



# Thermodynamic, Economic and Optimization Analysis of a New Geothermal Energy-Based Multiple Generation System for Hot Water, Cooling, Power and Liquid Hydrogen Production

Ali Eyvazi<sup>\*1</sup>, Mehran Ameri<sup>2</sup>, Mohammad Shafiey Dehaj<sup>3</sup>, Hadi Ghaebi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

4. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardebil, Iran.

## Abstract

In this study, a new geothermal energy-based multiple generation system is investigated. This system consists of a modified organic Rankine cycle, a single-effect absorption chiller, and a hydrogen liquefaction cycle that produces power, heat, cold, and liquid hydrogen. In the proposed system, by using geothermal energy as the primary energy source required for liquid hydrogen production, environmental pollution is minimized. The hydrogen gas produced by the electrolyzer in the proposed system is pre-cooled by an absorption heat transformer, and the power consumption of the hydrogen liquefaction cycle is reduced. In the present study, the effect of changes in important performance parameters on the system performance is evaluated. In addition, the optimal performance of the system is investigated using a two-objective genetic algorithm, and the optimal point of the system is obtained using the TOPSIS decision criterion. A complete thermodynamic analysis is performed in the present study, and the results show that an energy efficiency of 42% and an exergy efficiency of 51% are obtained for the proposed system. The economic evaluation conducted in the present study using updated cost functions shows that the total cost of the multiple generation system is \$16.37/GJ, which demonstrates the high economic justification of the proposed system.

## Keywords

Geothermal Energy  
Hydrogen Cloud Liquefaction Cycle  
Multiple Production System  
Optimization  
Modified Organic Rankine Cycle

Received: 11.22.2024

Revised: 12.31.2024

Accepted: 01.08.2025

\*Corresponding Author

Ali Eyvazi

Email

[alieyvazi1996@gmail.com](mailto:alieyvazi1996@gmail.com)

## 1- Introduction

Energy is a fundamental need for continued economic development, the provision of goods and services, and the comfort of human life. Some experts believe that another energy crisis is about to unfold. This crisis will not only be related to energy supply, but will also involve a complex combination of environmental problems that, in addition to affecting the quality of modern social life today, will jeopardize the economic development of the world. Increasing energy efficiency has brought many benefits to humanity. Investment in energy efficiency and fuel flexibility has led to greater attention to achieving sustainable energy. Fossil

energy sources have had many negative effects on the environment, including increasing global temperatures, greenhouse effects, and temperature inversions, and have caused the destruction of the ozone layer and the spread of many environmental pollutants. These problems can be solved by using clean fuel technology from renewable sources. Hydrogen, as a suitable alternative to fossil fuels, is capable of providing sustainable energy sources in the long term and is highly compatible with environmental standards. Hydrogen is the most abundant element in the world and the tenth most abundant element in the Earth's crust. Hydrogen, as



the lightest known element, has the highest energy per unit weight compared to other fuels. Hydrogen is one of the main elements that make up the Earth and plays an important role in life. Today, hydrogen is used as a feedstock in various industries. The possibility of another energy crisis and concerns about the depletion of fossil fuels, environmental imperatives, increasing energy consumption and population growth, problems caused by migration and uncontrolled urbanization are the driving forces that intensify attention to renewable sources and the hydrogen energy system. There are challenges in using hydrogen in its gaseous state that require its liquefaction for practical applications. Various methods for liquefaction of hydrogen have been proposed and widely studied. The most important advantages of using hydrogen fuel are the non-polluting product of the hydrogen combustion reaction, the higher amount of heat generated by combustion per unit weight, the economy due to the variable amount of mixing with air for combustion, the possibility of removing leaked hydrogen in a closed environment, the non-toxicity and the cheapness compared to other fuels. Liquid hydrogen is an environmentally friendly energy source. Storing liquid hydrogen in tanks is a simple process. It is important to remember that some energy is required to convert hydrogen into a liquid state. Rockets in the space program mainly use liquid hydrogen as a fuel source. It should be noted that hydrogen is primarily found in its gaseous state, but is stored and transported in liquid form for ease of use. Consequently, there is a high need for investment and technological advancement for clean hydrogen production based on renewable geothermal resources, and it has attracted the attention of many researchers.

## 2. Methodology

In this study, a complete thermodynamic and economic modeling of a multiple production system is introduced. EES software, which includes functions related to thermodynamic properties, is used for modeling. The thermodynamic equations are solved in steady state and simultaneously. In the economic analysis section, all prices and cost rates are updated to justify the proposed system well.

Then, a parametric analysis is performed to evaluate the effect of changes in functional parameters on the main system performance. Also, a two-objective genetic algorithm has been performed to achieve optimal performance on the system under study, in such a way that exergy efficiency and cost rate are the objective functions in the optimization algorithm. TOPSIS decision criterion has been used to determine the optimal point of the system. TOPSIS method is one of the multi-criteria decision-making methods that ranks alternatives. TOPSIS is a technique for ordering priority through similarity to the ideal solution and indicates the value of proximity to the ideal solution positively. This study shows the optimal combination of process parameters using the shortest distance from the ideal solution.

## 3. Results

The proposed system utilizes geothermal energy to provide primary energy through an innovative approach and is developed by modifying the organic Rankine cycle, resulting in a new system. This system has been simulated using EES software based on specific design criteria. In the thermodynamic analysis of the geothermal source, water acts as the working fluid. The findings from the thermodynamic evaluation show that the output power of the studied system is 1425 kW. The energy efficiency and exergy efficiency of the system are measured to be 42% and 51%, respectively. The findings indicate that significant exergy loss occurs in the modified Rankine unit and in the electrolyzer unit. It is worth noting that among the system components, the modified Rankine cycle turbine and electrolysis have the highest exergy destruction, while the pumps have the lowest exergy destruction among the system components. Calculations show that the total exergy destruction for the system is 56140 kW. The total system cost rate is \$37.16/GJ, indicating the significant economic efficiency of the proposed system. The levelized cost of electricity (LCOE) and the cost of hydrogen (LCOH) with values of 19.8 cents/kWh and \$24.39/kg are critical factors in the economic evaluation of the system.

#### 4. Conclusion

This study evaluates a novel multi-generation system that utilizes geothermal energy to produce electricity, heat, cold, and liquid hydrogen. The proposed system consists of a geothermal unit, an innovative modified organic Rankine cycle that integrates an internal heat exchanger and a steam heat exchanger generator, a single-effect absorption chiller, a proton exchange membrane electrolysis, and a hydrogen liquefaction cycle. The system under consideration has been subjected to an analysis focused on energy, exergy, and economic factors. The hydrogen gas produced by electrolysis is converted to liquid form during the cloud liquefaction cycle, increasing its storage and transportation efficiency. By pre-cooling the hydrogen gas in the absorption chiller, the energy consumed in the liquefaction cycle is reduced, and immersing it in two heat exchangers with a liquid nitrogen bath reduces the temperature difference in the heat exchanger, thereby reducing exergy loss and improving the efficiency of the proposed system. The electrolysis and modified Rankine cycle turbine show the highest exergy destruction compared to other system components, which can be significantly reduced by increasing the inlet temperature for the proposed system. In addition, a parametric analysis was performed to evaluate the system performance under different conditions. This research aims to optimize the configuration of the system components for maximum efficiency under ideal conditions and also to increase the thermodynamic performance of the system. The analyzed system shows satisfactory performance and by achieving an energy efficiency of 42% and an exergy efficiency of 51%, it represents the optimal configuration of a geothermal energy-based multiple generation system. In this study, an economic evaluation has been performed to develop a system characterized by high economic efficiency. The findings show that achieving the desired economic efficiency for the entire system involves a cost of \$16.37 per GJ. The effect of six decision variables on the system performance was investigated, including the turbine isentropic efficiency, turbine 1 outlet pressure, steam heat

exchanger generator outlet temperature, and turbine 1 outlet temperature. The dual-objective optimization significantly increases the exergy efficiency of the system, using the TOPSIS decision criterion, the optimal operating point is identified, and a system with an optimal cost rate is presented to improve the economic justification of employing the proposed cogeneration system.

#### 5- References

- [1] Mahdavi N, Ghaebi H, Minaei A. Proposal and multi-aspect assessment of a novel solar-based trigeneration system; investigation of zeotropic mixture's utilization. *Appl Therm Eng* 2022;206:118110.
- [2] Azizi S, Shakibi H, Shokri A, Chitsaz A, Yari M. Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Appl Energy* 2023;332.
- [3] Saberi, Mohammad Reza, Kandaharion, Amir Mohammad, Naqashzadeh, Ehsan. Investigating the reliability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, 1402; 2(1): 101-113. (in Persian)
- [4] O. Bamisile, et al., Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 157–175.
- [5] F. Yilmaz, et al., Proposed and assessment of a sustainable multigeneration plant combined with a transcritical CO<sub>2</sub> cycle operated by flash-binary geothermal energy, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (60) (2023) 22818–22833.
- [6] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy* 2023;263.





## تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی

### زمین‌گرمایی برای تولید آب گرم، سرمایش، توان و هیدروژن مایع

علی عیوضی<sup>۱\*</sup>، مهران عامری<sup>۲</sup>، محمد شفيعی دهج<sup>۳</sup>، هادی غائبی<sup>۴</sup>

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

#### چکیده

#### کلمات کلیدی

انرژی زمین‌گرمایی  
چرخه مایع سازی هیدروژن کلود  
سیستم تولید چندانگانه  
بهینه‌سازی  
چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده

در این مطالعه یک سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم شامل یک چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده، یک چیلر جذبی تک اثره و یک چرخه مایع سازی هیدروژن است که توان، حرارت، سرما و هیدروژن مایع را تولید می‌کند. در سیستم پیشنهادی با به‌کارگیری انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع تأمین انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید هیدروژن مایع باعث می‌شود که آلایندگی زیست‌محیطی به کمترین مقدار خود برسد. گاز هیدروژن تولید شده با الکترو لایزر در سیستم پیشنهادی توسط ترنسفورمر گرمای جذبی پیش‌سرمایش شده و توان مصرفی چرخه مایع سازی هیدروژن کاهش. در مطالعه حاضر تأثیر تغییرات پارامترهای عملکردی مهم روی کارکرد سیستم ارزیابی شده است. به علاوه عملکرد بهینه سیستم با استفاده از الگوریتم دو هدفه ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از معیار تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه بهینه سیستم به دست می‌آید. تحلیل ترمودینامیکی کاملی در مطالعه حاضر صورت می‌گیرد و نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازده انرژی ۴۲ درصد و بازده انرژی ۵۱ درصد برای سیستم پیشنهادی به دست می‌آید. ارزیابی اقتصادی صورت‌گرفته در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به‌روز نشان می‌دهد که هزینه کل سیستم تولید چندانگانه ۲۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول به‌دست می‌آید که توجیه اقتصادی بالای سیستم پیشنهادی را بیان می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

\* نویسنده مسئول

علی عیوضی

ایمیل

[alieyvazi1996@gmail.com](mailto:alieyvazi1996@gmail.com)

#### مقدمه

انرژی نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، تدارک و تأمین وسایل رفاه و آسایش زندگی بشری است. بنابر اعتقاد برخی از صاحب‌نظران بحران انرژی دیگری در شرف گسترش است. این بحران نه تنها مربوط به تأمین انرژی بلکه شامل ترکیب پیچیده‌ای از مشکلات زیست‌محیطی خواهد بود که علاوه بر اثرگذاری بر کیفیت زندگی اجتماعی مدرن امروز، توسعه اقتصادی جهان را دچار مخاطره خواهد کرد. افزایش بهره‌وری انرژی مزایای زیادی برای انسان به همراه داشته است. سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی و انعطاف‌پذیری سوخت منجر به توجه بیشتر به دستیابی به انرژی پایدار شده است [۱]. منابع انرژی

فسیلی اثرات منفی زیادی از جمله افزایش دمای زمین، اثرات گلخانه‌ای و وارونگی دما بر محیط‌زیست داشته‌اند و باعث تخریب لایه اوزون و گسترش بسیاری از آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود [۲]. با استفاده از فناوری سوخت‌های پاک از منابع تجدید پذیر می‌توان این مشکلات را حل کرد. هیدروژن به‌عنوان جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی در بلندمدت قادر به تأمین پایدار منابع انرژی بوده و سازگاری بالایی با معیارهای زیست‌محیطی دارد [۳]. هیدروژن فراوان‌ترین عنصر جهان و دهمین عنصر فراوان در پوسته زمین می‌باشد. هیدروژن به‌عنوان سبک‌ترین عنصر شناخته‌شده در مقایسه با سایر سوخت‌ها



بررسی کردند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها شامل ۱۰ توربین بادی است و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقیاس توربین‌های بادی شاهد بهبودهایی در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن هستند. آن‌ها گزارش دادند که میزان مصرف انرژی و مصرف انرژی باد به ترتیب به ۱۱/۱۹ درصد و ۹۹/۱۳ درصد می‌رسد. تیمز و همکاران [۱۰] به ارزیابی سیستم انرژی با استفاده از پانل‌های فتوولتائیک با ترکیب ذخیره انرژی زیرزمینی پرداختند. سیستم پیشنهادی آن‌ها دارای یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۲۱ مگاوات بر ثانیه و جایگزین‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی بوده و ظرفیت تولید انرژی الکتریکی به میزان ۵۱ گیگاوات ساعت در سال، گرمایش با ۲۳/۸ گیگاوات ساعت در سال و سرمایه‌ش با ۱/۱ گیگاوات ساعت در سال را دارد.

کیخاه و همکاران [۱۱] بهینه‌سازی و ارزیابی کارایی یک سیستم تولید چندگانه بر اساس زمین‌گرایی به همراه چرخه‌های رانکین آلی و تبخیر فشار مضاعف با مخلوط‌های ژئوتروپیک را انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که توربین بخار بیشترین تخریب انرژی را با ۹۹۱ کیلووات نشان داد، درحالی‌که شیر انبساط با تخریب انرژی ۱۱۴ کیلووات دنبال می‌شود. علاوه بر این، کندانسورها نقش قابل توجهی در تخریب انرژی داشته‌اند به صورتی که تقریباً ۲۱/۹۸ درصد از کل تخریب انرژی به آن‌ها نسبت داده شده‌است. علی‌رحمی و همکاران [۱۲] سیستمی را معرفی کردند که از منابع زمین‌گرایی برای تولید هیدروژن و الکتریسیته استفاده می‌کند. آن‌ها دریافتند که تبخیرکننده و اجزای الکترولیز غشای تبادل پروتون بیشترین میزان تخریب انرژی را دارا هستند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها ۴۶۹۶ مگاوات در ساعت برق تولید می‌کند که انرژی مورد نیاز سالانه ۱۶۰ خانواده را فراهم می‌کند. بامیسیل و همکاران [۱۳] با تحلیلی از اهداف چندگانه یک سیستم ترکیبی زمین‌گرایی-خورشیدی-بادی را بهینه کردند. آن‌ها مقادیر راندمان انرژی ۴۸/۶۱ درصد و بازده انرژی ۸۸/۳۱ درصد را برای سیستم مورد مطالعه دست یافتند که پس از بهینه‌سازی بازده انرژی و انرژی آن به ترتیب به ۵۱/۷۶ درصد و ۹۵/۰۸ درصد حاصل شد.

کاپیان و همکاران [۱۴] یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی/زمین‌گرایی را از جنبه انرژی و اقتصادی برای فراهم کردن ظرفیت گرمایشی و سرمایه‌سازی سازه‌های مسکونی ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش دادند که یک پنل خورشیدی با مساحت ۳۵ مترمربع، با کسر خورشیدی ۳۱ درصد، می‌تواند با نرخ تورم بالای ۲۴ درصد، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. کائو و همکاران [۱۵] برای برآورد نیازهای برق جامعه یک سیستم خورشیدی-زمین‌گرایی را پیشنهاد

بیشترین میزان انرژی را در واحد وزن دارد. هیدروژن یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده زمین بوده و نقش مهمی در زندگی دارد. امروزه از هیدروژن به‌عنوان خوراک در صنایع گوناگون استفاده می‌شود [۴]. احتمال وقوع یک بحران انرژی دیگر و نگرانی‌های ناشی از پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، ضرورت‌های زیست‌محیطی، افزایش روزافزون مصرف انرژی و رشد جمعیت، مشکلات ناشی از مهاجرت و رشد بی‌رویه شهرنشینی نیروهای محرکه‌ای هستند که توجه به منابع تجدید پذیر و سیستم انرژی هیدروژنی را شدت می‌بخشد [۵]. برای استفاده از هیدروژن در حالت گازی چالش‌هایی وجود دارد که نیاز به مایع‌سازی آن برای کاربردهای عملی دارد. روش‌های مختلفی برای مایع‌سازی هیدروژن پیشنهاد شده و به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین مزایای استفاده از سوخت هیدروژن عدم آلاینده‌گی محصول حاصل از واکنش سوختن هیدروژن، میزان حرارت تولیدشده بالاتر در اثر احتراق در واحد وزن، اقتصادی بودن به دلیل میزان اختلاط آن با هوا جهت احتراق در گستره قابل‌تغییر، امکان خارج کردن هیدروژن نشت یافته در محیط بسته، غیر سمی بودن و ارزان بودن نسبت به سایر سوخت‌ها می‌باشد. هیدروژن مایع یک منبع انرژی سازگار با محیط‌زیست می‌باشد. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع در مخازن یک فرآیند ساده است. لازم به یادآوری است که به مقداری انرژی برای تبدیل هیدروژن به حالت مایع نیاز است. موشک‌ها در برنامه فضایی عمدتاً از هیدروژن مایع به‌عنوان منبع سوخت استفاده می‌کنند. باید در نظر داشت که هیدروژن در درجه اول در حالت گازی خود یافت می‌شود، اما برای سهولت در به‌کارگیری به‌صورت مایع ذخیره و حمل می‌شود. در نتیجه، ضرورت بالایی برای سرمایه‌گذاری و پیشرفت فناوری برای تولید هیدروژن پاک مبتنی بر منابع تجدید پذیر زمین‌گرایی وجود دارد و مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۶و۷].

چن و همکاران [۸] سیستم جدیدی را معرفی کردند که انرژی باد را با ترکیبی از توربین‌های بادی و یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی دی‌اکسید کربن فشرده ادغام می‌کند. انرژی‌های تجدید پذیر ماهیت متناوبی دارند و با جفت شدن آن‌ها با سیستم‌های ذخیره انرژی به کارایی و توجیه اقتصادی مطلوبی می‌توان دست یافت. در طی بهینه‌سازی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی، بازده انرژی و هزینه واحد محصولات به ترتیب ۳۱/۱۲۱ درصد و ۳۱/۴۱ دلار به ازای هر گیگاژول به دست می‌آید. زو و همکاران [۹] یک سیستم انرژی با به‌کارگیری انرژی باد ترکیبی با ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن را

خالص، استخراج می‌شود. به دلیل توانایی استفاده کامل از اختلاف دمای بین منبع و چاه حرارتی، این سیکل در پردازش حرارتی صنعتی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی و استفاده از گرمای آب نیروگاه‌های توانی بسیار کاربرد دارد. آن‌ها گزارش دادند که ظرفیت خالص تولید برق سیستم ارزیابی شده حدود ۲۹۸ کیلووات می‌باشد. علاوه بر این، در این نیروگاه ظرفیت سرمایه‌گذاری و گرمایش به ترتیب ۱۱۶۹ کیلوژول و ۱۷۸۳ کیلوژول است. سیستم‌های چندگانه تولید انرژی در سال‌های اخیر به‌عنوان راه‌حلی قوی برای جلوگیری از اتلاف انرژی معرفی شده‌اند. هدف از این تحقیق کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و درعین حال افزایش عملکرد سیستم می‌باشد. این تحقیق یک سیستم نوآورانه را معرفی می‌کند که واحدهای چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده، یک منبع انرژی زمین‌گرمایی، یک الکترولیز PEM، یک سیستم پیش‌خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن را ترکیب می‌کند. ترکیب جدیدی در چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده با استفاده از مبدل داخلی و ژنراتور مبدل حرارتی بخار معرفی شده‌است و سیال عامل ژئوتروپیک در این چرخه استفاده شده‌است که عملکرد ترمودینامیکی مطلوبی را نشان می‌دهد. ژئوتروپیک مخلوطی از سه نوع مبرد با درصدهای مختلف است که ساختار آن شبیه نیست چرا که بعد از اختلاط در صد تشکیل‌دهنده عناصر آن در حالت مایع با درصد عناصر در حالت گاز متفاوت است. این مبردها در زمان تغییر فاز دادن فشار و دمای ثابتی ندارند.

نوآوری این تحقیق بر این اساس است که با بازیابی حرارت اتلافی در چرخه رانکین آلی توان موردنیاز برای تولید هیدروژن در الکترولیز فراهم شده و به‌منظور کاهش مصرف انرژی در سیکل مایع‌سازی، از سیکل پیش‌خنک‌کننده جذبی استفاده شده‌است و دو پیش‌خنک‌کننده حمام نیتروژن مایع با سیکل مایع‌سازی ادغام‌شده‌اند تا بازدهی سیستم را افزایش دهد. این مطالعه شامل بهینه‌سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین و بهینه‌ترین شرایط عملکرد برای سیستم است. این تحقیق شامل یک تحلیل اقتصادی برای ارزیابی بهای تمام‌شده واحدها و اجزای سیستم برای ارائه سیستمی با توجیه اقتصادی بالا می‌باشد. این مطالعه به دنبال ایجاد یک راه‌حل انرژی پایدار از طریق توسعه و بهینه‌سازی یک سیستم جدید زمین‌گرمایی است.

## ۲- توصیف سیستم

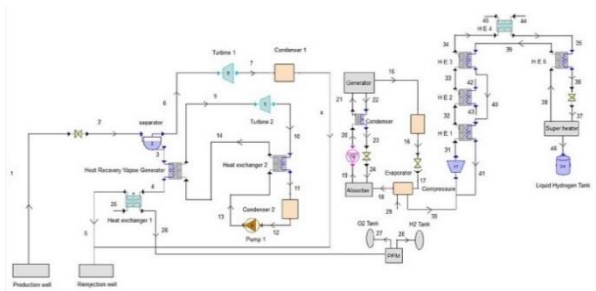
شکل ۱ شماتیک سیستم زمین‌گرمایی بررسی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این سیستم پیشنهادی دارای یک الکترولیز، یک واحد

کردند. سیستم طراحی شده امکان فروش برق اضافی را به شبکه فراهم می‌کند و هزینه‌های جاری سیستم با این امر جبران می‌شود. گولر و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی و خورشیدی با مدل‌های مختلفی از کلکتورهای سهموی و صفحه تخت را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به همراه تابش خورشیدی، ظرفیت گرمایی موردنیاز برای ساختمان‌ها را فراهم کردند. ژانگ و همکاران [۱۷] با ترکیب زغال‌سنگ و انرژی زمین‌گرمایی یک سیستم تولید برق ارائه کردند. تجزیه و تحلیل سیستم پیشنهادی آن‌ها پتانسیل افزایش بازده ترمودینامیکی نیروگاه زمین‌گرمایی توسط مهار بخار دمای متوسط از توربین بخار و پیش گرم کردن چرخه رانکین آلی با استفاده از بخار خروجی را نشان داد.

تکانات و همکاران [۱۸] یک سیستم چند نسلی را معرفی کردند که با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع انرژی اولیه امکان تولید برق و هیدروژن را فراهم می‌کند. این سیستم عملکرد مؤثری را نشان داد و بازده انرژی و اگزرژی را به ترتیب ۵۱/۵۳ و ۵۹/۱۷ درصد به دست آورد. خوش‌منش و همکاران [۱۹] یک سیستم خورشیدی-زمین‌گرمایی را باهدف تولید برق، هیدروژن و آب شیرین پیشنهاد دادند. یافته‌های آن‌ها معیارهای عملکرد قابل‌توجهی از جمله بازده انرژی ۲۳/۸۷ درصد، بازده اگزرژی ۲۸/۲۱ درصد، هزینه سالانه ۰/۱۴۴ دلار در ساعت، و تأثیر زیست‌محیطی ۰/۰۲۴ دلار در هر کیلووات ساعت برای سیستم خورشیدی-ژئوترمال را نشان داد. آساره و همکاران [۲۰] تولید هیدروژن و تولید برق از طریق پیل سوختی را با ادغام یک چرخه رانکین آلی دوگانه با یک چیلر جذبی با انرژی زمین‌گرمایی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کل نرخ تخریب اگزرژی سیستم زمین‌گرمایی پیشنهادی ۱۸۴۰/۷ کیلووات ساعت بود و هزینه کل سیستم بالغ بر ۵۱/۷۳ دلار در ساعت به دست می‌آید.

یلماز و همکاران [۲۱] مدلی برای یک نیروگاه زمین‌گرمایی ادغام‌شده با تولید هیدروژن معرفی کردند. مطالعه آن‌ها یک چرخه تولید چندگانه با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی را تجزیه و تحلیل کرد که شامل یک چرخه کالینا، یک چرخه رانکین آلی، یک ژنراتور ترموالکتریک، یک سیستم تبرید جذبی دو اثره، یک خشک‌کن، یک آبگرم کن خانگی و نمک‌زدایی چند اثره است. چرخه کالینا از محلولی با دو سیال با ماهای جوش متفاوت برای سیال کاری استفاده می‌کند. از آنجایی که این محلول در محدوده بزرگ‌تری از دما می‌جوشد، در مقایسه با چرخه رانکین، گرمای بیشتری از منبع نسبت به سیال کاری

الکترولیز را به هیدروژن مایع تبدیل می‌کند. در این سیستم زمین‌گرمایی پیشرفته، با استفاده از چرخه رانکین آلی الکتریسیته تولید می‌شود و به وسیله الکترولیز غشای تبادل پروتون گاز هیدروژن تولید می‌شود. استفاده از سیال زئوتروپیک به دلیل کارایی بالا، دوام اقتصادی و حداقل تأثیرات زیست‌محیطی در چرخه رانکین اصلاح‌شده، باعث بهبود کارایی سیستم و پایداری زیست‌محیطی می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

### ۳- روش‌شناسی

در این مطالعه یک مدل‌سازی کامل ترمودینامیکی و اقتصادی از سیستم تولید چندگانه معرفی شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار EES که شامل توابع مربوط به خواص ترمودینامیکی بوده استفاده می‌شود. معادلات ترمودینامیکی در حالت ثابت و به‌طور هم‌زمان حل می‌شوند. در قسمت تحلیل اقتصادی تمامی قیمت‌ها و نرخ‌های هزینه را به‌روز اعمال نموده تا توجیه سیستم پیشنهادی به‌خوبی انجام شود. سپس یک تحلیل پارامتری برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای کارکردی در عملکرد اصلی سیستم انجام می‌شود. همچنین، الگوریتم دو هدفه ژنتیک برای دستیابی به عملکرد بهینه روی سیستم مورد بررسی انجام شده است به صورتی که بازده انرژی و نرخ هزینه توابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی هستند.

معیار تصمیم‌گیری تاپسیس برای تعیین نقطه بهینه سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که به رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌پردازد. تاپسیس تکنیکی برای اولویت سفارش از طریق شباهت به راه‌حل ایده‌آل است و ارزش نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت را نشان می‌دهد. این مطالعه ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند را با استفاده از کوتاه‌ترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل نشان می‌دهد.

مفروضات زیر برای مدل‌سازی سیستم ارزیابی شده در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]:

- شرایط حالت پایدار برای تمام اجزای سیستم در نظر گرفته شده است.

زمین‌گرمایی، یک چرخه رانکین جدید، یک چرخه پیش‌خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن است. برای بهبود کارایی چرخه رانکین، با استفاده از مبدل حرارتی داخلی و ژنراتور مبدل حرارتی بخار ترکیب جدیدی ارائه شده است. آب گرم با عبور از شیر انبساط به‌عنوان سیال زمین‌گرمایی وارد جداکننده می‌شود. قسمت بخار به سمت توربین ۱ هدایت می‌شود، در حالی که بخش مایع وارد مبدل حرارتی می‌شود. در این چرخه، یک سیال کاری با نقطه جوش کم، بخار موردنیاز برای توربین ۲ را در اواپراتور تولید می‌کند. مخلوط داغ بخار و آب که از توربین ۱ خارج می‌شود در چگالنده ۱ خنک می‌شود و سپس همراه با آب آزاد شده از مبدل حرارتی به چاه زمین‌گرمایی بازگردانده می‌شود. سیال کاری پس از خنک شدن در چگالنده ۲، وارد توربین ۲ شده سپس توسط پمپ به گردش در می‌آید و با سیال زمین‌گرمایی تبادل حرارتی می‌کند. یک مبدل داخلی در چرخه رانکین آلی گنجانده شده است که با انتقال بخشی از گرمای خروجی از توربین ۲ به سیال خروجی از پمپ، اتلاف حرارت را در کندانسور ۲ به حداقل می‌رساند. گاز هیدروژن تولیدشده از طریق الکترولیز با استفاده از یک چیلر جذبی تک‌اثره از پیش‌خنک می‌شود که منجر به کاهش مصرف انرژی برای مایع‌سازی هیدروژن می‌شود. پس از آن، گاز هیدروژن وارد کمپرسور چرخه کلود می‌شود که در مطالعه حاضر جهت مایع‌سازی هیدروژن این چرخه به‌کاررفته است.

چرخه کلود به‌عنوان پایه همه نیروگاه‌های بزرگ مایع‌سازی هیدروژن در سراسر جهان شناخته می‌شود. در این روش، هیدروژن گازی از طریق چندین مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس گاز پرفشار به دو جریان جداگانه تقسیم می‌شود. در مبدل حرارتی ۱، گاز هیدروژن با استفاده از بخار سردی که از جداکننده باز می‌گردد، از قبل خنک می‌شود، در حالی که هیدروژن باقی‌مانده توسط بخار نیتروژن در مبدل حرارتی ۲ خنک می‌شود. هیدروژن در حمام نیتروژن مایع غوطه‌ور می‌شود. هیدروژن هنگام عبور از مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس جداکننده مایع را از بخار جدا می‌کند و امکان ذخیره هیدروژن مایع در منبع فراهم می‌شود. واحد زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع انرژی اولیه برای سیستم عمل می‌کند و انرژی حرارتی را از زیر سطح زمین استخراج می‌کند. علاوه بر این، ژنراتور مبدل حرارتی با بازیابی انرژی، بازده کلی چرخه رانکین اصلاح‌شده را افزایش می‌دهد. در این فرآیند، الکترولیز غشای تبادل پروتون با الکترولیز آب، گاز هیدروژن و اکسیژن تولید می‌کند. الکتریسیته موردنیاز برای الکترولیز آب از چرخه رانکین آلی تأمین می‌شود. چرخه کلود گاز هیدروژن تولیدشده از طریق

جدول ۱: داده‌های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدل سازی

| مقدار | پارامتر                                   |
|-------|---|
| ۱/۲   | دبی جرمی سیال زمین گرمایی ( $kg/s$ )      |
| ۱۰۰   | فشار چاه تولید زمین گرمایی ( $kPa$ )      |
| ۱۶۲   | دمای چاه تولید زمین گرمایی ( $c$ )        |
| ۶۹    | دمای چاه تزریق مجدد زمین گرمایی ( $c$ )   |
| ۳۰    | فشار چاه تزریق مجدد زمین گرمایی ( $kPa$ ) |
| ۰/۸   | راندمان ایزنتروپیک توربین (%)             |
| ۰/۸۵  | راندمان ایزنتروپیک پمپ (%)                |
| ۰/۸   | نرخ جریان جرمی توربین ۱ ( $kg/s$ )        |
| ۸۰    | دمای ورودی الکترو لایزر ( $c$ )           |
| ۱۰۰   | فشار ورودی الکترو لایزر ( $kPa$ )         |

| معادله نابودی انرژی  | اجزای سیستم              |
|--|--------------------------|
| $\dot{E}_{18} + \dot{E}_{24} - \dot{E}_{19} - Q_{abs, LiBr}$       | جاذب سیکل خنک کننده جذبی |
| $\dot{E}_{21} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{22} + Q_{Gen, LiBr}$       | ژنراتور سیکل جذبی        |
| $\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} - Q_{Cond, LiBr}$                     | کندانسور سیکل جذبی       |
| $\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18} + Q_{Evap, LiBr}$                     | اوپراتور سیکل جذبی       |
| $\dot{E}_{21} + \dot{E}_{23} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{20}$        | مبدل حرارتی بخار جذبی    |
| $\dot{E}_7 - \dot{E}_8 + Q_{Cond, ORC1}$                           | کندانسور سیکل رانکین ۱   |
| $\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12} + W_{Pump, ORC}$                      | پمپ سیکل رانکین          |
| $\dot{E}_6 - \dot{E}_7 - W_{Turb, ORC1}$                           | توربین سیکل رانکین ۱     |
| $\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} + Q_{Cond, ORC2}$                     | کندانسور سیکل رانکین ۲   |
| $\dot{E}_{10} - \dot{E}_9 - W_{Turb, ORC2}$                        | توربین سیکل رانکین ۲     |
| $\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28} - \dot{E}_{26} + W_{Electroliz, PEM}$ | الکترو لایزر             |
| $\dot{E}_5 + \dot{E}_{26} - \dot{E}_4 - \dot{E}_{25}$              | مبدل حرارتی ۱            |
| $\dot{E}_{13} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{11}$        | مبدل حرارتی ۲            |
| $\dot{E}_6 + \dot{E}_{38} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{39}$              | گرم کن الکترو لایزر      |
| $\dot{E}_4 + \dot{E}_9 - \dot{E}_3 - \dot{E}_{14}$                 | ژنراتور مبدل حرارتی بخار |
| $W_{Comp rev} - W_{Comp act}$                                      | کمپرسور چرخه کلود        |
| $\dot{E}_{31} + \dot{E}_{40} - \dot{E}_{41} - \dot{E}_{32}$        | مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود  |
| $\dot{E}_{33} + \dot{E}_{43} - \dot{E}_{42} - \dot{E}_{32}$        | مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود  |
| $\dot{E}_{40} + \dot{E}_{34} - \dot{E}_{33} - \dot{E}_{39}$        | مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود  |
| $\dot{E}_{45} + \dot{E}_{35} - \dot{E}_{34} - \dot{E}_{44}$        | مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود  |
| $\dot{E}_{35} + \dot{E}_{38} - \dot{E}_{36} - \dot{E}_{39}$        | مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود  |

• دمای سکون ۲۰ درجه سلسیوس و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

• اثرات افت فشار و انتقال حرارت در اجزا نادیده گرفته شده است.

• تأثیر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل بر عملکرد سیستم نادیده

گرفته می‌شود.

• بازده ایزنتروپیک ثابت برای پمپ‌ها، توربین‌ها و کمپرسورها در

نظر گرفته شده است.

#### ۴- تحلیل ترمودینامیکی سیستم

در ارزیابی ترمودینامیکی سیستم، اجزا به‌عنوان حجم کنترل

مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس مفروضات ترمودینامیکی که قبلاً

بیان شد، توازن جرم و انرژی برای سیستم پیشنهادی با استفاده از

معادلات ارائه شده در زیر انجام می‌شود [۲۴]: اجزای مختلف سیستم

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

جدول ۱ داده‌های ورودی تحلیل ترمودینامیکی را ارائه می‌دهد.

ضریب عملکرد ترانسفورمر حرارتی جذبی به‌صورت زیر ارائه

می‌شود:

$$COP = \frac{Q_{absorber}}{Q_{generator} + Q_{evaporator}} \quad (3)$$

توان تولید شده توسط چرخه رانکین اصلاح شده با استفاده از

معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (4)$$

مدل سازی الکترو لایزر PEM با استفاده از معادله‌های ارائه شده در

زیر تعیین می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

$$\dot{W}_{PEM} = 0.25 \times \dot{W}_{Total} \quad (5)$$

مقدار هیدروژن تولید شده با استفاده از فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{M}_{H2out} = a_{H2} \times \dot{W}_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2} \quad (6)$$

$$\dot{N}_{H2out} = 3600 \times \dot{M}_{H2out} \quad (7)$$

ضرایب a، b و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ می‌باشد.

بازده انرژی و انرژی و اگزرژی سیستم را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه

کرد:

$$\eta_{energy} = \frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{chiller} + \dot{W}_{clauder} - \dot{W}_{PEM}}{m_1 h_1} \quad (6)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{chiller} + \dot{W}_{clauder} - \dot{W}_{PEM} + \dot{E}_{x35} + \dot{E}_{cooling}}{m_1 e_1} \quad (7)$$

جدول ۲ معادلات تخریب انرژی را در اجزای مختلف سیستم

تولید هم‌زمان ارائه می‌دهد.

## ۵- تحلیل اقتصادی

انرژی و هزینه‌ها در سیستم پیشنهادی، از یک سری روابط که در جدول ۳ آمده است استفاده شده است [۳۱]. ایجاد تعادل بین این روابط برای دستیابی به اهداف تولید انرژی موردنظر و درعین حال کنترل هزینه‌ها ضروری است. به‌کارگیری این روابط عملکرد کلی سیستم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آن‌ها نقش مهمی در حصول اطمینان از اینکه مدیریت هزینه به‌طور مؤثر موردتوجه قرار می‌گیرد، ایفا می‌کنند.

## ۶- بهینه‌سازی سیستم با الگوریتم ژنتیک

این مطالعه بر روی یک رویکرد بهینه‌سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین شرایط برای عملکرد بهینه سیستم تمرکز دارد. هدف از فرآیند بهینه‌سازی در مطالعه حاضر یافتن کارآمدترین و مقرون به صرفه‌ترین پیکربندی برای اجزای سیستم در شرایط ایدئال است. با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک دو هدفه، همه اجزای سیستم برای ایجاد بهینه‌ترین شرایط برای سیستم ارزیابی می‌شود. در این تحقیق، بهینه‌سازی دو هدفه جهت به حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداقل رساندن نرخ هزینه کل هدف‌گذاری شده است تا بهینه‌ترین عملکرد برای سیستم حاصل شود. بعد از فرآیند بهینه‌سازی تعیین نقطه بهینه سیستم با نمودار پارتو نشان داده می‌شود. متغیرهای بهینه‌سازی برای سیستم شامل نسبت فشار کمپرسور و بازده ایزنتروپیک توربین و کمپرسور است.

## ۷- اعتبارسنجی

سیستم پیشنهادی در این تحقیق آرایش جدیدی از سیستم تولید هم‌زمان را معرفی می‌کند. برای اعتبارسنجی این تحقیق، مطالعه صورت گرفته توسط ارورا و همکاران [۳۲] انجام شد و با نتایج مطالعه انجام‌شده با مطالعه مرجع معرفی‌شده در جدول ۴ مقایسه شد. روش تحلیل این تحقیق به این صورت است که فرآیندهای ذکرشده با استفاده از شرایط و مفروضات اولیه مانند دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال و مقایسه نتایج با کار مرجع معرفی‌شده می‌باشد. نتایج مقایسه تفاوت جزئی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده دقت بالای اعتبارسنجی است.

ترموکونومیک رشته‌ای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی را از طریق تحلیل انرژی با اصول اقتصادی ادغام می‌کند و بینش‌های ارزشمندی را برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم به طراحان ارائه می‌دهد. هدف تحلیل ترموکونومیک در سیستم‌های ترمودینامیکی تعیین هزینه واحد خروجی انرژی با ارزیابی تلفات انرژی در هر جزء از سیستم است. در تحلیل اقتصادی، معادله تعادل هزینه حالت پایدار سیستم با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{F,total} + \dot{Z}_{CI,total} + \dot{Z}_{OM,total} \quad (10)$$

توابع مختلفی برای ارزیابی ترمواقصدی سیستم‌های ترمودینامیکی وجود دارد [۲۶]. در این مطالعه، روابط برای هزینه تولید انرژی (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) برای سیستم به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$LCOE = \frac{AOC}{(W_{total} + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (11)$$

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2} \dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (12)$$

در این سناریوها،  $\tau$  نشان‌دهنده ساعات عملیاتی سالانه سیستم است که ۸۰۰۰ ساعت در سال تخمین زده می‌شود. محاسبه هزینه عملیاتی سالانه (AOC) به شرح زیر است:

$$AOC = (TOC \times \phi \times CRF) \quad (13)$$

در این زمینه، کل هزینه‌های عملیاتی (TOC) تمام هزینه‌های عملیاتی را در برمی‌گیرد، درحالی‌که  $\phi$  نشان‌دهنده ضریب تعمیر و نگهداری است که به مقدار ۱/۰۶ است [۲۸]. متغیرهای  $i$  و  $n$  به ترتیب نشان‌دهنده نرخ بهره و مدت‌زمان بهره‌برداری هستند. ضریب بازگشت سرمایه با پارامتر CRF نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۹]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (14)$$

نرخ هزینه از طریق عوامل اقتصادی مانند ضریب بازگشت سرمایه و نرخ بهره تعیین می‌شود که امکان ارزیابی دقیق‌تری از هزینه سیستم را فراهم می‌کند. درنهایت، هزینه کلی سیستم با تقسیم هزینه سالانه بر تعداد کل ساعات کار در یک سال محاسبه می‌شود که معمولاً ۷۴۴۶ ساعت در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

$$Z_{Total} = (TOC \times \phi \times CRF) / t \quad (15)$$

در این زمینه، 'i' نشان‌دهنده نرخ بهره است، درحالی‌که 'n' نشان‌دهنده دوره عملیاتی سیستم است. برای ایجاد تعادل بین کارایی

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار ارورا و همکاران [۳۲]

| نتایج مرجع | نتایج به دست آمده | پارامتر                          |
|------------|-------------------|----------------------------------|
| ۲۹۴۵/۲۶    | ۲۹۴۳              | گرمای جاذب چرخه جذبی (kw)        |
| ۲۵۰۵/۹۱    | ۲۵۰۶              | گرمای کندانسور چرخه جذبی (kw)    |
| ۲۳۵۵/۴     | ۲۳۵۵              | گرمای اواپراتور چرخه جذبی (kw)   |
| ۰/۷۶۰۹     | ۰/۷۹              | ضریب عملکرد چرخه جذبی (/.)       |
| ۷۰/۴۷۸     | ۷۰/۱۶             | نابودی انرژی جاذب چرخه جذبی (kw) |
| ۶/۰۶۶      | ۶/۶۰۶             | نابودی انرژی کندانسور (kw)       |
| ۸۶/۲۷۵     | ۸۶/۲۸             | نابودی انرژی اواپراتور (kw)      |

جدول ۳: توابع هزینه اجزای مختلف سیستم

| تایع هزینه   | اجزای سیستم                          |
|--|--------------------------------------|
| $z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100}\right)^{0.6}$              | ژنراتور سیکل خنک کننده جذبی          |
| $z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$              | کندانسور سیکل خنک کننده جذبی         |
| $z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100}\right)^{0.6}$           | جاذب سیکل خنک کننده جذبی             |
| $z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$             | اواپراتور سیکل خنک کننده جذبی        |
| $z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100}\right)^{0.6}$              | مبدل حرارتی بخار سیکل خنک کننده جذبی |
| $z = 516.62 \times (A_{Cond})^{0.6}$                                   | کندانسور چرخه رانکین آلی             |
| $z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$                                    | توربین چرخه رانکین آلی               |
| $z = 200 \times (W_{Pump})^{0.65}$                                     | پمپ سیکل رانکین آلی                  |
| $z = 130 \times \left(\frac{A_{heat\ exchanger}}{0.093}\right)^{0.78}$ | مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۱        |
| $z = 4122 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.6}$                          | مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۲        |
| $z = 7900 \times (W_{Comp})^{0.62}$                                    | کمپرسور سیکل رانکین ارگانیک          |
| $z = 8500 + 409 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.8}$                    | مبدل حرارتی سیکل کلود                |
| $Z = 1000 \times (W_{elec})$   | چرخه الکترولیز PEM                   |

### ۸- نتایج و بحث

سیستم پیشنهادی از انرژی زمین گرمایی برای تأمین انرژی اولیه از طریق یک رویکرد نوآورانه استفاده می کند و با اصلاح چرخه رانکین آلی توسعه می یابد که منجر به یک سیستم جدید می شود. این سیستم با استفاده از نرم افزار EES بر اساس معیارهای طراحی خاص شبیه سازی شده است. یافته های حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی

| مقدار | پارامتر                        |
|-------|--------------------------------|
| ۴۲    | بازده انرژی سیستم (/.)         |
| ۵۱    | بازده انرژی سیستم (/.)         |
| ۴/۸۸  | نرخ تولید هیدروژن (kg/hr)      |
| ۴۷۵/۱ | توان خروجی چرخه الکترولیز (kw) |
| ۱۳/۷۷ | توان خروجی چرخه مایع سازی (kw) |
| ۱۴۲۵  | توان خروجی کل (kw)             |

سیستم پیشنهادی تحت یک تحلیل اقتصادی قرار گرفت تا کارایی اقتصادی بالای خود را از طریق توابع هزینه به روز نشان دهد. جدول ۷ نتایج نرخ‌های هزینه برای اجزای مختلف سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

| مقدار   | پارامتر                                    |
|---------|--|
| ۳۱۹۹۲   | جاذب چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)             |
| ۱۱۷۸    | پمپ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)          |
| ۴۰۳۲۷۵  | توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)     |
| ۱۱۲۹۱   | کندانسور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)         |
| ۱۷۴۸۴   | ژنراتور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)          |
| ۹۳۲۲    | مبدل حرارتی بخار چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ) |
| ۱۱۸۵۷۵۵ | توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)     |
| ۲۱۲۱۳   | کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)   |
| ۵۰۳۸۶۵۴ | الکتروولایزر (\$/GJ)                       |
| ۸۶۹۸    | کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (\$/GJ)   |
| ۳۶۱۳۴   | اوپراتور چرخه سرمایه‌گذاری (\$/GJ)         |
| ۴۰۱۵۲   | کمپرسور چرخه کلود (\$/GJ)                  |
| ۸۵۴۴    | مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (\$/GJ)            |
| ۸۵۴۹    | مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (\$/GJ)            |
| ۸۵۲۰    | مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (\$/GJ)            |
| ۸۵۱۶    | مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (\$/GJ)            |
| ۸۶۰۹    | مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (\$/GJ)            |

جدول ۸ برخی از نتایج اساسی را برای تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد. نرخ کل هزینه سیستم ۳۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول است که نشان‌دهنده کارایی اقتصادی قابل توجه سیستم پیشنهادی است. هزینه تولید برق (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) با مقادیر ۱۹/۸ سنت در هر کیلووات ساعت و ۲۴/۳۹ دلار به ازای هر کیلوگرم، فاکتورهای حیاتی در ارزیابی اقتصادی سیستم هستند.

جدول ۸: نتایج ارزیابی اقتصادی

| مقدار | پارامتر                     |
|-------|-----------------------------|
| ۱۹/۸  | هزینه تولید برق (cent/kwh)  |
| ۲۴/۳۹ | هزینه تولید هیدروژن (\$/kg) |
| ۱۸    | دوره بازگشت سرمایه          |
| ۳۷/۱۶ | هزینه کل سیستم (\$/GJ)      |

در تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی منبع زمین‌گرمایی، آب به عنوان سیال عامل عمل می‌کند. یافته‌های حاصل از ارزیابی ترمودینامیکی نشان می‌دهد که توان خروجی سیستم مورد مطالعه ۱۴۲۵ کیلووات است. بازده انرژی و بازده انرژی سیستم به ترتیب ۴۲٪ و ۵۱٪ اندازه‌گیری شده است. یافته‌ها حاکی از این است که اتلاف انرژی قابل توجهی در واحد رانکین اصلاح‌شده و در واحد الکتروولایزر رخ می‌دهد. قابل ذکر است که میان اجزای سیستم بیشترین تخریب انرژی را توربین چرخه رانکین اصلاح‌شده و الکتروولایزر و در مقابل، پمپ‌ها کمترین میزان تخریب انرژی را در بین اجزای سیستم دارند. محاسبات نشان می‌دهد تخریب انرژی کل برای سیستم ۵۶۱۴۰ کیلووات حاصل شده است. مقادیر تخریب انرژی برای اجزای مختلف سیستم به تفصیل در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: نتایج نابودی انرژی اجزای مختلف سیستم

| مقدار | پارامتر                               |
|-------|---------------------------------------|
| ۴۷۲۹۵ | الکتروولایزر (kw)                     |
| ۸۶/۲۹ | اوپراتور چرخه جذب (kw)                |
| ۲/۱۹۶ | پمپ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)        |
| ۱۲۵۵  | توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)   |
| ۱۸۴۹  | توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw)   |
| ۶/۶۲  | کندانسور چرخه جذب (kw)                |
| ۲۸۳۱  | کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw) |
| ۲۵۲   | کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح‌شده (kw) |
| ۴۹/۹۶ | ژنراتور چرخه جذب (kw)                 |
| ۶/۹۳۴ | شیر انبساط چرخه جذب (kw)              |
| ۶/۳۳  | مبدل حرارتی بخار چرخه جذب (kw)        |
| ۵/۰۹۴ | مبدل حرارتی ۱ (kw)                    |
| ۶/۳۲۸ | مبدل حرارتی ۲ (kw)                    |
| ۸۴۰/۵ | ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)         |
| ۷/۲۷۷ | کمپرسور چرخه کلود (kw)                |
| ۸۱/۱۶ | مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (kw)          |
| ۱۴/۰۷ | مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (kw)          |
| ۷۹/۶۷ | مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (kw)          |
| ۶/۳۲۸ | مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (kw)          |
| ۱۱۷/۴ | مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (kw)          |
| ۵۶۱۴۰ | کل سیستم (kw)                         |

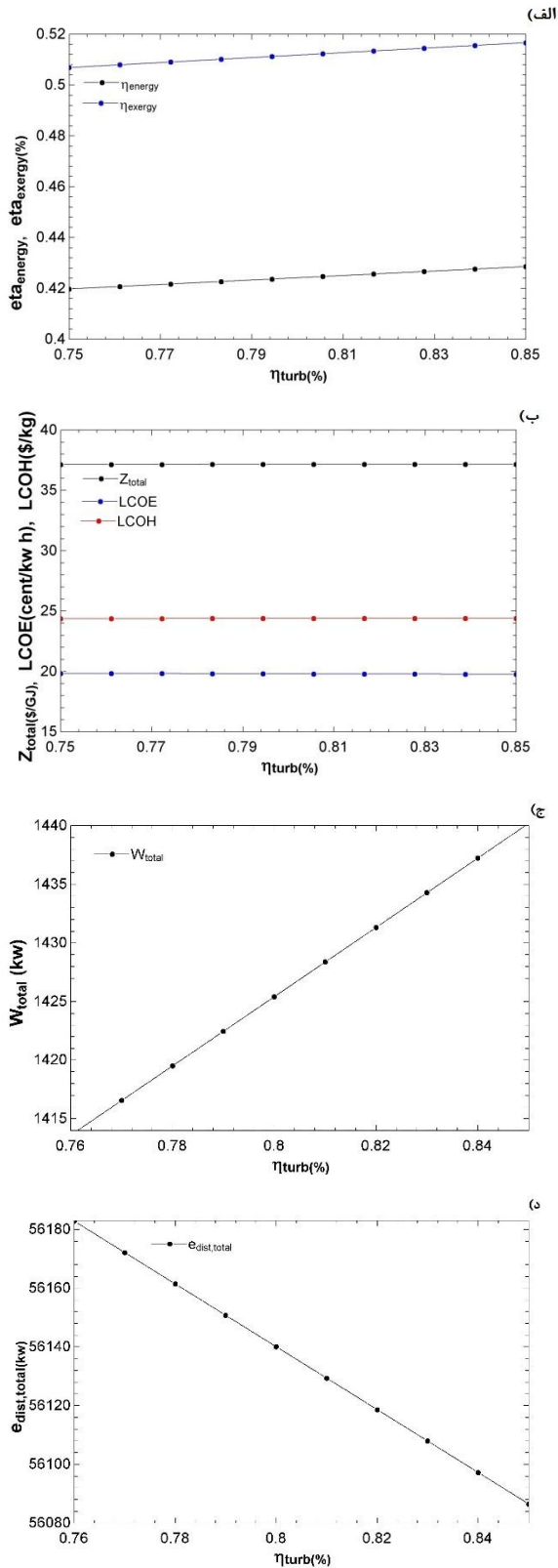
۸-۱- تحلیل پارامتریک

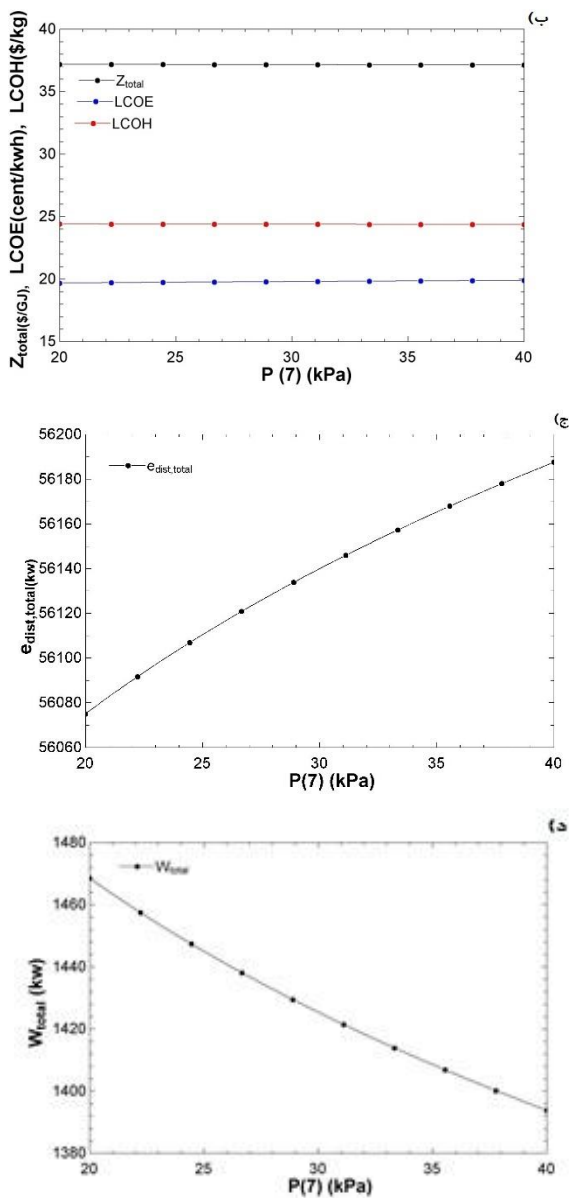
انرژی و انرژی آن را نیز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، منجر به کاهش تخریب انرژی در سیستم می‌شود و در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل پارامتریک یک تکنیک مؤثر برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف است که درک کاملی از سیستم مورد نظر ارائه می‌دهد. سیستم پیشنهادی بررسی می‌کند که چگونه پارامترهای طراحی کلیدی، از جمله بازده ایزنتروپیک توربین، دما و فشار خروجی توربین اول، و دمای ورودی توربین دوم، بر محصولات خروجی سیستم تأثیر می‌گذارند.

۸-۱-۱- اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

شکل ۲ چگونگی تأثیر تغییرات راندمان توربین بر توان تولیدی سیستم، تخریب کل انرژی، نرخ هزینه و همچنین راندمان انرژی و انرژی را تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش بازده توربین از ۰/۷۵ به ۰/۸۵ منجر به افزایش توان خالص کلی سیستم می‌شود. افزایش توان را می‌توان به تأثیر مطلوب بازده توربین بر بازده کار نسبت داد. در این سیستم‌ها، توربین نقش بسزایی در تولید انرژی الکتریکی دارد. از آنجایی که الکترولایزر با استفاده از الکتریسیته تولیدشده توسط توربین کار می‌کند، افزایش تولید توان باعث افزایش عملکرد الکترولایزر می‌شود و در نتیجه تولید هیدروژن در سیستم را افزایش می‌دهد. افزایش راندمان توربین منجر به بهبود راندمان انرژی و انرژی سیستم، در کنار کاهش هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کل سیستم شده است. افزایش انرژی نشان داده شده در این نمودار را می‌توان به همبستگی مستقیم بین بازده انرژی و توان خروجی سیستم نسبت داد. با افزایش کار سیستم، انرژی آن نیز افزایش می‌یابد. افزایش نرخ هزینه را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که هزینه‌های سیستم در کنار قدرت کلی سیستم رشد می‌کنند و تجهیزات بزرگ‌تر و جامع‌تری را ضروری می‌کنند. علاوه بر این، سایر عوامل مؤثر در افزایش نرخ هزینه عبارتند از: افزایش کلی در هزینه‌های تولید، هزینه‌های انرژی و تلفات متحمل شده در طول زمان از کارافتادن سیستم. مهم است که تأکید شود هزینه‌های انجام شده برای هر زیرسیستم ادغام شده در سیستم اصلی، کارایی تولید را کم‌هزینه‌تر کرده است و منجر به افزایش کلی هزینه‌های سیستم می‌شود. انرژی به حداکثر کار قابل استخراج از سیستم اشاره دارد. به عبارت دیگر، کار مفید تولیدشده توسط توربین در این سیستم را نشان می‌دهد. افزایش راندمان توربین به طور مثبت بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تأثیر می‌گذارد و در عین حال راندمان





شکل ۳: تأثیر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و اگزرژی (ب) نرخ هزینه (ج) نابودی اگزرژی (د) توان

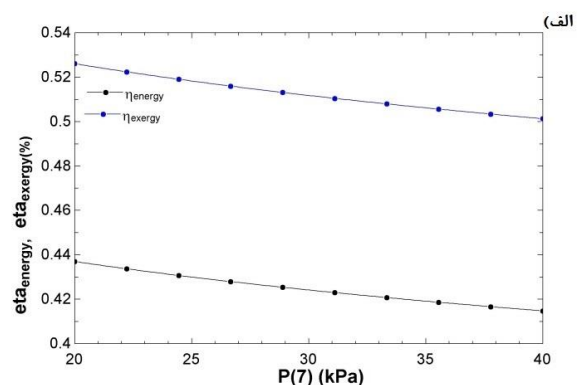
#### ۸-۱-۴ اثر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازیافت حرارتی روی عملکرد سیستم

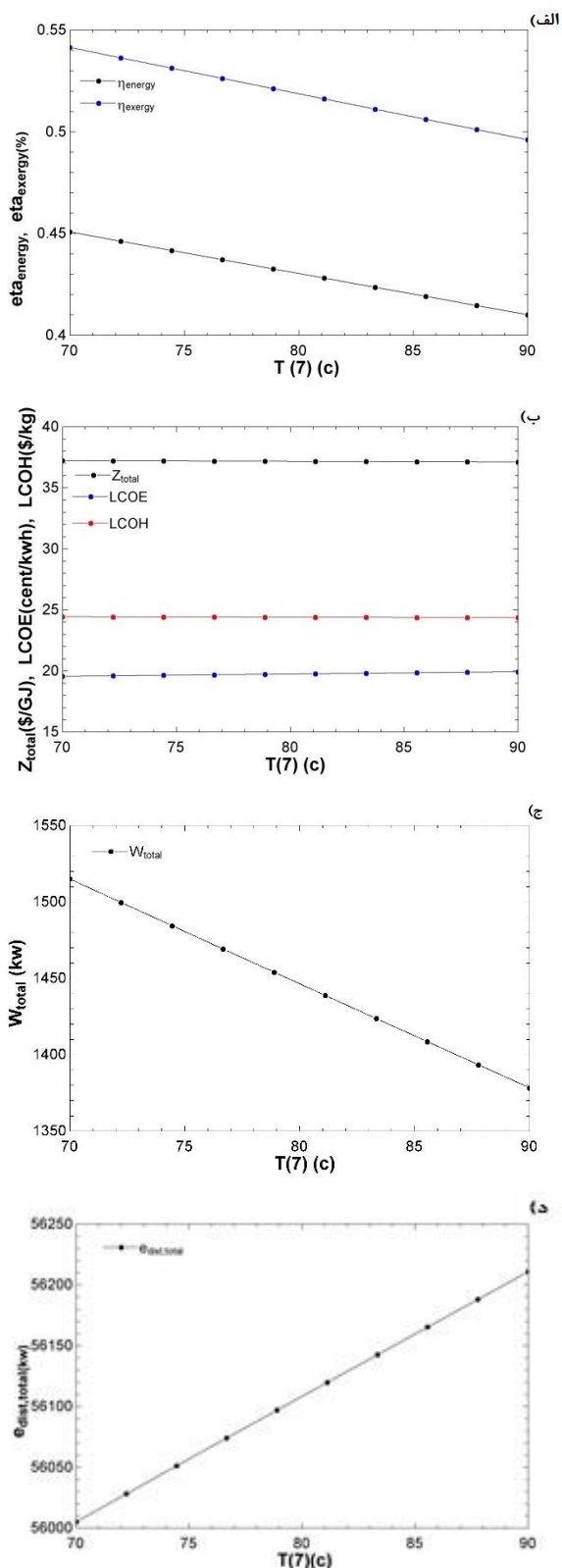
شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه دمای خروجی مولد بخار بازیابی گرما در چرخه اصلاح‌شده رانکین بر تولید توان سیستم، تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و بازده انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. هنگامی که دمای خروجی مبدل حرارتی افزایش می‌یابد، دمای ورودی آن کاهش می‌یابد. کاهش دمای ورودی به مولد بخار بازیابی گرما، انتقال حرارت و انرژی حرارتی ورودی به چرخه رانکین آلی را کاهش می‌دهد، که متعاقباً تخریب اگزرژی را در سیستم کاهش می‌دهد. کاهش انتقال

شکل ۲: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و اگزرژی (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی اگزرژی ۸-۱-۲ اثر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم شکل ۳ تجزیه و تحلیل می‌کند که چگونه تغییرات در فشار خروجی توربین ۱ بر توان تولید سیستم، تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و کارایی انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. با افزایش فشار خروجی توربین ۱، تخریب اگزرژی در سیستم نیز افزایش می‌یابد که منجر به تلفات بیشتر در توان خروجی می‌شود و بر عملکرد سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. از آنجایی که توان خروجی مستقیماً با بازده اگزرژی مرتبط است، افزایش تخریب اگزرژی منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی کلی سیستم می‌شود. کاهش توان خروجی سیستم، نیاز به تجهیزات بزرگ و پرهزینه ترمودینامیکی باراندمان بالا را از بین می‌برد و در نتیجه هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کلی سیستم کاهش می‌یابد.

#### ۸-۱-۳ اثر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم

شکل ۴ چگونگی تأثیر دمای خروجی توربین ۱ را بر توان خروجی سیستم، میزان تخریب اگزرژی، نرخ هزینه و راندمان انرژی و اگزرژی بررسی می‌کند. با افزایش دمای خروجی توربین ۱ از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰ درجه سانتی‌گراد، تلفات سیستم و تخریب اگزرژی افزایش می‌یابد. در نتیجه، ظرفیت انجام کار کاهش می‌یابد و منجر به کاهش توان خروجی می‌شود. راندمان اگزرژی مستقیماً با توان خروجی مرتبط است. بنابراین، کاهش توان تولیدی سیستم بر عملکرد ترمودینامیکی آن تأثیر منفی می‌گذارد و منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی می‌شود. کاهش ظرفیت تولید منجر به کاهش هزینه تولید برق، کاهش هزینه تولید هیدروژن و نرخ کلی سرمایه‌گذاری در تجهیزات بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه قابلیت اقتصادی سیستم را افزایش می‌دهد.





شکل ۴: تأثیر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی انرژی

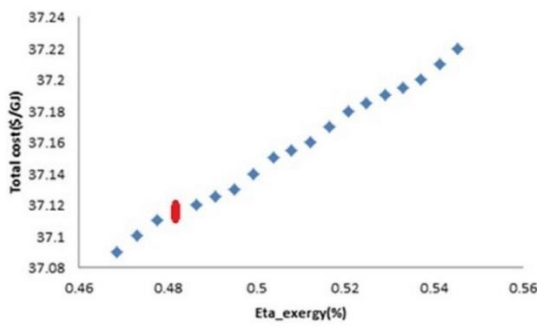
حرارت از مولد بخار بازیابی حرارتی به چرخه رانکین آلی منجر به کاهش توان خروجی توربین سیکل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش دمای ورودی به سیکل باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که ارتباط مستقیمی با توان کل سیستم دارد. از آنجایی که الکترولیز برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، تولید هیدروژن مایع با کاهش قدرت توربین کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هر دو راندمان انرژی و نرخ هزینه مستقیماً با توان تولید مرتبط هستند. بنابراین، هنگامی که توان تولید کاهش می‌یابد، بازده انرژی و هزینه‌های یکسان شده تولید برق، تولید هیدروژن و هزینه‌های کل نیز کاهش می‌یابد.

### ۸-۲- بهینه‌سازی دو هدفه

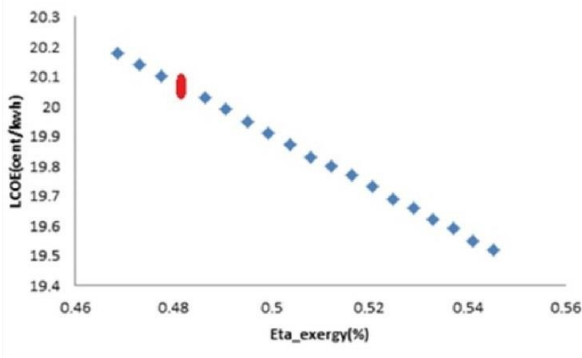
این مطالعه از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه برای تعیین بهترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. هدف یافتن بهینه‌ترین مقادیر برای دو تابع هدف راندمان انرژی و هزینه سیستم است. بهینه‌سازی بر بهبود پارامترهای عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی، به‌ویژه با افزایش کارایی انرژی و کاهش هم‌زمان هزینه‌های سیستم متمرکز است. جدول ۹ نتایج به دست آمده از طریق بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه را بیان می‌کند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با عملکرد بهینه، سیستم می‌تواند به بازده انرژی ۴۴٪، بازده انرژی ۵۳٪ و نرخ هزینه ۳۷/۰۷ دلار بر گیگا ژول برسد.

جدول ۹: مقادیر بهینه

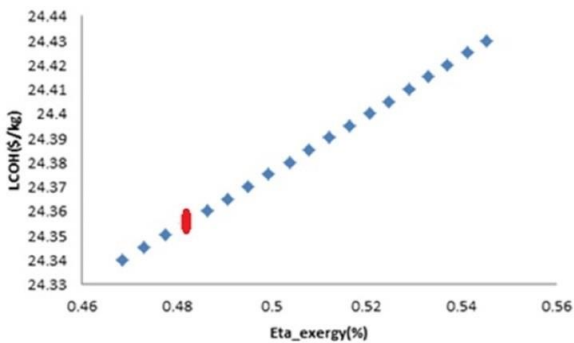
| پارامتر                       | مقدار بهینه |
|-------------------------------|-------------|
| هزینه کل سیستم (\$/GJ)        | ۳۷/۰۷       |
| بازده انرژی سیستم (%)         | ۵۳          |
| بازده انرژی سیستم (%)         | ۴۴          |
| بازده ایزونتروپیک توربین (%)  | ۷۰          |
| بازده ایزونتروپیک کمپرسور (%) | ۸۷          |
| بازده ایزونتروپیک پمپ (%)     | ۸۲          |
| فشار خروجی توربین ۱ (kPa)     | ۴۹/۹۵       |
| دمای ورودی توربین ۲ (C)       | ۱۳۳/۳       |
| هزینه تولید برق (cent/kwh)    | ۱۹۶۲        |
| هزینه (\$/kg)                 | ۲۴/۴۱       |



شکل ۶: نمودار پارتو بازده اگزرژی و هزینه کل

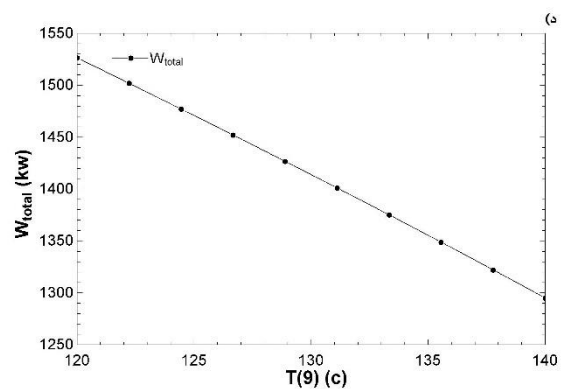
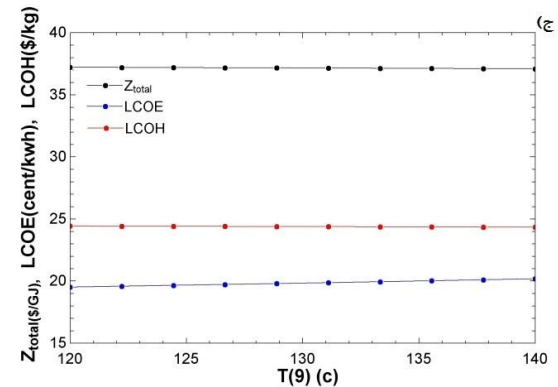
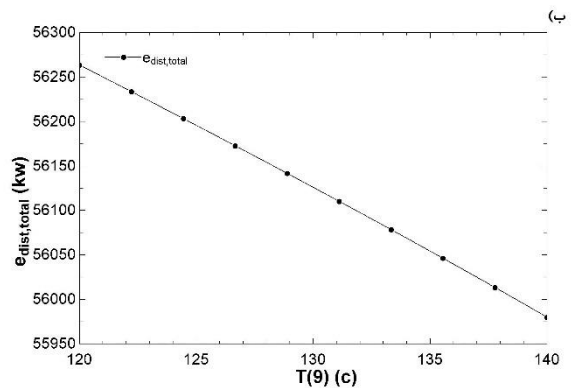
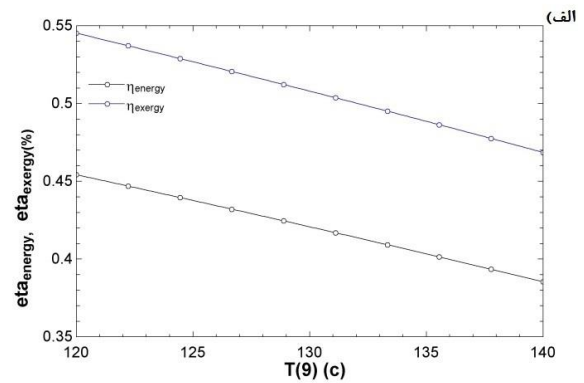


شکل ۷: نمودار پارتو بازده اگزرژی و هزینه تولید الکتریسیته



شکل ۸: نمودار پارتو بازده اگزرژی و هزینه تولید هیدروژن

هدف اصلی این سیستم زمین‌گرمایی تولید انرژی پاک و درعین حال کاهش آلودگی محیطی است. علاوه بر این، سه سناریو برای فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند که از نمودار پارتو در چارچوب بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. روش تصمیم‌گیری تاپسیس برای شناسایی مطلوب‌ترین وضعیت برای دستیابی به شرایط عملیاتی بهینه سیستم به کار گرفته شد. تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری کاربردی است که با تجزیه و تحلیل، مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها برای انتخاب بهترین و مناسب‌ترین گزینه با توجه به معیارهای مسئله، به مشکلات تصمیم‌گیری واقعی می‌پردازد. یافتن یک‌راه‌حل ایدئال و یک‌راه‌حل ضد ایدئال، که سپس برای تعیین فاصله بین گزینه‌ها و



شکل ۵: تأثیر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازافت حرارتی روی عملکرد سیستم الف) بازده انرژی و اگزرژی ب) نابودی اگزرژی ج) هزینه د) توان

راه حل ایدئال استفاده می‌شود، پایه و اساس رویکرد تاپسیس است. سپس این روش گزینه‌ها را با توجه به نزدیکی آن‌ها به راه حل ایدئال رتبه‌بندی می‌کند. نتایج بهینه‌سازی برای سیستم پیشنهادی، با در نظر گرفتن سه سناریو مجزا، در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده‌است، بازده انرژی و نرخ کل هزینه در نظر گرفته شده‌است. نقطه قرمز به‌عنوان راه حل بهینه برای سیستم با استفاده از روش تصمیم‌گیری تاپسیس شناسایی می‌شود. فرآیند بهینه‌سازی نشان داده شده در شکل ۷، بازده انرژی و هزینه تولید برق را نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۸ بر بازده انرژی و هزینه تولید هیدروژن متمرکز است.

### ۹- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک سیستم تولید چندگانه جدید را ارزیابی می‌کند که از انرژی زمین‌گرمایی برای تولید الکتریسته، گرما، سرما و هیدروژن مایع استفاده می‌کند. سیستم پیشنهادی شامل یک واحد زمین‌گرمایی، یک چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده ابتکاری است که یک مبدل حرارتی داخلی و یک ژنراتور مبدل حرارتی بخار، یک چیلر جذبی تک اثره، یک الکترولیز غشای تبادل پروتون و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن را ادغام می‌کند. سیستم موردبررسی تحت تجزیه و تحلیل متمرکز بر انرژی، انرژی و عوامل اقتصادی قرار گرفته است. گاز هیدروژن تولیدشده توسط الکترولیز در طول چرخه مایع‌سازی کلود به شکل مایع تبدیل می‌شود و کارایی ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل آن را افزایش می‌دهد. با پیش سرد کردن گاز هیدروژن در چیلر جذبی انرژی مصرفی در چرخه مایع‌سازی کاهش می‌یابد و غوطه‌ور کردن آن در دو مبدل حرارتی با حمام نیتروژن مایع باعث کاهش اختلاف دما در مبدل حرارتی شده به صورتی که نابودی انرژی کاهش یافته و منجر به بهبود راندمان سیستم پیشنهادی می‌شود. الکترولیز و توربین چرخه رانکین اصلاح‌شده بالاترین تخریب انرژی را در مقایسه با سایر اجزای سیستم نشان می‌دهند به صورتی که می‌توان با افزایش دمای ورودی به آن منجر به کاهش قابل توجه در تخریب انرژی برای سیستم پیشنهادی شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف انجام شد. این تحقیق باهدف بهینه‌سازی پیکربندی اجزای سیستم برای حداکثر بازده در شرایط ایدئال و همچنین افزایش عملکرد ترمودینامیکی سیستم تمرکز دارد. سیستم تجزیه و تحلیل شده عملکرد رضایت بخشی را نشان می‌دهد و با دستیابی به راندمان انرژی ۴۲٪ و راندمان انرژی ۵۱٪ نشان‌دهنده

پیکربندی مطلوب سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی است. در این مطالعه، یک ارزیابی اقتصادی برای توسعه سیستمی انجام شده‌است که با کارایی اقتصادی بالا مشخص می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که دستیابی به کارایی اقتصادی مطلوب برای کل سیستم هزینه‌ای معادل ۳۷/۱۶ دلار به ازای هر گیگا ژول را به همراه دارد. تأثیر شش متغیر تصمیم‌گیری را بر عملکرد سیستم، از جمله بازده انرژی، فشار خروجی توربین، فشار خروجی توربین ۱، دمای خروجی ژنراتور مبدل حرارتی بخار و دمای خروجی توربین ۱ بررسی شد. بهینه‌سازی دو هدفه به‌طور قابل توجهی بازده انرژی سیستم را افزایش می‌دهد، با استفاده از معیار تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه عملکرد بهینه شناسایی شده و سیستمی با نرخ هزینه بهینه جهت بهبود توجیه اقتصادی به کارگیری سیستم تولید هم‌زمان پیشنهادی ارائه می‌کند.

### ۱۰- فهرست علائم

| علائم انگلیسی |                            |
|---------------|----------------------------|
| Ex            | انرژی، kJ/kg               |
| h             | انتالپی مخصوص، kJ/kg       |
| m             | شدت جریان جرمی، kg/s       |
| P             | فشار، kPa                  |
| Q             | آهنگ انتقال گرما، kW       |
| s             | انرژی مخصوص، kJ/kg.K       |
| T             | دما، °C                    |
| W             | آهنگ کار مبادله شده، kW    |
| LCOE          | هزینه تولید برق، cent/kwh  |
| LCOH          | هزینه تولید هیدروژن، \$/kg |
| AOC           | هزینه عملیاتی سالانه       |
| CRF           | ضریب بازگشت سرمایه         |
| TOC           | کل هزینه‌های عملیاتی       |
| علائم یونانی  |                            |
| η             | بازده، %                   |
| e             | زیرنویس                    |
| Ex            | خروجی انرژی                |
| i             | ورودی                      |
| Total         | کل                         |
| Turb          | توربین                     |
| PEM           | الکترولیزر                 |

## ۱۱- منابع

- [9] Zhao, X., et al. (2023). "Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station." *International Journal of Hydrogen Energy* 48(57): 21531-21543.
- [10] Temiz, M. and I. Dincer (2022). "Design and analysis of a floating photovoltaic based energy system with underground energy storage options for remote communities." *Journal of Energy Storage* 55: 105733.
- [11] keykhah, A., et al. (2023). "Optimization and performance analysis of a geothermal-based power generation system based on flash-binary and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures." *Advances in Engineering and Intelligence Systems* 002(03).
- [12] S.M. Alirahmi, et al., Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system: thermodynamic modeling and optimization, *Fuel* 308 (2022) 122049.
- [13] O. Bamisile, et al., Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 157–175.
- [14] S. Kavian, C. Aghanajafi, H.J. Mosleh, A. Nazari, Exergy, economic and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic-geothermal heat pump system, *Appl. Energy* 276 (2020). Volume.
- [15] Y. Cao, et al., Development and transient performance analysis of a decentralized grid-connected smart energy system based on hybrid solar-geothermal resources; Techno-economic evaluation, *Sustain. Cities Soc.* 76 (2022) 103425
- [16] O.F. Guler, et al., Performance evaluation of a geothermal and solar-based multigeneration system and comparison with alternative case studies: energy, exergy, and exergoeconomic aspects, *Renew. Energy* 200 (2022) 1517–1532.
- [17] H. Zhang, et al., Thermodynamic performance analysis of an improved coal-fired power generation system coupled with geothermal energy based on organic Rankine cycle, *Renew. Energy* 201 (2022) 273–290.
- [1] Mahdavi N, Ghaebi H, Minaei A. Proposal and multi-aspect assessment of a novel solar-based trigeneration system; investigation of zeotropic mixture's utilization. *Appl Therm Eng* 2022;206:118110.
- [2] Azizi S, Shakibi H, Shokri A, Chitsaz A, Yari M. Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Appl Energy* 2023;332.
- [3] Saberi, Mohammad Reza, Kandaharion, Amir Mohammad, Naqashzadeh, Ehsan. Investigating the reliability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, 1402; 2(1): 101-113.(in Persian)
- [4] Maliki, Farhad, Akbari, Zahra, Farzaneh, Ali. An overview of modern methods of hydrogen production and storage and its use as a sustainable energy source. *New and Renewable Energy Journal*, 1400; 8(2): 101-109.
- [5] Karayel GK, Javani N, Dincer I. Effective use of geothermal energy for hydrogen production: a comprehensive application. *Energy* 2022;249:123597.
- [6] Arslan O, Arslan AE. Multi-criteria optimization of a new geothermal driven integrated power and hydrogen production system via a new Index: economic sustainability (EcoSI). *Fuel* 2024;358:130160.
- [7] Awad M, Said A, Saad MH, Farouk A, Mahmoud MM, Alshammari MS, et al. A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. *Alex Eng J* 2024;87:213–39.
- [8] Chen, Y., et al. (2023). "Exergy-economic analysis and multi-objective optimization of a multigeneration system based on efficient waste heat recovery of combined wind turbine and compressed CO2 energy storage system." *Sustainable Cities and Society* 96: 104714.

- optimizations,” *Energy*, vol. 145, pp. 38–51, 2018.
- [25] Kianfard, H., Khalilarya, S., Jafarmadar S., 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 339–349.
- [26] G. Tsatsaronis, —Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 249–253, 2007.
- [27] O.L. Gulder, "Flame temperature estimation of conventional and future jet fuels", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1986; 108(2), 376-380.
- [28] H. Sayyadi, "Multi-objective approach in thermoenvionomic optimization of a benchmark cogeneration system", *Applied Energy*, 2009; 86(6), 867-879.
- [29] Lingbao Wang, Xianbiao Bu, Hanzhi Wang, Zhitong Ma, Weibin Ma, Huashan Li, (2018). Thermo-economic evaluation and optimization of LiBr-H<sub>2</sub>O double absorption heat transformer driven by flat plate collector, *Energy Conversion and Management* 162. 66–76.
- [30] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Convers Manag* 2019:112320.
- [31] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran; "Thermal Design and Optimization."; New York: Wiley: 1996.
- [32] H. Kianfard, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.* 177 (2018) 339–349, vol.
- [18] B. Tekkanat, et al., The evaluation of hydrogen production via a geothermal-based multigeneration system with 3E analysis and multi-objective optimization, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (22) (2023) 8002–8021.
- [19] M.H. Khoshgoftar Manesh, et al., Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system for combined power, hydrogen, hot water, and freshwater production, *Sustain. Energy Technol. Assess.* 51 (2022) 101861.
- [20] A. Bedakhanian, E. Assareh, Exploring an innovative approach to hydrogen generation for fuel cell energy production by integrating a dual organic Rankine system with an absorption chiller powered by geothermal energy, *Energy Nexus* (2023) 100267.
- [21] F. Yilmaz, et al., Proposed and assessment of a sustainable multigeneration plant combined with a transcritical CO<sub>2</sub> cycle operated by flash-binary geothermal energy, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (60) (2023) 22818–22833.
- [22] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy* 2023;263.
- [23] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(40):14021e30.
- [24] Boyaghchi F. A., M. Chavoshi, and V. Sabeti, “Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact