



Analyzing the Impact of Equipment Deviations from Ideal Conditions in a Geothermal CCHP System: An Energy, Exergy, and Economic Assessment

Mohammad Seyyedi¹ | Farhad Hosseinnejad^{2*} | Keyvan Fallah³ | Yasser Rostamiyan⁴

1. Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. Email: mohammad.seyyedi.espoie@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. Email: fhosseinnejad@sariia.ac.ir

3. Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. Email: keyvan.fallah@gmail.com

4. Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. Email: y.rostamiyan@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article History:

Received 20 July 2024

Revised 20 August 2024

Accepted 21 October 2024

Published Online 04 January 2025

Keywords:

Energy and exergy analysis,
Exergeoeconomics,
CCHP,
Geothermal.

ABSTRACT

In this paper, a geothermal binary cycle cogeneration system based on TRCC is investigated. Pressurized hot water enters the separator, where the vapor part enters the steam turbine and the liquid part enters the heat exchanger to produce cooling, heating, and power (ORC turbine). The results showed that the irreversibility in heat transfer related equipment including condenser and heat exchanger is more than other equipment. It was observed that reducing the efficiency of turbine number 2 in the ORC cycle to 70% causes a 51% reduction in the net power output. These reduction values for turbine number 1, pump and compressor are 18%. The amount of energy and exergy efficiency decreases by 9% with the deviation of turbine number 2 from the ideal state (decrease in efficiency from 100% to 70%). This reduction is 4% for turbine number 1, pump and compressor equipment. The economic or exergeoeconomic study of the power plant showed that the decrease in the efficiency of turbine number 2 from 100% to 70% caused an increase in the cost of power generation from 2.5 cents/kwh to 2.8 cents/kwh, which shows an increase of 12%. The increase in power production cost for turbine number 1 and pump is 4%.

Cite this article: Seyyedi, M.; Hosseinnejad, F.; Fallah, K. & Rostamiyan, Y. (2025). Analyzing the Impact of Equipment Deviations from Ideal Conditions in a Geothermal CCHP System: An Energy, Exergy, and Economic Assessment. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (1), 69-82. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.382572.1097>



© Mohammad Seyyedi, Farhad Hosseinnejad, Keyvan Fallah, Yasser Rostamiyan

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.382572.1097>

Introduction

Today, the increase in energy demand as well as the environmental problems of fossil fuels have caused the use of renewable energy sources with higher efficiency to be considered. One of the latest technologies is the applying of a simultaneous system of combined cooling heat and power (CCHP) by geothermal energy with a combined cycle of instantaneous-binary evaporation. Geothermal fluid output can be in two states: vapor-liquid and high-pressure liquid. The application of the instantaneous-binary system is for high-pressure liquid fluid, which is also known as a hybrid power plant. In the present work, an energy, exergy and exergeoeconomic (economic) evaluation is performed on the instantaneous-binary evaporation cycle along with the CCHP system based on the TRCC cycle. The innovation of the present work is to investigate the effect of equipment deviation from the ideal state including turbine, compressor, pump and ejector.

Methods

In this system, water and CO₂ are the operating fluids. Hot water comes out of the separator under

pressure from the ground with a certain percentage of water and steam (according to the pressure of the separator). The steam produced in the separator enters the turbine number 1 and with the production of a certain electric power, it enters the condenser number 1 and returns to the ground. The liquid part enters heat exchanger number 2, which enters the first cycle of power generation with CO₂ base refrigerant. In this cycle, in addition to generating power, there is also a heater. In cycle No. 2, the ejector reduces irreversibility and waste compared to the expansion valve. In the present work, the EES software is used to solve the energy, exergy and economic equations. This software has a library of thermophysical properties of different materials and it solves the need to manually enter the properties in the new temperature and pressure.

Results

This article investigates the effect of equipment deviation from the ideal state in a CCHP geothermal system. The current cycle is a simultaneous production cycle including the production of power, heating and cooling, whose input source is geothermal energy. In the present work, energy, exergy and economic evaluation is done using EES cod and SPECO algorithm. The exergy analysis showed that heat exchanger No. 1, condenser No. 1, heat exchanger No. 2 and the ejector contribute the most to the exergy destruction of the system. This result confirms that irreversibilities are maximum in heat transfer related equipment. Further, the exergetoeconomic or economic analysis showed that turbine number 1 and turbine number 2 have the highest investment cost rate and exergy destruction cost rate. The results showed that the current CCHP power plant was more sensitive to turbine number 2, which is the turbine related to the ORC cycle section, so that by reducing the efficiency to 70%, the net output power of the power plant reaches from 4234 kW to 2800 kW, which It shows a decrease of 51%. These reduction values for turbine number 1, pump and compressor are 18%. The examination of energy and exergy efficiencies showed that with the deviation of turbine number 2 from the ideal state (decrease in efficiency from 100% to 70%), the amount of energy and exergy efficiencies decreases by 9%. This reduction is 4% for turbine number 1, pump and compressor equipment. The economic or exergetoeconomic study of the power plant showed that the decrease in the efficiency of turbine number 2 from 100% to 70% caused the cost of power production to increase from 2.5 cents/kwh to 2.8 cents/kwh, which shows an increase of 12%. The increase in power production cost for turbine number 1 and pump is 4%.

Conclusion

Decrease in efficiency from 100% to 70%) cause decrease of 51% for turbine number 2 and 18% for turbine number 1, pump and compressor at output power. The energy and exergy for turbine number decreases by 9%, 4% for turbine number 1, pump and compressor equipment. The cost of power production to increase from 2.5 cents/kwh to 2.8 cents/kwh for turbine number 2, which shows an increase of 12%. The increase in power production cost for turbine number 1 and pump is 4%.



تحلیل تأثیر انحرافات غیرایده‌آل تجهیزات بر سیستم تولید هم‌زمان زمین‌گرمایی: ارزیابی انرژی، انرژی و اقتصادی

محمد سیدی^۱ | فرهاد حسین‌نژاد^{۲*} | کیوان فلاح^۳ | یاسر رستمیان^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی ساری. رایانامه: mohammad.seyyedi.espoie@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی ساری. رایانامه: fhosseinnejadtausari@gmail.com

۳. دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی ساری. رایانامه: keyvan.fallah@gmail.com

۴. دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی ساری. رایانامه: y.rostamiyan@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

در مقاله حاضر نوعی سیستم تولید هم‌زمان سیکل آنی - باینری زمین‌گرمایی بر پایه TRCC بررسی می‌شود. آب داغ تحت فشار وارد جداساز شده که در آن قسمت بخار وارد توربین بخار و قسمت مایع وارد مبدل حرارتی به منظور تولید برودت و حرارت و توان (توربین ORC) می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار EES نشان داد مبدل حرارتی ۱ و کندانسور ۱ بیشترین سهم از تخریب انرژی را دارند. در رتبه بعدی، مبدل حرارتی ۲ و اجکتور هستند. مشاهده شد که توربین‌های ۱ و ۲ بیشترین مقادیر نرخ هزینه سرمایه‌گذاری را دارند. این نتایج نشان داد تجهیزات مرتبط با انتقال حرارت بیشترین سهم در تخریب انرژی و تجهیزات مرتبط با توان بیشترین سهم را در هزینه سرمایه‌گذاری دارند. انحراف تجهیزات از حالت ایده‌آل سبب کاهش توان خروجی خالص نیروگاه به میزان ۵۱ درصدی برای توربین ۲ و برابر ۱۸ درصد برای توربین ۱، پمپ و کمپرسور ۱۸ درصد می‌شود. راندمان‌های انرژی و انرژی نیز شامل ۹ درصد کاهش برای توربین ۲ و برابر ۴ درصد کاهش برای توربین ۱، پمپ و کمپرسور ۴ درصد می‌شوند. بررسی اقتصادی با انرژی‌اقتصاد یا انرژی‌اقتصادیک نیروگاه نشان داد کاهش راندمان توربین ۲ سبب افزایش هزینه تولید توان از ۲/۵ cent/kWh به ۲/۸ cent/kWh شده که آن نوعی افزایش ۱۲ درصدی را نشان می‌دهد. مقادیر افزایش هزینه تولید توان برای توربین ۱ و پمپ ۴ درصد است.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلیدواژه:

آنالیز انرژی و انرژی، انرژی‌اقتصادیک، سیستم هم‌زمان، زمین‌گرمایی.

استناد: سیدی، محمد؛ حسین‌نژاد، فرهاد؛ فلاح، کیوان و رستمیان، یاسر (۱۴۰۳). تحلیل تأثیر انحرافات غیرایده‌آل تجهیزات بر سیستم تولید هم‌زمان زمین‌گرمایی: ارزیابی انرژی، انرژی و اقتصادی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۱) ۶۹-۸۲

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.382572.1097>

© محمد سیدی، فرهاد حسین‌نژاد، کیوان فلاح، یاسر رستمیان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.382572.1097>



مقدمه

افزایش تقاضای انرژی و همچنین، مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی سبب شده است که امروزه استفاده از منابع انرژی نو با راندمان‌های بالاتر مورد توجه قرار گیرد [۱ و ۲]. از جدیدترین تکنولوژی‌ها استفاده از سیستم هم‌زمان تولید حرارت، برودت و توان الکتریکی تولید هم‌زمان^۱ با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی^۲ با چرخه ترکیبی تبخیر آبی - باینری^۳ است [۳ و ۴]. خروجی سیال زمین‌گرمایی می‌تواند در دو حالت بخار - مایع و مایع پرفشار باشد. کاربرد سیستم آبی - باینری برای سیال مایع پرفشار است که به عنوان نیروگاه هیبریدی هم شناخته می‌شود [5].

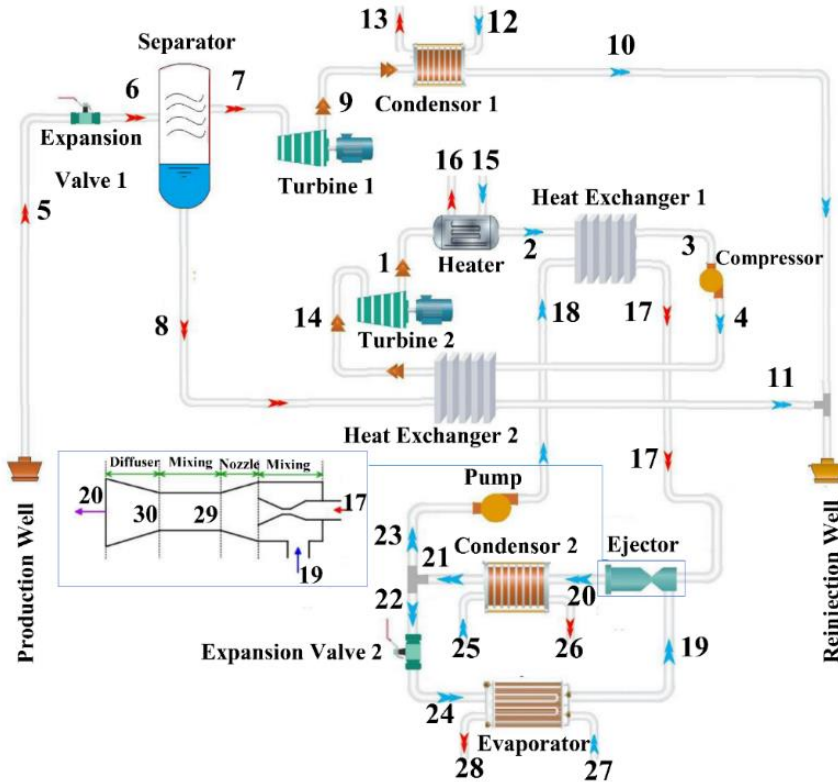
ابراهیمی و همکاران [6] اثر فشار و دمای ورودی به توربین را در سیستم تولید هم‌زمان بررسی کردند. در پژوهش یادشده آنالیز انرژی و انرژی نشان داد بخش تولید بخار سهم اصلی در تخریب انرژی را دارد. احمدی و همکاران [7] نوعی سیستم ترکیبی تولید هم‌زمان و سیکل ارگانیک رانکین^۴ را بررسی کردند. آن‌ها یک بهینه‌سازی براساس کمینه‌سازی مقادیر هزینه نهایی و بیشینه‌سازی راندمان انرژی انجام دادند و مقادیر ورودی را بر اساس آن تنظیم کردند. سیکل‌های هم‌زمان بر مبنای سیکل ارگانیک شامل بررسی پارامترهای دما، فشار، بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی توسط منابع [۸ - ۱۲] انجام شده است. وانگ و همکاران [13] در یک سیکل ترکیبی زمین‌گرمایی - رانکین آبی نشان دادند مبرد ترکیبی از ایزوبوتان و R142b با درصدهای حجمی ۳۰ و ۷۰ درصد بیشترین راندمان انرژی و کمترین تخریب انرژی را دارند. مصطفی و گروسی [14] نوعی سیستم تولید هم‌زمان مجهز به سرمایش (سیستم تبرید)، گرمایش (آبگرمکن خانگی) و سیستم تولید توان (سیکل رانکین آبی) را پیشنهاد کردند. آن‌ها نشان دادند مبرد R123 بهترین عملکرد را نسبت به مبردهای دیگر داشته است. محمدی م مهرپویا [15] نوعی سیستم ترکیبی از سیکل هم‌زمان و سیکل کالینا به همراه اسمز معکوس را ارائه دادند. دمای سیال زمین‌گرمایی ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. آن‌ها مقدار راندمان انرژی ۳۸ درصد را برای سیکل ترکیبی حاضر به دست آوردند. قائی و همکاران [16] نیز یک سیستم ترکیبی از سیکل تولید هم‌زمان به همراه چیلر جذبی و سیستم تولید توان LNG ارائه کردند. مقادیر توان خروجی، راندمان انرژی و راندمان انرژی در کار آن‌ها به ترتیب ۴۰۵ کیلووات، ۸۵ و ۱۸ درصد بوده است. آنالیز انرژی و انرژی در منابع [۱۷ - ۲۲] بررسی شده است. سیستم تولید هم‌زمان بر پایه سیکل TRCC توسط وانگ و همکاران [23] پیشنهاد و توسط مراجع [24] و [1] توسعه داده شد. زارع و همکاران [1] نوعی ارزیابی انرژی و انرژی از یک سیستم تولید هم‌زمان بر پایه سیکل TRCC انجام دادند و یک راندمان ۳۰/۹ درصدی برای انرژی به دست آوردند. در کار حاضر یک ارزیابی انرژی^۵، انرژی^۶ و انرژی^۷ (اقتصادی) روی سیکل تبخیر آبی - باینری به همراه سیستم تولید هم‌زمان بر پایه سیکل TRCC انجام می‌پذیرد. نوآوری کار حاضر بررسی اثر انحراف تجهیزات از حالت ایده‌آل شامل توربین، کمپرسور، پمپ و اجکتور است.

روش‌شناسی

تشریح سیستم

سیستم تولید هم‌زمان سیکل آبی - باینری زمین‌گرمایی بر پایه TRCC در شکل ۱ آمده است.

1. Combined cooling, heating and power (CCHP)
2. Geothermal energy
3. Flash-binary
4. Organic Rankine Cycle (ORC)
5. Energy
6. Exergy
7. Exergoeconomic



شکل ۱. سیستم تولید هم‌زمان سیکل آبی - باینری زمین‌گرمایی بر پایه TRCC

در این سیستم آب و CO₂ سیال عامل هستند. آب داغ تحت فشار خروجی از زمین با درصدی مشخص از آب و بخار (بر حسب فشار جداساز) از جداساز خارج می‌شود. بخار تولیدی در جداساز وارد توربین ۱ می‌شود و با تولید توان الکتریکی مشخص وارد کندانسور ۱ می‌شود و به زمین برمی‌گردد. بخش مایع وارد مبدل ۲ شده که وارد سیکل اول تولید توان با مبرد پایه CO₂ می‌شود. در این سیکل علاوه بر تولید توان یک هیتر نیز وجود دارد. در مبدل ۱ حرارت به سیکل ۲ به عنوان سیکل تبرید وارد می‌شود. اجکتور در سیکل حاضر سبب کاهش بازگشت‌ناپذیری و اتلاف‌ها نسبت به شیر انبساط می‌شود.

معادلات حاکم بر تئوری مسئله

برای مدل‌سازی سیستم سیکل به صورت پایا با صرف نظر کردن انرژی جنبشی و پتانسیل و افت‌های حرارتی و اصطکاکی در لوله‌ها در نظر گرفته می‌شود. معادلات بقایی شامل پیوستگی و مومنتوم به صورت روابط ۱ و ۲ بیان می‌شود:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (2)$$

در روابط یادشده، \dot{Q} و \dot{W} مقادیر حرارت منتقل شده و کار انجام‌شده است. h دبی جرمی و \dot{m} و آنتالپی مخصوص است. انرژی به عنوان حداکثر کار مفید قابل استحصال تعریف می‌شود و در کار حاضر برای بررسی هم‌زمان انرژی - اقتصادی سیکل از روش اسپکو^۱ استفاده می‌شود (رابطه ۳) [25]:

$$\dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{P,k} = \dot{E}x_{D,k} \quad (3)$$

برای $\dot{E}x_{F,k}$ ، $\dot{E}x_{P,k}$ و $\dot{E}x_{D,k}$ به ترتیب نرخ انرژی سوخت، محصول و نرخ تخریب انرژی است و مقادیر آن‌ها در جدول ۱ برای کلیه تجهیزات سیستم آمده است. مقادیر کار خالص تولیدی، انرژی ورودی، انرژی ورودی، راندمان انرژی و راندمان انرژی در ادامه آمده است (روابط ۴-۶).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Tur1} + \dot{W}_{Tur2} - \dot{W}_{Pump} - \dot{W}_{Comp} \quad (۴)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_5 h_5 - (\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{11} h_{11}) \quad (۵)$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_5 \quad (۶)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{evaporator} + \dot{Q}_{heater}}{\dot{Q}_{in}} \quad (۷)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{cooling} + \dot{E}_{heating}}{\dot{E}_{in}} \quad (۸)$$

جدول ۱. پارامترهای انرژی و انرژی برای تجهیزات سیستم

تجهیزات	معادله انرژی	معادله انرژی		
		$\dot{E}_{F,k}$	$\dot{E}_{P,k}$	$\dot{E}_{D,k}$
توربین ۱	$\dot{W}_{Tur1} = \dot{m}_7(h_7 - h_9)$	$\dot{E}_{x_7} - \dot{E}_{x_9}$	\dot{W}_{Tur1}	$\dot{E}_{x_{D,Tur1}}$
توربین ۲	$\dot{W}_{Tur2} = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_1)$	$\dot{E}_{x_{14}} - \dot{E}_{x_1}$	\dot{W}_{Tur2}	$\dot{E}_{x_{D,Tur2}}$
اجکتور	$\eta_n = \frac{h_{17} - h_{29}}{h_{17} - h_{29,s}}, C_{29} = \sqrt{2(h_{17} - h_{29})}$ $h_{30} = \frac{h_{17} + \frac{m_{19}}{m_{17}} h_{29}}{1 + \frac{m_{19}}{m_{17}}} - \frac{C_{30}^2}{2}$ $h_{20} = h_{20} + \frac{C_{30}^2}{2}, \eta_d = \frac{h_{20} - h_{30}}{h_{20} - h_{30,s}}$	$\dot{E}_{x_{17}} + \dot{E}_{x_{19}}$	$\dot{E}_{x_{20}}$	$\dot{E}_{x_{D,Ej}}$
مبدل ۱	$\dot{m}_2(h_2 - h_3) = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18})$	$\dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_3}$	$\dot{E}_{x_{17}} - \dot{E}_{x_{18}}$	$\dot{E}_{x_{D,HE1}}$
مبدل ۲	$\dot{m}_8(h_8 - h_{11}) = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_4)$	$\dot{E}_{x_8} - \dot{E}_{x_{11}}$	$\dot{E}_{x_{14}} - \dot{E}_{x_4}$	$\dot{E}_{x_{D,HE2}}$
جداساز شیر انبساط ۱	$h_5 - h_6$ $\dot{m}_7 = \dot{m}_6 x_6$ $\dot{m}_8 = \dot{m}_6 - \dot{m}_7$	\dot{E}_{x_5}	$\dot{E}_{x_7} + \dot{E}_{x_8}$	$\dot{E}_{x_{D,SEP-EV1}}$
کندانسور ۱	$\dot{m}_9(h_9 - h_{10}) = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12})$	$\dot{E}_{x_9} - \dot{E}_{x_{10}}$	$\dot{E}_{x_{13}} - \dot{E}_{x_{12}}$	$\dot{E}_{x_{D,Con1}}$
کندانسور ۲	$\dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21}) = \dot{m}_{26}(h_{26} - h_{25})$	$\dot{E}_{x_{20}} - \dot{E}_{x_{21}}$	$\dot{E}_{x_{26}} - \dot{E}_{x_{25}}$	$\dot{E}_{x_{D,Con2}}$
پمپ	$\dot{W}_{Pump} = \dot{m}_{18}(h_{18} - h_{23})$	\dot{W}_{Pump}	$\dot{E}_{x_{18}} - \dot{E}_{x_{23}}$	$\dot{E}_{x_{D,Pump}}$
کمپرسور	$\dot{W}_{Comp} = \dot{m}_4(h_4 - h_3)$	\dot{W}_{Comp}	$\dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_3}$	$\dot{E}_{x_{D,Comp}}$
اواپراتور	$\dot{m}_{19}(h_{19} - h_{24}) = \dot{m}_{27}(h_{27} - h_{28})$	$\dot{E}_{x_{19}} - \dot{E}_{x_{24}}$	$\dot{E}_{x_{27}} - \dot{E}_{x_{28}}$	$\dot{E}_{x_{D,Eva}}$
هیتر	$\dot{m}_1(h_1 - h_2) = \dot{m}_{15}(h_{15} - h_{16})$	$\dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_2}$	$\dot{E}_{x_{15}} - \dot{E}_{x_{16}}$	$\dot{E}_{x_{D,Heater}}$
شیر انبساط ۲	$h_{22} - h_{24}$	$\dot{E}_{x_{22}}$	$\dot{E}_{x_{24}}$	$\dot{E}_{x_{D,EV2}}$

برای مدل سازی انرژی و اکونومیک (اقتصادی) از معادله هزینه به صورت معادلات ۹ و ۱۰ استفاده می شود:

$$\dot{C}_{in,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{w,k} \quad (۹)$$

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N} \quad (۱۰)$$

در معادله بالا $\dot{C}_{w,k}$ و $\dot{C}_{q,k}$ نرخ هزینه انتقال حرارت و توان است. \dot{Z}_k نیز هزینه سرمایه گذاری اولیه هر تجهیز است و به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می شود. در معادله ۱۰ هزینه سرمایه گذاری، φ و N ضریب نگهداری تجهیزات (۱/۰۶) و تعداد ساعت کارکرد سالیانه (۷۴۴ ساعت) در نظر گرفته می شود [26]. CRF ضریب اصلاح سرمایه گذاری است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۱۱)$$

پارامترهای انرژی و اکونومیک شامل معادلات بالانس هزینه، هزینه سرمایه گذاری و معادلات کمکی در جدول ۲ آمده است. پارامترهای نهایی اقتصادی شامل نرخ هزینه تخریب انرژی، ضریب انرژی و اکونومیک و مجموع نرخ تخریب و سرمایه گذاری در ادامه آمده است (روابط ۱۲-۱۴).

1. Cost rate
2. Capital cost rate

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (12)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (13)$$

$$\dot{C}_{Tot} = \dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k \quad (14)$$

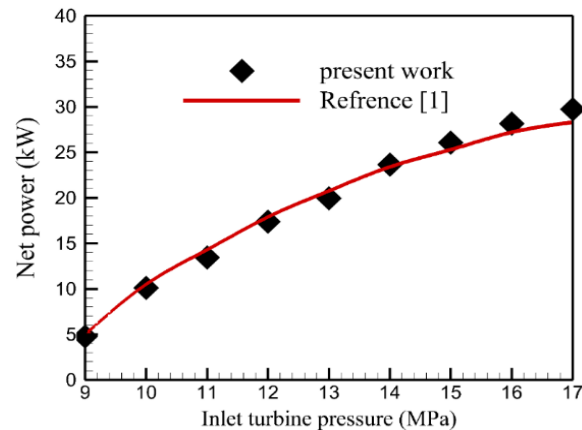
روش تحقیق و حل بر اساس روش اسپکو به این صورت است که ابتدا با آنالیز انرژی مقادیر دبی جرمی و دما و آنتالپی تمام نقاط به دست می‌آید. سپس، با آنالیز انرژی مقادیر انرژی تمام نقاط به دست می‌آید. در ادامه، برای تمام تجهیزات مقدار سرمایه‌گذاری آن محاسبه شده و در هر تجهیز یک معادله بقای اقتصادی نوشته می‌شود. در ادامه این معادلات بقایی مقدار هزینه واحد انرژی را محاسبه می‌کند.

روش حل و صحت‌سنجی

قبل از بررسی و آنالیز نتایج یک اعتبارسنجی روی سیکل مشابه مقاله زارع و همکاران [1] انجام می‌شود. شکل ۱ نشان می‌دهد که حداکثر خطا ۶ درصد بوده که نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی با نتایج مقاله مرجع است. در مقاله حاضر برای شبیه‌سازی سیکل از نرم‌افزار EES برای حل هم‌زمان معادلات انرژی، انرژی و اقتصادی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار دارای کتابخانه‌ای از خواص ترموفیزیکی مواد مختلف بوده و در حالت تکرار و خطا نیاز به ورود خواص را در دما و فشار جدید به صورت دستی رفع می‌کند.

جدول ۲. پارامترهای انرژی‌اقتصادی

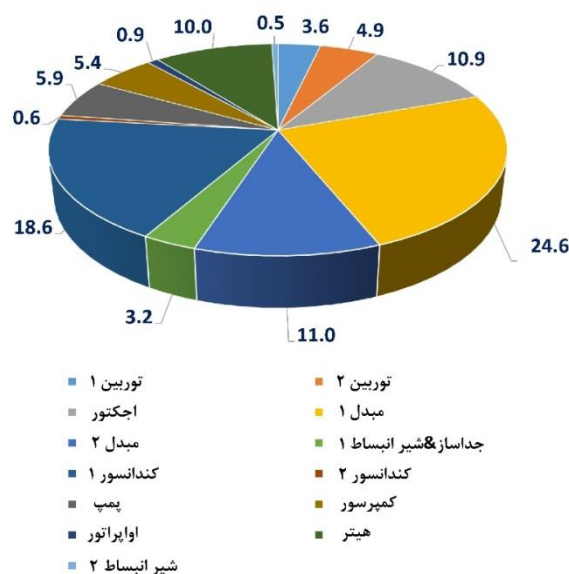
تجهیزات	هزینه سرمایه‌گذاری (\$) (\$)	معادله هزینه	معادله کمکی
توربین ۱	$Z_{tur1} = 6000 \dot{W}_{Tur1}^{0.7}$ [27]	$\dot{C}_7 + \dot{Z}_{tur1} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{w,tur1}$	$\frac{\dot{C}_7}{\dot{E}x_7} = \frac{\dot{C}_9}{\dot{E}x_9}$
توربین ۲	$Z_{tur2} = 6000 \dot{W}_{Tur1}^{0.7}$ [27]	$\dot{C}_4 + \dot{Z}_{tur2} = \dot{C}_1 + \dot{C}_{w,tur2}$	$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}x_4} = \frac{\dot{C}_1}{\dot{E}x_1}$
اجکتور	$Z_{ej} = \frac{8760}{6.7958} \dot{m}_{20}^{0.75} \left(\frac{T_{29}}{P_{29}}\right)^{0.015} \left(\frac{P_{20}}{P_{29}}\right)^{-1.55}$ [28]	$\dot{C}_{17} + \dot{C}_{19} + \dot{Z}_{ej} = \dot{C}_{20}$	$\frac{\dot{C}_{17} - \dot{C}_{20}}{\dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{20}} = \frac{\dot{C}_{19} - \dot{C}_{20}}{\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{20}}$
مبدل ۱	$Z_{HE1} = 130 \left(\frac{A_{HE1}}{0.093}\right)^{0.78}$ [29]	$\dot{C}_2 + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{HE1} = \dot{C}_{17} + \dot{C}_3$	$\frac{\dot{C}_8}{\dot{E}x_8} = \frac{\dot{C}_{11}}{\dot{E}x_{11}}$
مبدل ۲	$Z_{HE2} = 130 \left(\frac{A_{HE2}}{0.093}\right)^{0.78}$ [29]	$\dot{C}_8 + \dot{C}_4 + \dot{Z}_{HE2} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{11}$	$\frac{\dot{C}_2}{\dot{E}x_2} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{E}x_3}$
جداساز & شیر انبساط ۱	$Z_{SEP-EV1} = 280.3 \dot{m}_5^{0.67} + 114.5 \dot{m}_5$ [30] [31]	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{SEP-EV1} = \dot{C}_7 + \dot{C}_9$	$c_5 = \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}x_5} = 1.3 \left(\frac{\$}{GJ}\right)$
کندانسور ۱	$Z_{con1} = 1773 \dot{m}_9$ [32]	$\dot{C}_9 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{con1} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{13}$	$\frac{\dot{C}_5}{\dot{E}x_5} = \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}x_6}$
کندانسور ۲	$Z_{con2} = 1773 \dot{m}_{20}$ [32]	$\dot{C}_{20} + \dot{C}_{25} + \dot{Z}_{con2} = \dot{C}_{21} + \dot{C}_{26}$	$\frac{\dot{C}_7 - \dot{C}_6}{\dot{E}x_7 - \dot{E}x_6} = \frac{\dot{C}_8 - \dot{C}_6}{\dot{E}x_8 - \dot{E}x_6}$
پمپ	$Z_{pump} = 3540 (\dot{W}_{pump})^{0.71}$ [9]	$\dot{C}_{23} + \dot{Z}_{pump} + \dot{C}_{w,pump} = \dot{C}_{18}$	$\frac{\dot{C}_{10}}{\dot{E}x_{10}} = \frac{\dot{C}_9}{\dot{E}x_9}$
کمپرسور	$Z_{comp} = \frac{727.4235}{0.8996 - \eta_{comp}} \left(\frac{P_4}{P_3}\right) \ln\left(\frac{P_4}{P_3}\right)$ [33]	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{comp} + \dot{C}_{w,comp} = \dot{C}_4$	$\frac{\dot{C}_{21}}{\dot{E}x_{21}} = \frac{\dot{C}_{20}}{\dot{E}x_{20}}$
اواپراتور	$Z_{eva} = 309.143 A_{Eva} + 231.195$ [34]	$\dot{C}_{24} + \dot{C}_{27} + \dot{Z}_{eva} = \dot{C}_{19} + \dot{C}_{28}$	$\frac{\dot{C}_{w,tur1}}{\dot{W}_{tur1}} = \frac{\dot{C}_{w,pump}}{\dot{W}_{pump}}$
هیتر	$Z_{Heater} = 130 \left(\frac{A_{Heater}}{0.093}\right)^{0.78}$ [29]	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{15} + \dot{Z}_{Heater} = \dot{C}_2 + \dot{C}_{16}$	$\frac{\dot{C}_{tur2}}{\dot{W}_{tur2}} = \frac{\dot{C}_{comp}}{\dot{W}_{comp}}$
شیر انبساط ۲	$114.5 \dot{m}_{22}$ [30]	$\dot{C}_{22} + \dot{Z}_{EV2} = \dot{C}_{24}$	$\frac{\dot{C}_{24}}{\dot{E}x_{24}} = \frac{\dot{C}_{19}}{\dot{E}x_{19}}$
			$\frac{\dot{C}_1}{\dot{E}x_1} = \frac{\dot{C}_2}{\dot{E}x_2}$
			$\frac{\dot{C}_{22}}{\dot{E}x_{22}} = \frac{\dot{C}_{24}}{\dot{E}x_{24}}$



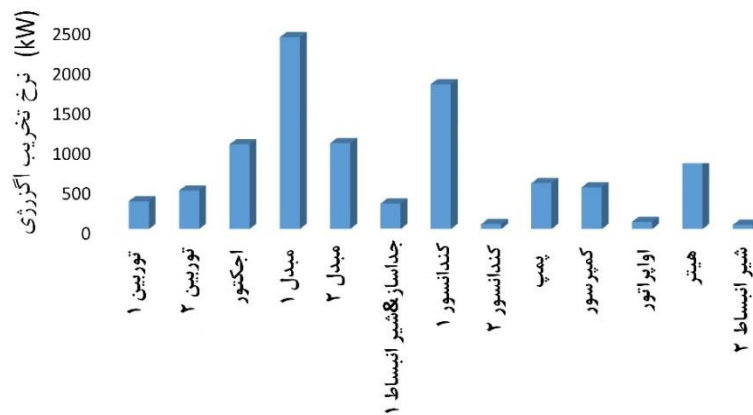
شکل ۲. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج کار [۱]

نتایج و بحث

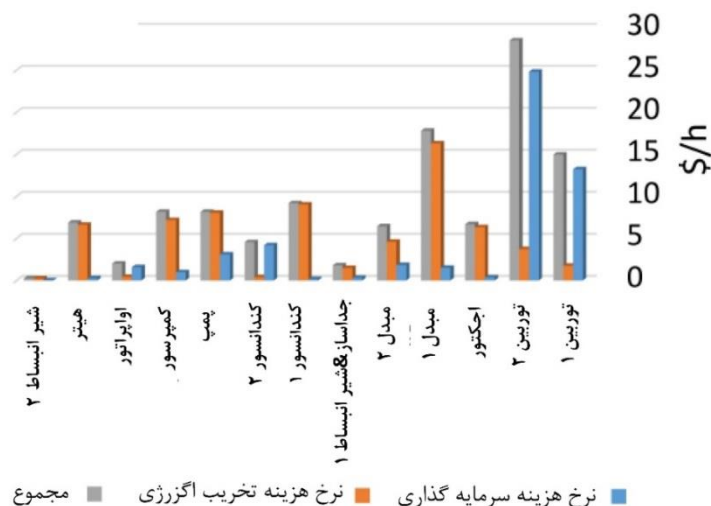
در بخش حاضر به بررسی اثر راندمان تجهیزات مختلف بر پارامترهای طراحی سیکل پرداخته می‌شود. ابتدا مقادیر تخریب آگرزژی تجهیزات مختلف و درصدهای مربوطه با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ بررسی می‌شود. مشاهده می‌شود که مبدل حرارتی ۱ و کندانسور ۱ با ۲۴/۶ و ۱۸/۶ درصد بیشترین سهم را در تخریب آگرزژی سیستم دارند. مبدل حرارتی ۲ و اجکتور با ۱۱ و ۱۰/۹ درصد نیز در رده بعدی قرار دارند. نتایج نشان داد تخریب آگرزژی مبدل‌های حرارتی ۱ و ۲ به میزان ۳۵/۶ درصد کل سیستم است. این نتایج نشان می‌دهد مقادیر بازگشت‌ناپذیری‌ها یا تولید آنتروپی در تجهیزات مرتبط با انتقال گرما بیشتر از تجهیزات مرتبط با تراکم و انبساط مانند توربین، پمپ و کمپرسور هستند. شکل ۵ پارامترهای نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ هزینه تخریب آگرزژی و مجموع را برای تجهیزات مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که توربین‌های ۱ و ۲ بیشترین مقادیر نرخ هزینه سرمایه‌گذاری را به ترتیب با ۱۴ و ۲۵ دلار بر ساعت دارند. این نتیجه نشان می‌دهد توربین‌ها در مجموعه سیکل حاضر گران‌ترین تجهیزات موجود هستند. نرخ هزینه تخریب آگرزژی که مربوط به بازگشت‌ناپذیری‌های جریان است برای توربین‌های ۱ و ۲ و مبدل حرارتی ۱ بیشینه بوده و به ترتیب ۱۵، ۲۷ و ۱۷ دلار بر ساعت است. این مقادیر نشان می‌دهد که مقادیر افت‌های اصطکاکی و بازگشت‌ناپذیری‌ها در این تجهیزات نسبت به سایر تجهیزات بیشینه است. در محاسبات آگرزژواکونومیک یا اقتصادی معمولاً از مجموع مقادیر نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ هزینه تخریب آگرزژی استفاده می‌شود.



شکل ۳. درصد تخریب آگرزژی تجهیزات سیستم CCHP



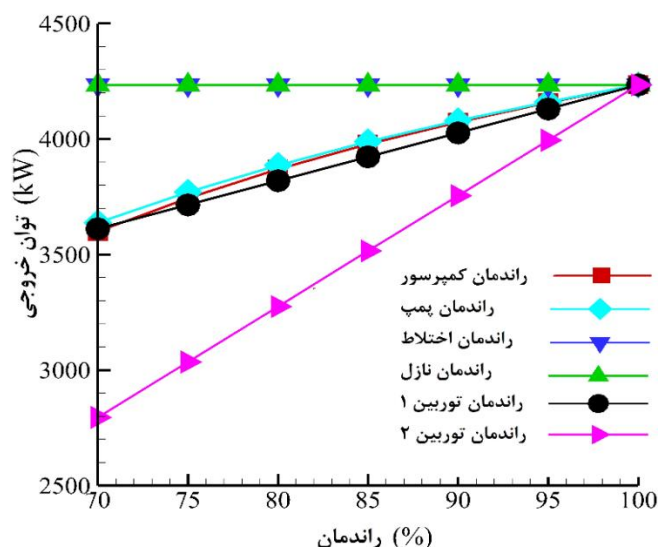
شکل ۴. میزان نرخ انرژی مصرفی تجهیزات سیستم CCHP



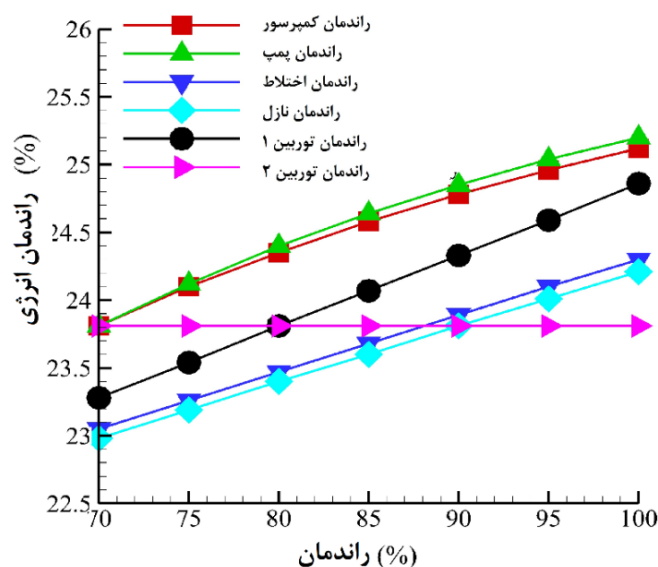
شکل ۵. پارامترهای نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ هزینه انرژی مصرفی تجهیزات

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد توربین ۲، مبدل حرارتی ۱ و توربین ۱ با مقادیر ۲۸، ۱۷ و ۱۵ دلار بر ساعت بیشترین مقادیر را دارند. این مقادیر نشان می‌دهد کارکرد تجهیزاتی مانند توربین در حالت ایده‌آل تأثیر زیادی روی عملکرد بهینه سیستم ترکیبی دارد. کاهش راندمان تجهیزات اصلی مانند توربین‌ها سبب کاهش عملکرد سیستم خواهد شد. در ادامه نحوه اثرگذاری انحراف تجهیزات از حالت ایده‌آل روی عملکرد سیستم بررسی می‌شود.

شکل ۶ اثر راندمان تجهیزات مختلف را روی توان خروجی خالص نیروگاه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیستم حاضر نسبت به راندمان توربین ۲ بسیار حساس بوده، به طوری که در راندمان ۷۰ درصد میزان توان خروجی ۲۸۰۰ کیلووات بوده، اما در راندمان ۱۰۰ درصد این مقدار به ۴۲۳۴ کیلووات می‌رسد که این یک افزایش ۵۱ درصدی توان خالص تولیدی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر راندمان نازل و راندمان اختلاط در سیستم اجکتور اثر ناچیزی روی توان ورودی دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد تغییر راندمان توربین ۱، پمپ و کمپرسور اثر تقریباً مشابهی روی افزایش توان خالص تولیدی داشته و آن یک افزایش ۱۸ درصدی را نشان می‌دهد. شکل ۷ اثر راندمان تجهیزات بر راندمان انرژی و در شکل ۸ روی راندمان انرژی کل سیستم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با انحراف توربین ۲ از حالت ایده‌آل (کاهش راندمان از ۱۰۰ به ۷۰ درصد)، میزان راندمان‌های انرژی و انرژی حدود ۹ درصد کاهش می‌یابد.

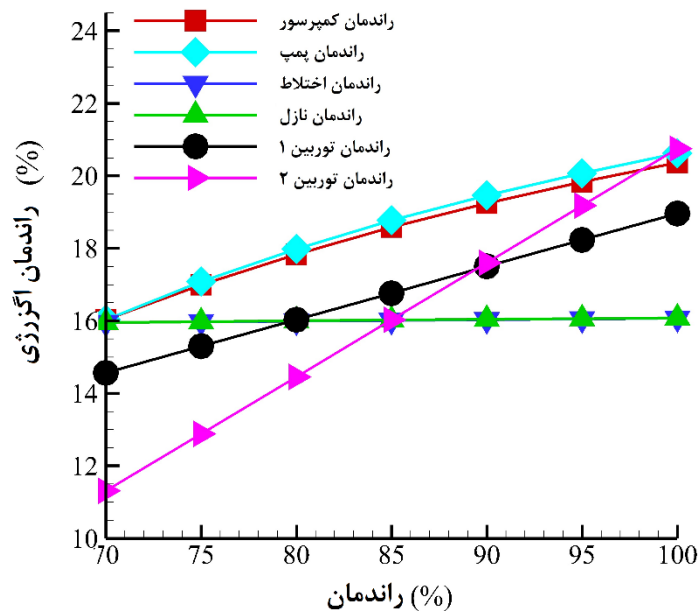


شکل ۶. اثر راندمان تجهیزات مختلف بر میزان توان خروجی خالص

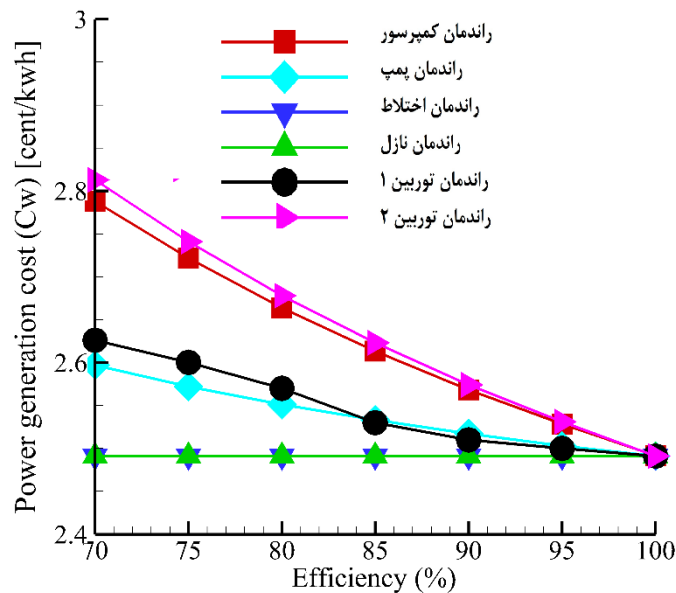


شکل ۷. اثر راندمان تجهیزات مختلف بر راندمان انرژی و انرژی

این کاهش برای تجهیزات توربین ۱، پمپ و کمپرسور که روند مشابهی دارند، حدود ۴ درصد است. راندمان اجزای اجکتور شامل نازل و محفظه اختلاط اثر ناچیزی روی راندمان‌های انرژی و انرژی دارد. مهم‌ترین پارامتر در طراحی سیکل تولید هم‌زمان سیستم زمین‌گرمایی مقدار نرخ هزینه تولید توان است که در آن یک پارامتر معیار برای ارزیابی هم‌زمان انرژی، انرژی و انرژی‌اقتصادی یا اقتصادی است. این پارامتر نشان می‌دهد به ازای هر کیلووات ساعت تولید توان الکتریکی به چه مقدار هزینه بر حسب سنت نیاز است. شکل ۹ اثر راندمان تجهیزات را روی این پارامتر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کاهش راندمان توربین ۲ از ۱۰۰ درصد به ۷۰ درصد سبب افزایش هزینه تولید توان از ۲/۵ cent/kWh به ۲/۸ cent/kWh شده که آن یک افزایش ۱۲ درصدی را نشان می‌دهد. مقادیر افزایش هزینه تولید توان برای توربین ۱ و پمپ ۴ درصد است.



شکل ۸. اثر راندمان تجهیزات مختلف بر راندمان انرژی و انرژی



شکل ۹. اثر راندمان تجهیزات مختلف بر نرخ هزینه تولید توان الکتریکی

نتیجه گیری

مقاله حاضر به بررسی اثر انحراف تجهیزات از حالت ایده آل در یک سیستم تولید هم‌زمان زمین‌گرمایی می‌پردازد. در کار حاضر ارزیابی انرژی، انرژی و اقتصادی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی EES و استفاده از الگوریتم اسپکو انجام شد. آنالیز انرژی نشان داد مبدل حرارتی ۱، کندانسور ۱، مبدل حرارتی ۲ و اجکتور بیشترین سهم را در تخریب انرژی سیستم دارند. این نتیجه تأیید می‌کند که بازگشت‌ناپذیری‌ها در تجهیزات مرتبط با انتقال گرما بیشینه هستند. در ادامه آنالیز انرژی و اکونومیک یا اقتصادی نشان داد توربین ۱ و توربین ۲ بیشترین نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ هزینه تخریب انرژی را دارند که آن نشان داد تجهیزات مرتبط با توان بیشترین سهم را در پارامترهای هزینه دارند. نتایج نشان داد نیروگاه تولید هم‌زمان به توربین ۲ که توربین مربوط به بخش سیکل رانکین آلی است، حساس‌تر بوده به طوری که با انحراف از حالت ایده آل میزان توان خروجی

خالص نیروگاه از ۴۲۳۴ کیلووات به ۲۸۰۰ کیلووات می‌رسد که این یک کاهش ۵۱ درصدی را نشان می‌دهد. این مقادیر کاهش برای توربین ۱، پمپ و کمپرسور ۱۸ درصد است. میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی با انحراف توربین ۲ از حالت ایده‌آل ۹ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش برای تجهیزات توربین ۱، پمپ و کمپرسور ۴ درصد است. بررسی اقتصادی یا انرژی‌اقتصادی نیروگاه نشان داد انحراف از حالت ایده‌آل سبب افزایش هزینه تولید توان از ۲/۵ cent/kWh به ۲/۸ cent/kWh شده که آن یک افزایش ۱۲ درصدی را نشان می‌دهد. مقادیر افزایش هزینه تولید توان برای توربین ۱ و پمپ ۴ درصد است.

منابع

- [1] Zare V, Rostamnejad Takleh H. Novel geothermal driven CCHP systems integrating ejector transcritical CO₂ and Rankine cycles: Thermodynamic modeling and parametric study. *Energy Conversion and Management*. 2020;205:112396.
- [2] Boyaghchi FA, Molaie H. Sensitivity analysis of exergy destruction in a real combined cycle power plant based on advanced exergy method. *Energy Conversion and Management*. 2015;99:374–86.
- [3] Aneke M, Agnew B, Underwood C. Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(10):1825–32.
- [4] Khosravi A, Syri S, Zhao X, Assad MEH. An artificial intelligence approach for thermodynamic modeling of geothermal based-organic Rankine cycle equipped with solar system. *Geothermics*. 2019;80:138–54.
- [5] DiPippo R. Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* [No date]. 2012;1–600.
- [6] Ebrahimi M, Keshavarz A, Jamali A. Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building. *Energy and Buildings*. 2012;45:202–10.
- [7] Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Performance assessment and optimization of a novel integrated multigeneration system for residential buildings. *Energy and Buildings*. 2013;67:568–78.
- [8] Chaiyat N, Kiatsiroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system. *Energy*. 2015 Nov 1;91:363–70.
- [9] Darvish K, Ehyaei MA, Atabi F, Rosen MA. Selection of Optimum Working Fluid for Organic Rankine Cycles by Exergy and Exergy-Economic Analyses. *Sustainability* 2015, Vol 7, Pages 15362-15383 [No date]. 2015;7(11):15362–83.
- [10] Imran M, Usman M, Park BS, Yang Y. Comparative assessment of Organic Rankine Cycle integration for low temperature geothermal heat source applications. *Energy*. 2016;102:473–90.
- [11] Zhao Y, Wang J. Exergoeconomic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power system. *Applied Energy*. 2016;179:159–70.
- [12] Haghighi A, Pakatchian MR, Assad MEH, Duy VN, Alhuyi Nazari M. A review on geothermal Organic Rankine cycles: modeling and optimization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021;144(5):1799–814.
- [13] Wang N, Zhang S, Fei Z, Zhang W, Shao L, Sardari F. Thermodynamic performance analysis a power and cooling generation system based on geothermal flash, organic Rankine cycles, and ejector refrigeration cycle; application of zeotropic mixtures. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;40:100749.
- [14] Mosaffa AH, Farshi LG. Thermodynamic and economic assessments of a novel CCHP cycle utilizing low-temperature heat sources for domestic applications. *Renewable Energy*. 2018;120:134–50.
- [15] Mohammadi A, Mehrpooya M. Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*. 2017;116:685–94.
- [16] Ghaebi H, Parikhani T, Rostamzadeh H. A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis. *Renewable Energy*. 2018;119:513–27.
- [17] Tian MW, Parikhani T, Jermisittiparsert K, Ashraf MA. Exergoeconomic optimization of a new double-flash geothermal-based combined cooling and power (CCP) system at two different cooling temperatures assisted by boosters. *Journal of Cleaner Production*. 2020;261:120921.
- [18] Ahmadi A, El Haj Assad M, Jamali DH, Kumar R, Li ZX, Salameh T, et al. Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*. 2020;274:122950.
- [19] Assad MEH, Aryanfar Y, Radman S, Yousef B, Pakatchian M. Energy and exergy analyses of single flash geothermal power plant at optimum separator temperature. *International Journal of Low-Carbon Technologies* [No date]. 2021;16(3):873–81.

- [20]Gholizadeh T, Vajdi M, Rostamzadeh H. A new trigeneration system for power, cooling, and freshwater production driven by a flash-binary geothermal heat source. *Renewable Energy*. 2020;148:31–43.
- [21]Ding P, Zhang K, Yuan Z, Wang Z, Li D, Chen T, et al. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of geothermal-based electricity and cooling system using zeotropic mixtures as the working fluid. *Journal of Cleaner Production*. 2021;294:126237.
- [22]Cao Y, Mihardjo LW, Dahari M, Ghaebi H, Parikhani T, Mohamed AM. An innovative double-flash binary cogeneration cooling and power (CCP) system: Thermodynamic evaluation and multi-objective optimization. *Energy*. 2021;214:118864.
- [23]Wang J, Zhao P, Niu X, Dai Y. Parametric analysis of a new combined cooling, heating and power system with transcritical CO₂ driven by solar energy. *Applied Energy*. 2012;94:58–64.
- [24]Xu XX, Liu C, Fu X, Gao H, Li Y. Energy and exergy analyses of a modified combined cooling, heating, and power system using supercritical CO₂. *Energy*. 2015;86:414–22.
- [25]Lazzaretto A, Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*. 2006;31(8–9):1257–89.
- [26]Shamoushaki M, Aliehyaei M, Taghizadeh-Hesary F. Energy, Exergy, Exergoeconomic, and Exergoenvironmental Assessment of Flash-Binary Geothermal Combined Cooling, Heating and Power Cycle. *Energies*. 2021;14(15):4464.
- [27]Shokati N, Ranjbar F, Yari M. Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined cycles based on exergoeconomic criteria. *Applied Thermal Engineering*. 2015;86:414–22.
- [28]Mabrouk AA, Nafey AS, Fath HES. Thermo-economic analysis of some existing desalination processes. *Desalination*. 2007;205(1–3):354–73.
- [29]Cheddie DF, Murray R. Thermo-economic modeling of a solid oxide fuel cell/gas turbine power plant with semi-direct coupling and anode recycling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(20):11208–15.
- [30]Zoghi M, Habibi H, Chitsaz A, Javaherdeh K, Ayazpour M. Exergoeconomic analysis of a novel trigeneration system based on organic quadrilateral cycle integrated with cascade absorption-compression system for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. 2019;198:111818.
- [31]Mosaffa AH, Farshi LG, Infante Ferreira CA, Rosen MA. Exergoeconomic and environmental analyses of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems equipped with different types of flash tank intercoolers. *Energy Conversion and Management*. 2016;117:442–53.
- [32]Mohammadkhani F, Shokati N, Mahmoudi SMS, Yari M, Rosen MA. Exergoeconomic assessment and parametric study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor combined with two Organic Rankine Cycles. *Energy*. 2014;65:533–43.
- [33]Jain V, Sachdeva G, Kachhwaha SS, Patel B. Thermo-economic and environmental analyses based multi-objective optimization of vapor compression–absorption cascaded refrigeration system using NSGA-II technique. *Energy Conversion and Management*. 2016;113:230–42.
- [34]Selbaş R, Kizilkan Ö, Şencan A. Thermo-economic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle. *Energy*. 2006;31(12):2108–28.