‌تواند به



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال نهم ، شماره دوم پاییز و زمستان ۱۴۰۱

فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال نهم ، شماره دوم پاییز و زمستان ۱۴۰۱

در نهایت توان حرارتی به دست آمده از بازیابی حرارتی برای مصارف گرمایشی طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{Th} = \dot{m}_2(h_4 - h_3) \quad (27)$$

محاسبات شبیه‌سازی در پژوهش حاضر بر اساس موقعیت جغرافیایی و آب و هوایی شهر تهران به عرض جغرافیایی ۳۵.۶۹ درجه شرقی و طول جغرافیایی ۵۱.۳۹ درجه شمالی انجام می‌گیرد. ضریب بازتاب سطح زمین برای شهر تهران به میزان ۰.۲ در نظر گرفته می‌شود. داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ داده های ورودی

واحد	مقدار	پارامتر
(%)	۱۷/۴	راندمان پنل ۱ LG285S1C-G4
(W/K)	۰/۰۰۴۲	ضریب افت توان با دما
(%)	۹۰	راندمان اینورتر
(m ²)	۰/۵	مساحت پنل
(-)	۰/۳	گسیلندگی پنل
(-)	۰/۳	گسیلندگی عایق
(W/m ²)	۰/۰۰۰۰۲۸	مقاومت حرارتی بین پنل و صفحه جاذب
(W/m ²)	۱	مقاومت حرارتی بین صفحه جاذب و عایق
(cm ²)	۵	عرض پنل
(m)	۱۰	طول پنل
(-)	۴۰	قدرت جمع‌کنندگی متمرکزکننده
(-)	۰/۸۵	ضریب بازتاب متمرکزکننده
(%)	۸۵	راندمان ایزنتروپیک پمپ
(%)	۸۵	راندمان ایزنتروپیک توربین
(%)	۹۰	راندمان ریکوپراتور
(%)	۹۰	راندمان میدل حرارتی
°C	۳۰	دمای خروجی کندانسور
(-)	مایع اشباع	کیفیت سیال در خروجی کندانسور
(-)	بخار اشباع	کیفیت سیال در ورودی توربین
°C	۵	اختلاف دمای پینچ
(%)	۷۵	راندمان پمپ
(%)	۸۵	راندمان توربین
(%)	۹۰	راندمان ژنراتور
°C	۱۲۰	دمای پنل فتولتائیک
°C	۱۱۰	دمای سیال در ورودی توربین
USD/kW _e	۱۰۰۰	هزینه سرمایه‌گذاری پنل فتولتائیک
USD/m ²	۵۹/۶۶	هزینه سرمایه‌گذاری سیستم متمرکزکننده
USD/kW _e	۲۰۰۰-۳۵۰۰	هزینه سرمایه‌گذاری سیکل رانکین آلی
USD/kW _{Th}	۵.۵	هزینه سرمایه‌گذاری میدل حرارتی
USD/kW _e	۷۲۰	هزینه تجهیزات الکتریکی (کابل، اینورتر، دنبال‌کننده و ...)

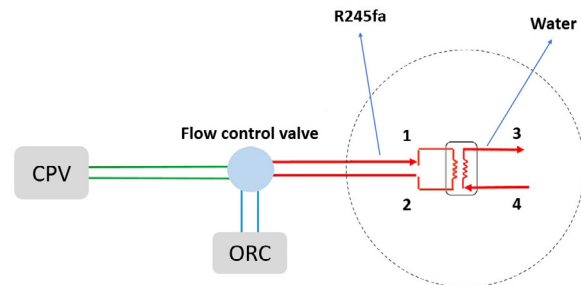
اسکرول از جهت قیمت کمتر، قسمت‌های متحرک کمتر، راندمان بالاتر و کامپکت بودن آنها مناسب است. توان الکتریکی تولیدی اکسپندر در سیکل طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{Expander} = \dot{m}_{orc}(h_1 - h_2)\eta_{Expander}\eta_{Gen} \quad (28)$$

η_{Gen} راندمان ژنراتور و $\eta_{Expander}$ راندمان توربین است. راندمان کلی سیستم فتولتائیک-سیکل رانکین آلی بر حسب درصد به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{CPV-ORC} = \frac{P_{pv} + P_{Expander} - P_{pump} - P_{Par}}{GCA_{pv}} \times 100 \quad (29)$$

عبارت P_{Par} توان مصرفی دنبال‌کننده بیشینه توان و پمپ خنک‌کن کندانسور است که برابر است با ۲.۳ درصد کل تابش فرودی به سیستم فتولتائیک [۷]. در فصل زمستان، توان حرارتی خروجی از سیستم فتولتائیک-متمرکزکننده به جای سیکل رانکین آلی وارد میدل حرارتی برای بازیابی حرارتی و برای مصارف گرمایشی می‌شود. برای محاسبه حرارت بازیافتی از سیستم CPV از مدل پایستگی جرم و انرژی استفاده می‌شود. شماتیک کلی بازیابی حرارتی برای مصارف گرمایی در شکل ۳ نشان داده شده است. شیر کنترل برای کنترل جریان سیال در فصول گرم و سرد به کار می‌رود. به گونه‌ای که در فصول گرم شیر کنترل جریان سیال را به سمت سیکل رانکین آلی هدایت کرده و در فصول سرد جریان سیال را برای بازیابی حرارتی به میدل حرارتی هدایت می‌کند. راندمان انرژی میدل حرارتی به میزان ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ شماتیک کلی بازیابی حرارتی برای مصارف گرمایشی

میزان حرارتی که سیال ارگانیک از سیستم فتولتائیک-متمرکزکننده دریافت می‌کند با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Q_{Th} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) \quad (30)$$

دمای سیال در خروجی سیستم فتولتائیک به میزان ۱۰ درجه از دمای پنل فتولتائیک کمتر خواهد بود [۱]:

$$T_1 = T_{pv} - 10 \quad (31)$$

اختلاف دمای پینچ برای میدل حرارتی به میزان ۵ درجه در نظر گرفته می‌شود که ارتباط دمای آب در خروجی میدل را به دمای سیال ارگانیک در ورودی میدل را تعیین می‌کند:

$$T_3 = T_2 - T_{pinchpoint} \quad (32)$$

رابطه موازنه انرژی برای میدل حرارتی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{m}_1(h_1 - h_2) \times \eta_{HE} = \dot{m}_2(h_4 - h_3) \quad (33)$$

1. <https://www.energysage.com/solar-panels/lg-solar/213/lg285s1c-g4/>

۳- نتایج و بحث

۳-۱- عملکرد سیستم

جدول ۲ مقادیر بدست آمده برای پارامترهای کارکردی سیستم در تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع، سرعت باد ۲ متر بر ثانیه و دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سالانه را برای کل سیستم نشان می‌دهد. در شکل ۴ نمودار انرژی تولیدی سیستم به تفکیک زیر سیستم‌ها مشاهده می‌کنید.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم

پارامتر	واحد	مقدار
توان تولیدی پنل	کیلووات	۳/۳۰
توان تولیدی توربین (تابستان)	کیلووات	۳/۴۴
توان مصرفی پمپ (تابستان)	کیلووات	۰/۱۲
توان حرارتی (زمستان)	کیلووات	۲۶/۲۲

جدول ۳ انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سالانه برای کل سیستم

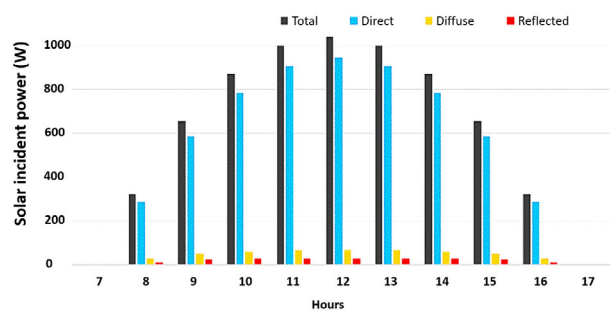
پارامتر	واحد	مقدار
انرژی تولیدی سالیانه پنل	مگاوات ساعت	۷/۳۸
انرژی تولیدی سالیانه سیکل ORC	مگاوات ساعت	۳/۵۷
انرژی حرارتی تولیدی سالیانه	مگاوات ساعت	۲۸/۴۷

طرفی باعث کاهش اتلافات حرارتی (کاهش اختلاف دمای سیستم با محیط نرخ انتقال حرارت از سیستم به محیط را کاهش می‌دهد) و در نتیجه افزایش تولید سیکل گردیده و توان تولیدی کل سیستم را افزایش می‌دهد که این پدیده طبق نمودار شکل ۷ نیز مشخص است. بنا به استدلال مشابه، افزایش سرعت باد تغییری در توان تولیدی پنل فتوولتائیک ایجاد نمی‌کند ولی نرخ انتقال حرارت از سیستم به محیط را افزایش می‌دهد که این عمل باعث انتقال کمتر حرارت به سیکل شده و توان تولیدی آن کاهش می‌دهد. کاهش توان تولیدی سیکل با وجود ثابت ماندن توان تولیدی پنل باعث کاهش توان تولیدی کل سیستم می‌شود که این پدیده در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است.

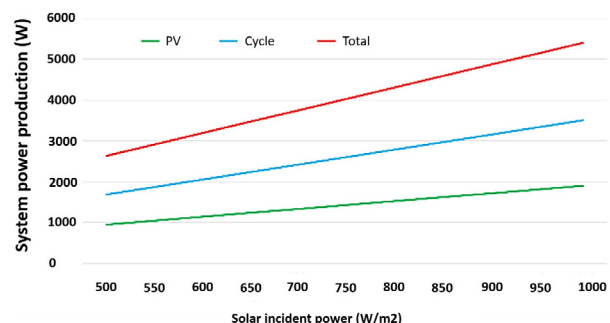
شکل ۹ تغییرات توان حرارتی تولیدی سیستم را به ازای تغییرات تابش خورشید نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که افزایش تابش خورشیدی توان حرارتی تولیدی سیستم را افزایش می‌دهد.

شکل ۱۰ تغییرات توان حرارتی تولیدی با تغییرات دمای محیط را نشان می‌دهد. از آنجایی که دمای پنل فتوولتائیک ثابت در نظر گرفته شده است، لذا افزایش دمای محیط تأثیری در توان تولیدی پنل ندارد ولی نرخ انتقال بین سیستم و محیط کاهش یافته و حرارت بیشتری برای مبدل حرارتی جهت بازیابی حرارتی منتقل شده و توان حرارتی تولیدی سیستم را افزایش می‌دهد. با همین استدلال، افزایش سرعت باد نرخ انتقال حرارت بین سیستم و محیط را افزایش داده و توان حرارتی تولیدی سیستم را کاهش می‌دهد (شکل ۱۱).

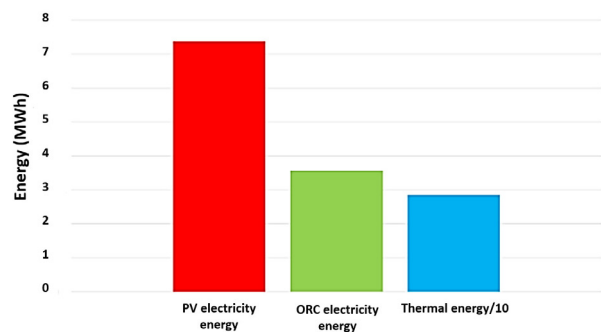
شکل ۱۲ تغییرات بازدهی الکتریکی و بازدهی حرارتی سیستم ترکیبی را نسبت به تغییرات دمای کاری پنل فتوولتائیک در فصول سرد نشان می‌دهد. افزایش دمای کاری پنل باعث کاهش راندمان کاری پنل و در نتیجه کاهش راندمان الکتریکی سیستم می‌شود. از طرفی افزایش دمای کاری پنل باعث افزایش دمای سیال شده و راندمان حرارتی سیستم را افزایش می‌دهد. البته این افزایش راندمان به علت افزایش تلفات حرارتی با افزایش دما روند کاهشی دارد.



شکل ۵ تغییرات تابش خورشید در طول ساعات روز برای روز ۱۰م دی ماه



شکل ۶ تغییرات توان تولیدی سیستم ترکیبی با تغییرات تابش خورشید



شکل ۴ انرژی تولیدی سالانه به تفکیک زیر سیستم‌ها

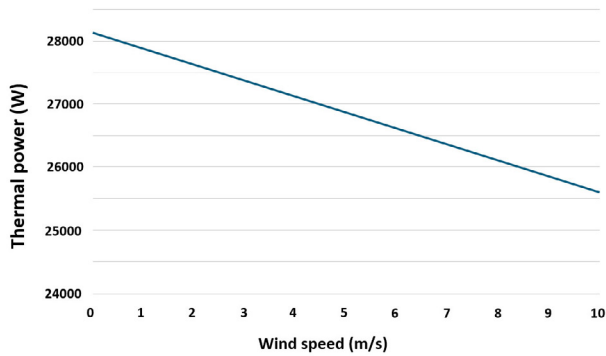
۳-۲- تحلیل حساسیت

شکل ۵ نمودار تابش خورشید (شامل تابش مستقیم، تابش نفوذی، تابش بازتابی و تابش کل) برای روز ۱۰م دی ماه و از ساعت ۷ صبح الی ۱۷ عصر نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، تابش خورشید با نزدیک شدن به ظهر افزایش پیدا کرده و در ساعت ۱۲ ظهر به مقدار بیشینه خود می‌رسد.

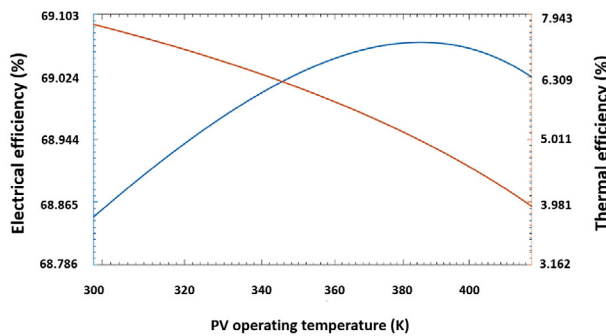
شکل ۶ تغییرات توان تولیدی سیستم (شامل توان تولیدی سیستم فتوولتائیک، توان تولیدی سیکل و توان تولیدی کل) را نسبت به تغییرات تابش خورشید در فصول گرم نشان می‌دهد. افزایش تابش خورشید باعث افزایش توان تولیدی سیستم فتوولتائیک و سیکل رانکین آلی شده و نهایتاً توان تولیدی کل سیستم را افزایش می‌دهد.

شکل ۷ تغییرات توان تولیدی سیستم ترکیبی را نسبت به تغییرات دمای محیط نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که دمای پنل فتوولتائیک توسط تغییرات دبی جرمی سیال خنک‌کن ثابت نگه داشته می‌شود، افزایش دمای محیط تغییری در بازدهی و توان تولیدی پنل ایجاد نمی‌کند ولی از



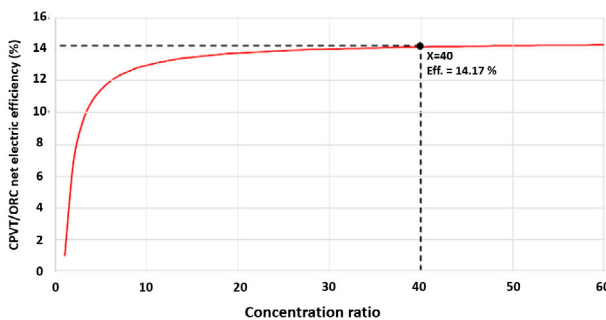


شکل ۱۱ تغییرات توان حرارتی تولیدی با تغییرات سرعت باد



شکل ۱۲ تغییرات بازدهی الکتریکی و بازدهی حرارتی سیستم با افزایش دمای کاری پنل فتولتائیک

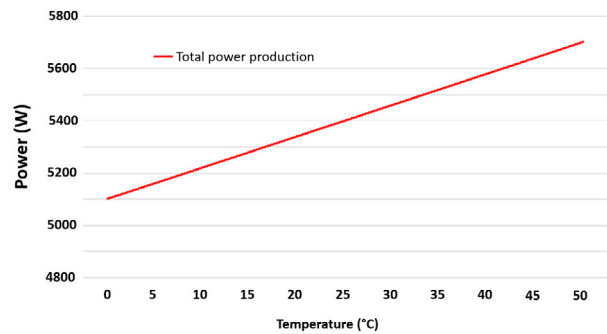
تاثیر افزایش ضریب متمرکزکنندگی بر روی بازدهی کلی سیستم برای فصل تابستان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار مشخص است، تغییرات بازدهی در ضرایب متمرکزکنندگی کوچک بسیار شدید است در حالی که این تغییرات در ضرایب متمرکزکنندگی بالا بسیار کوچک بوده و در ضریب جمع‌کنندگی بی نهایت به عدد ۱۴.۵۴ درصد میل می‌کند. از طرفی راندمان سیستم در ضریب جمع‌کنندگی ۴۰ در حدود ۱۴.۱ درصد است که این مقدار ضریب برای شیب‌سازی انتخاب می‌شود. به این علت که در این مقدار ضریب جمع‌کنندگی، راندمان سیستم بالا بوده و از طرفی از پیچیدگی و هزینه‌های بالای ساخت متمرکزکننده با ضریب جمع‌کنندگی بالا را ندارد.



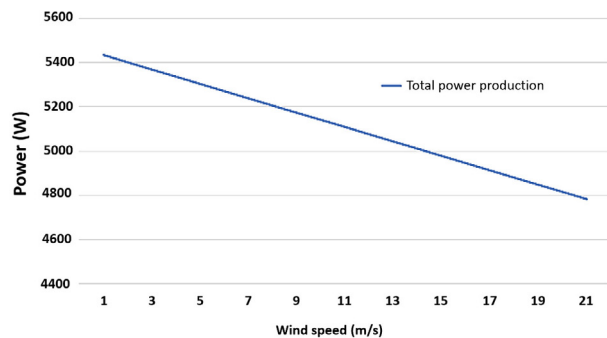
شکل ۱۳ تغییرات راندمان کلی سیستم با تغییرات ضریب جمع‌کنندگی متمرکزکننده

۳-۳- تحلیل اقتصادی

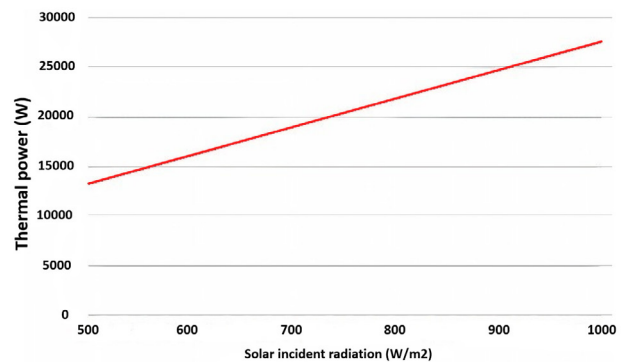
یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی برای بررسی اقتصاد و توجیه‌پذیری سیستم‌های انرژی شاخص زمان برگشت سرمایه است. این شاخص را به دو روش ایستا و پویا می‌توان محاسبه کرد. در روش ایستا گذر زمان دخیل



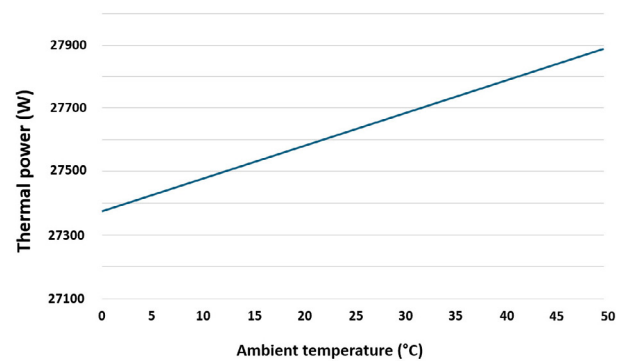
شکل ۷ تغییرات توان تولیدی سیستم ترکیبی با تغییرات دمای محیط



شکل ۸ تغییرات توان تولیدی سیستم ترکیبی با تغییرات سرعت باد



شکل ۹ تغییرات توان حرارتی تولیدی با تغییرات تابش



شکل ۱۰ تغییرات توان حرارتی تولیدی با تغییرات دمای محیط



سرمایه‌گذاری سیکل رانکین به میزان ۲۰۰۰ دلار بر کیلووات مقدار زمان برگشت سرمایه ۳.۵۸ سال و برای هزینه سرمایه‌گذاری سیکل رانکین به میزان ۳۵۰۰ دلار بر کیلووات مقدار زمان برگشت سرمایه ۵.۸۱ سال به دست آمد که نشان دهنده توجیه‌پذیری اقتصادی این سیستم است.

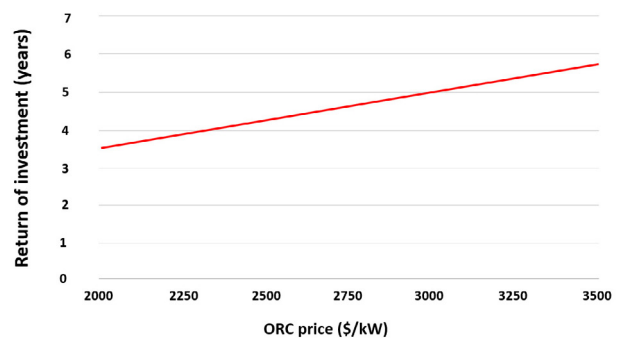
۵- مراجع

- [1] R. Moltames and R. Roshandel, Techno-economic analysis of a modified concentrating photovoltaic/organic Rankine cycle system, *International Journal of Ambient Energy*, 2020.
- [2] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, A review of solar photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [3] V. N. Palaskar, S. Deshmukh, Design configurations of Hybrid solar Photovoltaic/Thermal collector technology a review, *Proceeding of Indian National Science Academy (INSA)*, Vol. 78, No. 4, pp: 725-734, 2012.
- [4] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis, and P. Yianoulis, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar Energy*, Vol. 72, No. 3, pp. 217–234, 2002.
- [5] Z. A. Haidar, J. Orfi, H. F. Oztop, and Z. Kaneesamkandi, Cooling of solar PV panels using evaporative cooling, *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 2, No. 5, pp. 928–933, 2016.
- [6] A. Royne, C. J. Dey, and D. R. Mills, Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: A critical review, *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 86, No. 4, pp. 451–483, 2005.
- [7] G. Kosmadakis, D. Manolakas, and G. Papadakis, Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 2, pp. 308–324, 2011.
- [8] T. J. Zhang and E. N. Wang, Design of a microscale organic rankine cycle for high-concentration photovoltaics waste thermal power generation, *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, pp. 993–1002, 2012.
- [9] G. C. Zhao, L. P. Song, X. C. Hou, and Y. Wang, Thermodynamic optimization of the organic Rankine cycle in a concentrating photovoltaic/thermal power generation system, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 448–453, pp. 1514–1518, 2014
- [10] F. Calise, M. D. Daccadia, M. Vicidomini, G. Ferruzzi, and L. Vanoli, Design and dynamic simulation of a combined system integration concentrating photovoltaic/Thermal solar collectors and organic rankine cycle, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 100–118, 2015.
- [11] K. Tourkov and L. Schaefer, Performance evaluation of a PVT/ORC (photovoltaic thermal/organic Rankine cycle) system with optimization of the ORC and evaluation of several PV (photovoltaic) materials, *Energy*, Vol. 82, pp. 839–849, 2015.
- [12] C. Renno, F. Petito, D. D'Agostino, and F. Minichiello, Modeling of a CPV/T-ORC Combined System Adopted for an Industrial User, *energies*, 2020, Vol. 13, No. 13, pp. 1-17, doi: 10.3390/en13133476.
- [13] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review, *Energy Procedia*, 2013, Vol. 33, pp. 311–321, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [14] J. Ji, K. Liu, T. tai Chow, G. Pei, W. He, and H. He, Performance analysis of a photovoltaic heat pump, *Applied Energy*, Vol. 85, No. 8, pp. 680–693, 2008.
- [15] T. C. Hung, T. Y. Shai, and S. K. Wang, A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat, *Energy*, Vol. 22, No. 7, pp. 661–667, 1997.
- [16] K. Yang and H. Zhang, Performance Analysis of the Organic Rankine Cycle (ORC) System under Engine Various Operating Conditions, *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 3, No. 5, pp. 340–344, 2015.

نیست. در حالی که در روش پویا گذر زمان و به تبع میزان تنزیل سرمایه در محاسبات دخیل است. رابطه‌ای که برای محاسبه زمان برگشت سرمایه به کار می‌رود به صورت زیر است:

$$\sum_{j=1}^{n_p} \frac{S_j - C_j}{(1+f)^j} - I_0 = 0 \quad (28)$$

رابطه بالا برای یک مقدار مشخص n صادق است که این مقدار همان زمان برگشت سرمایه موردنظر است. در محاسبه زمان برگشت سرمایه فرض می‌شود هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی به قیمت ۱۰۰۰ تومان خریده شود. از طرفی فرض می‌شود که با تولید انرژی حرارتی هزینه سوخت گاز طبیعی برای تولیدکننده ذخیره می‌شود که این پس انداز جزو درآمد تولیدکننده حساب می‌شود. در این حالت راندمان تبدیل سوخت به انرژی حرارتی ۸۰ درصد (راندمان بویلرهای طبیعی) فرض می‌شود. شکل ۱۴ نمودار زمان برگشت سرمایه برای قیمت‌های مختلف سیکل رانکین آلی نشان داده شده است. طبق نمودار کمترین زمان برگشت سرمایه در قیمت سیکل به میزان ۲۰۰۰ دلار بر کیلووات اتفاق می‌افتد که مقدار آن برابر است با ۳.۵۸ سال. بیشترین زمان برگشت سرمایه نیز در قیمت سیکل به میزان ۳۵۰۰ دلار بر کیلووات اتفاق می‌افتد که مقدار آن برابر است با ۵.۸۱ سال.



شکل ۱۴ زمان برگشت سرمایه برای قیمت‌های مختلف سیکل رانکین آلی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم نوین هایبرید فتوولتائیک دارای متمرکزکننده ترکیب شده با سیکل رانکین آلی برای تولید الکتریسیته و حرارت از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی شبیه‌سازی شد. سیستم فتوولتائیک قسمتی از تابش متمرکزشده را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. مابقی انرژی تابشی از طریق یک سیال عامل بازیابی می‌شود. در فصول گرما این حرارت وارد سیکل رانکین آلی شده و دوباره به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در فصول سرما نیز این حرارت وارد مبدل حرارتی شده و به یک سیال عامل ثانویه (در این پروژه آب) منتقل می‌شود که این آب برای مصارف گرمایشی مصرف می‌شود. شبیه‌سازی سالانه سیستم برای موقعیت جغرافیایی شهر تهران صورت گرفت. برای این منظور از داده‌های آب و هوایی سازمان هواشناسی به مدت یک سال برای شهر تهران استفاده شد. شبیه‌سازی سیستم بر اساس مدل پایداری جرم و انرژی و برای تحلیل اقتصادی از اقتصاد مهندسی به روش پویا استفاده شده و کد شبیه‌سازی در نرم افزار متلب توسعه داده شده. توجیه‌پذیری سیستم‌های انرژی از نگاه سرمایه‌گذار با شاخص زمان بازگشت سرمایه سنجیده می‌شود. هر چه زمان برگشت سرمایه کمتر شود، ریسک سرمایه‌گذاری در طرح مذکور کمتر و توجیه‌پذیری آن افزایش می‌یابد. برای پروژه حاضر مقدار این شاخص متفاوت است. به طوری که برای هزینه

