



## Energy, Exergy and Economic Analysis of a New Geothermal Resource-Based Multigeneration System For Power, Heat, Cooling and Liquid Hydrogen Production by Cascade Method

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

1. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. Email: [alieyvazi1996@gmail.com](mailto:alieyvazi1996@gmail.com)
2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: [mm\\_ameri@uk.ac.ir](mailto:mm_ameri@uk.ac.ir)
3. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. Email: [m.shafiey@vru.ac.ir](mailto:m.shafiey@vru.ac.ir)
4. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabi, Iran. Email: [hghaebi@uma.ac.ir](mailto:hghaebi@uma.ac.ir)

### 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:**  
Multigeneration system,  
Cascade liquefaction cycle,  
Geothermal energy,  
Economic analysis.

### ABSTRACT

In the present study, a new multi-generation system using geothermal energy as an energy source for the production of electricity, heat, cold and liquid hydrogen has been developed. The proposed system consists of an organic Rankine cycle combined with an internal heat exchanger and feed water heater, a double-effect absorption refrigeration cycle, a proton exchange membrane electrolyzer unit, a dual flash geothermal source and a novel cascade liquefaction cycle. In this study, a new cascade liquefaction method with two variable temperatures has been used, which independently produces liquid nitrogen and simultaneously the produced liquid nitrogen is immersed in a heat exchanger with hydrogen. A complete thermodynamic and economic analysis has been carried out on the studied system. In addition, a parametric study has been carried out to evaluate the effect of changes in key parameters on the efficiency of the system under different operating conditions. The new arrangement developed in the present study has a good coordination with each other and the results show that we witness a desirable thermodynamic performance from the proposed system, such that an energy efficiency of 43% and an exergy efficiency of 56% are achieved. To increase the economic efficiency of the proposed system, the cost functions of the system components are analyzed along with economic variables and the total system cost is calculated to be \$0.37/GJ. The new liquefaction cycle modeled in this study has a performance factor of 36% and the exergy efficiency of this unit is calculated to be 39%.

**Cite this article:** Eyvazi, A.; Ameri, M.; Shafiey Dehaj, M. & Ghaebi, H. (2025). Energy, Exergy and Economic Analysis of a New Geothermal Resource-Based Multigeneration System For Power, Heat, Cooling and Liquid Hydrogen Production by Cascade Method. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (1), 83-105. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386772.1108>



© Ali Eyvazi, Mehran Ameri, Mohammad Shafiey Dehaj, Hadi Ghaebi

**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386772.1108>

## 1. Introduction

This study adopts a dual-cycle geothermal power plant due to the characteristics of the low-temperature geothermal resource and the gravity fluid of the region. Unlike traditional geothermal systems, the dual cycle uses a secondary fluid with a lower boiling point than water as the working fluid. An organic fluid is used in this process in a closed cycle, evaporating at a lower temperature than water, thus extracting heat from the geothermal fluid to generate electricity. Much research has

been conducted on the development of efficiency, economy, environmental protection, and hydrogen production. Many factors such as the complementary role of hydrogen alongside other renewable energy sources, the qualitative superiority of hydrogen over conventional fuels, the conversion of hydrogen into electricity, the establishment of a sustainable energy system alongside renewable energy sources, and technical feasibility play a significant role in the stability of the hydrogen position.

## **2. Methodology**

In this study, a complete and comprehensive thermodynamic and economic modeling of the multiple production system has been carried out. For modeling, EES software, which includes functions related to thermodynamic properties, is used. The thermodynamic equations are solved in steady state and simultaneously. In the economic analysis section, the cost-effectiveness of the proposed system is evaluated by applying up-to-date prices and cost rates. Then, a parametric analysis is performed to evaluate the effect of changes in functional parameters on the main performance of the system. In the present study, a double-effect absorption precooling unit is used to reduce the power consumption of the liquefaction cycle, and a new cascade liquefaction cycle is used, which independently produces liquid nitrogen and simultaneously uses the produced liquid nitrogen for cooling in the cloud cycle.

## **3. Results**

The results of the energy and exergy analysis show that the multiple production system introduced in the present study has high efficiency with an energy efficiency of 43% and an exergy efficiency of 56%. Geothermal energy is used as the primary energy supplier for hydrogen production in this system and is capable of producing 114 kg/h of hydrogen without emission of pollutants. The double-effect absorption cooling unit has a significant effect on reducing the work consumed in the liquefaction cycle, and the output power of the electrolyzer unit is 12186 kW, and the new liquefaction cycle has an output power of 709 kW. The multiple production system is capable of producing an output power of 36558 kW. The results show that for the new method proposed for hydrogen liquefaction in the present study, the performance coefficient is 36% and the exergy efficiency of the liquefaction cycle is 39%, which indicates the optimal performance of the innovative hydrogen liquefaction cycle. The total exergy destruction of the system is 98956 kW .

## **4. Conclusion**

The present study investigates the maximization of energy efficiency and economic viability by using geothermal energy as the primary energy source in a multigeneration system. The potential for substantial improvements in energy efficiency and cost effectiveness is realized through a thorough analysis. The findings of the present study emphasize the feasibility and efficiency of combining renewable energies in multigeneration systems. These results are promising for stakeholders in various sectors, from energy policymakers and planners to engineers and investors, and provide valuable insights for the transition towards cleaner and more efficient energy solutions. This study investigates the conversion of energy into different forms through cogeneration processes for electricity generation using geothermal energy, along with heating and cooling, which uses a novel cascade liquefaction method with two variable temperatures to independently produce liquid nitrogen, and simultaneously, by immersing liquid nitrogen in the heat exchanger of the hydrogen liquefaction cycle, it cools the heat exchanger and improves the exergy efficiency of the hydrogen liquefaction cycle by reducing exergy destruction, leading to the development of a distinctive system.



## تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی سیستم تولید چندگانه نوین مبتنی بر منبع زمین گرمایی برای تولید توان، حرارت، سرمایش و هیدروژن مایع به روش آبشاری

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

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: [alieyvazi1996@gmail.com](mailto:alieyvazi1996@gmail.com)
۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [mm\\_ameri@uk.ac.ir](mailto:mm_ameri@uk.ac.ir)
۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: [m.shafiey@vru.ac.ir](mailto:m.shafiey@vru.ac.ir)
۴. استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [hghaebi@uma.ac.ir](mailto:hghaebi@uma.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

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:

سیستم تولید چندگانه، چرخه مایع‌سازی آبشاری، انرژی زمین گرمایی، تحلیل اقتصادی.

در مطالعه حاضر سیستم جدید تولید چندگانه با استفاده از منبع زمین گرمایی به عنوان منبع تأمین انرژی برای تولید الکتریسیته، حرارت، سرما و هیدروژن مایع توسعه داده شده است. سیستم پیشنهادی متشکل از چرخه رانکین آلی ترکیب شده با مبدل حرارتی داخلی و گرم کن آب تغذیه، چرخه سرمایش جذبی دو اثره، واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون، منبع زمین گرمایی فلش دوگانه و چرخه نوین آبشاری مایع‌سازی است. در این مطالعه روش جدید مایع‌سازی آبشاری با دو دمای متغیر به کار گرفته شده است که به صورت مستقل نیتروژن مایع تولید می‌کند و هم‌زمان نیتروژن مایع تولید شده در مبدل حرارتی با هیدروژن غوطه‌ور می‌شود. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی کاملی روی سیستم مورد مطالعه صورت گرفته است. به علاوه، مطالعه پارامتریک برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای کلیدی روی کارایی سیستم در شرایط کاری مختلف انجام شده است. آرایش جدید توسعه داده شده در مطالعه حاضر هماهنگی مناسبی با هم‌دیگر دارد و نتایج نشان می‌دهد عملکرد ترمودینامیکی مطلوبی را از سیستم پیشنهادی شاهد هستیم به صورتی که بازده انرژی ۴۳ درصد و بازده انرژی ۵۶ درصد حاصل می‌شود. برای رشد کارایی اقتصادی سیستم پیشنهادی توابع هزینه اجزای سیستم به همراه متغیرهای اقتصادی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و هزینه کل سیستم ۰/۳۷ دلار بر گیگاژول محاسبه می‌شود. چرخه نوین مایع‌سازی مدل‌سازی شده در این مطالعه دارای ضریب عملکرد ۳۶ درصد بوده و بازده انرژی این واحد ۳۹ درصد محاسبه می‌شود.

**استناد:** عیوضی، علی؛ عامری، مهران؛ شفیع دهج، محمد و غائبی، هادی (۱۴۰۳). تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی سیستم تولید چندگانه نوین مبتنی بر منبع زمین گرمایی برای تولید توان، حرارت، سرمایش و هیدروژن مایع به روش آبشاری. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۱) ۸۳-۱۰۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386772.1108>

© علی عیوضی، مهران عامری، محمد شفیع دهج، هادی غائبی

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.386772.1108>



## ۱. مقدمه

در حال حاضر، انرژی نقش تعیین‌کننده‌ای در اقتصاد و سیاست جهانی ایفا می‌کند. همان‌طور که انرژی‌های فسیلی در قرن بیستم موجب تحولات عظیم صنعتی شده است، برای قرن‌های آینده نیز انرژی از محورهای اصلی توسعه فناوری خواهد بود. نیاز روزافزون به انرژی از یک طرف و محدودیت منابع انرژی‌های فسیلی از طرف دیگر تأثیر متقابل بر بخش انرژی گذاشته است، به نحوی که نقش و اهمیت انرژی در جهان در بالاترین درجه اهمیت قرار دارد. طبق محاسبه مؤسسات معتبر بین‌المللی، مصرف نفت جهان در سال ۱۹۹۳ میلادی، ۶۷ میلیون بشکه در روز بوده است. بر این مبنای ذخایر کشف‌شده نفت در دنیا برای حدود ۴۲ سال دیگر قابل استفاده خواهد بود. مصرف انرژی‌های فسیلی به علت تولید گاز دی‌اکسید کربن، آثار نامطلوبی بر محیط زیست گذاشته است، به طوری که این امر در حال حاضر به صورت یکی از مشکلات جهان امروزی درآمده است. گرم شدن کره زمین به سبب استفاده زیاد از انرژی‌های فسیلی یکی دیگر از علل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. بهینه‌سازی مصرف انرژی‌های فسیلی و نیز استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر یکی دیگر از راه‌حل‌های پیشنهادی برای اصلاح محیط زیست است. با پایان گرفتن منابع انرژی‌های فسیلی در چند دهه آینده و آثار نامطلوبی که در حال حاضر این انرژی‌ها بر محیط زیست دارند، مجبور خواهیم شد از انرژی‌های نو استفاده کنیم که پایان‌ناپذیر و فاقد آثار نامطلوب زیست‌محیطی هستند. استفاده از انرژی‌های نو مستلزم سرمایه‌گذاری‌های کلان و داشتن فناوری پیشرفته است که کمتر در اختیار کشورهای در حال توسعه قرار دارد. مسائل حل‌نشده استفاده از انرژی‌های نو بسیار است و حل آن‌ها که بهای انرژی تولیدشده را پایین می‌آورد، به‌کندی پیش می‌رود. یکی از علل کندی این پیشرفت‌ها، ارزان بودن بهای انرژی‌های فسیلی است [۱]. اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی، با بالا رفتن قیمت نفت، کشورهای پیشرفته تحقیق درباره استفاده از انرژی‌های نو مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و غیره را به سرعت پیگیری کردند. یکی از ویژگی‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، پراکندگی و گستردگی آن‌ها روی کره زمین است، به خلاف انرژی‌های فسیلی که در بعضی نقاط جهان یافت می‌شوند. استفاده از برخی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، در مقایسه با انرژی‌های فسیلی نیاز به فناوری‌های پیچیده و پرهزینه‌ای ندارند، لذا برای کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار است. در حال حاضر، بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی در حال اقتصادی شدن هستند [۲]. یک منبع زمین‌گرمایی به عنوان یک مخزن طبیعی درون زمین تعریف می‌شود که گرمای خارج‌شده از آن می‌تواند از نظر اقتصادی به‌صرفه باشد و برای تولید نیروی الکتریکی و سایر کاربردهای صنعتی، کشاورزی و خانگی استفاده شود. منابع انرژی زمین‌گرمایی در زمینه‌های گسترده برای تأمین انرژی کافی برای کاربردهای مختلف به کار می‌روند و پتانسیل مناسبی برای تولید نیرو، خنک‌کننده، هیدروژن و فرایندهای نمک‌زدایی دارند و بنابراین، در نیروگاه‌های تولید چندگانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات مختلفی برای اتخاذ نرخ‌های بالاتر انرژی از منابع زمین‌گرمایی در نیروگاه‌های مختلف برای تولید انواع محصولات مورد نظر انجام شده و تلاش برای حداکثر استخراج انرژی از منابع انرژی زمین‌گرمایی برای تولید محصولات مختلف در مرکز توجه است [۳]. استفاده از انرژی زمین‌گرمایی برای سیستم‌های خنک‌کننده جذبی و تولید برق ترکیبی مزایای متعددی از جمله راندمان انرژی بالا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش امنیت انرژی را به همراه دارد. با مهار گرمای مخازن زمین‌گرمایی، این سیستم‌ها می‌توانند راه حل‌های انرژی قابل اعتماد و پایداری را برای بخش‌های مسکونی و صنعتی ارائه دهند. با این حال، طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد چنین سیستم‌های یکپارچه‌ای نیاز به درک جامعی از جنبه‌های ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی دارد [۴]. انرژی زمین‌گرمایی گرمای زمین را مهار می‌کند و از آب‌های زمین‌گرمایی زیرزمینی با دمای بالا در مناطق خاص استفاده می‌کند. سپس، این انرژی به برق یا گرما تبدیل می‌شود. فناوری زمین‌گرمایی به‌خوبی تثبیت شده است و معمولاً برای تولید برق و گرمایش منطقه‌ای استفاده می‌شود [۵]. این مطالعه یک نیروگاه زمین‌گرمایی سیکل دوتایی را به دلیل ویژگی‌های منبع زمین‌گرمایی با دمای پایین و مایع وزنی منطقه به کار می‌گیرد. به خلاف سیستم‌های زمین‌گرمایی سنتی، چرخه دوتایی از یک سیال ثانویه با نقطه جوش کمتر از آب به عنوان سیال عامل استفاده می‌کند. یک سیال آلی در این فرایند در چرخه بسته مورد استفاده قرار می‌گیرد، در دمای پایین‌تر از آب تبخیر می‌شود، بنابراین گرما را از سیال زمین‌گرمایی برای تولید الکتریسیته استخراج می‌کند [۶]. تحقیقات بسیار زیادی روی توسعه بازده، اقتصاد، حفاظت از محیط زیست و تولید هیدروژن انجام شده

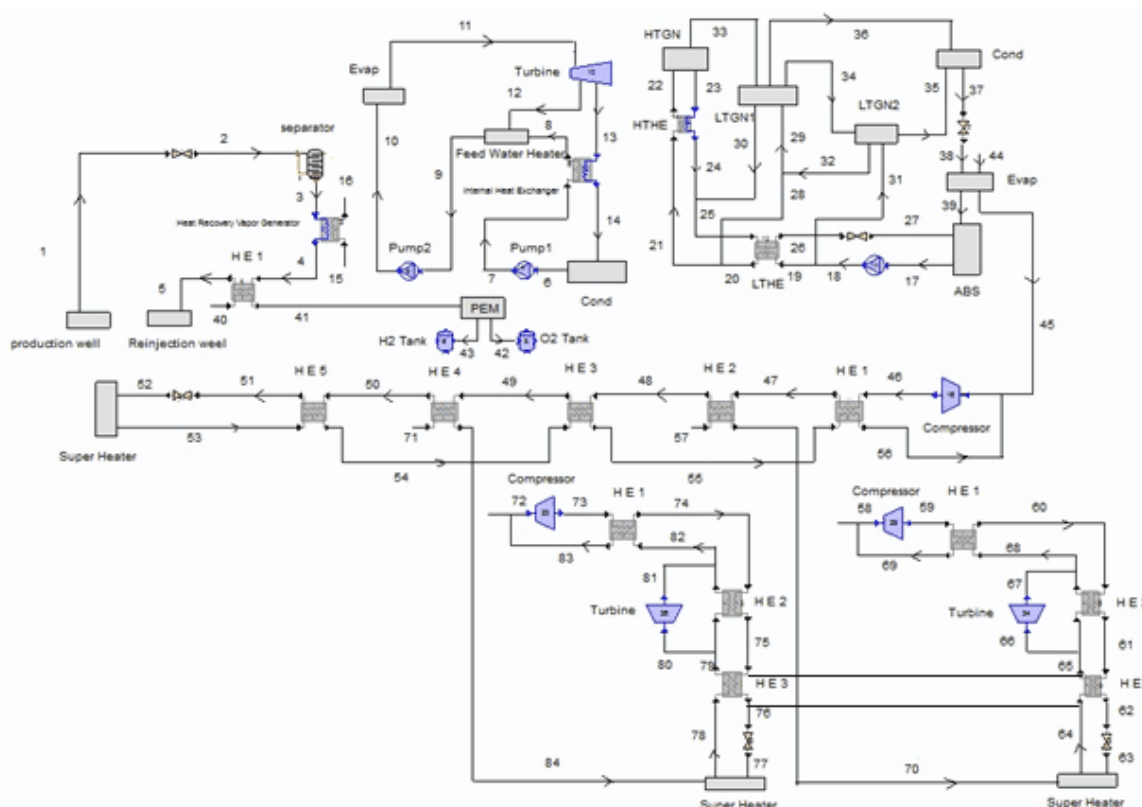
است. در نتیجه فرایندهای گوناگونی که توانایی توسعه این اهداف را داشتند شناسایی شدند. عوامل زیادی همچون نقش تکمیلی هیدروژن در کنار سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، برتری کیفی هیدروژن بر سوخت‌های متعارف، تبدیل هیدروژن به الکتریسته، ایجاد سیستم انرژی پایدار در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر و امکان‌پذیری فنی در ثبات جایگاه هیدروژن نقش بسزایی دارند [۷]. هیدروژن در سطح زمین بی‌نهایت فراوان است، اما همیشه به شکل‌های ترکیبی مانند آب یا به صورت آرایه عظیمی از مولکول‌های هیدروکربنی است که قلمروی زیست‌شناختی را تشکیل می‌دهند. تولید هیدروژن از آب، نیازمند مقدار عظیمی انرژی است. در حالت گاز بسیار انفجاری و مهار کردن آن مشکل است، سرد کردن و متراکم کردن آن به شکل مایع نیازمند مقدار زیاد دیگری انرژی است. هیدروژن را می‌توان به چند روش تولید کرد اما ساده‌ترین روش عبور یک جریان الکتریکی از درون آب است. برای ورود به عصر هیدروژن باید روش‌های کنونی ذخیره‌سازی هیدروژن را توسعه داد. در مولدهای پیل سوختی استفاده از مبدل سوخت اقتصادی نیست و باید از هیدروژن به صورت ذخیره‌شده استفاده کرد. ذخیره‌سازی هیدروژن در مخازن تحت فشار یکی از روش‌های معمول ذخیره‌سازی هیدروژن است، ولی از این روش برای ذخیره‌سازی مقادیر کم هیدروژن استفاده می‌شود. در حال حاضر، ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت مایع در دمای ۲۲ درجه کلوین یکی از روش‌های مهم ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس زیاد است. هیدروژن مایع مصارف ویژه‌ای دارد. در فرایندهای تقطیر پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های تولید آمونیاک اغلب برای نگهداری هیدروژن در مقیاس بالا از مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت مایع استفاده می‌شود [۸]. ناکوش و همکاران [۹] عملکرد سیستم یکپارچه مایع‌سازی هیدروژن را با استفاده از سیستم انرژی هوای مایع مبتنی بر چرخه رانکین آلی و تبرید جذبی بررسی کرده‌اند. آن‌ها گزارش دادند که راندمان انرژی ۳۵/۷ درصد حاصل می‌شود. ریاض و همکاران [۱۰] به بررسی امکان‌سنجی بهبود عملکرد گاز طبیعی مایع با دوباره گازی شدن در سیستم مایع‌سازی هیدروژن با استفاده از تجزیه و تحلیل اکسرژی و انرژی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقدار کل مبرد تقریباً ۵۰ درصد کاهش یافته و بازده اکسرژی فرایند توسعه یافته ۴۲/۲۵ درصد محاسبه می‌شود. نبات و همکاران [۱۱] یک سیستم ذخیره انرژی جدید را با ذخیره انرژی هوای مایع از جنبه انرژی، انرژی و اقتصادی بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد اکسرژی رفت و برگشت و بازده انرژی به ترتیب ۵۲/۸۴ و ۶۱/۱۳ درصد به دست می‌آید. خوش‌گفتار منش و همکاران [۱۲] به تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم جدید ذخیره‌سازی انرژی با ادغام واحد هوای مایع فشرده، سیستم مایع‌سازی لیند هامسون، چرخه رانکین آلی و سلول سوختی کربنات مذاب پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بازده ذخیره‌سازی و بازده رفت و برگشت سیستم هیبریدی به ترتیب ۸۶ درصد و ۶۹ درصد به دست می‌آید. همچنین، بازده انرژی سیستم ۶۰ درصد محاسبه شد. کوک و همکاران [۱۳] یک سیستم انرژی جدید را از منظر ترمودینامیکی برای تولید هیدروژن مایع ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها راندمان تولید توان با استفاده از رویکرد ترمودینامیکی تحت شرایط کاری مختلف را مورد بررسی قرار دادند و تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی نشان داد بازده اکسرژی و انرژی به ترتیب ۵۸/۳۷ درصد و ۶۰/۱۴ درصد به دست می‌آید. بی و همکاران [۱۴] نوعی سیستم مایع‌سازی هیدروژن ابتکاری را تحلیل و بهینه‌سازی کرده‌اند. آن‌ها عملکرد سیستم پیشنهادی با سایر سیستم‌های موجود را مقایسه کردند و تلفات انرژی دستگاه‌های اصلی و منحنی‌های دما را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد با فرض مایع‌سازی کامل ضریب عملکرد و بازده انرژی سیستم مورد مطالعه به ترتیب ۱۸ درصد و ۵۴ درصد محاسبه می‌شود. دینگ و همکاران [۱۵] سیستمی با ترکیب انرژی خورشیدی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی با فناوری‌های مختلف را پیشنهاد کردند که کارایی تولید انرژی را افزایش می‌دهد. سیستم پیشنهادی آن‌ها شامل یک چرخه کالینا، چرخه خنک‌کننده، چرخه رانکین آلی، الکترولیز آب و چرخه‌های ترموالکتریک است. یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، کارایی اکسرتیک و هزینه واحد محصول را بهینه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد این سیستم می‌تواند ۸۰/۱ کیلووات برق و ۱۹۳۰ گرم در ساعت هیدروژن تولید کند که بازدهی ۳۵/۹ درصد و هزینه واحد ۳۶/۹۵ دلار بر گیگا ژول حاصل می‌شود. همچنین، هزینه تولید برق و هیدروژن به ترتیب ۵/۶۷ دلار/کیلوگرم و ۰/۰۹۸ دلار/کیلووات ساعت بهینه شده است. شکویی و همکاران [۱۶] نوعی سیستم هیبریدی جدید را معرفی کردند که نیروی زمین‌گرمایی، خنک‌کننده، آب شیرین و تولید هیدروژن را با تمرکز بر منبع زمین‌گرمایی توسعه می‌دهد. این سیستم تحت تجزیه و تحلیل کامل از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی قرار می‌گیرد و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی اعمال

می‌شوند. سناریوهای مختلف بهینه‌سازی دو و سه هدفه بررسی شده‌اند، که یک سیستم بهینه با توان خالص ۱۲۶۳ کیلووات، راندمان اکسرژی ۳۹/۸۹ درصد و دوره بازپرداخت ۲/۱۳ سال را در حالت پایه ارائه می‌دهد. سان و همکاران [۱۷] طراحی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندگانه با استفاده از نیروگاه زمین‌گرمایی به عنوان منبع پایه با ادغام انرژی خورشیدی را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک، عملکرد انرژی و انرژی و انرژی سیستم را بهینه کردند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد خروجی الکتریکی ۲۶/۱ مگاوات و بازده انرژی و انرژی ۲۴/۹ درصد و ۵۳/۴ درصد به دست می‌آید. ژانگ و همکاران [۱۸] نوعی فرایند جدید مایع‌سازی هیدروژن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مدل پیشنهادی بر اساس ترکیب سیستم پیش‌خنک‌کننده بهبودیافته کلود با سیستم خنک‌کننده ژول - برایتون و مبردهای مخلوط توسعه یافته است. ضریب عملکرد و بازده انرژی واحد توسعه یافته به ترتیب ۰/۱۵۷ و ۵۵/۳۰ درصد به دست آمد. فرامرزی و همکاران [۱۹] یک سیستم جدید مایع‌سازی هیدروژن بر اساس چرخه مبرد مخلوط و انرژی سرد گاز طبیعی مایع را مورد تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی قرار داده و با چرخه‌های قبلی مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد هزینه سالانه مدل توسعه یافته ۱۳/۴۳ درصد کمتر از مدل اولیه بود. ابراهیمی و همکاران [۲۰] خواص ترمودینامیکی یک سیستم جدید مایع‌سازی هیدروژن با استفاده از کلکتورهای خورشیدی و یک واحد ترموالکتروشیمیایی با روش پینچ در مبدل‌های چندجریانی را مطالعه کردند و نشان دادند راندمان حرارتی سیستم پیشنهادی ۷۱/۴ درصد به دست می‌آید. در مطالعه حاضر سیستم تولید چندگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن مایع، الکتریسیته و ظرفیت سرمایشی و گرمایشی مورد تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی قرار می‌گیرد. سیستم پیشنهادی متشکل از چرخه رانکین آلی اصلاح شده با ادغام مبدل حرارتی داخلی و گرم‌کن آب تغذیه، منبع انرژی زمین‌گرمایی فلش دوگانه، چرخه سرمایش جذبی دو اثره، واحد الکترولایزر مبدل غشای پروتونی و چرخه نوین مایع‌سازی آبشاری کلود است. با استفاده از توابع هزینه به روز سیستم پیشنهادی مورد ارزیابی اقتصادی قرار می‌گیرد. همچنین، تحلیل پارامتریک برای بررسی تأثیرات تغییر پارامترهای کلیدی در شرایط کارکردی مختلف روی عملکرد سیستم صورت گرفته است. در مطالعات قبلی از چرخه سرمایش جذبی تک‌اثره برای پیش‌سرمایش واحد مایع‌سازی هیدروژن استفاده شده است و در مطالعه حاضر با به کارگیری چرخه سرمایش جذبی دو اثره شاهد بهبود ضریب عملکرد واحد مایع‌سازی هیدروژن و افزایش بازده انرژی واحد مایع‌سازی نسبت به چرخه تبرید جذبی تک‌اثره هستیم. جنبه نوآوری مطالعه حاضر استفاده از چرخه مایع‌سازی نوین آبشاری کلود با دو دمای متغیر است که به صورت مستقل نیتروژن مایع تولید می‌کند و به علاوه هم‌زمان نیتروژن مایع تولید شده را برای غوطه‌ور شدن با هیدروژن در مبدل حرارتی چرخه مایع‌سازی هیدروژن به منظور کم کردن اختلاف دما و کاهش نابودی انرژی در واحد مایع‌سازی مورد استفاده قرار می‌دهد که تا کنون در مطالعات قبلی به کار گرفته نشده است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد روش نوین مایع‌سازی به کاررفته در سیستم پیشنهادی باعث رشد قابل توجهی در عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه و افزایش کارایی واحد مایع‌سازی هیدروژن می‌شود.

## ۲. توصیف سیستم

شماتیک سیستم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم یک چرخه رانکین آلی اصلاح شده ترکیبی با مبدل حرارتی داخلی و گرم‌کن آب تغذیه، یک واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون، یک واحد تبرید جذبی دو اثره، یک واحد زمین‌گرمایی فلش دوگانه به عنوان منبع تأمین انرژی اولیه و یک چرخه نوین مایع‌سازی آبشاری کلود دارد. آب گرم به دنبال فرایند خفگی شیر انبساط به عنوان یک سیال زمین‌گرمایی به جداکننده جریان می‌یابد. در چرخه رانکین آلی اصلاح شده دمای خروجی توربین از دمای خروجی کندانسور بیشتر است. جریان دما بالا برای پیش‌گرم کردن مایع ورودی به اواپراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدل حرارتی داخلی بین خروجی توربین و ورودی کندانسور قرار می‌گیرد و توان مورد نیاز را کاهش داده و کارایی سیستم بهبود می‌یابد. بخشی از بخار با فشار متوسط از توربین استخراج شده و مستقیم به گرم‌کن آب تغذیه فرستاده می‌شود. با این حال، بخار باقی‌مانده برای تولید کار منبسط می‌شود تا زمانی که فشار به فشار متراکم کاهش یابد. پس از آن، بخار با دمای پایین وارد کندانسور می‌شود و با فرایند خنک‌سازی حالت مایع اشباع به دست می‌آید. مخلوط داغ بخار و آب که از توربین چرخه رانکین خارج می‌شود در کندانسور خنک می‌شود و در پی آن همراه با آب آزاد شده از مبدل حرارتی به چاه زمین‌گرمایی بازگردانده

می‌شود. الکترولیز غشای تبادل پروتون با الکترولیز آب نقش مهمی در تولید گاز هیدروژن و اکسیژن دارد. الکترولیت مورد نیاز برای الکترولیز آب از چرخه رانکین آلی اصلاح شده تأمین می‌شود و تأمین انرژی برای تولید گاز هیدروژن را فراهم می‌کند. واحد تبرید جذبی دو اثره با پیش سرمایش گاز هیدروژن تولید شده در الکترولیز توان مصرفی در واحد مایع‌سازی را کاهش می‌دهد. پس از آن، گاز هیدروژن وارد کمپرسور سیکل کلود 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. جریان‌های مخلوط هیدروژن ابتدا به پیش‌خنک‌کننده جریان می‌یابد که با استفاده از نیتروژن مایع تولید شده در چرخه آبشاری مایع‌سازی غوطه‌ور می‌شود. پس از خروج از پیش‌خنک‌کننده، هیدروژن در حین عبور از یک مبدل حرارتی توسط بخار جداکننده خنک می‌شود. سپس در جداکننده مایع از بخار جدا می‌شود و هیدروژن مایع در منبع ذخیره می‌شود.



شکل ۱. شماتیک سیستم پیشنهادی

### ۳. روش‌شناسی

در این مطالعه مدل‌سازی کامل و جامع ترمودینامیکی و اقتصادی روی سیستم تولید چندگانه صورت گرفته است. در تجزیه و تحلیل ترموآکونومیک، دما و دبی جرمی منبع زمین‌گرمایی متغیرهای اساسی هستند. مطالعات پارامتریک تحقیقات ترموآکونومیک با توجه به دما و دبی جرمی مختلف منبع زمین‌گرمایی انجام می‌شود. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار EES که شامل توابع مربوط به خواص ترمودینامیکی است استفاده می‌شود. معادلات ترمودینامیکی در حالت ثابت و به طور هم‌زمان حل می‌شوند. با استفاده از نرم‌افزار EES، متغیرهایی همچون تولید برق، ظرفیت خنک‌کننده، بار گرمایی، نرخ تولید هیدروژن و برآورد هزینه مدل پیشنهادی که تحلیل‌های ترمودینامیکی و ترموآکونومیک آن انجام شده مورد محاسبه قرار می‌گیرند. این مطالعه به بررسی انرژی، انرژی و عملکرد اقتصادی سیستم‌های تولید چندگانه به کمک انرژی زمین‌گرمایی می‌پردازد. تمرکز بر ارزیابی کارایی کلی سیستم، ارزیابی تخریب و تلفات انرژی و انجام تجزیه و تحلیل ترموآکونومیک برای تعیین به صرفه بودن

سیستم پیشنهادی خواهد بود. در قسمت تحلیل اقتصادی با اعمال قیمت‌ها و نرخ‌های هزینه به‌روز به‌صرفه بودن سیستم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس، یک تحلیل پارامتری برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای کارکردی در شرایط کاری گوناگون روی عملکرد سیستم انجام می‌شود. در مطالعه حاضر از واحد پیش‌سرمایش جذبی دو اثره برای کاهش توان مصرفی چرخه مایع‌سازی استفاده می‌شود و چرخه نوین مایع‌سازی آبشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که به طور مستقل نیتروژن مایع تولید می‌کند و به صورت هم‌زمان نیتروژن مایع تولیدی برای خنک‌سازی در چرخه کلود به کار می‌رود.

مفروضات زیر برای مدل‌سازی سیستم پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند [۲۱]:

- اجزای سیستم در شرایط پایا در نظر گرفته شده است.
- دمای سکون ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال فرض شده است.
- از اثرات افت فشار و انتقال حرارت در اجزا چشم‌پوشی شده است.
- تأثیر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل بر عملکرد سیستم ناچیز فرض می‌شود.
- بازده ایزونتروپیک ثابت برای پمپ‌ها، توربین‌ها و کمپرسورها در نظر گرفته شده است.

#### ۴. تحلیل ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه

در این قسمت یک بررسی جامع از ویژگی‌های ترمودینامیکی و عملکرد سیستم تولید چندگانه پیشنهادی انجام شده است. پارامترهایی مانند بازده انرژی، بازده انرژی، تخریب انرژی و برگشت‌ناپذیری برای ارزیابی عملکرد کلی سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. معیارهای ترمودینامیکی ضروری، از جمله بازده انرژی و انرژی، برای سنجش توانایی سیستم برای تبدیل انرژی ورودی به کار مفید و به حداقل رساندن تلفات انرژی محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل انرژی اطلاعات مفیدی را در مورد کیفیت انرژی و دسترس‌پذیری در سیستم ارائه می‌دهد و شناسایی مناطق مختلف سیستم برای بهبود عملکردی را تسهیل می‌کند [۲۲]. برای تحلیل قانون اول، معادلات تراز جرم و انرژی زیر برای هر جزء در نظر گرفته شده است. در معادلات ۱ و ۲،  $h$  نشان‌دهنده آنتالپی جریان است، و زیرنویس‌های «i» و «e» به مرزهای ورودی و خروجی یک حجم کنترل مربوط می‌شوند. بر اساس مفروضات بیان شده معادله موازنه جرم و انرژی برای سیستم پیشنهادی با استفاده از معادلات ۱ و ۲ انجام می‌شود [۲۳]:

$$\sum m_i = \sum m_e \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

تجزیه و تحلیل انرژی یک سیستم پیشنهادی روشی سازگار برای مشخص کردن قابلیت سیستم و تشخیص مقادیر تخریب انرژی در اجزای مختلف سیستم برای تشخیص منابع اصلی تخریب انرژی است. تعادل انرژی در سیستم به شرح زیر بیان می‌شود (معادله ۳).

$$\dot{E}_{x_Q} - \dot{w} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_i ex_i + \dot{E}_{x_D} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه  $\dot{E}_{x_Q}$  نرخ انرژی مربوط به انتقال حرارت است،  $\dot{E}_{x_D}$  به نرخ تخریب انرژی اشاره دارد و  $ex$  به عنوان انرژی ویژه تعریف می‌شود. انرژی ویژه مجموع مقادیر فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و انرژی پتانسیل است. مقادیر انرژی جنبشی و پتانسیل معمولاً در تجزیه و تحلیل انرژی نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین، انرژی ویژه را می‌توان بر اساس مقادیر انرژی فیزیکی و شیمیایی تعریف کرد. انرژی فیزیکی ویژه به صورت معادله ۴ تعریف می‌شود [۲۴]:

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن مقادیر  $h_0$ ،  $T_0$  و  $s_0$  به ترتیب به عنوان آنتالپی، دما و آنتروپی حالت مرده تعریف می‌شوند. انرژی شیمیایی ویژه با رابطه ۵ قابل محاسبه است [۲۴]:

$$ex^{ch} = \sum y_i ex_i^{ch,0} + RT_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad \text{رابطه (۵)}$$

ضریب عملکرد چرخه سرمایش جذبی به صورت ۶ ارائه می‌شود:



$$COP = \frac{\dot{Q}_{absorber}}{\dot{Q}_{generator} + \dot{Q}_{evaporator}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در سیستم الکترولایزر PEM، آب (در دمای محیط) از یک مبدل حرارتی عبور می کند تا دمای الکترولایزر گرم شود. انرژی الکتریکی ورودی آب گرم را به اکسیژن و هیدروژن تجزیه می کند. سپس، جریان های اکسیژن و هیدروژن تولید شده در مخازن ذخیره سازی مربوطه ذخیره می شوند. بخشی از آب که تجزیه نشده است به جریان آب اولیه برمی گردد. معادلات حاکم بر الکترولایزر PEM در جدول ۱ فهرست شده و به اختصار توضیح داده شده است. ضرایب a، b و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ است.

جدول ۱. روابط مورد استفاده برای مدل سازی الکترولایزر [۲۴ و ۲۵]

| رابطه   | پارامتر                       |
|---|-------------------------------|
| $W_{PEM} = 0.25 \times W_{Total}$   | کار الکترولایزر PEM           |
| $M_{H2out} = a_{H2} \times W_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2}$   | مقدار هیدروژن تولیدی          |
| $N_{H2out} = 3600 \times M_{H2out}$   | نرخ تولید هیدروژن در ساعت     |
| $\Delta G = \Delta H + T \Delta S$  | انرژی نظری برای تولید هیدروژن |
| $E_{elec} = JV$   | انرژی الکتریکی مورد نیاز      |
| $V = V_0 + V_{ohm} + V_{act,a} + V_{act,c}$   | ولتاژ الکترولایزر             |
| $V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{PEM} - 298)$  | ولتاژ نرنست                   |
| $V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_0} \right)$   | مازاد پتانسیل آند و کاتد      |
| $J_0 = J^{ref} \exp\left(-\frac{E_{act,i}}{RT}\right)$  | چگالی جریان مبادله            |
| $V_{ohm} = JR_{PEM}$  | ولتاژ اهمی                    |
| $R_{PEM} = \int_0^L \frac{dx}{\sigma \lambda(x)}$   | مقاومت کلی اهمی               |
| $\sigma \lambda(x) = [0.5139 \lambda(x) - 0.326] \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$ | هدایت یونی محلی               |

بازده انرژی و انرژی و انرژی سیستم را می توان با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه کرد:

$$\eta_{energy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiller} + W_{claud} - W_{PEM}}{m_1 h_1} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\eta_{exergy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiller} + W_{claud} - W_{PEM} + Ex_{55} + E_{cooling}}{m_1 e_1} \quad \text{رابطه ۸}$$

سیستم تولید چندگانه پیشنهادی با استفاده از معادلات تعادل جرم، انرژی و انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده های لازم برای مدل سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. داده های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدل سازی

| مقدار | پارامتر                               |
|-------|---------------------------------------|
| ۳۰    | دبی جرمی سیال زمین گرمایی (kg/s)      |
| ۱۰۰   | فشار چاه تولید زمین گرمایی (kPa)      |
| ۱۶۲   | دمای چاه تولید زمین گرمایی (c)        |
| ۵۰    | دمای چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (c)   |
| ۱۹۰۸  | فشار چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (kPa) |
| ۰/۸   | راندمان ایزنتروپیک توربین (%)         |
| ۰/۸   | راندمان ایزنتروپیک کمپرسور (%)        |
| ۰/۸۵  | راندمان ایزنتروپیک پمپ (%)            |
| ۱۹۵   | دما ورودی توربین رانکین آلی (c)       |
| ۸۰    | دمای ورودی الکترولایزر (c)            |
| ۱۰۰   | فشار ورودی الکترولایزر (kPa)          |

## ۵. تحلیل اقتصادی

این بخش به طور جامع عملکرد اقتصادی سیستم تولید چندگانه طراحی شده را ارزیابی می‌کند. تجزیه و تحلیل ترموکنومیک اصول ترمودینامیکی را با ملاحظات اقتصادی ترکیب می‌کند تا به صرفه بودن و دوام مالی سیستم را ارزیابی کند. هدف تجزیه و تحلیل ترموکنومیک، شناسایی طراحی به صرفه و استراتژی‌های عملیاتی است که تعادل بین سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی را بهینه می‌کند. به طور کلی، تجزیه و تحلیل ترموکنومیک بینش‌های ارزشمندی در مورد کارایی اقتصادی و رقابتی مدل طراحی شده ارائه می‌دهد. این یافته‌ها برای تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان درگیر در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های انرژی پایدار ضروری هستند، زیرا برای اطلاع‌رسانی تصمیمات سرمایه‌گذاری و اولویت‌بندی مؤثر منابع مفید هستند. معادله پایه اقتصادی در معادله ۹ نوشته شده است [۲۶]:

$$C_{P,total} = C_{F,total} + Z_{total}^{CI} + Z_{total}^{OM} \quad \text{رابطه ۹}$$

این معادله بیان می‌کند که نرخ هزینه مربوط به محصول سیستم برابر با مجموع نرخ هزینه سوخت، هزینه سرمایه و هزینه عملیات است. علاوه بر این، دو جمله آخر این معادله را می‌توان در معادله ۱۰ نشان داد:

$$Z = Z_{total}^{CI} + Z_{total}^{OM} = \sum Z_k \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این مرحله هزینه‌های انرژی واحد به هر جریانی مانند جریان انرژی مواد ورودی یا خروجی، جریان کاری یا حرارتی یا خروجی سیستم اختصاص داده می‌شود. این علائم در معادلات ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند:

$$C_i = c_i E_i = c_i (m_i e_i) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$C_e = c_e E_e = c_e (m_e e_e) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن  $C$  هزینه‌های متوسط در هر واحد انرژی هستند. با استفاده از معادلات بالا برای هر جز معادله توازن هزینه به معادله ۱۳ تغییر می‌کند:

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = C_{Q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k \quad \text{رابطه ۱۳}$$

با وارد کردن معادلاتی که هزینه را به هر جریان انرژی اختصاص می‌دهند معادله ۱۴ به دست می‌آید:

$$\sum_e (c_e E_e)_k + c_w W_k = c_{Q,k} E_{Q,k} + \sum_i (c_i E_i)_k + Z_k \quad \text{رابطه ۱۴}$$

معادله ۱۴ مشخص می‌کند که هزینه کل جریان‌های انرژی خروجی از سیستم برای یک جزء معین برابر با کل هزینه‌های متحمل شده برای تعیین این هزینه است، که شامل جریان انرژی ورودی در کنار سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جانبی می‌شود. برای هر جزء  $k$ ، نسبت انرژی ورودی و خروجی با استفاده از روابط انرژی محاسبه می‌شود. با پیش‌بینی این هزینه‌ها، رابطه تعمیم‌یافته برای نسبت هزینه مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری برای جزء  $k$  را می‌توان به صورت ۱۵ بیان کرد [۲۷].

$$C_{CIM} = CRF \times \frac{\varphi_r}{(N \times 3600)} \times PEC_k \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در این معادله، قیمت خرید (\$) جزء  $k$  ضریب بازایی سرمایه (CRF)، ساعات عملیاتی کسب‌وکار در هر واحد سال  $N$  است و این عامل به هزینه عملیاتی و نگهداری بستگی دارد. ضریب بازایی سرمایه CRF یک پارامتر اقتصادی است که به نرخ بهره و طول عمر تجهیزات تخمین زده شده بستگی دارد. که با رابطه ۱۶ به دست می‌آید [۲۸]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در این مطالعه، روابط برای هزینه تولید انرژی (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) برای سیستم به صورت معادلات ۱۷ و ۱۸ بیان می‌شود [۲۹]:

$$LCOE = \frac{AOC}{(W_{total} + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2} \dot{N}_{H_2} \dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

در این سناریوها،  $\tau$  نشان دهنده ساعت‌های عملیاتی سالانه سیستم است که ۸ هزار ساعت در سال تخمین زده می‌شود. محاسبه هزینه عملیاتی سالانه (AOC) به شرح زیر است:

$$AOC = (TOC \times \phi \times CRF) \quad \text{رابطه ۱۹}$$

در این زمینه، کل هزینه‌های عملیاتی (TOC) تمام هزینه‌های عملیاتی را در بر می‌گیرد، در حالی که  $\phi$  نشان دهنده ضریب تعمیر و نگهداری است که به مقدار ۱/۰۶ است [۳۰]. در این روش، تمام هزینه‌های یک سازه طی عمر فنی برآورده شده آن از جمله قیمت سرمایه سالانه (Cacap)، قیمت جایگزینی (Carep) و قیمت تعمیر و نگهداری (Camain) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه عمر مفید پروژه ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود روابط ارزیابی اقتصادی بیان می‌شوند. Cacap شامل هزینه‌های خرید تجهیزات یادشده است که طی عمر مفید هر سازه یکپارچه تراز می‌شود و با رابطه ۲۰ بیان می‌شود [۳۱]:

$$Cacap = Ccap \times \left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{رابطه ۲۰}$$

که در آن Ccap کل قیمت دستگاه خریداری شده است،  $i$  نرخ سود بانکی واقعی و CRF عامل بازبایی سرمایه است. نرخ تورم سالانه  $f$  و نرخ سود اسمی  $j$  برای محاسبه نرخ سود واقعی بانکی به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$i = \frac{j-f}{1+f} \quad \text{رابطه ۲۱}$$

برای انجام تحقیقات اقتصادی سیستم، نرخ تورم سالانه، نرخ بهره اسمی و عمر مفید سیستم به ترتیب ۱۷، ۲۰ و ۲۰ سال در نظر گرفته شد. کل قیمت دستگاه خریداری شده (Ccap) با رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$Ccap = 1.1 \times Z_{total} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

قیمت جایگزینی (Carep) سیستم با رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود:

$$Carep = Crap \times \left( \frac{0.2}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$Crap = Ccap \times (1+i)^n \quad \text{رابطه ۲۴}$$

Camain شامل هزینه‌های نگهداری دوره‌ای و تعویض قطعات حساس است که با رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$Camain = 0.5 \times Z_{all\ part} \quad \text{رابطه ۲۵}$$

هزینه سالانه سیستم (ACS) را با رابطه ۲۶ نشان می‌دهیم:

$$ACS = Cacap + Ccap + Carep + Camain + Crap \quad \text{رابطه ۲۶}$$

با محاسبه NPV، تمام هزینه‌ها و درآمدها طی عمر مفید سازه‌های یکپارچه به زمان جاری یا زمان شروع پروژه تبدیل می‌شود. ارزش فعلی خالص را می‌توان به شرح زیر به دست آورد (معادلات ۲۷):

$$NPV = \frac{ACS}{\left( \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)} \quad \text{رابطه ۲۷}$$

تجزیه و تحلیل اقتصادی به طراحان کمک می‌کند تا محیط اقتصادی فعلی و تأثیر آن بر پتانسیل موفقیت سیستم طراحی شده خود را درک کنند. جدول ۳ روشی را برای محاسبه هزینه خرید هر جزء سیستم ارائه می‌دهد که در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به طول عمر عملیاتی مورد انتظار هر جزء، نرخ هزینه اندازه‌گیری شده در دلار بر گیگاژول به عنوان یک معیار با ارزش برای تجزیه و تحلیل عمل می‌کند.

جدول ۳. توابع هزینه اجزای مختلف سیستم [۳۲]

| تابع هزینه   | اجزای سیستم                          |
|--|--------------------------------------|
| $z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100}\right)^{0.6}$    | ژنراتور سیکل خنک‌کننده جذبی          |
| $z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$    | کندانسور سیکل خنک‌کننده جذبی         |
| $z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100}\right)^{0.6}$ | جاذب سیکل خنک‌کننده جذبی             |
| $z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$   | اوپراتور سیکل خنک‌کننده جذبی         |
| $z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100}\right)^{0.6}$    | مبدل حرارتی بخار سیکل خنک‌کننده 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                  |
| $z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$    | کندانسور چرخه رانکین آلی             |
| $z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$   | اوپراتور چرخه رانکین آلی             |
| $z = 7900 \times (W_{Comp})^{0.62}$                          | کمپرسور سیکل مایع‌سازی               |
| $z = 8500 + 409 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.8}$          | مبدل حرارتی سیکل مایع‌سازی           |
| $Z = 1000 \times (W_{elec})$                                 | چرخه الکترولیز PEM                   |

## ۶. اعتبارسنجی

این تحقیق یک رویکرد جدید برای سازماندهی یک سیستم تولید هم‌زمان ارائه می‌کند. برای اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی، ارزیابی با استفاده از یافته‌های ژنگ و همکاران [۳۳] به عنوان معیار انجام شد و نتایج بیشتر با آنچه در جدول ۴ شرح داده شده مقایسه شد. هم این مطالعه و هم تحقیق یادشده با مدل‌سازی فرایندهای توصیف‌شده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. مدل‌ها بر اساس شرایط و فرضیات اولیه از جمله دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال خواهند بود. سپس نتایج با هم مقایسه خواهند شد. برای پمپ و توربین، راندمان ایزنتروپیک به ترتیب ۸۵ و ۸۰ درصد است. فشار اوپراتور و دمای کندانسور به ترتیب ۲۵۰ کیلو پاسکال و ۲۹۸ کلون ثابت شده است. گرما توسط سیستم رانکین اصلاح‌شده با مقدار ۲۵۲ کیلووات از منبع گرما به دست می‌آید. فشار میانی فرضی با بازسازی برای چرخه رانکین اصلاح‌شده یک هزار کیلو پاسکال است. علاوه بر این، هر دو پمپ با راندمان یکسانی کار می‌کنند و تحت تأثیر شرایط جریان متفاوت قرار نمی‌گیرند. فرض بر این است که هیچ تلفات حرارتی و فشاری در تجهیزات وجود ندارد.

جدول ۴. اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی با کار ژنگ و همکاران [۳۳]

| پارامتر  | نتایج به دست آمده | نتایج مرجع |
|--|-------------------|------------|
| کار پمپ چرخه رانکین آلی (kw)                     | ۳/۰۵              | ۳/۲۱       |
| کار توربین چرخه رانکین آلی (kw)                  | ۵۹/۳۶             | ۵۹/۷۴      |
| کار خروجی چرخه رانکین آلی (kw)                   | ۶۲/۴۱             | ۶۲/۹۵      |
| دمای خروجی پمپ چرخه رانکین آلی (c)               | ۲۵/۳۱             | ۲۵/۴       |
| دمای ورودی اوپراتور چرخه رانکین آلی (c)          | ۱۳۹/۸             | ۱۴۰/۲      |
| دمای خروجی توربین چرخه رانکین آلی (c)            | ۱۵۵/۱             | ۱۵۷/۳      |
| دمای ورودی مبدل حرارتی داخلی چرخه رانکین آلی (c) | ۸۸/۶۲             | ۹۲         |

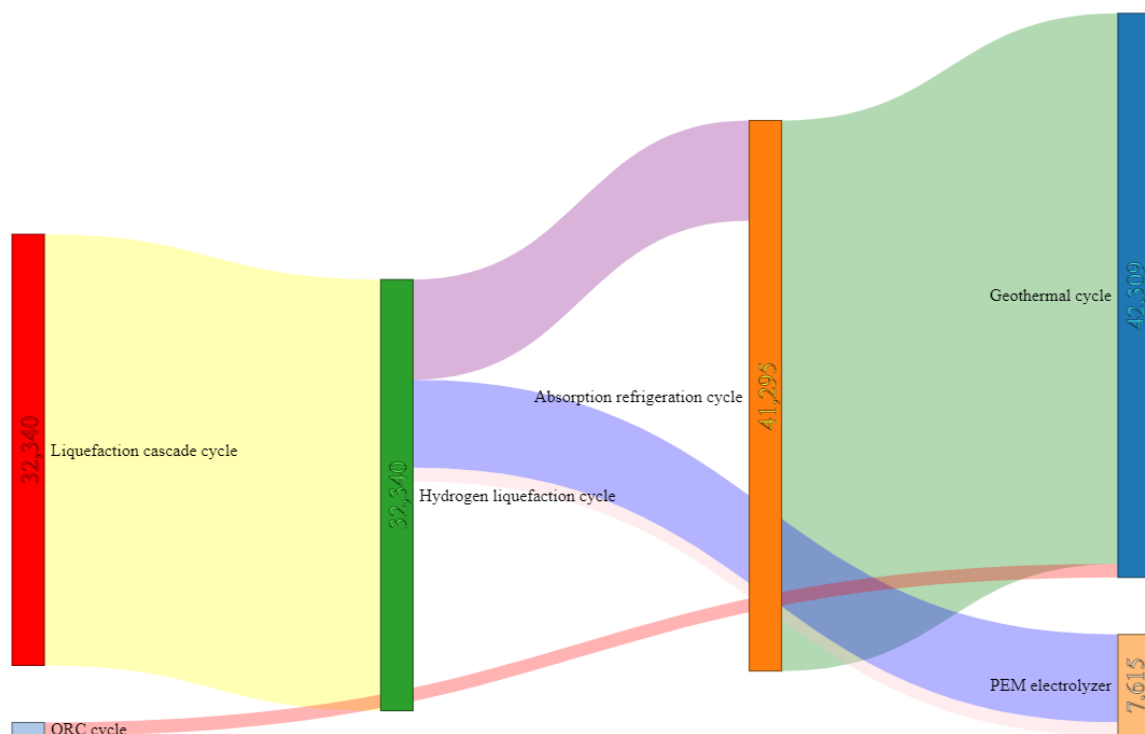
## ۷. نتایج و بحث

یک بررسی جامع از ویژگی‌های ترمودینامیکی و عملکرد سیستم تولید چندانگانه پیشنهادی انجام شده است. تجزیه و تحلیل دقیق شامل ارزیابی پارامترهایی مانند بازده انرژی، تخریب انرژی و برگشت‌ناپذیری برای ارزیابی عملکرد کلی سیستم است. این تجزیه و تحلیل شامل ارزیابی جریان‌های انرژی و انرژی در اجزای سیستم مانند چاه انرژی زمین گرمایی، چیلرهای جذبی، ژنراتورهای برق و مبدل‌های حرارتی است. معیارهای ترمودینامیکی ضروری، از جمله بازده انرژی و انرژی، برای اندازه‌گیری ظرفیت سیستم برای تبدیل انرژی ورودی به کار مفید و به حداقل رساندن تلفات انرژی محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل انرژی بینش‌هایی را در مورد کیفیت انرژی و در دسترس بودن در سیستم ارائه می‌دهد و شناسایی مناطق برای بهینه‌سازی و بهبود را تسهیل می‌کند. قبل از بحث در مورد نتایج، آنالیز ترمودینامیکی حساسیت عملکرد سیستم را به تغییرات در شرایط عملیاتی و سناریوها، از جمله تغییرات دمای منبع زمین گرمایی، دبی جرمی سیال زمین گرمایی و تقاضای انرژی بررسی می‌کند. تجزیه و تحلیل حساسیت تأثیر طراحی و پارامترهای عملیاتی حیاتی را بر عملکرد سیستم ارزیابی می‌کند تا فرصت‌های بهینه‌سازی را مشخص کند. این بررسی کامل بینش‌های ارزشمندی را در مورد فرایندهای تبدیل انرژی و کارایی سیستم تولید چندانگانه ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل شرایط حالت پایدار و حجم کنترل تجهیزات را در نظر می‌گیرد و از افت فشار صرف نظر می‌کند. جدول ۵ نتایج تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید چندانگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی را ارائه می‌دهد. نرخ انرژی بر اساس خواص حالت مرده سیستم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ کیلو پاسکال محاسبه می‌شود. خواص ترمودینامیکی سیال عامل R113 در چرخه رانکین آلی، سیال زمین گرمایی در منبع فلش دوگانه زمین گرمایی، جفت سیال LiBr-H<sub>2</sub>O در چرخه تبرید جذبی و هیدروژن در چرخه مایع‌سازی با استفاده از نرم‌افزار EES محاسبه شد.

جدول ۵. نتایج تحلیل ترمودینامیکی

| مقدار | پارامتر                        |
|-------|--------------------------------|
| ۴۳    | بازده انرژی سیستم (%)          |
| ۵۶    | بازده انرژی سیستم (%)          |
| ۱۱۴   | نرخ تولید هیدروژن (kg/hr)      |
| ۳۶    | ضریب عملکرد چرخه مایع‌سازی (%) |
| ۳۹    | بازده انرژی چرخه مایع‌سازی (%) |
| ۳۶۵۵۸ | توان خروجی کل (kw)             |

نتایج حاصل از تحلیل انرژی و انرژی انجام شده نشان می‌دهد سیستم تولید چندانگانه معرفی شده در مطالعه حاضر با بازده انرژی ۴۳ درصد و بازده انرژی ۵۶ درصد کارایی بالایی دارد. انرژی زمین گرمایی به عنوان تأمین‌کننده انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید هیدروژن در این سیستم به کار می‌رود و بدون انتشار آلاینده‌گی قادر به تولید ۱۱۴ کیلوگرم در ساعت هیدروژن است. واحد سرمایه‌گذاری جذبی دو اثره تأثیر قابل ملاحظه‌ای برای کاهش کار مصرفی در چرخه مایع‌سازی دارد و توان خروجی واحد الکتروولت‌یژر ۱۲۱۸۶ کیلووات بوده و چرخه نوین مایع‌سازی به مقدار ۷۰۹ کیلووات توان خروجی دارد. سیستم تولید چندانگانه قادر به تولید توان خروجی به مقدار ۳۶۵۵۸ کیلووات است. نتایج نشان می‌دهد برای روش نوین پیشنهادی برای مایع‌سازی هیدروژن در مطالعه حاضر ضریب عملکرد به مقدار ۳۶ درصد و بازده انرژی چرخه مایع‌سازی ۳۹ درصد حاصل می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب چرخه ابتکاری مایع‌سازی هیدروژن است. تحلیل انرژی روی سیستم پیشنهادی صورت می‌گیرد تا با شناسایی نقاطی از سیستم که در آن بیشترین تخریب انرژی صورت می‌گیرد بتوان برای بهبود عملکرد سیستم و کاهش تخریب انرژی برای افزایش قابلیت انجام کار اقدامات شایسته‌ای انجام شود. همان‌طور که نمودار سنکی جریان انرژی سیستم مورد مطالعه در شکل ۲ نشان می‌دهد چرخه مایع‌سازی با جریان انرژی به مقدار ۷۵۱۳ کیلووات بیشترین سهم را میان چرخه‌های سیستم داشته و کمترین جریان انرژی متعلق به چرخه رانکین اصلاح‌شده با مقدار ۱۰۱۴ کیلووات است.



شکل ۲. نمودار سنگی جریان انرژی سیستم

کیفیت عملکرد سیستم پیشنهادی از طریق یک بررسی انرژی‌تیک ارزیابی می‌شود. تجزیه و تحلیل انرژی تلاش می‌کند تا خروجی کار را از یک چرخه به حداکثر برساند. این تحلیل شامل دو مرحله کلیدی است: اول، فرایندهای ترمودینامیکی ناکارآمد را با کمی کردن تلفات انرژی از طریق تعادل انرژی شناسایی و بررسی می‌کند. دوم، بهبودهای احتمالی را بر اساس تلفات انرژی قابل اجتناب و اجتناب‌ناپذیر تعیین می‌کند. تلفات انرژی اجتناب‌ناپذیر نشان‌دهنده حداقل تخریب انرژی است که توسط فناوری فعلی و عوامل اقتصادی محدود شده است. بنابراین، زبان‌های قابل اجتناب، پتانسیل بهینه‌سازی فرایند را برجسته می‌کند. بنابراین، تجزیه و تحلیل انرژی به سرعت ناکارآمدی‌ها و بهبودهای بالقوه را در یک سیستم مشخص می‌کند. همان‌طور که نتایج به دست آمده در جدول ۶ نشان می‌دهد ناپودی انرژی کل سیستم ۹۸۹۵۶ کیلووات بوده و بیشترین ناپودی انرژی در الکترولیزر صورت می‌گیرد و اوپراتور چرخه سرمایه‌گذاری کمترین سهم از ناپودی انرژی میان اجزای مختلف سیستم را دارد.

برای تعیین سودآوری سیستم پیشنهادی، یک آنالیز اقتصادی انجام می‌شود. درک ترمو اقتصادی به کاررفته در سیستم‌های ترمودینامیکی از جمله سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم، متعادل کردن ملاحظات ترمودینامیکی و اقتصادی ضروری است. با استفاده از اصول اقتصادی در طراحی فنی سیستم‌های انرژی، می‌توانیم شرایط عملیاتی تجهیزات را شناسایی و اجرا کنیم که هزینه‌های کلی تولید را به حداقل می‌رساند. هدف تجزیه و تحلیل ترمو اکونومیک شناسایی طراحی به صرفه و استراتژی‌های عملیاتی است که تعادل بین سرمایه‌گذاری سرمایه و هزینه‌های عملیاتی را بهینه می‌کند. در این تحقیق ارزیابی اقتصادی کاملی روی سیستم پیشنهادی صورت می‌گیرد و نتایج حاصل از نرخ هزینه اجزای سیستم در جدول ۷ به نمایش درآمده و ژنراتور مبدل حرارتی بخار بیشترین سهم از نرخ هزینه بین اجزای سیستم را داشته و کمترین نرخ هزینه متعلق به پمپ چرخه رانکین آلی است.

در تحلیل ترمو اکونومیک، یک تعامل پیچیده بین چندین مفهوم به هم پیوسته، از جمله استهلاک، انرژی، کیفیت، هزینه، قیمت، منبع، مصرف، هدف و علیت وجود دارد. یک بررسی تحلیلی برای درک مکانیسم‌های فیزیکی و محلی که جریان‌های تولید خاص را طی فرایند هزینه‌یابی بیان می‌کنند، ضروری است. پارامترهای کلیدی در ارزیابی اقتصادی سیستم محاسبه شده

است و طبق نتایج جدول ۸ مقدار هزینه کل سیستم ۰/۳۷ دلار بر گیگاژول حاصل می‌شود. هزینه تولید برق (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) دو پارامتر مهم تحلیل اقتصادی در سیستم مورد مطالعه هستند که به ترتیب به مقادیر ۰/۰۳ سنت در هر کیلووات ساعت و ۲/۰۰۹ دلار به ازای هر کیلوگرم به دست می‌آید.

جدول ۶. نتایج نابودی انرژی اجزای مختلف سیستم

| مقدار | پارامتر                                       |
|-------|---|
| ۳۶۳/۷ | کمپرسور چرخه مایع‌سازی (kw)                   |
| ۲۹۶۷  | کندانسور چرخه رانکین آلی (kw)                 |
| ۱۰/۶۶ | گرم کن آب تغذیه چرخه رانکین آلی (kw)          |
| ۴۶/۲۹ | ژنراتور دما بالا چرخه سرمایش جذبی (kw)        |
| ۳۰۴/۹ | ژنراتور دما پایین دوم چرخه سرمایش جذبی (kw)   |
| ۲۸۷۸  | پمپ چرخه رانکین آلی (kw)                      |
| ۲۹۰۴  | مبدل حرارتی ۱ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw)  |
| ۶۳۲۷  | مبدل حرارتی ۳ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw)  |
| ۳۲۸۶  | مبدل حرارتی ۲ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw)  |
| ۱۱۴/۸ | توربین چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw)         |
| ۴۸۹۶  | ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)                 |
| ۶۸/۱۴ | جاذب چرخه سرمایش جذبی (kw)                    |
| ۲/۳۳۴ | کمپرسور چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw)        |
| ۰/۶   | اوپراتور چرخه سرمایش جذبی (kw)                |
| ۱۶۳/۲ | مبدل حرارتی دما بالا چرخه سرمایش جذبی (kw)    |
| ۳۷/۲۳ | مبدل حرارتی دما پایین چرخه سرمایش جذبی (kw)   |
| ۱۱۴/۸ | توربین چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw)         |
| ۲۱/۴۱ | کندانسور چرخه سرمایش جذبی (kw)                |
| ۱/۰۱۶ | کمپرسور چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw)        |
| ۲۷/۴  | اوپراتور چرخه رانکین آلی (kw)                 |
| ۸۲/۰۴ | مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی (kw)              |
| ۱۸۱/۹ | شیر ژول تامسون چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw) |
| ۱۸۲/۵ | شیر ژول تامسون چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (kw) |
| ۳۳/۱۳ | ژنراتور دما پایین چرخه سرمایش جذبی (kw)       |
| ۵۴۰۰۸ | الکترولایزر (kw)                              |
| ۶۸/۵  | توربین چرخه رانکین آلی (kw)                   |
| ۲۸۹۱  | مبدل حرارتی ۱ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw)  |
| ۲۲۶۶  | مبدل حرارتی ۲ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw)  |
| ۱۲۸۱۰ | مبدل حرارتی ۳ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (kw)  |
| ۳۹۸/۸ | مبدل حرارتی ۱ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (kw)     |
| ۲۲۷/۲ | مبدل حرارتی ۲ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (kw)     |
| ۵۷/۰۷ | مبدل حرارتی ۳ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (kw)     |
| ۹۷/۷۷ | مبدل حرارتی ۴ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (kw)     |
| ۲۱/۷۴ | مبدل حرارتی ۵ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (kw)     |
| ۴۸۹۶  | ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)                 |
| ۱۳۰/۲ | سوپر هیتر (kw)                                |

## جدول ۷. نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

| مقدار  | پارامتر  |
|--------|--|
| ۲۲۳۵۷  | کمپرسور چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (\$/GJ)            |
| ۱۶۰۸   | اوپراتور چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ)              |
| ۹۱۶۱   | مبدل حرارتی ۱ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (\$/GJ)      |
| ۳۴۷۴۶  | مبدل حرارتی ۲ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (\$/GJ)      |
| ۱۷۱۶۷  | مبدل حرارتی ۳ چرخه آبشاری مایع‌سازی دوم (\$/GJ)      |
| ۹۴۶۱   | مبدل حرارتی ۱ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (\$/GJ)      |
| ۳۵۷۴۶  | مبدل حرارتی ۲ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (\$/GJ)      |
| ۱۷۲۵۴  | مبدل حرارتی ۳ چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (\$/GJ)      |
| ۱۷۴۴۳  | مبدل حرارتی ۱ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (\$/GJ)         |
| ۲۱۵۳۶  | مبدل حرارتی ۲ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (\$/GJ)         |
| ۸۵۰۰   | مبدل حرارتی ۳ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (\$/GJ)         |
| ۱۲۱۵۶  | مبدل حرارتی ۴ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (\$/GJ)         |
| ۱۲۷۴۳  | مبدل حرارتی ۵ چرخه مایع‌سازی هیدروژن (\$/GJ)         |
| ۲۹۹۴۵  | مبدل حرارتی دما بالای چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ) |
| ۱۰۱۵۷۸ | توربین چرخه رانکین آلی (\$/GJ)                       |
| ۳۳۷۶   | کندانسور چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ)              |
| ۲۸۱۲۵  | کمپرسور چرخه آبشاری مایع‌سازی اول (\$/GJ)            |
| ۱۴۲۹   | اوپراتور چرخه رانکین آلی (\$/GJ)                     |
| ۹۵۴/۱  | مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی (\$/GJ)                  |
| ۳۸۰۷   | مبدل حرارتی دما پایین چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ) |
| ۵۰۳۸۵  | الکترولایزر (\$/GJ)                                  |
| ۱۹۴۶   | جاذب چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ)                  |
| ۱۸۰۳   | کندانسور چرخه رانکین آلی (\$/GJ)                     |
| ۲۶۳۰۵۰ | ژنراتور مبدل حرارتی بخار (\$/GJ)                     |
| ۲۳۲۱   | ژنراتور دما بالای چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ)     |
| ۳۲۹۷   | ژنراتور دما پایین چرخه سرمایه‌گذاری جذبی (\$/GJ)     |
| ۴۱۳/۷  | پمپ چرخه رانکین آلی (\$/GJ)                          |

## جدول ۸. نتایج ارزیابی اقتصادی

| مقدار | پارامتر                         |
|-------|---------------------------------|
| ۰/۰۳  | هزینه تولید برق (cent/kwh)      |
| ۲/۰۰۹ | هزینه تولید هیدروژن (\$/kg)     |
| ۰/۱۸  | دوره بازگشت سرمایه              |
| ۰/۴۱  | هزینه کل سیستم (\$/GJ)          |
| ۲/۵۵  | هزینه سالانه سیستم (\$)         |
| ۰/۰۲  | قیمت سرمایه سالانه (\$/year)    |
| ۰/۴۱  | کل قیمت دستگاه خریداری شده (\$) |
| ۲/۵۸  | قیمت تعمیر و نگهداری (\$)       |
| ۰/۱۶  | قیمت تعمیر و نگهداری (\$)       |
| ۳/۵۹  | ارزش فعلی خالص (\$/year)        |

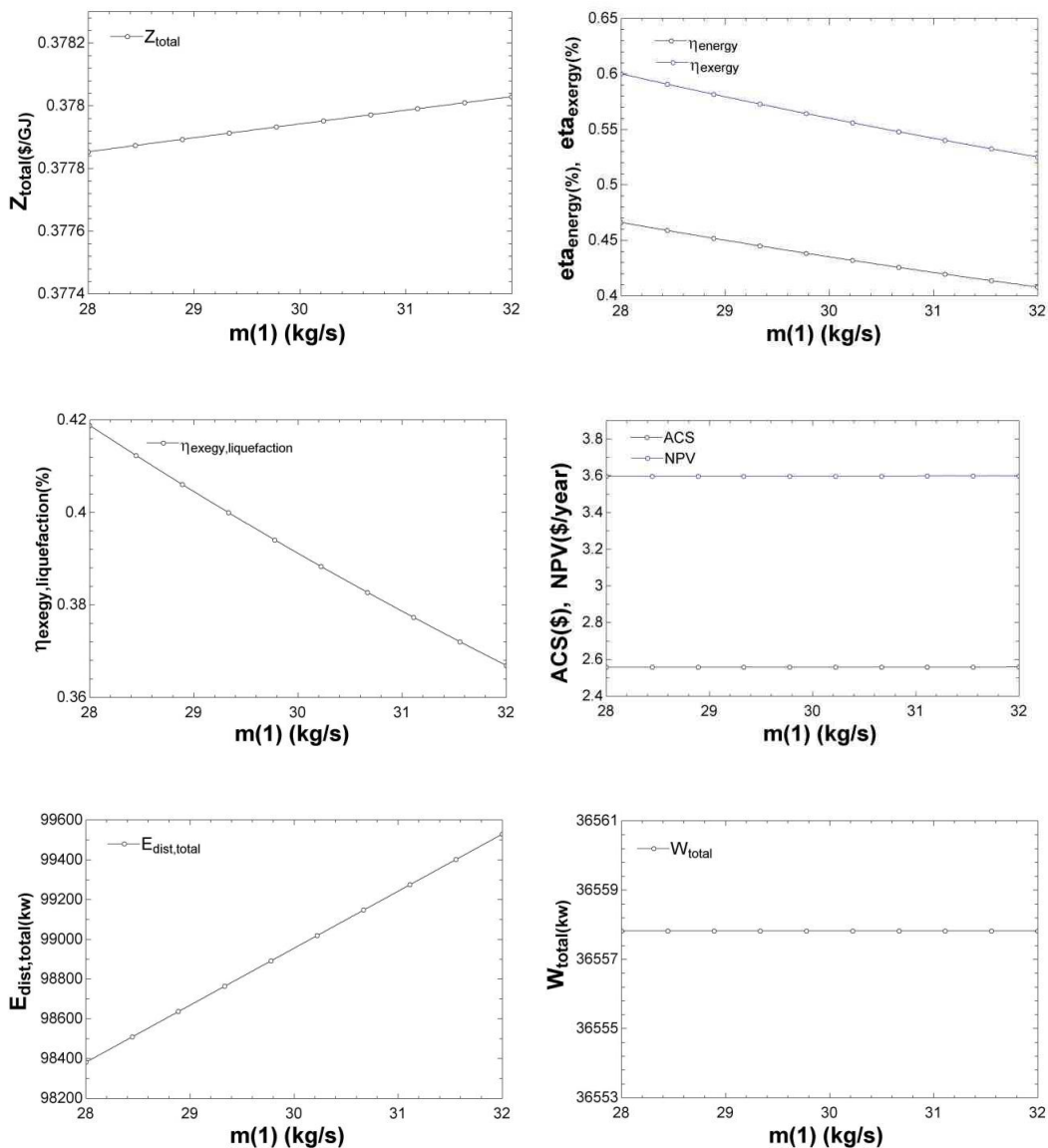


### ۷-۱. تحلیل پارامتریک

تجزیه و تحلیل پارامتریک روشی قابل اعتماد برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط عملیاتی مختلف است که درک جامعی از رفتار آن ارائه می‌دهد. به طور خاص، این تجزیه و تحلیل بررسی می‌کند که چگونه پارامترهای طراحی کلیدی مانند بازده ایزونتروپیک توربین، دمای منبع زمین گرمایی و دبی جرمی سیال زمین گرمایی بر عملکرد سیستم مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد.

### ۷-۱-۱. اثر تغییرات دبی جرمی سیال زمین گرمایی بر عملکرد سیستم

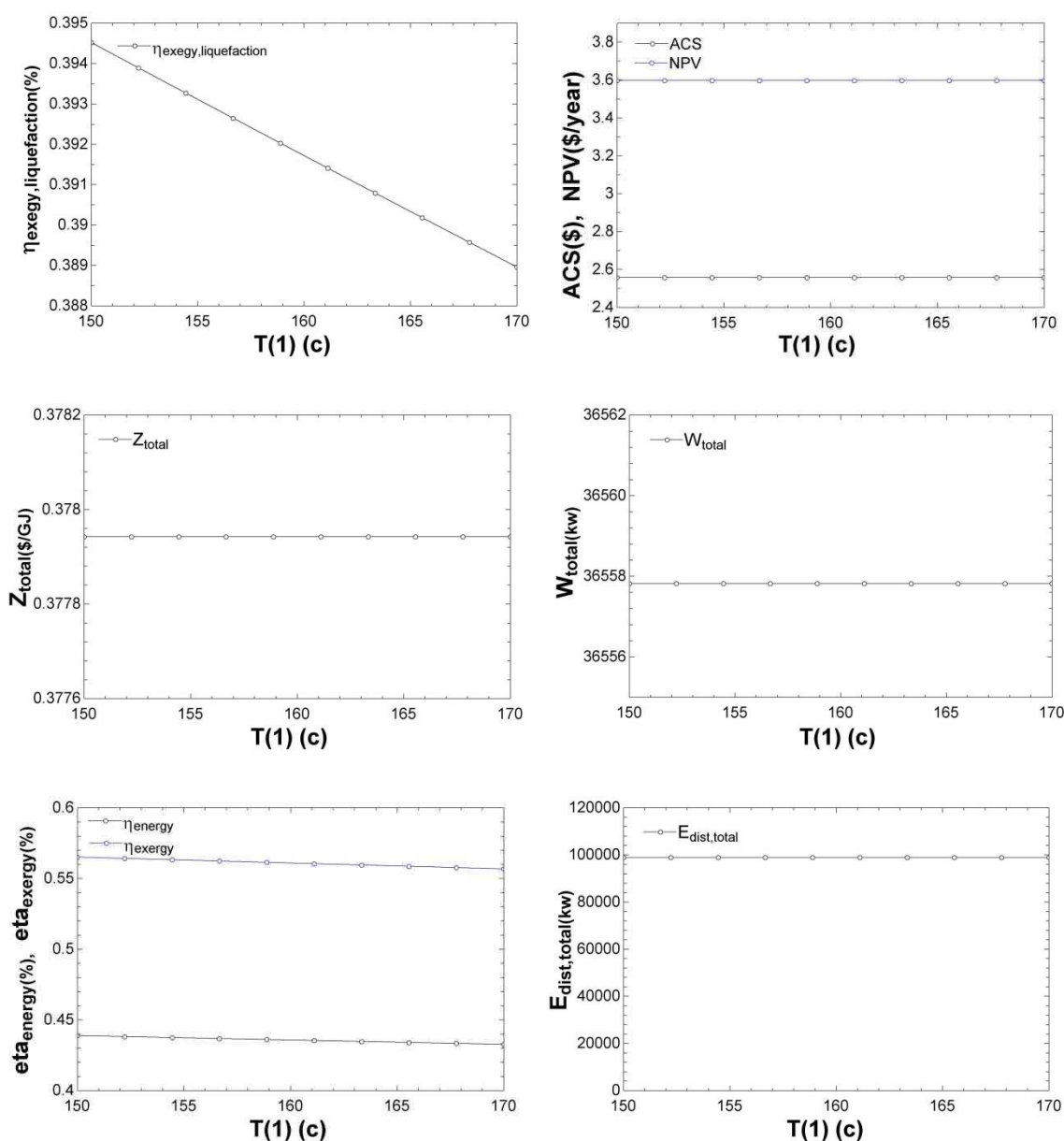
همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش دبی جرمی سیال زمین گرمایی از ۲۸ تا ۳۲ کیلوگرم بر ثانیه بازده انرژی سیستم تولید چندگانه ۷ درصد و بازده انرژی ۶ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش بازده سیستم ناشی از افزایش تخریب انرژی سیستم است که توان خروجی قابل دسترس را کاهش می‌دهد و روی عملکرد سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. بازده انرژی با توان خروجی رابطه مستقیم دارد و کاهش توان تولیدی به علت افت بازده انرژی سیستم است. افزایش دبی جرمی سیال زمین گرمایی هزینه بیشتری را به سیستم تحمیل می‌کند به علاوه هزینه سالانه سیستم و ارزش فعلی خالص افزایش می‌یابد. هنگامی که تخریب انرژی سیستم با افزایش دبی جرمی سیال زمین گرمایی نیز متاثر شده و کاهش می‌یابد.



شکل ۳. تأثیر تغییرات دبی جرمی سیال زمین گرمایی بر عملکرد سیستم

### ۷-۱-۲. اثر تغییرات دمای ورودی سیال زمین گرمایی بر عملکرد سیستم

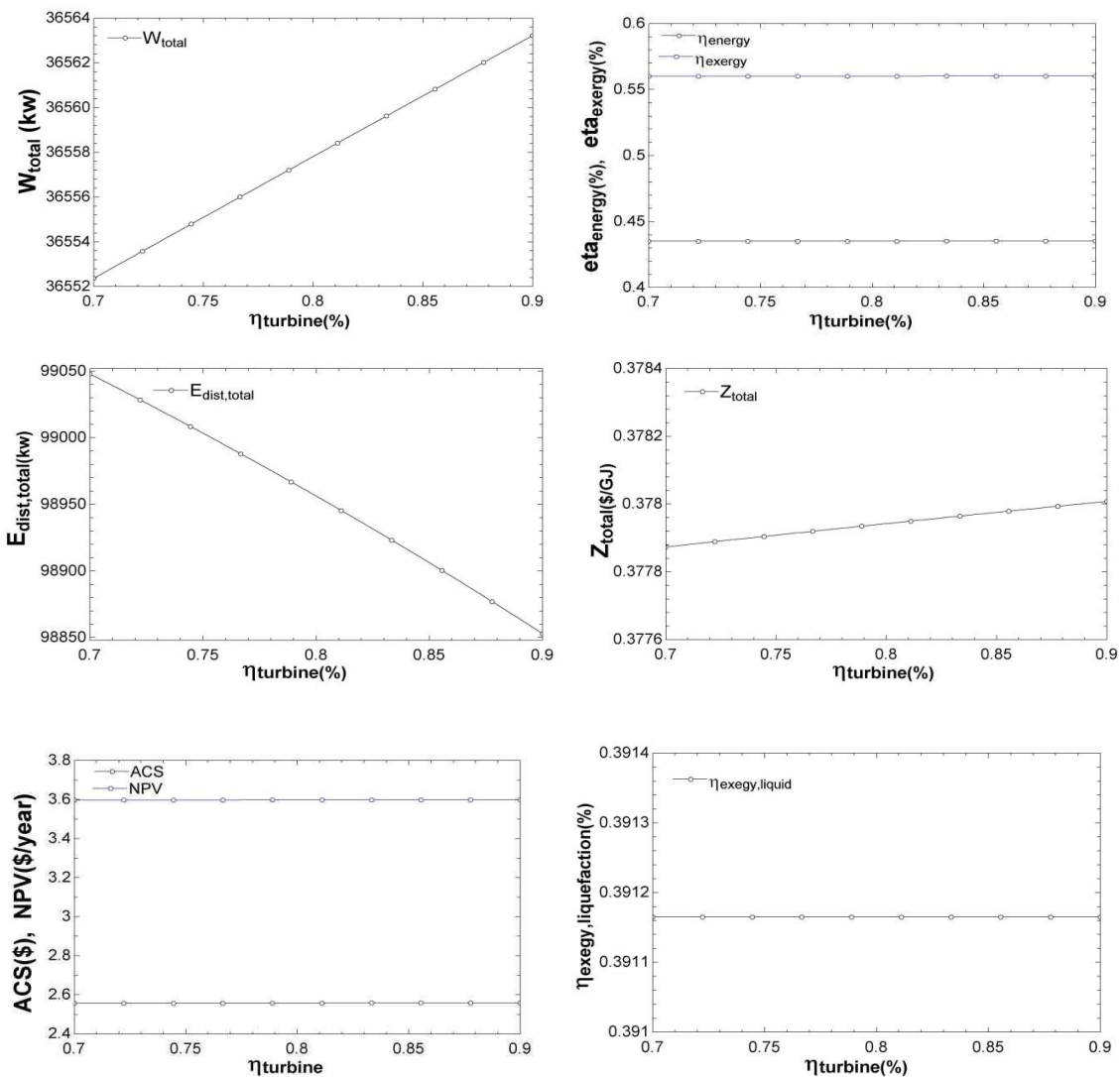
همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ظرفیت تولید نیروی الکتریکی بیش از افزایش هزینه کل است. شایان یادآوری است که هیدروژن و الکتروسیته به طور هم‌زمان تولید نمی‌شوند. ظرفیت تولید هیدروژن نشان داده شده در صورتی به دست می‌آید که توان الکتریکی به طور کامل به الکترولایزر ارسال شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد وقتی که دمای سیال زمین گرمایی افزایش می‌یابد بازده انرژی چرخه مایع‌سازی افت پیدا می‌کند. طبق شواهد منبع زمین گرمایی دما بالا باعث کاهش بازده انرژی و انرژی سیستم شده و به صورت متقابل با افزایش تخریب انرژی در سیستم توان خروجی مفید قابل استخراج نیز کاهش می‌یابد. علت کاهش میزان بازده انرژی را می‌توان ناشی از این امر دانست که بازده انرژی و توان خروجی سیستم با هم رابطه مستقیم دارند، یعنی با کاهش کار سیستم میزان بازده انرژی سیستم کاهش می‌یابد. در کنار کاهش بازدهی سیستم افزایش مقدار نرخ هزینه و به علاوه هزینه سالانه سیستم و ارزش فعلی خالص نیز از جمله تأثیرات نامطلوب افزایش دمای ورودی سیال زمین گرمایی است.



شکل ۴. تأثیر تغییرات دمای ورودی سیال زمین گرمایی بر عملکرد سیستم

### ۷-۱-۳. اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

وقتی که بازده ایزنتروپیک توربین افزایش می‌یابد روی عملکرد سیستم اثر می‌گذارد که تغییرات بازده انرژی و انرژی سیستم، توان خروجی، نابودی انرژی کل، نرخ هزینه کل، بازده انرژی واحد مایع‌سازی و هزینه سالانه سیستم و ارزش فعلی خالص بر حسب بازده ایزنتروپیک توربین در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده با افزایش بازده ایزنتروپیک توربین از ۰/۷ تا ۰/۹ توان خروجی سیستم افزایش می‌یابد. در سیستم تولید چندانگانه توربین نقش بسزایی در تولید الکتریسیته ایفا می‌کند. افزایش توان ناشی از تأثیر مطلوب بازده توربین بر بازده کار است. بهبود تولید توان ناشی از افزایش بازده ایزنتروپیک توربین روی کارکرد الکترولایزر تأثیر مثبت می‌گذارد و در نتیجه، تولید هیدروژن در سیستم را افزایش می‌دهد و روی بازده انرژی واحد مایع‌سازی هیدروژن نیز اثر مطلوبی می‌گذارد. بازده انرژی و انرژی سیستم با افزایش بازده ایزنتروپیک توربین رشد می‌یابد. افزایش انرژی صورت‌گرفته ناشی از همبستگی مستقیم بین بازده انرژی و توان خروجی سیستم است. شرط لازم برای بهبود توان خروجی سیستم به‌کارگیری تجهیزات بزرگ‌تر و جامع‌تر بوده که به صورت مستقیم روی هزینه سیستم تأثیر می‌گذارد و نیاز است که هزینه بیشتری برای تولید توان بیشتر متحمل شد به علاوه هزینه سالانه سیستم و ارزش فعلی خالص نیز افزایش می‌یابد. انرژی بیانگر حداکثر کار قابل استخراج از سیستم است و نشان‌دهنده کار مفید تولیدشده توسط توربین در این سیستم است. وقتی که بازده توربین افزایش می‌یابد تخریب انرژی کاهش یافته و قابلیت انجام کار بهبود یافته و باعث تأثیر مثبت روی عملکرد ترمودینامیکی سیستم می‌شود.



شکل ۵. تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

## ۸. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به حداکثر رساندن کارایی انرژی و دوام اقتصادی با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به عنوان منبع انرژی اولیه در سیستم تولید چندانگانه مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل بهبودهای اساسی در بازده انرژی و کارایی هزینه از طریق تجزیه و تحلیل کامل حاصل می‌شود. یافته‌های مطالعه حاضر بر امکان‌سنجی و کارآمدی ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های تولید چندانگانه تأکید می‌کند. این نتایج برای ذی‌نفعان در بخش‌های مختلف، از سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان انرژی گرفته تا مهندسان و سرمایه‌گذاران، نویدبخش است و بینش‌های ارزشمندی را برای انتقال به سمت راه‌حل‌های انرژی پاک‌تر و کارآمدتر ارائه می‌دهد. این مطالعه به بررسی تبدیل انرژی به شکل‌های مختلف از طریق فرایندهای تولید هم‌زمان برای تولید برق با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، در کنار گرمایش و سرمایش می‌پردازد که با استفاده از روش نوین مایع‌سازی آبشاری با دو دمای متغیر به صورت مستقل نیتروژن مایع تولید می‌کند و هم‌زمان با غوطه‌ور شدن نیتروژن مایع در مبدل حرارتی چرخه مایع‌سازی هیدروژن باعث خنک‌سازی مبدل حرارتی شده و با کاهش دادن تخریب آگرژی مقدار بازده آگرژی چرخه مایع‌سازی هیدروژن را بهبود می‌دهد و منجر به توسعه یک سیستم متمایز می‌شود. چرخه تبرید جذبی دو اثره توسعه‌یافته برای پیش‌سرمایش واحد الکترولایزر، با چرخه رانکین آلی ترکیب شده با مبدل حرارتی داخلی و گرم‌کن آب تغذیه سازگاری مناسبی را نشان می‌دهد، که امکان‌سنجی فنی و هزینه‌ای ادغام تولید برق و خنک‌کننده در یک سیستم یکپارچه را تأیید می‌کند. سیستم‌های مایع‌سازی می‌توانند برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت هیدروژن و حمل‌ونقل به مکان‌های دور استفاده شوند. این سیستم‌ها شامل شبکه‌های مبدل حرارتی و سیستم‌های تبرید هستند که کاملاً به یکدیگر وابسته هستند. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی کاملی روی سیستم پیشنهادی صورت گرفته است و هماهنگی مناسب اجزای سیستم و به‌کارگیری از منبع انرژی اولیه پاک زمین‌گرمایی به بازده انرژی ۴۳ درصد و بازده آگرژی ۵۶ درصد برای سیستم تولید چندانگانه منجر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد روش جدید مایع‌سازی معرفی شده در مطالعه حاضر کارایی بالایی دارد و ضریب عملکرد واحد مایع‌سازی ۳۶ درصد و بازده آگرژی آن ۳۹ درصد محاسبه می‌شود. نتایج حاصل شده بیان‌کننده این است که الکترولایزر غشای تبادل پروتون بیشترین نابودی آگرژی را میان اجزای ترمودینامیکی به‌کاررفته در سیستم پیشنهادی دارد و برای بهبود عملکرد سیستم می‌توان اقداماتی همچون افزایش دمای آب ورودی به الکترولایزر برای کاهش دادن بیشینه نابودی آگرژی را انجام داد که نقش بسزایی در افزایش بازده سیستم پیشنهادی دارد. به طور کلی، تجزیه و تحلیل ترموآکونومیک بینش‌های ارزشمندی در مورد کارایی اقتصادی و رقابتی مدل طراحی شده ارائه می‌دهد. این یافته‌ها برای تصمیم‌گیرندگان و سهامداران درگیر در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های انرژی پایدار ضروری هستند، زیرا به اطلاع‌رسانی تصمیمات سرمایه‌گذاری و اولویت‌بندی منابع به طور مؤثر کمک می‌کنند. صرفه اقتصادی بالای سیستم پیشنهادی با حصول نرخ هزینه کل ۰/۳۷ دلار بر گیگا ژول با استفاده از توابع هزینه و ارزیابی اقتصادی صورت‌گرفته نشان داده می‌شود. نتایج ارزیابی اقتصادی نشان‌دهنده دوره بازگشت سرمایه ۰/۱۸ سال برای سیستم پیشنهادی است که با توجه به پارامترهای اقتصادی بیانگر این است که سیستم مورد مطالعه پس از کارکرد کمتر از دو ماه به سود می‌رسد و از نظر اقتصادی بسیار به صرفه است. هزینه تولید برق (LCOE) در سیستم مورد مطالعه به مقدار ۰/۰۳ سنت در هر کیلووات ساعت محاسبه می‌شود و برای تولید الکتریسیته در کاربردهای گوناگون تجاری و صنعتی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد و با توجه به هزینه پایین می‌تواند جایگزین مناسبی برای تأمین برق از شبکه مصرف باشد که هزینه هنگفتی را برای مصرف‌کننده به همراه دارد. واحد پیش‌سرمایش جذبی دو اثره مورد استفاده در سیستم مورد مطالعه باعث کاهش هزینه تولید هیدروژن (LCOH) به مقدار ۲/۰۰۹ دلار به ازای هر کیلوگرم می‌شود. میان اجزای مورد استفاده در سیستم پیشنهادی ژنراتور مبدل حرارتی بخار بیشترین سهم از هزینه کل را شامل می‌شود. این بررسی پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی را برای تولید هیدروژن تجدیدپذیر در نظر می‌گیرد. این مطالعه راه‌حل‌ها و فرصت‌هایی را برای ارزیابی امکان‌سنجی استفاده از مخازن زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن مایع پیشنهاد کرد. این ارزیابی شامل مدل‌سازی ترمودینامیکی و ترموآقتصادی سیستم‌های تولید هیدروژن مایع با استفاده از ظرفیت حرارتی منبع زمین‌گرمایی بود. برای افزایش کارایی و جذابیت اقتصادی تولید هیدروژن مبتنی بر زمین‌گرمایی، تلاش‌ها شامل بهبود کارایی اجزای جداگانه و سیستم کلی با کاهش تلفات حرارتی و شناسایی پارامترهای عملیاتی بهینه است.

انتخاب شرایط عملیاتی بهینه برای سیستم‌های تولید هیدروژن مایع به کمک زمین گرمایی، شامل پارامترهایی مانند دما و نرخ جریان سیال زمین گرمایی و همچنین، شرایط عملیاتی اجزای چرخه رانکین اصلاح شده به طور قابل توجهی بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد. مطالعه حاضر سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی بر اساس روش ابتکاری مایع‌سازی هیدروژن را معرفی می‌کند که با توجه به بازدهی بالا و عملکرد مطلوب می‌تواند در کاربردهای گوناگون صنعتی مورد استفاده قرار بگیرد.

## منابع

- [1] Ifaei P, Nazari-Heris M, Charmchi AS, Asadi S, Yoo C. Sustainable energies and machine learning: An organized review of recent applications and challenges. *Energy*. 2023 Mar 1;266:126432.
- [2] Shinde TU, Dalvi VH, Patil RG, Mathpati CS, Panse SV, Joshi JB. Thermal performance analysis of novel receiver for parabolic trough solar collector. *Energy*. 2022 Sep 1;254:124343.
- [3] Dan M, He A, Ren Q, Li W, Huang K, Wang X, Feng B, Sardari F. Multi-aspect evaluation of a novel double-flash geothermally-powered integrated multigeneration system for generating power, cooling, and liquefied Hydrogen. *Energy*. 2024 Feb 15;289:129900.
- [4] Guzović Z, Duić N, Piacentino A, Markovska N, Mathiesen BV, Lund H. Paving the way for the Paris Agreement: Contributions of SDEWES science. *Energy*. 2023 Jan 15;263:125617.
- [5] Li P, Lin H, Li J, Cao Q, Wang Y, Pei G, Jie D, Zhao Z. Analysis of a direct vapor generation system using cascade steam-organic Rankine cycle and two-tank oil storage. *Energy*. 2022 Oct 15;257:124776.
- [6] Chen C, Witte F, Tuschy I, Kolditz O, Shao H. Parametric optimization and comparative study of an organic Rankine cycle power plant for two-phase geothermal sources. *Energy*. 2022 Aug 1;252:123910.
- [7] Karayel GK, Javani N, Dincer I. Effective use of geothermal energy for hydrogen production: a comprehensive application. *Energy*. 2022 Jun 15;249:123597.
- [8] 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 Feb 15;358:130160.
- [9] Naquash A, Qyyum MA, Islam M, Sial NR, Min S, Lee S, Lee M. Performance enhancement of hydrogen liquefaction process via absorption refrigeration and organic Rankine cycle-assisted liquid air energy system. *Energy Conversion and Management*. 2022 Feb 15;254:115200.
- [10] Riaz A, Qyyum MA, Min S, Lee S, Lee M. Performance improvement potential of harnessing LNG regasification for hydrogen liquefaction process: Energy and exergy perspectives. *Applied Energy*. 2021 Nov 1;301:117471.
- [11] Nabat MH, Zeynalian M, Razmi AR, Arabkoohsar A, Soltani M. Energy, exergy, and economic analyses of an innovative energy storage system; liquid air energy storage (LAES) combined with high-temperature thermal energy storage (HTES). *Energy Conversion and Management*. 2020 Dec 15;226:113486.
- [12] Manesh MH, Ghorbani B. Energy and exergy analyses of an innovative energy storage configuration using liquid air integrated with Linde-Hampson liquefaction system, molten carbonate fuel cell, and organic Rankine cycle. *Journal of Energy Storage*. 2022 Mar 1;47:103676.
- [13] Koc M, Yuksel YE, Ozturk M. Thermodynamic assessment of a novel multigenerational power system for liquid hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022 Aug 29;47(74):31806-20.
- [14] Bi Y, Yin L, He T, Ju Y. Optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction process for circulating hydrogen refrigeration. *international journal of hydrogen energy*. 2022 Jan 1;47(1):348-64.
- [15] Ding GC, Peng JI, Mei-Yun GE. Technical assessment of Multi-generation energy system driven by integrated renewable energy Sources: Energetic, exergetic and optimization approaches. *Fuel*. 2023 Jan 1;331:125689.
- [16] Shakibi H, Faal MY, Assareh E, Agarwal N, Yari M, Latifi SA, Ghodrat M, Lee M. Design and multi-objective optimization of a multi-generation system based on PEM electrolyzer, RO unit, absorption cooling system, and ORC utilizing machine learning approaches; a case study of Australia. *Energy*. 2023 Sep 1;278:127796.
- [17] Sun J, Yan G, Abed AM, Sharma A, Gangadevi R, Eldin SM, Taghavi M. Evaluation and optimization of a new energy cycle based on geothermal wells, liquefied natural gas and solar thermal energy. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022 Dec 1;168:544-57.
- [18] Zhang S, Liu G. Design and performance analysis of a hydrogen liquefaction process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022 Jan 1:1-5.

- [19] Faramarzi S, Nainiyan SM, Mafi M, Ghasemiasl R. A novel hydrogen liquefaction process based on LNG cold energy and mixed refrigerant cycle. *International Journal of Refrigeration*. 2021 Nov 1;131:263-74.
- [20] Ebrahimi A, Saharkhiz MH, Ghorbani B. Thermodynamic investigation of a novel hydrogen liquefaction process using thermo-electrochemical water splitting cycle and solar collectors. *Energy Conversion and Management*. 2021 Aug 15;242:114318.
- [21] 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 Jan 15;263:125535.
- [22] Valero A. The thermodynamic process of cost formation. *Exergy, energy system analysis and optimization*. 2009 May 13;2:35.
- [23] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *International journal of hydrogen energy*. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [24] Boyaghchi FA, Chavoshi M, Sabeti V. Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations. *Energy*. 2018 Feb 15;145:38-51.
- [25] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S. 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 conversion and management*. 2018 Dec 1;177:339-49.
- [26] Turton R, Bailie RC, Whiting WB, Shaeiwitz JA, Bhattacharyya D. *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes: Analy Synth Desig Chemi Pr\_4*. Prentice Hall; 2012 Jun 22.
- [27] Valero, A., & Torres, C. Relative free energy function and structural 846 theory of thermoeconomics. In *Proceedings* (Vol. 58, No. 1, p. 28). MDPI. 2020, September.
- [28] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*. 2020 Jan 15;204:112320.
- [29] Sayyaadi H. Multi-objective approach in thermoenvionomic optimization of a benchmark cogeneration system. *Applied Energy*. 2009 Jun 1;86(6):867-79.
- [30] Wang L, Bu X, Wang H, Ma Z, Ma W, Li H. Thermoeconomic evaluation and optimization of LiBr-H<sub>2</sub>O double absorption heat transformer driven by flat plate collector. *Energy Conversion and Management*. 2018 Apr 15;162:66-76.
- [31] Taghavi M, Salarian H, Ghorbani B. Economic evaluation of a hybrid hydrogen liquefaction system utilizing liquid air cold recovery and renewable energies. *Renewable Energy Research and Applications*. 2023 Jan 1;4(1):125-43.
- [32] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SMS. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy* 2017;124:625–39.
- [33] Shah ZA, Zheng Q, Mehdi G, Ahmad N, Waleed R, Rehman AU, Raza A. The Theoretical Framework of the Modified Organic Rankine Cycles for Improved Energy and Exergy Performances. *Int Energy J*. 2020 May 25;20:169-80.