



Performance evaluation of hydrogen production system using CPVT/ROC

Younes Noorollahi¹, Hossein Yousefi¹, Rahim Moltames^{2*}, Reza Fattahi²

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 Revised: 20 December 2021 Accepted: 2 January 2022

Abstract

Hydrogen is usually used as a means of storing the energy produced from renewable energy resources. The electrolyzer, meanwhile, is a system by which hydrogen can be produced sustainably. In the present paper, a Concentrated Photovoltaic Thermal/Organic Rankine Cycle (CPVT/ORC) system coupled with a PEM electrolyzer system is simulated and evaluated. Concentrated solar radiation is used as the input energy of the coupled system. Part of this radiation is converted directly into electrical energy using the Photovoltaic (PV) panel, and the rest enters the organic Rankine cycle system as heat. The heat in the cycle is converted into mechanical power by the turbine and finally into electrical energy by the generator. The total electrical power generated by the organic Rankin panel and cycle enters the electrolyzer for producing hydrogen. A combination of MATLAB and REFPROP software was used to simulate the system performance. The most striking result is that that the net generating power of the system is equal to 3820 watts, which is equivalent to producing 0.02072 grams per second of hydrogen and 0.0829 grams per second of oxygen.

Keywords: Hydrogen, photovoltaic technology, solar concentrator, organic Rankine cycle

1. INTRODUCTION

Increasing energy demand and the resulting environmental effects have led energy experts to focus more on the development of energy production systems from renewable energy sources. Among renewable energy resources, solar energy has become one of the most important sources of renewable energy in the world due to its high potential and cheaper conversion technologies. The combination of energy technologies, in addition to increasing the reliability of these systems, can also lead to a decline in the cost of energy production. In this paper, a hydrogen production system using the PEM electrolyzer is simulated and the results of the system performance in different operating conditions are reported. A combination of CPVT and a modified ORC system is used to produce electricity as the input energy of the electrolyzer system. Energy analysis of subsystems, electrolyzer system simulation, along with simulation results and parametric analysis are described below. In the present study, a concentrated photovoltaic thermal/organic Rankine cycle system coupled with a PEM electrolyzer system is simulated. In the following sections, the system simulation methodology, system performance results such as turbine output power, pump consumption power, net output power, ORC efficiency, total electrical efficiency, hydrogen production, and oxygen production will be reported. Then, using parametric analysis, the effect of changes in affecting parameters

on system performance is determined.

2. MATERIAL AND METHOD

The general schematic of the system is shown in Fig. 1. In this system, part of the concentrated solar radiation in the photovoltaic panel is first converted into electrical energy. The rest of the energy is thermal, part of which is conveyed by heat transfer and radiation from the system to the environment, and the rest of the heat is transferred from the panel to the organic Rankin cycle by the working fluid. To maximize the thermal input power to the cycle, a recuperator is used to preheat the fluid before entering the photovoltaic system. The heat generated in the panel leads to produce power in the organic Rankine cycle. Finally, two electric powers enter the PEM electrolyzer in order to produce hydrogen. The PV panel electricity production is calculated by the following equation:

$$P_{pv} = Q_{pv} n_{pv} n_{inv} \quad (1)$$

The ORC power production is also calculated using the following relation:

$$P_{orc} = \dot{m}_{orc} [(h_1 - h_2) \eta_{Gen} - (h_5 - h_4)] \quad (2)$$

The sum of these two powers is considered as the input of the electrolyzer system for producing hydrogen.

Finally, the mass flow rate of hydrogen produced in the electrolyzer is obtained by the following equation [1]:

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = 2\dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (3)$$

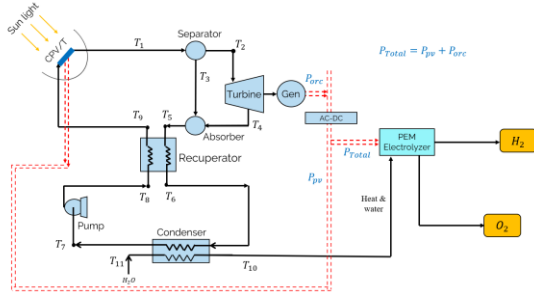


Figure 1. Detailed layout of the proposed system

3. Validation

To validate the present study, the thermodynamic characteristics of the fluid at different points of the cycle through simulation (a) are compared with the values obtained in reference [2] (b) shown in Table 1.

Table 1. Thermodynamic properties of the fluid compared to the Ref. [2]

Point		1	2	3	4
Temperature (°C)	a	90	45.18	30	30.37
	b	90	49	30	30.04
Pressure (bar)	a	10.063	1.7785	1.7785	10.063
	b	10.044	1.7904	1.7904	10.044
Enthalpy (kJ/kg)	a	468.21	441.15	239.12	239.85
	b	470.48	445.01	239.60	240.35
Entropy (kJ/kgK)	a	1.7856	1.8007	1.1355	1.1359
	b	1.7925	1.8137	1.1372	1.1377

4. Results and Discussion

Table 3 shows the operating parameters of the system including turbine output power, pump consumption power, net output power, organic Rankine cycle efficiency, overall electrical efficiency, and hydrogen production rate. According to the results, the net electrical power produced by the system is equal to 3820 watts, which is equivalent to 0.02072 g/s of hydrogen and 0.0829 g/s of oxygen.

Table 2. Values of system performance parameters

Parameter	Value	Unit
Turbine output power	3980.01	W
Pump consumption	160.01	W
Net power production	3820.00	W
ORC efficiency	12.97	%
Total electric efficiency	9.55	%
Hydrogen production	0.02072	g/s

Oxygen production 0.08290 g/s

5. Conclusion

In this paper, an improved CPVT/ORC system was evaluated. The parabolic through concentrator system was used to transfer heat to the working fluid. A PEM electrolyzer system was also used to produce hydrogen. A combination of MATLAB and REFPROP software was used to simulate the system. Performance parameters such as turbine output power, pump consumption power, photovoltaic generating electric power, hydrogen production rate, and thermal and electrical efficiencies were investigated. In the future, exergy and economic analysis can be used to better understand system performance.

6. References

- [1] T. A. H. Ratlamwala, I. Dincer, and M. A. Gadalla, Thermodynamic analysis of an integrated geothermal based quadruple effect absorption system for multigenerational purposes, *Thermochimica Acta*, Vol. 535, pp. 27–35, 2012.
- [2] G. Kosmadakis, D. Manolakos, 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.

ارزیابی عملکردی سیستم تولید هیدروژن با استفاده از فناوری ترکیبی فتوولتائیک-سیکل رانکین آلی

یونس نوراللهی¹، حسین یوسفی¹، رحیم ملتمس^{2*}، رضا فتاحی²

1- دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
2- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
* تهران، ۱۴۳۹۵۷۱۳۱، rahim.moltames@ut.ac.ir

چکیده

هیدروژن معمولاً ابزاری برای ذخیره‌سازی انرژی تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر گرفته می‌شود. در این میان، الکترولیزر وسیله‌ای است که از طریق آن می‌توان به تولید هیدروژن به صورت پایدار پرداخت. هیدروژن می‌تواند به عنوان یک حامل انرژی در نظر گرفته شده و در مواقع لازم به انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی تبدیل شود. در این مقاله، یک سیستم فتوولتائیک متمرکز/سیکل رانکین آلی کوپل شده با الکترولیزر غشاء پلیمری شیبه‌سازی می‌شود. انرژی تابشی خورشید متمرکز شده توسط متمرکزکننده به عنوان انرژی ورودی سیستم استفاده می‌شود. قسمتی از این تابش به صورت مستقیم توسط پنل فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل شده و مابقی به صورت حرارت وارد سیکل رانکین آلی می‌شود. حرارت در سیکل توسط توربین به انرژی مکانیکی و نهایتاً توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. مجموع توان الکتریکی تولید شده توسط پیل و سیکل رانکین آلی وارد الکترولیزر شده و باعث تولید هیدروژن می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که توان الکتریکی خالص تولیدی سیستم برابر است با میزان 3820 وات که این مقدار معادل است با تولید 0.02072 گرم بر ثانیه هیدروژن و نیز تولید 0.0829 گرم بر ثانیه اکسیژن.

کلیدواژگان: هیدروژن، فناوری فتوولتائیک، متمرکزکننده خورشیدی، سیکل رانکین آلی

Performance Evaluation of Hydrogen Production System Using CPVT/ROC

Younes Noorollahi¹, Hossein Yousefi¹, Rahim Moltames^{2*}, Reza Fattahi²

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: 2 January 2022

Abstract

Hydrogen is usually used as a means of storing the energy produced from renewable energy resources. The electrolyzer, meanwhile, is a system by which hydrogen can be produced sustainably. In the present paper, a Concentrated Photovoltaic Thermal/Organic Rankine Cycle (CPVT/ORC) system coupled with a PEM electrolyzer system is simulated and evaluated. Concentrated solar radiation is used as the input energy of the coupled system. Part of this radiation is converted directly into electrical energy using the Photovoltaic (PV) panel, and the rest enters the organic Rankine cycle system as heat. The heat in the cycle is converted into mechanical power by the turbine and finally into electrical energy by the generator. The total electrical power generated by the organic Rankin panel and cycle enters the electrolyzer for producing hydrogen. A combination of MATLAB and REFPROP software was used to simulate the system performance. The most striking result is that that the net generating power of the system is equal to 3820 watts, which is equivalent to producing 0.02072 grams per second of hydrogen and 0.0829 grams per second of oxygen.

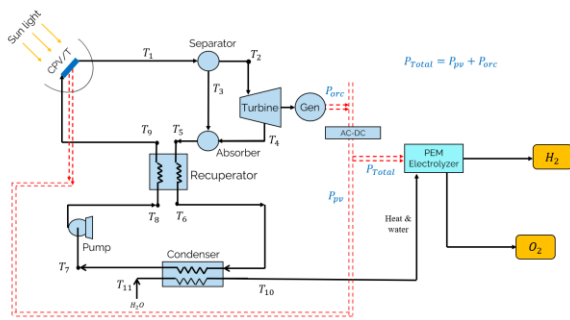
Keywords: Hydrogen, photovoltaic technology, solar concentrator, organic Rankine cycle

1- مقدمه

افزایش تقاضای انرژی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از توسعه، استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی‌های پاک و طرح‌های بهینه یکپارچه‌سازی شده آن‌ها را توجیه‌پذیر می‌کند. بر این اساس مطالعه طرح‌های یکپارچه بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی در مجاورت توسعه انرژی‌های پاک مثل بازیافت تلفات حرارتی عیار پائین از طریق سیکل رانکین آلی (ORC)، می‌تواند از راهکارهای موثری در پاسخگویی به افزایش روزافزون تقاضای انرژی در بخش عرضه باشد.

اثر فوتوالکتریک برای اولین بار توسط بکروئل در سال 1839 کشف شده و نتایج آن بر روی سلنیوم سولاید برای نخستین بار توسط آدامز و دی [1] مشاهده گردید. در سال 1883 نیز فریتز [2] نخستین سلول فتوولتائیک که راندمان تبدیل انرژی آن کمتر از 1 درصد بود، توسعه داد. مطالعات گوناگونی برای افزایش راندمان سلول‌های فتوولتائیک پس از آن انجام گرفت. متمرکز کردن تابش خورشید بر روی پنل‌ها راهکاری بود که برای نخستین بار در اواسط سال 1970 توسط لابراتوری سندیا در ایالات متحده امریکا مورد آزمایش قرار گرفت و در پی آن راندمان سیستم به کار رفته با ظرفیت 1 کیلووات، 12.7 درصد ثبت شد. کارلو و همکاران [3] طی یک مطالعه‌ای در جنوب کشور ایتالیا، سامانه ترکیبی مشتمل بر یک سیستم حرارتی-خورشیدی متمرکز در کنار یک سیکل رانکین ارگانیک را برای پاسخگویی به یک مصرف‌کننده بار الکتریکی صنعتی از طریق بکارگیری 16 مازول مشتمل بر 500 سلول با اتصال سه‌گانه پیشنهاد داده‌اند. در فرآیند این تحقیق پس از شبیه‌سازی سامانه یکپارچه، ارزیابی شاخص تابش مستقیم طبیعی سه سناریوی کاربری در شرایط تابستان، زمستان و فصل میانی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پاسخگویی بار انرژی مورد نظر را تایید می‌کند. در این نمونه مطالعاتی حداکثر تقاضای بار الکتریکی واحد صنعتی برای ماشین‌آلات صنعتی 42 کیلووات و سایر مصارف شامل سرمایش، گرمایش حداکثر 15 کیلووات با متوسط مصرف انرژی ماهیانه 7500 کیلووات ساعت برآورد می‌شود. در تحلیل سالیانه این مسئله نیز، پاسخگویی تولید سامانه به کل نیاز انرژی مورد تایید بوده و حتی در برخی ماه‌های سال قابلیت فروش تولید مازاد به شبکه یا ذخیره‌سازی برای سایر زمان‌ها امکان‌پذیر است. شایان ذکر است که میزان پوشش بار الکتریکی تولیدی سامانه به ترتیب در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس به ترتیب 73٪، 77٪ و 83٪ و همچنین برای ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر نیز 86٪، 93٪ و 100٪ برآورد می‌شود. بطورکلی سامانه ترکیبی پیشنهادی گزینه‌ای ایده‌آل برای یک کاربری صنعتی ارزیابی گردید. ال نیما و همکاران [4] به بررسی یک سامانه انرژی مشتمل بر یک سیستم حرارتی-خورشیدی متمرکز در مجاورت یک سیکل رانکین ارگانیک که با یک سیستم کندانسور زمین‌گرمایی و واحد ذخیره انرژی یکپارچه شده است در کشور اردن پرداخته‌اند. در این سامانه واحد ذخیره‌سازی نوع پیل سوختی با الکترولیز تبادل یونی پروتونی جهت بازیافت انرژی شیمیایی و تبدیل آن به انرژی خورشیدی بکار گرفته شده است. این مطالعه از طریق ابزار شبیه‌سازی مدل ریاضی حالت پایدار سیستم و نیز تجزیه و تحلیل تأثیر پارمترهای کلیدی از قبیل دمای ورودی توربین، متوسط تابش خورشیدی برخی پارمترهای موثر در ذخیره‌سازی انرژی در کشور اردن انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی توربین تا زیر دمای 61 درجه سانتی‌گراد موجب افزایش راندمان کلی

سامانه شده و در غیر این صورت نتایج بالعکس است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سیکل رانکین ارگانیک در کارایی الکتریکی سامانه مذکور ارتقای راندمان از 15.72٪ به 17.78٪ است. همچنین برای بدترین سناریو موجود در ماه نوامبر، تأثیر سیستم ذخیره‌سازی انرژی ارتقای راندمان از 18.21٪ به 21.97٪ ارزیابی می‌شود، نیز برای شرایط فوق‌الذکر برآورد راندمان سیستم خورشیدی بدون سیستم خنک‌کاری 3.88٪، در صورت استفاده از سیستم خنک‌کاری به 18.92٪ و با کمک بکارگیری سیکل رانکین ارگانیک راندمان تا 21.96٪ از طریق بازیافت تلفات حرارتی ارتقا می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر ال نیما و همکاران [5]، پیشنهاد یک سامانه نوین تولید توان ترکیبی از طریق دو کلکتور مشتمل بر حرارتی-خورشیدی و متمرکزکننده سهموی خطی، که با یک مبدل حرارتی زیرزمینی و سیکل رانکین ارگانیک یکپارچه شده، ارائه دادند. در اصل واحد اواپراتور این سامانه، شامل کلکتور شفاف تخت حرارتی-خورشیدی است که با متمرکزکننده سهموی خطی، سری شده است. اولین کلکتور خورشیدی شفاف سامانه، از سلول‌های خورشیدی شفاف کاملاً غوطه‌ور در یک سیال آلی شفاف تحت فشار تشکیل شده، بطوریکه اجازه دریافت تابش خورشیدی، خنک‌کاری موثر و امکان جذب تلفات حرارتی سلول‌های خورشیدی فراهم می‌آورد، دومین کلکتور خورشیدی نیز یک گیرنده مشکی مات متداول است که برای بازگرمایش مایع آلی شفاف جهت به دمای بالاتر استفاده می‌شود. به عبارت دیگر مجموع عملکرد این دو کلکتور به عنوان یک دیگ بخار و فوق‌گرم‌کننده برای سیکل رانکین ارگانیک عمل می‌کنند. عملکرد این سامانه از طریق مدل ریاضی حالت پایدار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق برای شرایط طراحی نشان می‌دهد که راندمان مازول‌های خورشیدی در حدود 12٪ تثبیت شده و راندمان در بخش‌های جذب‌کننده سامانه در بازه 64٪ تا 74٪ و راندمان سیکل رانکین ارگانیک در بازه 64٪ تا 74٪ است. گولونیس و همکاران [6] نیز به مطالعه عملکرد یکپارچه کلکتور حرارتی-خورشیدی متمرکز با دمای 70 تا 90 درجه سانتی‌گراد با موتور مبتنی بر سیکل رانکین ارگانیک و شناسایی عملکرد بهره‌برداری سامانه پرداخته‌اند. در این سامانه با هدف حداکثرسازی تولید کلی برق، بررسی رفتار سیکل رانکین ارگانیک تحت بارهای حرارتی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تقریباً 17٪ از کل خروجی سامانه مربوط به سیکل رانکین ارگانیک است. اجرای راهکارهای تکنولوژیک در این سامانه موجب ارتقای راندمان تبدیل انرژی در کلکتور خورشیدی متمرکز و بازدهی سیکل رانکین ارگانیک می‌گردد. همچنین تحلیل‌های تکمیلی این مطالعه نشان می‌دهد که این سامانه یکپارچه حتی برای مقیاس‌های کوچک نیز اقتصادی است. ژانگ و وانگ [7] نیز سامانه یکپارچه سازی شده امیدوارکننده از سیستم فتوولتائیک فوق متمرکز با سیکل رانکین ارگانیک مقیاس کوچک مورد بررسی قرار داده‌اند. بدلیل تلفات بالای انرژی حرارتی تا سقف 60 درصد سیستم فتوولتائیک فوق متمرکز امکان بکارگیری فناوری تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریکی در کنار بکارگیری تلفات حرارتی عیار پائین در سیکل رانکین ارگانیک مقیاس کوچک به عنوان یک دستاورد امیدوارکننده برای آینده را ترسیم می‌کند. در سامانه مورد نظر سیال عامل مادون‌سرد سیکل رانکین ارگانیک مقیاس کوچک زیر فشار بحرانی به عنوان منبع حرارتی دما پائین در یک میکروکانال به سلول خورشیدی پمپ می‌شود. در این تحقیق مدل کامل جریان جوش سیال در



شکل 1 شماتیک کلی سیستم ترکیبی

1-2- فتوولتائیک حرارتی-سیکل رانکین آلی

سیستم فتوولتائیک متمرکز به کار رفته در شبیه‌سازی شامل یک متمرکزکننده سهموی خطی و پنل فتوولتائیک در کانون آن است. لازم به ذکر است که ابعاد به کار رفته در این مقاله برای طراحی سیستم به حالت مقیاس کوچک است که نتایج آن قابل تعمیم به طراحی‌های مقیاس بالا نیز است. مساحت پنل به کار رفته در سیستم به میزان 1 متر مربع است که در آن طول پنل 10 برابر عرض آن انتخاب می‌شود. مساحت متمرکزکننده با توجه به ابعاد پنل و ضریب جمع‌کنندگی متمرکزکننده به دست می‌آید.

$$A_{con} = C \times A_{pv} \quad (1)$$

میزان ضریب جمع‌کنندگی متمرکزکننده در ابتدای طراحی سیستم یک مقدار اولیه ثابت در نظر گرفته می‌شود. این مقدار در ادامه پس از معرفی کامل سیستم و طی تحلیل حساسیتی که برای این ضریب صورت خواهد گرفت، تغییر می‌کند. در تحلیل سیستم فتوولتائیک، تابش خورشید برابر با 1000 وات بر متر مربع، دمای محیط 25 درجه سانتی‌گراد و سرعت باد 2 متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. راندمان پنل فتوولتائیک با توجه به دمای کاری آن با رابطه زیر بدست می‌آید [10]:

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

که در آن n_{pv-ref} راندمان مرجع پنل فتوولتائیک است که برابر با 16 درصد در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه توان تولیدی پنل، ابتدا نیاز است توان تابشی فرودی بر روی پنل (Q_{pv}) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

توان تولیدی پنل (P_{pv}) با توجه به توان تابشی فرودی بر آن طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

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

در رابطه بالا n_{inv} راندمان اینورتر بوده و برابر با 90 درصد در نظر گرفته می‌شود. توان تابشی فرودی به سیستم قسمتی طبق رابطه 4 به توان الکتریکی

میکروکانال براساس قوانین بقای جرم، انرژی و پایستگی اندازه حرکت توسعه داده شده و سپس ارزیابی اثرات سیال عامل حالت مادون‌سرد در ورودی، توزیع محوری دما برای تبادل حرارت سیال عامل و سلول خورشیدی و نیز شار حرارتی بحرانی در راندمان تولید همزمان مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل عملکرد سامانه HCPV/MORC افزایش بازده خالص تولید برق را در مقایسه با HCPV خنک‌کننده مایع در دمای محیط به میزان 8.8٪ را تایید می‌کند، نیز چارچوب تعریف شده برای سامانه مورد نظر نوید بزرگی را در کاربردهای مقیاس بزرگ تولید برق خورشیدی HCPV نشان می‌دهد. ملتس و همکاران [8] نیز یک سیستم ترکیبی بهبودیافته از سیستم فتوولتائیک متمرکز و سیکل رانکین آلی دارای ریکوپراتور را شبیه‌سازی کرده و دمای کاری بهینه پنل فتوولتائیک برای راندمان‌های مختلف پنل را بررسی کردند. قابل توجه‌ترین نتیجه‌ای که از داده‌های شبیه‌سازی به دست آمد این بود که افزایش بازده نامی فتوولتائیک منجر به انتخاب دمای پایین‌تر برای دمای مطلوب فتوولتائیک می‌شود. نتایج نشان داد که برای پانل‌های فتوولتائیک با بازده 10٪، 14٪، 18٪ و 22٪ دمای مطلوب فتوولتائیک به ترتیب 145.0، 121.2، 139.8، 132.3 درجه سانتی‌گراد، 121.2 درجه سانتی‌گراد است. سید احسان حسینی و همکارش [9] نیز یک سیستم مشابه را برای تولید هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. با این تفاوت که سیستم آن‌ها شامل سیکل رانکین آلی معمولی بوده و از ریکوپراتور بهره نمی‌برد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اتصال CPVT به ORC سیستم را قادر می‌سازد تا تولید برق را بهبود بخشد و در نتیجه تولید هیدروژن روزانه تا 30 درصد افزایش می‌یابد.

در این مقاله، یک سیکل رانکین آلی بهبودیافته با منبع انرژی خورشیدی جهت تولید هیدروژن مورد ارزیابی عملکردی قرار می‌گیرد. پژوهش‌های اخیر نشان‌دهنده اقتصاد رو به بهبود سیستم ترمودینامیکی پیشنهادی است. لذا در این مقاله پتانسیل تولید هیدروژن توسط سیستم ترکیبی پیشنهادی برای اولین بار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه روش‌شناسی بکار رفته در شبیه‌سازی سیستم، نتایج عملکردی سیستم، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت ارائه می‌شود.

2- روش تحقیق

شماتیک کلی سیستم در شکل 1 نشان داده شده است. در این سیستم، ابتدا قسمتی از تابش متمرکز خورشید در پنل فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. 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 از پنل به سیکل رانکین آلی منتقل می‌شود. جهت استفاده هرچه بیشتر از توان حرارتی ورودی به سیکل حاصل از بازیابی حرارت سیستم فتوولتائیک، از یک ریکوپراتور برای پیش‌گرم کردن سیال قبل از ورود به سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. بازیابی حرارت ایجاد شده در پنل موجب تولید توان در سیکل رانکین آلی شده و این توان به همواره توان تولیدی پنل به منظور تولید هیدروژن وارد الکترولیزر غشاء پلمیری می‌گردد. داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی سیستم در جدول 1 نشان داده شده است.

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

دمای آسمان در رابطه بالا طبق رابطه زیر قابل محاسبه است [11]:

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

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 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 [12] و با رابطه زیر بیان می‌شود (از انتقال حرارت از لبه‌ها صرف نظر می‌شود):

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

دمای پنل فتوولتائیک در حدود 10 درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای سیال خنک‌کن خروجی خواهد بود [13]. حل تکراری و همزمان معادلات بالا منجر به محاسبه مقادیر پارامترهای متغیر همچون دمای لایه‌های متفاوت در پنل فتوولتائیک و نهایتاً انرژی ورودی به سیکل رانکین آلی می‌شود. برای تحلیل ترمودینامیکی سیکل رانکین آلی، نیاز است همه مشخصه‌های ترمودینامیکی نقاط مختلف سیکل همچون دما، فشار، آنتالپی و آنترופی محاسبه گردند. برای شروع، دمای نقطه 1 به میزان 10 درجه از دمای پنل فتوولتائیک کمتر خواهد بود. در این نقطه، سیال در حالت بخار اشباع قرار دارد. جهت افزایش کارایی سیستم نیز دمای نقطه 4 یک مقدار کم انتخاب می‌شود (30 درجه سانتی‌گراد). در این نقطه سیال در حالت مایع اشباع قرار دارد. دبی جرمی سیال در داخل سیکل طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

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

دمای سیال در ورودی سیستم فتوولتائیک به میزان 10 درجه از دمای سیکل در خروجی توربین پایین تر خواهد بود که آن را می‌توان طبق رابطه زیر تعریف کرد [14]:

$$T_6 = T_2 - \Delta T_{pp} \quad (16)$$

حرارت انتقال سافته در ریکوپراتور طبق رابطه زیر مشخص می‌شود:

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

راندمان آیزنترتوپیک توربین و پمپ نیز به ترتیب طبق روابط زیر محاسبه

می‌شوند:

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

شده و مابقی به توان حرارتی تبدیل می‌شود که مقدار آن طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

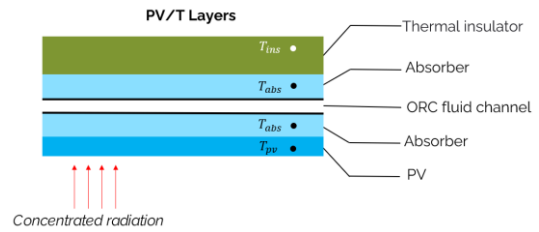
از این توان حرارتی تولیدی در سیستم، قسمتی به وسیله تابش ناشی از دمای بالاتر سیستم نسبت به محیط و انتقال حرارت همرفتی تلف شده و قسمتی به سیکل رانکین آلی تحویل داده می‌شود که طبق رابطه 7 نوشته می‌شود:

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

توان حرارتی همرفتی و تابشی حاصل از دمای بالاتر سیستم فتوولتائیک نسبت به محیط آن به ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

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



شکل 2 لایه‌های به کار رفته در سیستم فتوولتائیک-حرارتی

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 (شکل 2). موازنه انرژی حول هر یک از لایه‌های به کار رفته در سیستم PVT به صورت زیر است:

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

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:

$$V_0 = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (24)$$

ولتاژ مدار باز برای الکترولیزر غشا پلیمری با استفاده از معادله نرنست به دست می‌آید [16]:

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-3}(T_{PEM} - 298) \quad (25)$$

ولتاژ تک سل الکترولیزر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = V_0 + V_{act.a} + V_{act.c} + V_{ohm} \quad (26)$$

که در آن $V_{act,a}$ افت ولتاژ فعال‌سازی در آند، $V_{act,c}$ افت ولتاژ فعال‌سازی در کاتد و V_{ohm} افت ولتاژ اهمیک بر حسب ولت را نشان می‌دهد. نکته بسیار مهمی که باید در طراحی الکترولیزر منظور گردد این است که، چگالی شدت جریان در نقطه طراحی باید در ناحیه افت‌های ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد. بنابراین در این مقاله، در محاسبات افت ولتاژ غلظتی لحاظ نمی‌گردد.

افت ولتاژ فعال‌سازی: افت ولتاژ فعال‌سازی نشان‌دهنده آمادگی الکترون برای واکنش الکتروشیمیایی است. مقداری از ولتاژ اعمالی به الکترولیزر در نتیجه انتقال الکترون‌ها از سطح الکترودها در طول فرآیند شیمیایی از دست می‌رود. انرژی فعال‌سازی در هر دو سمت کاتد و آند به دلیل افت ولتاژ فعال‌سازی توسط معادله ولمر-باتلر به صورت زیر مدل می‌شود [17]:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad (27)$$

که در آن $J_{0,i}$ چگالی تبادل جریان آند/کاتد بر حسب آمپر بر سانتی‌متر مربع بوده و طبق رابطه زیر بدست می‌آید [17]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left(-\frac{V_{act,i}}{RT} \right) \quad (28)$$

افت ولتاژ اهمیک: افت پتانسیل اهمیک به دلیل مقاومت الکتریکی در سلول‌های الکترولیزر حاصل می‌گردد. این افت ولتاژ بستگی به نوع الکترولیزر غشا پلیمری و جنس الکترودها دارد. افت ولتاژ اهمیک به صورت خطی با چگالی جریان رابطه دارد. افت ولتاژ اهمیک ناشی از مقاومت غشاء مقاومت الکترولیزر در مقابل انتقال پروتون‌ها است و به عنوان تابعی از ضخامت غشا (L) بر حسب متر، رسانندگی یونی غشای تبادل یونی (σ_{mem}) بر حسب (Ω/cm) و چگالی جریان (i) بر حسب آمپر بر سانتی‌متر مربع به صورت زیر تعریف می‌شوند [17]-[19]:

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

برای محاسبه میزان توان مصرفی پمپ از رابطه زیر استفاده می‌شود [15]:

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

نهایتاً توان الکتریکی تولیدی سیکل رانکین آلی طبق رابطه زیر برابر خواهد بود با:

$$P_{orc} = \dot{m}_{orc}[(h_1 - h_2)\eta_{Gen} - (h_5 - h_4)] \quad (20)$$

با در نظر گرفتن توان تولیدی سیکل و نیز توان حرارتی ورودی به آن راندمان کاری سیکل طبق رابطه زیر برابر خواهد بود با:

$$n_{orc} = \frac{P_{orc}}{Q_{orc}} \quad (21)$$

راندمان الکتریکی کل سیستم برابر است با خروجی الکتریسیته کل بر ورودی انرژی کل سیستم. لذا می‌توان نوشت:

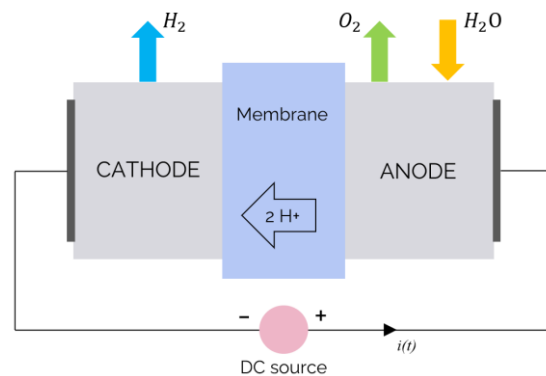
$$\eta_{elec} = \frac{P_{orc} + P_{pv}}{Q_{pv}} \quad (22)$$

2-2- الکترولیزر

در این مقاله، شبیه‌سازی الکترولیزر غشا پلیمری به دلیل مزایای زیادی از جمله چگالی جریان و راندمان بالا و قابلیت ترکیب با انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی مورد توجه قرار دارد. بر اساس انرژی آزاد گیبس واکنش، یک ولتاژ برگشت‌پذیر برای الکترولیزر غشا پلیمری وجود دارد. این ولتاژ مربوط به سل الکترولیزر ایده‌آل در شرایط بازگشت‌پذیر و هم‌دما است. انرژی آزاد گیبس به صورت زیر تعریف می‌شود [16]:

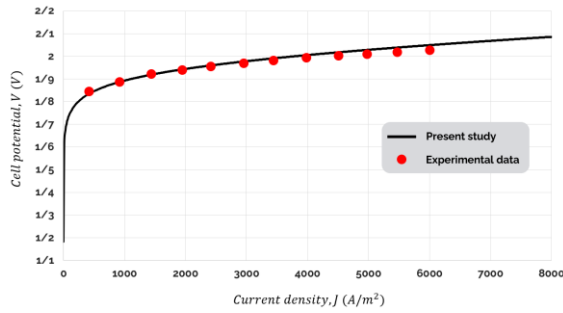
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (23)$$

که در آن ΔS تغییرات آنتالپی در واحد ژول بر مول، ΔS تغییرات آنتالپی در واحد ژول بر مول کلوین و T دما بر حسب کلوین است. شماتیک تک سلول الکترولیزر غشا پلیمری در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3 شماتیک سلول الکترولیزر غشا پلیمری

تحت شرایط ایده‌آل، گرمای تولید شده در طول واکنش به طور پیوسته از سیستم دفع می‌شود، بنابراین دمای سیستم تغییری نمی‌کند. مقدار انرژی که دفع می‌شود برابر تغییر آنتروپی و دما است. پتانسیل برگشت‌پذیر توسط معادله زیر به دست می‌آید:



شکل 4 مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی برای الکترولایزر

4- نتایج و بحث

4-1- عملکرد سیستم

جدول 2 مشخصات ترمودینامیکی سیال R245fa را در نقاط مختلف سیکل نشان می‌دهد. در نقطه 1، سیال در حال بخار اشباع است. پس از عبور سیال از توربین، بنا به ماهیت سیال‌های ارگانیک همچون سیال R245fa، حالت آن به بخار سوپرهیت تغییر پیدا می‌کند (نقطه 2). سپس با عبور از ریکوپراتور، سیال قسمتی از انرژی خود را از دست داده و مقداری دمای آن کاهش پیدا می‌کند ولی همچنان در حالت بخار سوپرهیت قرار دارد (نقطه 3). با ورود سیال به کندانسور ابتدا دمای سیال تا حالت بخار اشباع کاهش پیدا کرده و تا رسیدن به حالت مایع اشباع حرارت از دست می‌دهد (نقطه 4). سیالی که در نقطه 4 در حالت مایع اشباع قرار دارد به دلیل غیرایده‌آل بودن پمپ کمی به دمای آن اضافه شده و در نقطه 5 به حالت مایع مادون سرد می‌رسد. در انتها سیال با عبور از ریکوپراتور و گرفتن انرژی حرارتی دمای آن افزایش پیدا کرده و دوباره بری رسیدن به حالت بخار اشباع در دمای بالا وارد اواپراتور می‌شود.

جدول 2 مشخصات ترمودینامیکی سیال در نقاط مختلف سیکل

نقطه	حالت	دما (°C)	فشار (kPa)	آنتالپی (kJ/kg)	آنتروپی (kJ/kg.K)	دبی (g/s)
1	بخار اشباع	118.8	157	479.75	1.795	12.96
		4	0.13		9	
2	بخار اشباع	51.27	177.84	445.62	1.814	12.96
					7	
2s	بخار مافوق اشباع (آیزنترو پیک)	43.58	177.84	439.60	1.795	12.96
					9	
3	بخار مافوق اشباع	36.44	177.84	432.69	1.773	12.96
					8	
4	مایع اشباع	30.00	177.84	239.12	1.135	12.96
					5	
5	مایع سابکول	30.63	157	240.35	1.136	12.96
			0.13		1	
5s	مایع سابکول	30.49	157	240.17	1.135	12.96
			0.13		5	

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (29)$$

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{mem}[\lambda(x)]} \quad (30)$$

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (31)$$

که D ضخامت غشاء و λ_a و λ_c به ترتیب محتوای آب در آند و کاتد می‌باشند.

$$\sigma_{mem}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (32)$$

دبی جرمی هیدروژن تولیدی در الکترولایزر نیز از رابطه زیر بدست می‌آید [20]:

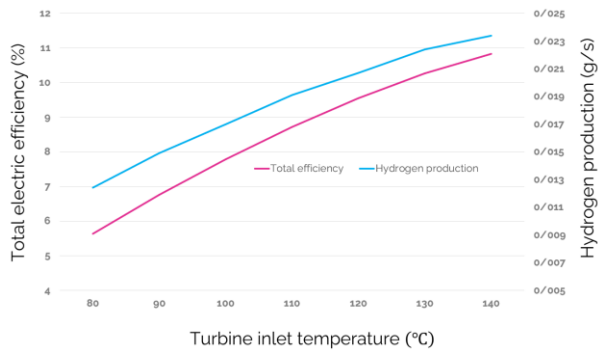
$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = 2\dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (33)$$

3- اعتبارسنجی

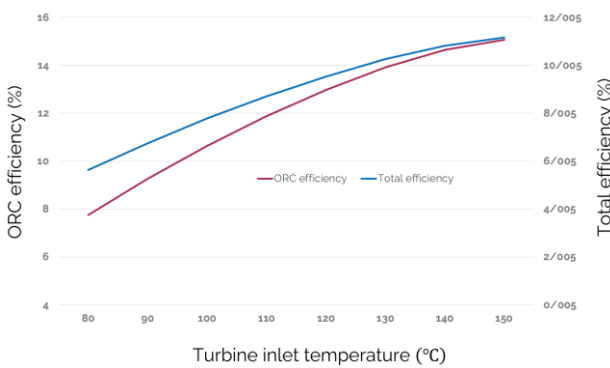
برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مشخصات ترمودینامیکی سیال در نقاط مختلف سیکل از طریق شبیه‌سازی (الف) و در حالتی که ریکوپراتور استفاده نشده است، با مقادیر بدست آمده در مرجع [13] (ب) در جدول 1 مقایسه شده‌اند. اختلاف اندکی در مقادیر بدست آمده در این مقاله با مرجع [13] نشان از اعتبار کد توسعه داده شده برای شبیه‌سازی سیستم است. برای اعتبارسنجی عملکرد الکترولایزر نیز نمودار پلورازیسون بدست آمده از شبیه‌سازی در این مقاله با مرجع [21] و در شکل 4 مقایسه شده است.

جدول 1 مشخصات ترمودینامیکی سیال در مقایسه با مرجع [13]

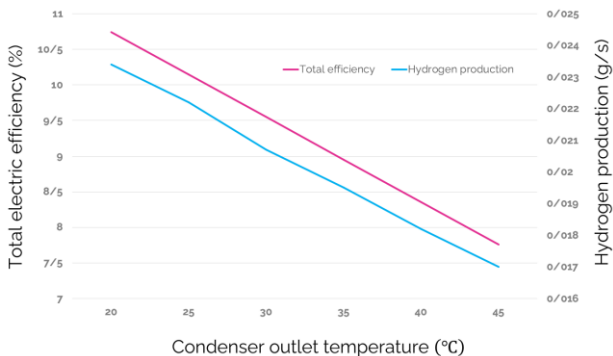
نقطه	1	2	3	4
دما (°C)	الف	45.18	30	30.37
	ب	49	30	30.04
فشار (bar)	الف	1.7785	1.7785	10.063
	ب	1.7904	1.7904	10.044
آنتالپی (kJ/kg)	الف	441.15	239.12	239.85
	ب	470.48	239.60	240.35
آنتروپی (kJ/kg.K)	الف	1.7856	1.1355	1.1359
	ب	1.7925	1.1372	1.1377



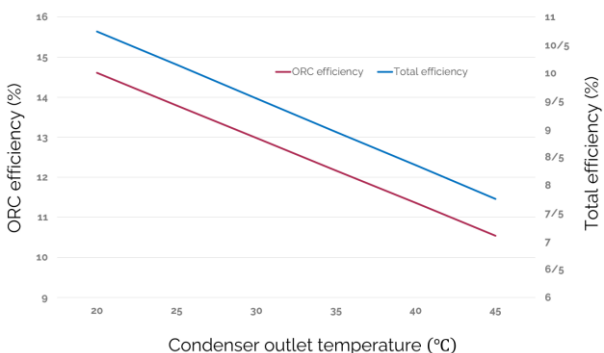
شکل 5 تاثیر دمای ورودی توربین بر راندمان کلی و تولید هیدروژن



شکل 6 تاثیر دمای ورودی توربین بر راندمان کلی و راندمان ORC



شکل 7 تاثیر دمای خروجی کندانسور بر راندمان کلی و تولید هیدروژن



شکل 8 تاثیر دمای خروجی کندانسور بر راندمان کلی و راندمان ORC

5- نتیجه گیری

پیک (آیزنترو)					
12.96	1.175 9	252.63	157 0.13	39.80	6 مایع سابکول
4611. 20	0.387 6	111.00	100	26.44	7 مایع
4611. 20	0.367 3	104.96	100	25.00	8 مایع

جدول 3 پارامترهای عملکردی سیستم از جمله توان تولیدی توربین، توان مصرفی پمپ، توان خالص تولیدی، بازدهی سیکل رانکین آلی، بازدهی الکتریکی کلی و میزان تولید هیدروژن را نشان می‌دهد. طبق نتایج، توان الکتریکی خالص تولیدی سیستم برابر است با میزان 3820 وات که این مقدار معادل است با تولید 0.02072 گرم بر ثانیه هیدروژن و نیز تولید 0.0829 گرم بر ثانیه اکسیژن.

جدول 3 مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم

پارامتر	مقدار	واحد
خروجی توربین	3980.01	وات
مصرف پمپ	160.01	وات
خروجی خالص	3820.00	وات
راندمان ORC	12.97	%
راندمان الکتریکی کل	9.55	%
تولید هیدروژن	0.02072	گرم بر ثانیه
تولید اکسیژن	0.08290	گرم بر ثانیه

4-2- تحلیل پارامتریک

تاثیر دمای ورودی توربین: تاثیر تغییرات دمای ورودی توربین بر روی عملکرد سیستم در شکل 5 و شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که از دو شکل هم مشخص است، افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش راندمان حرارتی کل، افزایش راندمان سیکل رانکین آلی، افزایش راندمان الکتریکی کل و نیز افزایش تولید هیدروژن می‌گردد. در سیکل‌های رانکین عموماً عملکرد به شدت وابسته به دمای سیال در ورودی توربین است. افزایش تولید برق در سیکل به نوبه خود باعث افزایش تولید هیدروژن در سیستم الکترولایزر می‌شود.

تاثیر دمای خروجی کندانسور: تاثیر تغییرات دمای خروجی کندانسور بر روی عملکرد سیستم در شکل 7 و شکل 8 نشان داده شده است. همانطور که از هر دو شکل مشخص است، افزایش دمای خروجی کندانسور باعث کاهش راندمان حرارتی کل، کاهش راندمان سیکل رانکین آلی، کاهش راندمان الکتریکی کل و نیز کاهش تولید هیدروژن می‌گردد. افزایش دمای سیال در خروجی کندانسور به این معنی است که دمای سیال در خروجی کندانسور نیز بالاتر است و به نوبه خود مساحت زیر منحنی دما-آنترپوی کاهش می‌یابد. دمای بالاتر سیال در خروجی کندانسور به عبارتی برابر است با کاهش توان تولیدی توربین. کاهش راندمان سیکل باعث کاهش توان الکتریکی ورودی به سیستم الکترولایزر شده و در نتیجه هیدروژن تولیدی را کاهش می‌دهد.

- Rankine cycle for increased power generation, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 2, pp. 308–324, 2011.
- [14] S. Karellas and A. Schuster, Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 11, No. 3, pp. 101–108, 2008.
- [15] 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.
- [16] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, Performance assessment and optimization of a novel integrated multigeneration system for residential buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 568–578, 2013.
- [17] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 4, pp. 1795–1805, 2013.
- [18] M. Ni, M. K. H. Leung, and D. Y. C. Leung, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 10, pp. 2748–2756, 2008.
- [19] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, and A. Jamali, Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building, *Energy and Buildings*, Vol. 45, pp. 202–210, 2012.
- [20] T. A. H. Ratlamwala, I. Dincer, and M. A. Gadalla, Thermodynamic analysis of an integrated geothermal based quadruple effect absorption system for multigenerational purposes, *Thermochimica Acta*, Vol. 535, pp. 27–35, 2012.
- [21] Y. E. Yuksel, M. Ozturk, and I. Dincer, Thermodynamic analysis and assessment of a novel integrated geothermal energy-based system for hydrogen production and storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 9, pp. 4233–4243, 2018.

در این مقاله، یک سیکل رانکین آلی بهبودیافته با منبع انرژی خورشیدی جهت تولید هیدروژن مورد ارزیابی عملکردی قرار گرفت. سیستم متمرکزکننده خورشیدی از نوع سهموی خطی برای انتقال حرارت به سیال کاری مورد استفاده قرار گرفت. سیستم الکترولایزر از نوع غشاپلیمری نیز برای تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی سیستم از ترکیب نرم‌افزارهای متلب و رف‌پراپ استفاده شد. معادلات انتقال حرارت در مدل انرژی از مرتبه صفر برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم فتوولتائیک با متمرکزکننده و از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای شبیه‌سازی عملکرد سیکل رانکین آلی استفاده شد. برای درک عملکرد سیستم پارامترهای عملکردی همچون توان تولیدی توربین، توان مصرفی پمپ، توان الکتریکی تولیدی فتوولتائیک، نرخ تولید هیدروژن و راندمان های حرارتی و الکتریکی بررسی شده و تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها انجام شد. در آینده می‌توان تحلیل اکسرژی و اقتصادی را برای بررسی دقیق‌تر سیستم انجام داد.

6- مراجع

- [1] G. K. Singh, Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review, *Energy*, Vol. 53, pp. 1–13, 2013.
- [2] A. Murty and C. Y. P. D. P. Rajanish, Enhanced energy harvesting and analysis of a High Concentration Photovoltaic /Thermal System with support of Cooling fluid and Increased Mass Flow Rates, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 8 No. 2, pp. 1077–1085, 2016.
- [3] C. Renno, F. Petito, D. D'Agostino, and F. Minichiello, Modeling of a CPV/T-ORC Combined System Adopted for an Industrial User, *Energies*, Vol. 13, No. 13, p. 3476, 2020.
- [4] M. A. Al-Nimr, M. Bukhari, and M. Mansour, A combined CPV/T and ORC solar power generation system integrated with geothermal cooling and electrolyser/fuel cell storage unit, *Energy*, Vol. 133, pp. 513–524, 2017.
- [5] M. A. Al-Nimr and W. A. Al-Ammari, A novel PVT/PTC/ORC solar power system with PV totally immersed in transparent organic fluid, *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 9, pp. 4766–4782, 2019.
- [6] C. Golonis, A. Skiadopoulou, D. Manolakos, and G. Kosmadakis, Assessment of the performance of a low-temperature Organic Rankine Cycle engine coupled with a concentrating PV-Thermal system, *Renewable Energy*, Vol. 179, pp. 1085–1097, 2021.
- [7] 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.
- [8] R. Moltames and R. Roshandel, Techno-economic analysis of a modified concentrating photovoltaic/organic Rankine cycle system, *International Journal of Ambient Energy*, 2020.
- [9] S.E. Hosseini, B. Butler, Design and Analysis of a Hybrid Concentrated Photovoltaic Thermal System Integrated with an Organic Rankine Cycle for Hydrogen Production, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, pp. 763–778, 2020.
- [10] 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*, Vol. 33, pp. 311–321, 2013.
- [11] 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.
- [12] S. Van Erdeweghe, J. Van Bael, B. Laenen, and W. D'Haeseleer, Influence of the pinch-point-temperature difference on the performance of the Preheat-parallel configuration for a low-temperature geothermally-fed CHP, *Energy Procedia*, Vol. 129, pp. 10–17, 2017.
- [13] G. Kosmadakis, D. Manolakos, and G. Papadakis, Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic