



## Thermoeconomics Analysis and Optimization of a Geothermal-Based Power and Heat Generation System Using Genetic Algorithm

Amirhossein Akbari<sup>1</sup> , Seyedeh Mohadeseh Miri<sup>\*2</sup> , Javad Abolfazli Esfahani<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

3. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

In this study, a combined heat and power (CHP) system based on geothermal energy is introduced, analyzed from energy, exergy, economic, and environmental perspectives, and optimized using a genetic algorithm. The system consists of an organic Rankine cycle (ORC) and an improved Brayton cycle, designed to utilize geothermal energy. The energy analysis results show that the system's net power output is 3585 kW, and its heating heat rate is 12278 kW. The energy and exergy efficiencies of the system are calculated to be 42.9% and 47.31%, respectively. The results related to the effects of operational parameters indicate that increasing the maximum pressure in the ORC and the temperature difference across heat exchangers significantly affect energy efficiency, exergy efficiency, and the levelized cost of products. Specifically, for every 100 kPa increase in the ORC's maximum pressure, the energy efficiency increases by 11.2%, and the exergy efficiency increases by 6.29%. Additionally, an optimization process was carried out using a genetic algorithm to maximize energy and exergy efficiencies and minimize the levelized cost of products. Furthermore, optimization of the proposed system resulted in a 30% reduction in the levelized cost of products and a 9.4% reduction in the exergoenvironmental index.

### Keywords

Thermoeconomic analysis  
Geothermal energy  
Combined heat and power (CHP) production

Received: 10.04.2025

Revised: 04.06.2025

Accepted: 12.07.2025

\*Corresponding Author

Seyedeh Mohadeseh Miri

Email

[mhdsh.miri@uoz.ac.ir](mailto:mhdsh.miri@uoz.ac.ir)

## 1- Introduction

Energy is one of the fundamental pillars of modern societies; however, the rapid increase in its consumption—especially through fossil fuels—has led to a rise in greenhouse gas emissions and climate change [1]. Carbon dioxide plays a major role in global warming, with emissions surpassing 30 gigatons annually over the past century [2]. Despite abundant fossil resources, Iran has low energy efficiency, and the country's rising temperature trends have raised environmental concerns [3]. In this context, renewable energies such as geothermal

are gaining attention due to their sustainability, lower emissions, and high reliability [4]. Studies have shown that Iran has strong geothermal potential in regions such as Sabalan, Damavand, and Sahand, which could be utilized in combined heat and power (CHP) systems [5].

Van Erdugah et al. (2018) investigated the optimization of a combined heat and power (CHP) plant utilizing low-temperature geothermal resources. The study examined several configurations of CHP systems operating with

How to Cite this Article:

[1] M. Miri, A. Akbari, and J. A. Esfahani, "Thermoeconomics analysis and optimization of a geothermal-based power and heat generation system using genetic algorithm," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 183–201, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.515220.1118> (in Persian)





demonstrated an energy efficiency of 42.9% and an exergy efficiency of 47.31%. Furthermore, economic and environmental assessments revealed that the levelized cost of energy (LCOE) was 0.01153 \$/kWh, while the CO<sub>2</sub> emission rate was 16.95 tonnes per year.

### 3-2-Parametric Analysis

The effect of variations in  $\Delta T_{EVA}$  is illustrated in Figure 2. As  $\Delta T_{EVA}$  increases, the mass flow rate of the working fluid in the ORC decreases, resulting in a reduction in both the exergy destruction rate and the net power output of the ORC. Conversely, this increase leads to a higher mass flow rate in the improved Brayton cycle (IRBC), which in turn causes an increase in its exergy destruction rate and net power output.

However, the reduction in exergy destruction within the ORC consistently outweighs the increase in the IRBC. As a result, the total exergy destruction of the system initially decreases, which—as observed in the figure—leads to an improvement in overall exergy efficiency.

On the other hand, the variation in net power output initially contributes to enhanced energy efficiency and a reduction in the Levelized Cost of Product (LCOP). Nevertheless, as the dominance of the ORC's net power output diminishes relative to the total output, energy efficiency decreases and LCOP increases accordingly.

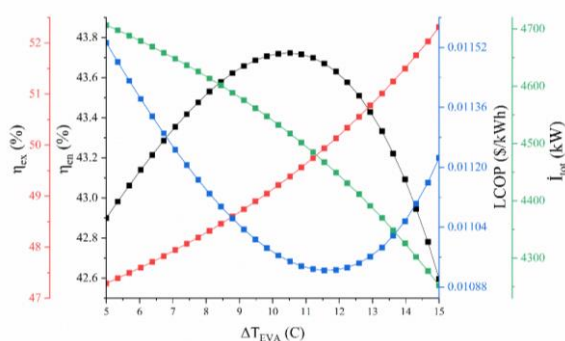


Figure 2: Effect of evaporator temperature difference on objective functions

### 3-3- Optimization

In this study, the number of generations and population size were set to 64 and 16, respectively, as default parameters provided by the built-in

genetic algorithm code. Following the optimization process, the energy efficiency and exergy efficiency improved by approximately 36.6% and 8.5%, respectively, compared to the pre-optimization results, demonstrating the significant enhancement in the proposed system's performance. Additionally, the Levelized Cost of Product (LCOP) and the exergo-environmental indicator decreased by approximately 30% and 4.9%, respectively, relative to the baseline case. These reductions not only confirm the economic feasibility of the proposed system but also indicate its improved environmental performance.

## 4- Conclusion

In this study, a novel combined heat and power (CHP) system based on geothermal energy is introduced and analyzed from energy, exergy, and economic perspectives using the EES software, aiming to provide a sustainable solution for utilizing renewable resources. The results indicate that the integration of an Organic Rankine Cycle (ORC) and an improved Brayton cycle, along with a heat exchanger for water heating, can significantly enhance the efficiency of geothermal energy utilization. The key findings of this research are summarized as follows:

- The proposed system is capable of producing a net power output of 3,585 kW and a heat supply rate of 12,278 kW.
- The energy and exergy efficiencies of the system are 42.9% and 47.31%, respectively.
- The total exergy destruction rate and the levelized cost of energy (LCOE) are 4,706 kW and 0.01153 \$/kWh, respectively.

## 5- References

[1] N. Zheng, Q. Zhang, Y. Ren, L. Duan, Q. Wang, X. Ding, Y. Zhou, X. Wang, L. Liu, M. Sun, and W. Jiao, "Thermodynamic analysis of a novel SOFC-based CCHP system integrated supercritical carbon dioxide and organic Rankine cycles for waste heat cascade utilization," *Energy*, vol. 2025, p. 136547,

---

May 2025. [Online]. Available: doi:  
[10.1016/j.energy.2025.136547](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136547)

[2] M. Mamorian, S. Akbari, and Y. Javanshir, "Energy and exergy analysis of the organic Rankine cycle used for waste heat recovery from the cement industry," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 7–25, 2023. [Online]. Available: doi:  
[10.22034/stme.2023.408480.1040](https://doi.org/10.22034/stme.2023.408480.1040)(in Persian)

[3] A. Souhankar, A. Mortezaee, and R. Hafezi, "Potentials for energy-saving and efficiency capacities in Iran: An interpretive structural model to prioritize future national policies," *Energy*, vol. 262, p. 125500, Jan. 2023. [Online]. Available: doi:  
[10.1016/j.energy.2022.125500](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125500)(in Persian)

[4] K. Bareiß, C. de la Rua, M. Möckl, and T. Hamacher, "Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems," *Applied Energy*, vol. 237,

pp. 862–872, Mar. 2019. [Online]. Available:doi:  
[10.1016/j.apenergy.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001)

[5] P. Kazemiani-Najafabadi and E. Amiri Rad, "Optimization of an improved power cycle for geothermal applications in Iran," *Energy*, vol. 209, p. 118381, Oct. 2020. [Online]. Available: doi:  
[10.1016/j.energy.2020.118381](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118381)(in Persian)

[6] S. Van Erdeweghe, J. Van Bael, B. Laenen, and W. D'haeseleer, "Optimal combined heat-and-power plant for a low-temperature geothermal source," *Energy*, vol. 150, pp. 396–409, May 2018. [Online]. Available: doi:  
[10.1016/j.energy.2018.01.136](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.136)

[7] Y. Chen, J. Wang, and P. D. Lund, "Thermodynamic performance analysis and multi-criteria optimization of a hybrid combined heat and power system coupled with geothermal energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112741, Apr. 2020. [Online]. Available: doi:  
[10.1016/j.enconman.2020.112741](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112741)



## تحلیل ترموآکونومیک-زیست‌محیطی و بهینه‌سازی یک سامانه تولیدکننده توان و گرما مبتنی بر

### انرژی زمین‌گرمایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

امیرحسین اکبری<sup>۱</sup> ID، سیده محدثه میری<sup>۲\*</sup> ID، جواد ابوالفضلی اصفهانی<sup>۳</sup> ID

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

#### چکیده

در این پژوهش، یک سامانه تولید هم‌زمان برق و گرمایش مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی معرفی و از منظر انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی و توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. این سامانه شامل چرخه رانکین آلی و چرخه برایتون بهبود یافته بوده و با هدف بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی طراحی شده است. نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهد که توان خالص تولیدی سامانه برابر  $3585 \text{ kW}$  و نرخ حرارت گرمایشی آن  $12278 \text{ kW}$  است. بازده انرژی و انرژی سامانه نیز به ترتیب  $42/9\%$  و  $47/31\%$  محاسبه شده است. نتایج حاصل از تأثیر مؤلفه‌های عملیاتی نشان می‌دهد که افزایش فشار بیشینه در چرخه رانکین آلی و اختلاف دمای مبدل‌های حرارتی، تأثیر قابل توجهی بر بازده انرژی، انرژی و هزینه هم‌سطح شده محصولات دارد و با افزایش هر  $100 \text{ kPa}$  در فشار بیشینه چرخه رانکین آلی، بازده انرژی  $11/2\%$  و بازده انرژی  $6/29\%$  افزایش می‌یابد. همچنین، فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به حداکثر بازده انرژی و انرژی و حداقل هزینه هم‌سطح شده محصولات انجام شد. علاوه بر این، بهینه‌سازی سامانه پیشنهادی منجر به کاهش  $30\%$  هزینه هم‌سطح شده محصولات و کاهش  $9/4\%$  شاخص انرژی محیط‌زیستی شده است.

#### کلمات کلیدی

تحلیل ترموآکونومیک  
انرژی زمین‌گرمایی  
تولید هم‌زمان

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

\*نویسنده مسئول

سیده محدثه میری

ایمیل

[mhdsh.miri@uoz.ac.ir](mailto:mhdsh.miri@uoz.ac.ir)

#### ۱- مقدمه

گلخانه‌ای، با جذب اشعه مادون قرمز منعکس شده توسط زمین، پدیده گرمایش جهانی را تشدید می‌کند و انتشار این گاز در صد سال اخیر، به بیش از ۳۰ گیگاتن در سال می‌رسد [۴]. این پدیده، جهان را از نظر تنش آب و هوایی تحت تأثیر خود قرار داد و می‌تواند پیامدهایی از جمله خشکسالی، افزایش سطح آب دریاها، اختلال در زنجیره غذایی و غیره را به همراه داشته باشد [۵].

باتوجه به پیشرفت فناوری در جهان، سوخت‌های فسیلی همچنان مهم‌ترین منبع تأمین انرژی محسوب می‌شوند [۶]. ایران به‌عنوان یک کشور در حال توسعه با منابع غنی سوخت‌های فسیلی، در زمینه بهره‌وری انرژی عملکرد ضعیفی داشته و با خطر عدم توانایی در تأمین

امروزه انرژی به عنوان یکی از ارکان اصلی جوامع مدرن شناخته می‌شود و نقش اساسی در توسعه اقتصادی، اجتماعی و فناوری ایفا می‌کند [۱]. این موضوع زمانی به چالشی بزرگ تبدیل شد که مصرف جهانی انرژی در دهه‌های اخیر، از رشد جمعیت پیشی گرفت و رشد اقتصادی، به‌طور عمده به مصرف سوخت‌های فسیلی وابسته شد [۲]. این وابستگی باعث انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تغییرات آب و هوایی شده است. از زمان تصویب پروتکل کیوتو در سال ۱۹۹۷ تا کنفرانس اخیر سازمان ملل متحد، یافتن راهکارهای جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تبدیل به موضوع اصلی این نشست‌ها گردید [۳]. دی‌اکسید کربن، به‌عنوان بزرگ‌ترین عامل انتشار گازهای

How to Cite this Article:

[1] M. Miri, A. Akbari, and J. A. Esfahani, "Thermoeconomics analysis and optimization of a geothermal-based power and heat generation system using genetic algorithm," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 183-201, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.515220.1118> (in Persian)



ENEL ایتالیا، مطالعاتی را برای شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین‌گرمایی آغاز کرد. نتایج این تحقیقات، منجر به احداث نیروگاه مشکین شهر در استان اردبیل شد. براساس مطالعات انجام شده توسط دانشگاه کیوشو ژاپن<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۰، مناطق مستعد برای تولید برق از انرژی زمین‌گرمایی در ایران شامل: (۱) سبلان (شهر مشکین شهر)، (۲) خوی ماکو، (۳) دماوند و (۴) سه‌سند شناسایی شده‌اند. همچنین، محدوده دمای سیال خروجی از چاه‌های زمین‌گرمایی در ایران بین ۱۶۵ الی ۲۴۰ سانتی‌گراد برآورد شده است [۶ و ۱۲].

تولید هم‌زمان برق و گرمایش<sup>۴</sup>، رویکردی نوین در استفاده بهینه از انرژی است که در این سامانه، حرارت ناشی از فرآیند تولید برق، به جای اتلاف، به جهت مصارف گرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد این سامانه، نظیر کاهش محسوس مصرف سوخت‌های فسیلی، کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی و همچنین کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، سبب شده است تا در ساختمان‌های تجاری، اداری، بیمارستان‌ها و صنایع، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این مزایا، هزینه اولیه نسبتاً بالا برای برخی تجهیزات و پیچیدگی طراحی زیرساخت‌های حرارتی، ایجاب می‌کند که پیش از اجراء، ارزیابی‌های دقیق فنی و اقتصادی صورت پذیرد. با این حال، تجربه بسیاری از کشورها نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش‌های تولید انرژی ترکیبی، به‌ویژه تولید هم‌زمان برق و حرارت، به‌علت مزایای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت، با رشد قابل توجهی روبه‌رو بوده است [۱۴ و ۱۵].

روزننتی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی ارزیابی پایداری زیست‌محیطی یک سامانه کوچک تولید هم‌زمان برق و حرارت با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی دماپایین و خورشیدی پرداختند. در این پژوهش، از یک چرخه رانکین با منابع انرژی تجدیدپذیر زمین‌گرمایی و خورشیدی استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که سیال R245fa به دلیل نیاز کمتر به سطوح مبدل حرارتی و داشتن راندمان بهتر در ORC، اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به سایر سیال‌ها دارد. همچنین، سامانه ترکیبی زمین‌گرمایی-خورشیدی در مقیاس کوچک به‌ویژه در مناطقی که چاه‌های زمین‌گرمایی کم‌دما یا متروکه در دسترس هستند، می‌تواند رویکردی جذاب و به نسبت پایدار برای تأمین هم‌زمان برق و حرارت باشد [۱۶].

تقاضای انرژی داخلی خود روبه‌رو است. [۷]. سرانه انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران، از ۶/۸ تن در سال ۲۰۰۸ به ۷/۰۱ تن در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است. همچنین، براساس گزارش مرکز ملی و پایش خشکسالی ایران<sup>۱</sup> میانگین دمای کشور در ۳۰ سال گذشته ۱/۶۸ سانتی‌گراد افزایش یافته است [۴]. در مقابل، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ردپای کربن کم‌تری دارد و می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند [۶].

ایران با دارا بودن نقاط بادخیز و ساعات آفتابی فراوان، از پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی‌های بادی و خورشیدی برخوردار است. همچنین ۳۱۰۰۰ کیلومتر مربع از خاک ایران (معادل ۸/۸٪ از کل مساحت ایران)، به عنوان سایت‌های بالقوه انرژی زمین‌گرمایی شناخته می‌شوند. لازم به ذکر است که این پتانسیل بالا به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص ایران و قرار گرفتن بر روی کمربند زمین‌گرمایی می‌باشد [۸ و ۹]. همچنین، انرژی زمین‌گرمایی به دلیل پاک بودن، پایداری (برخلاف انرژی‌های خورشیدی و بادی که وابسته به شرایط آب و هوایی هستند) و قابلیت اطمینان بالا، به عنوان یکی از منابع امیدوارکننده بشمار می‌آید [۱۰]. امروزه این انرژی علاوه بر تولید توان و گرما، در استخراج نفت، تولید کاغذ، تولید غبار سیلیس و غیره کاربرد دارد [۶].

قدمت تاریخی استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به هزاران سال قبل بازمی‌گردد. در گذشته، این انرژی را به جهت مصارف مختلفی مانند درمان، حمام کردن، پخت‌وپز و سایر نیازهای روزمره، مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱۱]. به عنوان مثال، رومیان باستان برای گرمایش شهر پمپئی<sup>۲</sup> از انرژی زمین‌گرمایی استفاده می‌کردند. امروزه نیز کشورهایمانند ایسلند بطور گسترده از این انرژی بهره می‌برند، بطوری که حدود ۸۵٪ از تقاضای گرمایشی این کشور توسط انرژی زمین‌گرمایی تأمین می‌شود. این مثال‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای این منبع انرژی پایدار و کارآمد در طول تاریخ و در دنیای مدرن است [۸ و ۱۲].

اولین ماشین گرمایی با منبع حرارتی زمین‌گرمایی در سال ۱۹۰۳ توسط شاهزاده پیرو گینوری راه‌اندازی شد [۱۲]. براساس آمار منتشر شده در سال ۲۰۱۹، ظرفیت نیروگاه‌های زمین‌گرمایی در جهان به ۱۳۹۳۱ مگاوات رسیده است [۱۳]. در سال ۱۹۷۶ نیز، وزارت نیروی ایران با همکاری شرکت‌های بین‌المللی فعال در حوزه انرژی، از جمله

<sup>3</sup> Kyushu University

<sup>4</sup> Combined Heat and Power

<sup>1</sup> National Drought Warning and Monitoring Center of Iran

<sup>2</sup> Pompeii

از طرح‌های CHP، راندمان انرژی نسبت به نیروگاه سنتی تولیدکننده برق خالص، تا بیش از ۲۰٪ بهبود می‌یابد که در منابع زمین‌گرمایی با دمای پایین و دبی کم، چشمگیرتر است [۱۹].

چن<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ به تحلیل عملکرد ترمودینامیکی و بهینه‌سازی چندمعیاره یک سامانه دورگه‌ای تولید هم‌زمان برق و گرما با بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی پرداختند. پژوهش حاضر، به بررسی سامانه‌ی ترکیبی می‌پردازد که در آن، یک موتور درون‌سوز گازسوز همراه با یک پمپ حرارتی جذبی و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به‌منظور تأمین برق و گرمایش یک ساختمان ادغام شده‌اند. در این ترکیب، از گرمای آب داغ موتور برای پیش‌گرمایش آب ورودی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و نیز تغذیه پمپ حرارتی جذبی استفاده می‌شود. به‌منظور دستیابی به بالاترین کارایی انرژی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انعطاف‌پذیری، از یک روش بهینه‌سازی چندمعیاره استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه پیشنهادی در حالت بهینه، حدود ۳۰/۲۶ درصد انرژی اولیه نسبت به سامانه مرجع صرفه‌جویی می‌شود. علاوه بر این، سامانه ترکیبی ۴۰ الی ۸۰ درصد هزینه‌های سالانه را نسبت به حالت مرجع کاهش می‌دهد [۲۰].

وانگ<sup>۱</sup> و وانگ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی یک سامانه هیدروژن‌سازی هسته‌ای مبتنی بر راکتور گازی با دمای بسیار بالا (VHTR) و چرخه مس-کلر (Cu-Cl) پرداختند. در این پژوهش، سه پیکربندی مختلف شامل چرخه رانکین بخار (SRC)، چرخه برایتون با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی (SCBC) و ترکیب چرخه SCBC با چرخه رانکین آلی (ORC) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دماهای ورودی پایین به راکتور، بازده حرارتی چرخه SCBC کمتر از ۳۷ درصد است. ترکیب ORC با SCBC منجر به بهبود بازده حرارتی در حدود ۰/۷ تا ۳/۷ درصد و افزایش بازده انرژی در حدود ۱/۰ تا ۵/۳ درصد شده است. همچنین افزایش نسبت فشار در کمپرسور SCBC نقش مؤثری را در بهبود عملکرد کلی سامانه ایفا می‌کند [۲۱].

پژوهش حاضر، با معرفی و بررسی یک سامانه ترکیبی نوین برای تولید هم‌زمان برق و حرارت مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی، رویکردی نوین در بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. در این تحقیق، سامانه‌ای خلاقانه متشکل از چرخه برایتون فوق‌بحرانی و چرخه رانکین

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تحلیل انرژی و انرژی یک سامانه آب‌شیرین‌کن و تولید هم‌زمان سرما، گرما و برق مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی پرداختند. در این پژوهش، از یک چرخه کالینای اصلاح شده، آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس استفاده شده است. نتایج این کار نشان می‌دهد که این سامانه توانایی تولید ۴۶/۷۷ کیلووات برق خالص، ۴۵۱/۳۶ کیلووات گرمایش، ۵۲/۳۸ کیلووات سرمایش و ۰/۷۹ کیلوگرم بر ثانیه آب شیرین، با بازده انرژی ۳۸/۱ درصد را دارد. همچنین، افزایش اختلاف دمای حداقلی در مبدل حرارتی اصلی، می‌تواند بازده انرژی در این ساختار خاص را به مقدار کمی افزایش دهد؛ چرا که بخشی از انرژی ذخیره‌شده صرف گرمایش خروجی می‌شود و از دید انرژی مفیدتر است. این نتایج حاکی از عملکرد کارآمد و چندمنظوره سامانه در بهره‌برداری بهینه از انرژی و تأمین هم‌زمان نیازهای مختلف انرژی است [۱۷].

ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی ترمودینامیکی و اقتصادی یک سامانه یکپارچه CCHP جدید که از زیست‌توده، گاز طبیعی و انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان تغذیه مشترک استفاده می‌کند، پرداختند. در این پژوهش، یک سامانه ترکیبی تولید توان، گرمایش و سرمایش، طراحی و تحلیل شده که سه منبع انرژی (زیست‌توده، گاز طبیعی و انرژی زمین‌گرمایی) را به‌صورت هم‌زمان به کار می‌گیرد. اجزای اصلی سامانه شامل بخش گازسازی زیست‌توده، چرخه توربین بخار، چرخه توربین گاز، پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و واحد بازیافت حرارت (سردکن جذبی) است. یافته‌های این پژوهش، نشان می‌دهد که با استفاده از گاز طبیعی، چگالی انرژی سوخت ترکیبی افزایش یافته و قابلیت اطمینان سامانه بالاتر می‌رود و به‌کارگیری انرژی زمین‌گرمایی در قالب پمپ حرارتی، باعث افزایش ظرفیت گرمایشی و بهبود راندمان کلی سامانه می‌شود. همچنین، هزینه انرژی هم‌سطح شده در این شرایط به حدود ۰/۳۱۵\$/kWh می‌رسد [۱۸].

ون اردوگه<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰۸ به بهینه‌سازی نیروگاه تولید هم‌زمان برق و گرما برای منابع زمین‌گرمایی با دمای پایین پرداختند. در این مطالعه، چند پیکربندی مختلف از سامانه‌های تولید هم‌زمان گرما و برق با استفاده از منابع زمین‌گرمایی در محدوده دماهای بین ۱۱۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است. نتایج و دستاوردهای کلیدی حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده

<sup>4</sup> Qi Wang

<sup>1</sup> Zhang

<sup>2</sup> Van Erdeweghe

<sup>3</sup> Chen

۲- آب خالص به عنوان سیال زمین‌گرمایی [۲۲]

۳- فشار و دمای محیط به ترتیب ۱ bar و ۲۵ C است [۲۲].

۴- تمامی فرایندها آدیاباتیک هستند [۲۳].

۵- صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و نیز افت فشار

درون لوله‌ها و مبادله‌کن‌های حرارتی [۲۴]

### ۳- مدل‌سازی سامانه پیشنهادی

جهت طراحی و مدل‌سازی سامانه پیشنهادی، از داده‌های ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده است. همچنین، مدل‌سازی سامانه پیشنهادی مطابق با شکل ۲، شامل تجزیه و تحلیل ترمودینامیک می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از داده‌های جدول ۲، تجزیه و تحلیل‌های انرژی، انرژی و اقتصادی به ترتیب انجام می‌گیرد. در بخش‌های آتی، به تفکیک هر یک از این تجزیه و تحلیل‌ها پرداخته خواهد شد.

### ۳-۱- تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی

برای تجزیه و تحلیل سیستم قوانین اساسی حاکم بر رفتار سیالات بیان می‌گردد. قانون بقای جرم در شرایط پایا به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

که در آن زیرنویس‌های  $i$  و  $e$  به ترتیب بیانگر ورودی و خروجی بوده و  $\dot{m}$  بیانگر شدت جریان جرمی است. باین‌حال، قانون بقای انرژی در شرایط پایا تعریف می‌شود:

$$Q_{cv} + \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e + \dot{W}_{cv} \quad (2)$$

که در این رابطه  $Q$ ،  $h$  و  $\dot{W}$  به ترتیب بیانگر نرخ گرمای منتقل شده، آنتالپی مخصوص و توان تولیدی یا مصرفی است [۲۳]. بالانس انرژی در شرایط پایا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{I} = \sum Q_j (1 - T_0/T) + \sum \dot{m}_i ex_i - \sum \dot{m}_e ex_e - \dot{W} \quad (3)$$

که در آن،  $\dot{I}$  نرخ تخریب انرژی بوده و سمت راست معادله به ترتیب انرژی‌های جایگزین انتقال حرارت، انرژی جریان ورودی، انرژی جریان خروجی و توان تولیدی یا مصرفی را بیان می‌کنند؛ بنابراین، انرژی جریان تعریف می‌شود:

$$ex = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (4)$$

که در این رابطه،  $s$  بیانگر آنتروپی ویژه است [۲۲].

آلی طراحی و تحلیل شده است. ویژگی بالقوه این پژوهش، رویکرد جامع آن در بررسی ابعاد گوناگون عملکرد سامانه است. در گام نخست، سامانه پیشنهادی از منظر انرژی و انرژی به طور دقیق تحلیل شده است تا شناختی عمیق از رفتار ترمودینامیکی آن حاصل شود. سپس، از شاخص هزینه کارخانه مهندسی شیمی<sup>۱</sup> به عنوان یک رویکرد اقتصادی نوین جهت ارزیابی دقیق هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سامانه استفاده شده است که منجر به افزایش دقت و کارآمدی تحلیل اقتصادی شده است. در ادامه، بهینه‌سازی عامل‌های کلیدی سامانه به منظور ارتقای عملکرد و به حداکثر رساندن بازده، مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب این رویکردهای نوآورانه، این پژوهش را به یک مطالعه پیش‌گام در زمینه طراحی و تحلیل سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت با منابع انرژی زمین‌گرمایی تبدیل کرده و مسیر جدیدی برای توسعه فناوری‌های مرتبط گشوده است.

### ۲- معرفی سامانه و فرضیات حاکم

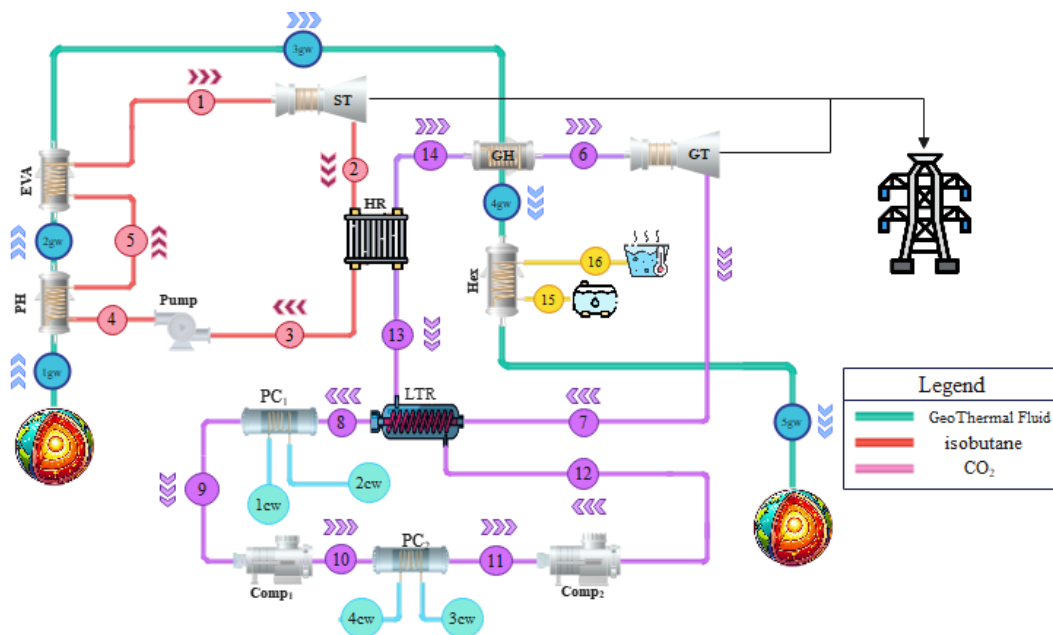
سامانه پیشنهادی تولید هم‌زمان حرارت و توان در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل، انرژی زمین‌گرمایی حرارت لازم برای چرخه رانکین آلی ORC با سیال عامل ایزوبوتان و چرخه برایتون گسترش یافته با سیال عامل کربن‌دی‌اکسید را تأمین می‌کند. همچنین از این منبع انرژی برای گرمایش آب مصرفی نیز استفاده می‌شود که به افزایش بهره‌وری کلی سامانه منجر خواهد شد. ویژگی منحصر به فرد این سامانه، استفاده بهینه از انرژی زمین‌گرمایی در دو چرخه مکمل است که منجر به افزایش کارایی و کاهش تلفات انرژی می‌شود. این ترکیب نوآورانه می‌تواند جایگزین بالقوه‌ای برای روش‌های مرسوم تولید توان در مناطق دارای منابع زمین‌گرمایی باشد.

در این سامانه، چرخه رانکین آلی چهار فرایند تراکم، جذب گرما، انبساط و دفع گرما را طی کرده جدول ۱ به طور کامل تمامی فرایندهای صورت گرفته در این چرخه را به اشتراک می‌گذارد. از سوی دیگر، چرخه برایتون بهبود یافته علاوه بر این فرایندها، شامل بازیافت حرارتی و دو مرحله تراکم است که به افزایش بازده سامانه کمک شایانی می‌کند. در نهایت، توان خالص تولیدی این سامانه ترکیبی، به شبکه برق منتقل شده و به عنوان یک منبع پایدار و کارآمد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرضیات حاکم بر این سامانه عبارت است از:

۱- شرایط پایا [۲۲]

<sup>1</sup> Chemical Engineering Plant Cost Index



شکل ۱: سامانه تولید همزمان برق و حرارت

جدول ۱: تشریح فرآیندهای چرخه رانکین آبی

چرخه	وسيله	موقعيت	فرآیند	حالت
ORC	ST	۱ ← ۲	انبساط	بخار مافوق داغ ← بخار مافوق داغ
	HR	۲ ← ۳	چگالش	بخار مافوق داغ ← مایع اشباع
	Pump	۳ ← ۴	تراکم	مایع اشباع ← مایع متراکم
	PH	۴ ← ۵	پیش گرمایش	مایع متراکم ← مایع اشباع
	Eva	۱ ← ۵	تبخیرکننده	مایع اشباع ← بخار اشباع

### ۲-۳- بازده‌های کلی

نرخ توان خالص تولیدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{ST} + \dot{W}_P + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{Comp1} + \dot{W}_{Comp2} \quad (5)$$

همچنین، نرخ حرارت جذب شده توسط سامانه و نرخ حرارت صرف شده به جهت گرمایش آب به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{geo} (h_{gw1} - h_{gw2}) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{water} (h_{16} - h_{15}) \quad (7)$$

بنابراین، بازده انرژی کلی سامانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{heating}}{\dot{Q}_{in}} \quad (8)$$

نرخ تخریب انرژی کل سامانه عبارت است از:

جدول ۲: داده‌های استفاده شده در طراحی سامانه پیشنهادی

مرجع	مقدار	مشخصه
[۲۲]	۱۷۵ C	دمای سیال زمین گرمایی
[۲۲]	۷۰۰۰ kPa	فشار سیال زمین گرمایی
[۲۲]	۸۳ kg/s	شدت جریان جرمی سیال زمین گرمایی
[۲۴]	۱۳۰۰ kPa	فشار پیش‌بینی ORC
[۲۴]	۵۰۰ kPa	فشار کمینه ORC
[۲۴]	٪۸۵	بازده ایزنتروپیک پمپ و توربین بخار
[۲۳]	٪۹۰	بازده ایزنتروپیک توربین گاز
[۲۳]	۷۴۰۰ kPa	فشار کمینه IRBC
[۲۳]	۱۰۷۰۰ kPa	فشار میانی IRBC
[۲۳]	۱۴۰۰۰ kPa	فشار پیش‌بینی IRBC
[۲۳]	۳۲ C	دمای کمینه IRBC
[۲۳]	۵ C	اختلاف دمای پینچ پوینت

باتوجه به روابط اساسی ذکر شده، تحلیل ترمودینامیکی تمامی اجزاء استفاده شده در شکل ۱، در جدول ۳ گزارش شده است.

اگرژی اجزاء هر سیکل محاسبه می‌شوند. بازده اگرژی کل سامانه به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15})}{\dot{E}_{GW1} - \dot{E}_{GW5}} \quad (10)$$

$$\dot{I}_{tot} = \dot{I}_{ORC} + \dot{I}_{IRBC} + \dot{I}_{Hex} \quad (9)$$

که در رابطه فوق  $\dot{I}_{ORC}$  و  $\dot{I}_{IRBC}$  به ترتیب تخریب اگرژی چرخه رانکین آلی و چرخه برایتون بهبودیافته هستند که از مجموع تخریب

جدول ۳: روابط حاکم ترمودینامیکی برای تمامی اجزاء

اجزاء	بقای جرم	بقای انرژی	تخریب اگرژی
توربین‌ها	$\dot{m}_i = \dot{m}_e$	$\dot{W}_T = \dot{m}_i(h_i - h_e)$	$\dot{I}_T = \dot{E}_i - \dot{E}_e + \dot{W}_T$
پمپ	$\dot{m}_i = \dot{m}_e$	$\dot{W}_P = \dot{m}_i(h_i - h_e)$	$\dot{I}_P = \dot{E}_i - \dot{E}_e + \dot{W}_P$
کمپرسورها	$\dot{m}_i = \dot{m}_e$	$\dot{W}_C = \dot{m}_i(h_i - h_e)$	$\dot{I}_C = \dot{E}_i - \dot{E}_e + \dot{W}_C$
مبادله‌کن‌های حرارتی	$\dot{m}_{i,c} = \dot{m}_{e,c} = \dot{m}_c, \dot{m}_{i,H} = \dot{m}_{e,H} = \dot{m}_H$	$\dot{m}_c(h_{i,c} - h_{e,c}) = \dot{m}_H(h_{i,H} - h_{e,H})$	$\dot{I}_{Hex} = \dot{E}_{i,H} - \dot{E}_{e,H} + \dot{E}_{i,c} - \dot{E}_{e,c}$

مجموع هزینه‌های اجزاء سامانه پیشنهادی مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$Z_{tot,2023} = Z_k \left( \frac{CEPCI_{2023}}{CEPCI_0} \right) \quad (12)$$

که در آن  $Z_k$  و  $CEPCI_0$  به ترتیب نشان دهنده معادله و شاخص هزینه کارخانه مهندسی شیمی در سال اول برای هر جزء است که در جدول ۴ گزارش شده است. همچنین،  $CEPCI_{2023}$  نشان دهنده شاخص هزینه کارخانه مهندسی شیمی برای سال ۲۰۲۳ است که برابر ۸۰۰/۶ می‌باشد [۲۹].

کل هزینه سرمایه سامانه هم‌سطح شده که در تمام روزهای سال کال می‌کنند از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\dot{Z}_{tot,2023,Capital} = \frac{CRF_{Capital}}{NN_{GeoThermal}} Z_{tot,2023} \quad (14)$$

که در رابطه فوق  $NN_{GeoThermal}$  ساعات عملیاتی انرژی زمین گرمایی را نشان می‌دهد و برابر با ۸۷۶۰ ساعت می‌باشد. هزینه لوله‌های و اتصالات ۱۰٪ از تجهیزات را شامل می‌شود، هزینه تعمیر و نگهداری عبارت است از:

$$\dot{Z}_{tot,2023,OM} = \frac{CRF_{OM} \times f}{NN_{GeoThermal}} \dot{Z}_{tot,2023,Capital} \quad (15)$$

### ۳-۳- تحلیل اقتصادی

به جهت تحلیل اقتصادی از شاخص هزینه کارخانه مهندسی شیمی (CEPCI) استفاده شده است. این شاخص به‌عنوان یک ابزار کلیدی در ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی شمرده شده و از سال ۱۹۶۳ به طور ماهانه به‌روزرسانی می‌شود. یکی از نکات قوت و برجسته CEPCI نسبت به دیگر شاخص‌ها، جامعیت و پوشش کامل آن از تمام جنبه‌های هزینه‌ای پروژه‌های صنعتی است [۲۵]. با این حال، ضریب بازگشت سرمایه مطابق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$CRF_{capital} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

در معادله فوق  $n = 20$  و  $i = 0.1$  است و به ترتیب طول عمر و نرخ بهره سالانه تعریف می‌شوند [۲۶].

معادله زیر به هدف محاسبه هزینه نگهداری با تأثیر مستقیم بر ضریب بهره سالانه، نرخ تورم، طول عمر سامانه و ارزش نجات تعریف می‌شود:

$$CRF_{O,M} = \left[ \frac{1+r}{i-r} \right] \left[ 1 - \left( \frac{1+r}{1+i} \right)^n \right] \quad (12)$$

که در این معادله  $r$  نرخ تورم بوده و برابر ۰/۰۴ است [۲۷].

جدول ۴: هزینه اجزاء بکار رفته در سامانه پیشنهادی بر اساس شاخصه هزینه کارخانه مهندسی شیمی

وسیله	هزینه	سال مرجع	CEPCI	مرجع
Eva	$Z_{EVA} = 1921.5A_{Eva}^{0.4887}$	۲۰۰۱	۳۹۷	[۳۰]
PH	$Z_{PH} = 1921.5A_{PRH}^{0.4887}$	۲۰۰۱	۳۹۷	[۳۰]
ST	$Z_{ST} = 4405W_{ST}^{0.7}$	۲۰۰۱	۳۹۷	[۲۸]
Pump	$Z_{Pump} = 2000W_P^{0.71}$	۲۰۰۱	۳۹۷	[۳۰]
Cond	$Z_{Cond} = Z_{ref,Cond}(A_i/A_{ref}), Z_{ref} = 8000$	۲۰۰۰	۳۹۴/۱	[۲۷]
Comp	$Z_C = \frac{71.1\dot{m}_i}{0.9 - \eta_{aC}} \left(\frac{P_e}{P_i}\right) \ln\left(\frac{P_e}{P_i}\right)$	۱۹۹۴	۳۶۸/۱	[۲۸]
GT	$Z_{GT} = \frac{479.34\dot{m}_i}{0.92 - \eta_{aGT}} \ln\left(\frac{P_e}{P_i}\right) (1 + \exp(0.036T_i - 54.4))$	۱۹۹۴	۳۶۸/۱	[۲۸]
PC	$Z_{PC} = 2681A_{PCH}^{0.59}$	۱۹۸۶	۳۱۸/۴	[۲۸]
GH	$Z_{GH} = 2681A_{HR}^{0.59}$	۱۹۸۶	۳۱۸/۴	[۲۸]
Reg	$Z_{LTR} = 2681A_{LTR}^{0.59}$	۱۹۸۶	۳۱۸/۴	[۲۸]

### ۳-۴- تحلیل زیست محیطی

انرژی زمین گرمایی یک منبع پایدار و دوستدار محیط زیست است که در مقایسه با سوخت های فسیلی متداول، انتشار حداقل دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) را به همراه خود دارد [۳۴]. نرخ انتشار دی اکسید کربن ناشی از انرژی زمین گرمایی را می توان مطابق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$EF = LCCE (\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Heating}) \times \frac{24 \times 365}{10^6} \quad (۲۰)$$

که در رابطه فوق، LCCE نرخ انتشار دی اکسید کربن در طول چرخه عمر نیروگاه زمین گرمایی از زمان نصب تا پایان عمر عملیاتی بوده و معادل  $122 \text{ kg/kwh}$  است [۳۴].

به جهت تحلیل آسیب های زیست محیطی به وجود آمده ناشی از ناکارآمدی های اجزاء چرخه، ضریب تأثیر گذاری اگزرو محیطی زیستی تعریف می شود. این پارامتر به صورت زیر قابل محاسبه است [۳۴]:

$$EEI = \frac{\dot{I}_{tot}}{\dot{E}_{gw1}} \quad (۲۱)$$

در معادله فوق  $f$  عامل نگهداری مربوط به هزینه خرید تعریف می شود و برابر با  $0.1$  است. باتوجه به موارد ذکر شده، نرخ هزینه کل به شرح زیر محاسبه می شود:

$$\dot{Z}_{tot,2023} = \dot{Z}_{tot,2023,OM} + \dot{Z}_{tot,2023,Capital} \quad (۱۶)$$

مساحت مبادله کن های گرمایی که در جدول ۵ گزارش شده اند، مطابق رابطه زیر حساب می شوند [۳۱]:

$$A_{HEX} = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{LMTD}} \quad (۱۷)$$

که در آن  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت بوده و مقادیر آن در جدول ۵ برای تمامی مبادله کن های حرارتی استفاده شده گزارش شده است. همچنین  $\Delta T_{LMTD}$  به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{H,in} - T_{C,out}) - (T_{H,out} - T_{C,in})}{\ln\left(\frac{T_{H,in} - T_{C,out}}{T_{H,out} - T_{C,in}}\right)} \quad (۱۸)$$

بنابراین، هزینه هم سطح شده تولید تمامی محصولات<sup>۱</sup> که شامل توان خالص تولیدی و جریان آب گرم می شود، به صورت زیر است [۳۳]:

$$LCOP = \frac{\dot{Z}_{tot,2023}}{\dot{W}_{tot} + \dot{Q}_{heating}} \quad (۱۹)$$

<sup>۲</sup> Exergoenvironmental

<sup>۱</sup> levelized cost of products

## ۳-۵- بهینه‌سازی

به‌منظور دستیابی هم‌زمان به مقادیر بهینه سه تابع هدف اصلی که شامل بازده انرژی، بازده انرژی و شاخص هزینه سطحی محصولات می‌شود، بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) در محیط نرم‌افزار EES انجام می‌گیرد. در این راستا، ابتدا عامل‌های اصلی طراحی سامانه به‌عنوان متغیرهای تصمیم تعیین می‌شوند. سپس الگوریتم ژنتیک، با ایجاد جمعیتی اولیه از جواب‌های ممکن و اعمال متوالی عملگرهای ژنتیکی (انتخاب، جابجایی و جهش) در نسل‌های گوناگون، ترکیبی را جست‌وجو می‌کند که در آن، بازده انرژی و انرژی گداخته شده و درعین حال، مقدار LCOP تا حد ممکن کاهش یابد. ساختار کلی این فرایند و شیوه اعمال آن در نرم‌افزار EES به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{Maximize:} \quad (22)$$

$$\eta_{en} (\Delta T_{EVA}, P_{\max-IRBC}, P_{\max-ORC}, \Delta T_{HR})$$

$$\text{Maximize:} \quad (23)$$

$$\eta_{ex} (\Delta T_{EVA}, P_{\max-IRBC}, P_{\max-ORC}, \Delta T_{HR})$$

$$\text{minimize:} \quad (24)$$

$$\eta_{en} (\Delta T_{EVA}, P_{\max-IRBC}, P_{\max-ORC}, \Delta T_{HR})$$

$$20 \geq \Delta T_{EVA} (C) \geq 5 \quad (25)$$

$$20 \geq \Delta T_{HR} (C) \geq 5 \quad (26)$$

$$15000 \geq P_{\max-IRBC} (\text{kPa}) \geq 12500 \quad (27)$$

$$1000 \geq P_{\max-ORC} (\text{kPa}) \geq 1500 \quad (28)$$

جدول ۵: مقادیر ضریب انتقال حرارت کلی برای مبدل‌های حرارتی

مرجع	$U \left( \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$	مبدل‌کن حرارتی
[۳۱]	۰/۹	Eva
[۳۱]	۰/۰۹۰	PH
[۳۱]	۱	Cond
[۳۲]	۱	Hex

## ۴- اعتبارسنجی

برای ارزیابی قابلیت اطمینان و دقت سامانه پیشنهادی، این بخش یک ارزیابی سامان‌مند از روش‌ها و اجزای مورد استفاده در مطالعه ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی برای سامانه‌های ORC و IRBC مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. جدول ۶ مقایسه‌ای دقیق بین نتایج این مطالعه و یافته‌های گزارش شده در منابع علمی ارائه می‌دهد. این تحلیل بر سازگاری عملکرد سامانه پیشنهادی با معیارهای استاندارد تأکید دارد.

## ۵- نتایج و بحث

این بخش شامل یافته‌های اصلی پژوهش حاضر است که شامل تحلیل ترموآکونومیک سامانه پیشنهادی است. بدین منظور، بررسی نتایج اولیه و تحلیل پارامتریک می‌تواند در ارزیابی سامانه مفید باشد.

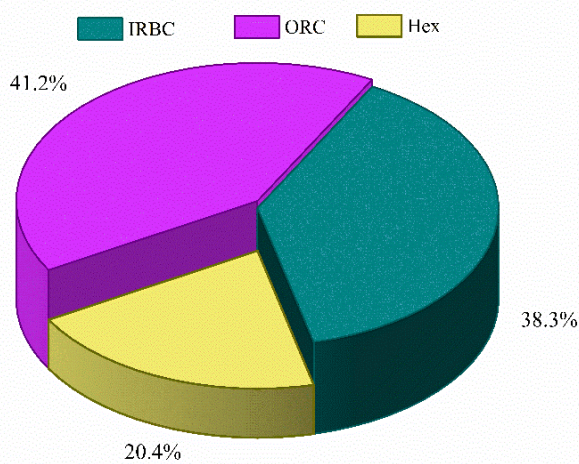
## ۵-۱- نتایج ترموآکونومیک

نتایج حاصل از تحلیل ترموآکونومیک سامانه پیشنهادی در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق این جدول، سامانه پیشنهادی با توان خالص تولیدی ۳۵۸۵ kW و ۱۲۲۷۸ kW حرارت مصرف شده به جهت گرمایش آب، بازده انرژی ۴۲/۹٪ و بازده انرژی ۴۷/۳۱٪ را به ثبت رسانده است. همچنین، نتایج اقتصادی و زیست‌محیطی نشان می‌دهند که هزینه سطحی محصولات برابر ۰/۰۱۱۵۳ \$/kWh بوده و نرخ انتشار CO2 معادل ۱۶/۹۵ tone/yr است.

نرخ تخریب انرژی زیر چرخه‌های IRBC، ORC و Hex در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، چرخه رانکین آلی دارای بیشترین نرخ تخریب انرژی بوده و بعد به ترتیب چرخه برایتون بهبود یافته و مبدل حرارتی استفاده شده به جهت گرمایش آب مصرفی دارای بیشترین نرخ تخریب انرژی هستند. تخریب انرژی تمامی اجزاء استفاده شده در شکل ۴ به صورت نمودار سکنی نمایش داده شده است. مطابق این شکل، مبدل‌کن حرارتی به علت وجود اختلاف دمای بسیار میان جریان‌های سرد و گرم، بیشترین نرخ تخریب انرژی را به خود اختصاص داده‌اند که Hex و HR به ترتیب با نرخ‌های ۹۶۳/۶kW و ۷۹۲/۲ kW دارای بیشترین نرخ تخریب انرژی هستند.

جدول ۶: اعتبارسنجی پژوهش حاضر

سامانه	مؤلفه‌های عملکردی	کار حاضر	کار مرجع	درصد اختلاف
مقایسه میان کار حاضر با پژوهش کیانفر و همکاران [۲۲]:				
	$\dot{I}_{HPT} (kW)$	۲۵۹/۵	۲۵۹/۸	۰/۱۱
ORC	$\dot{I}_{HPE} (kW)$	۶۲۴/۸	۶۲۵/۵	۰/۱۱
	$\dot{W}_{HPT} (kW)$	۱۸۷۱	۱۸۷۴	۰/۱۶
مقایسه میان کار حاضر با پژوهش رویز و همکاران [۲۳]:				
	$\dot{W}_{ele} (kW)$	۶۰۰/۱	۵۹۸/۳۲	۰/۲۹۷۴
IRBC	$\eta_{en-IRBC} (\%)$	۸/۸۵۹	۸/۸۳	۰/۳۲۹۲
	$\dot{m}_{CO2} (kg/s)$	۳۵/۷۸	۳۷/۶۲	۴/۸۹۱



شکل ۲: تخریب انرژی سامانه‌های به کار رفته

### ۵-۲- تحلیل پارامتریک

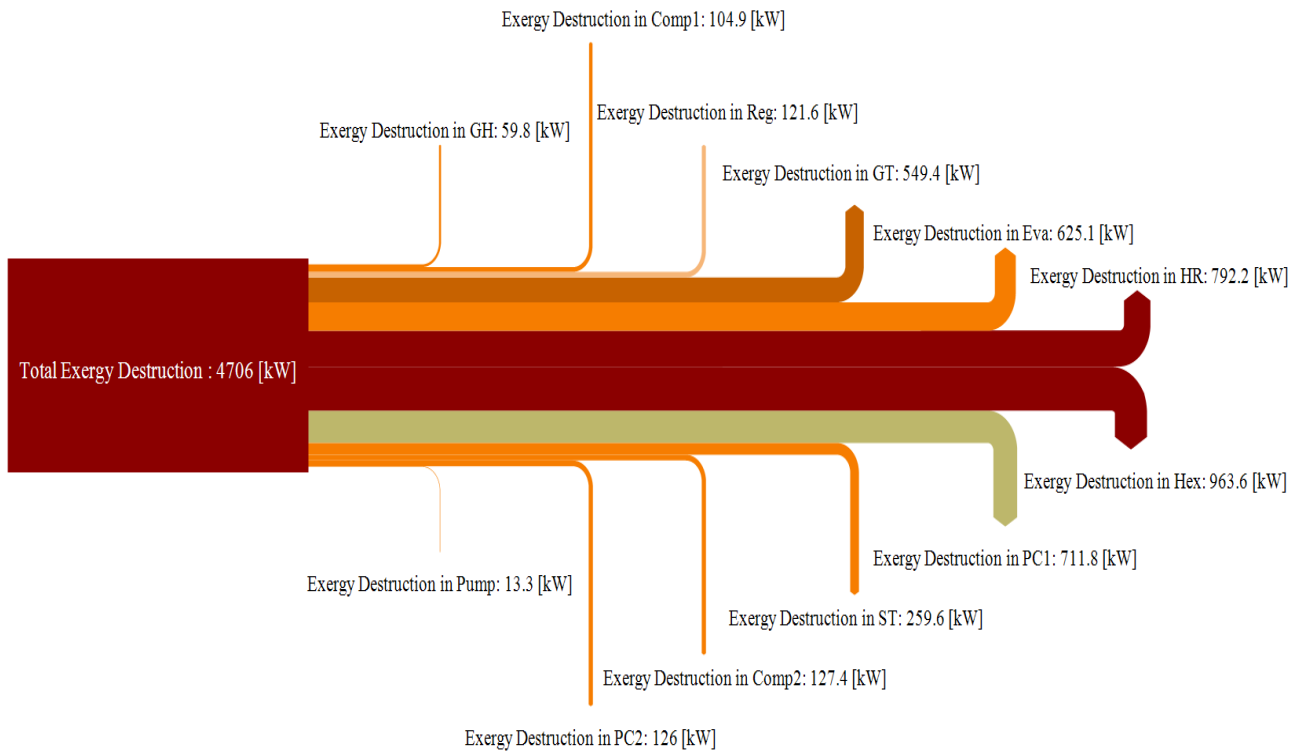
اثر تغییرات  $\Delta TEVA$  در شکل ۴ نمایش داده شده است. با افزایش  $\Delta TEVA$ ، شدت جریان جرمی سیال عامل ORC کاهش یافته و این مسئله موجب کاهش نرخ تخریب انرژی ORC و به دنبال آن کاهش توان خالص تولیدی این چرخه می‌شود. در مقابل مطالب ذکر شده، با افزایش این مؤلفه شدت جریان جرمی چرخه IRBC افزایش یافته که به دنبال خود افزایش نرخ تخریب انرژی و توان خالص در IRBC را به همراه دارد؛ بنابراین، کاهش نرخ تخریب انرژی در ORC همواره غالب‌تر از افزایش نرخ تخریب انرژی در IRBC بوده که این مسئله ابتدا موجب کاهش تخریب انرژی کل شده و سپس مطابق شکل، به بهبود بازده انرژی کمک می‌کند. از طرفی دیگر، تغییرات توان خالص تولیدی ابتدا به بهبود بازده انرژی و کاهش LCOP کمک کرده و

سپس به علت غلبه کردن توان خالص تولیدی ORC به توان خالص کل، بازده انرژی کاهش و LCOP افزایش می‌یابد.

افزایش فشار بیشینه ORC مطابق شکل ۵ تأثیر بسیار مهمی بر روی چرخه می‌گذارد. مطابق این شکل با افزایش  $P_{max-ORC}$ ، بازده انرژی و LCOP به علت افزایش توان خالص تولیدی ORC بهبود می‌یابند. به طوری که با افزایش هر ۱۰۰ kPa فشار بیشینه ORC بازده انرژی حدود ۱/۱٪ افزایش و LCOP حدود ۷/۴٪ کاهش می‌یابد. این افزایش فشار اختلاف دما میان جریان‌ها گرم و سرد مبادله‌کن‌های حرارتی ORC را کاهش داده که در نتیجه موجب کاهش تخریب انرژی کل می‌شود؛ بنابراین، با افزایش توان خالص تولیدی و نیز کاهش نرخ تخریب انرژی، مطابق این شکل بازده انرژی نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش هر ۱۰۰ kPa فشار بیشینه ORC بازده انرژی حدود ۶/۲۹٪ افزایش یافته و نرخ تخریب انرژی کل حدود ۴/۳٪ کاهش می‌یابد.

جدول ۷: نتایج ترموآکونومیک سامانه پیشنهادی

واحد	مقدار	اختصار	مؤلفه
kW	۳۵۸۵	$\dot{W}_{net}$	توان خالص تولیدی سامانه
kW	۱۷۳۹	$\dot{W}_{ORC}$	توان خالص تولیدی چرخه رانکین آلی
kW	۱۸۴۷	$\dot{W}_{IRBC}$	توان خالص تولیدی چرخه برایتون بهبود یافته
kW	۱۲۲۷۸	$\dot{Q}_{heating}$	نرخ حرارت جریان آب گرم
%	۴۲/۹	$\eta_{en}$	بازده انرژی کل سامانه
%	۴۷/۳۱	$\eta_{ex}$	بازده انرژی کل سامانه
kW	۴۷۰۶	$\dot{I}_{tot}$	تخریب انرژی کل سامانه
\$/kWh	۰/۱۱۵۳	LCOP	هزینه هم‌سطح شده تولید محصولات
Tone/yr	۱۶/۹۵	EF	نرخ انتشار کربن دی‌اکسید
-	۰/۴۴۳۴	EI	شاخص انرژی‌زیستی

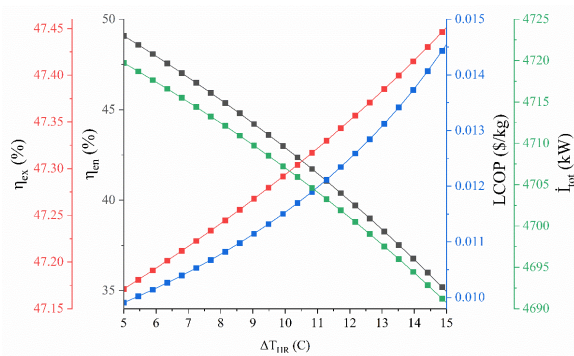


شکل ۳: نرخ تخریب انرژی اجزاء بکار رفته در سامانه پیشنهاد

جدول ۸: خواص ترمودینامیکی سامانه پیشنهادی

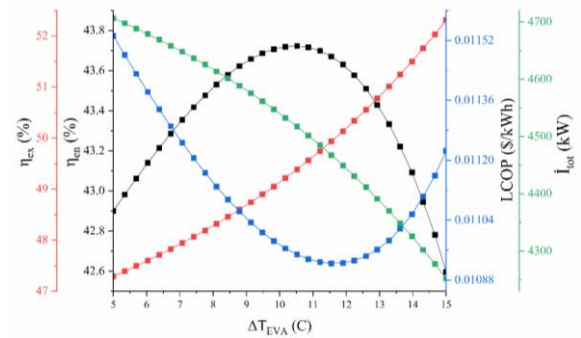
ex (kW)	s (kJ/kg-K)	h (kJ/kg)	P (kPa)	T (°C)	m (kg/s)	موقعیت
۶۳۸۴	-۰/۳۴۲۸	۱۵۴/۲۷۶	۱۳۰۰	۱۲۹/۵	۶۲/۲	۱
۴۲۷۹	-۰/۳۲۸۸	۱۲۴/۶۱۳	۵۰۰	۱۰۲	۶۲/۲	۲
۸۳۴	-۱/۲۵۵	۲۰۶/۸۱۳	۵۰۰	۸۳/۷۷	۶۲/۲	۳
۹۲۷	-۱/۲۵۴	-۲۰۵/۱۰۳	۱۳۰۰	۸۴/۳۲	۶۲/۲	۴
۲۶۳۴	-۰/۹۱۹۵	-۷۷/۹۵	۱۳۰۰	۱۲۹/۵	۶۲/۲	۵
۳۸۴۰۰	۰/۹۲۳۲	-۲۶/۸۳۴	۱۴۵۰۰	۱۰۷	۱۵۴/۴	۶
۳۴۳۹۰	-۰/۹۱۱۳	-۴۹/۲۷۳	۸۰۰۰	۵۹/۶۸	۱۵۴/۴	۷
۳۳۹۵۰	-۱/۰۱۷	-۸۳/۵۱۱	۸۰۰۰	۴۵/۳	۱۵۴/۴	۸
۳۳۲۳۰	-۱/۴۲۶	-۲۱۰/۳۵۳	۸۰۰۰	۳۲	۱۵۴/۴	۹
۳۳۸۶۰	-۱/۴۲۴	-۲۰۵/۶۱۲	۱۰۷۰۰	۳۹/۱۳	۱۵۴/۴	۱۰
۳۳۷۲۰	-۱/۵۰۸	-۲۳۱/۴۱۲	۱۰۷۰۰	۳۲	۱۵۴/۴	۱۱
۳۴۴۸۰	-۱/۵۰۵	-۲۲۵/۶۷۴	۱۴۵۰۰	۳۷/۹۱	۱۵۴/۴	۱۲
۳۴۷۹۰	-۱/۳۹۷	-۱۹۱/۴۳۵	۱۴۵۰۰	۴۹/۶۸	۱۵۴/۴	۱۳
۳۷۴۵۰	-۱/۰۰۷	-۵۷/۹۲۴	۱۴۵۰۰	۹۲/۰۲	۱۵۴/۴	۱۴
۲۶	۰/۲۲۴۴	۶۳/۰۷۷	۱۰۰۱	۱۵	۳۶/۱۱	۱۵
۶۸۴	۱/۰۷۶	۳۳۵/۰۵۵	۱۰۰۱	۸۰	۳۶/۱۱	۱۶

شکل ۷ اثر تغییرات اختلاف دمای میان جریان سردوگرم مبدل حرارتی HR را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش این عامل، IRBC نرخ انرژی بیشتری را جذب کرده و این مسئله موجب افزایش توان خالص تولیدی می‌شود. در مقابل، این افزایش توان خالص تولیدی با کاهش نرخ حرارت صرف شده به جهت گرمایش آب هم‌راستا بوده که نرخ حرارت کاهش یافته همواره غالب‌تر است از افزایش توان خالص تولیدی؛ بنابراین، با افزایش هر یک درجه  $\Delta T_{HR}$  بازده حرارتی حدود  $2/29\%$  کاهش یافته و LCOP حدود  $2/62\%$  افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش این عامل بر روی افزایش نرخ بازگشت‌ناپذیری مؤثر بوده و در نتیجه منجر به کاهش بازده انرژی می‌شود.

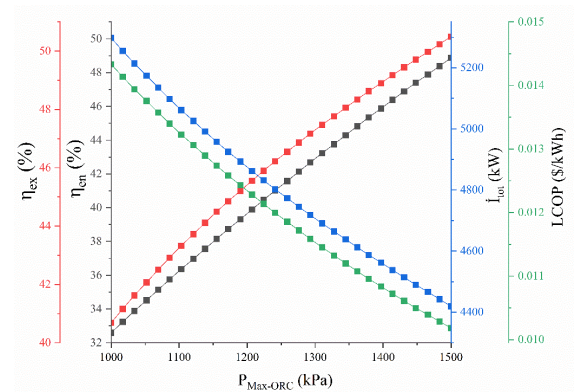


شکل ۷: تأثیر اختلاف دمای مبدل حرارتی HR بر روی توابع هدف مؤثر

اثر کاهش دمای چاه زمین‌گرمایی مطابق شکل ۸ قابل مشاهده است. با کاهش دمای سیال خروجی از چاه زمین‌گرمایی ( $T_{gw1}$ )، انرژی جذب‌شده توسط سامانه پیشنهادی کاهش می‌یابد و در نتیجه، توان خالص تولیدی نیز افت می‌کند. در مقابل، هرچند کاهش  $T_{gw1}$  باعث افزایش نرخ انتقال حرارت به جریان آب مصرفی می‌شود، اما به‌طور کلی، با هر ۵ درجه سلسیوس کاهش در دمای چاه زمین‌گرمایی، بازده انرژی کل سامانه حدود  $8\%$  کاهش می‌یابد. همچنین، کاهش این دما منجر به کاهش نرخ تخریب انرژی کل سامانه شده و در نتیجه، شاخص EEI نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش  $T_{gw1}$  در ابتدا موجب افزایش بازده انرژی می‌شود، اما به دلیل افت توان خالص تولیدی، در ادامه بازده انرژی نیز کاهش می‌یابد. در نهایت، با هر ۵ درجه سلسیوس کاهش در این دما، مقدار LCOP حدود  $4\%$  و مقدار EEI حدود  $2\%$  کاهش می‌یابند.

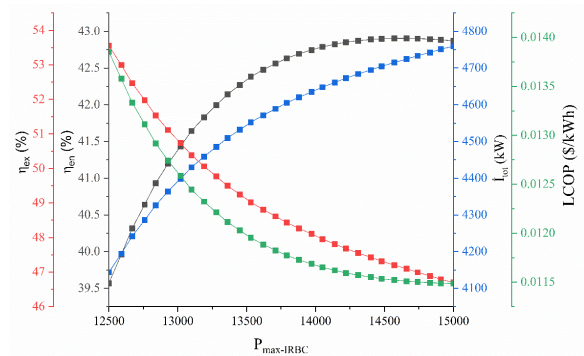


شکل ۴: تأثیر اختلاف دمای اواپراتور بر روی توابع هدف



شکل ۵: تأثیر فشار بیشینه چرخه رانکین آبی بر روی توابع هدف

تغییرات  $P_{max-IRBC}$  در شکل ۶ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش این عامل هرچند که کار مخصوص توربین گاز افزایش می‌یابد؛ اما به دنبال آن کار مخصوص کمپرسور دوم افزایش یافته که در نتیجه موجب کاهش توان خالص تولیدی سامانه پیشنهادی می‌شود. همچنین افزایش این مؤلفه بر افزایش نرخ حرارت منتقل شده به جهت گرمایش آب مصرفی مؤثر بوده است؛ بنابراین، افزایش نرخ حرارت ذکر شد همواره غالب‌تر از کاهش توان خالص تولیدی بوده که در نتیجه موجب افزایش بازده انرژی سامانه پیشنهادی و کاهش LCOP می‌شوند. علاوه بر این، افزایش نرخ تخریب انرژی کل نیز با افزایش این عامل افزایش یافته و به دنبال آن بازده انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۶: تأثیر فشار بیشینه چرخه برایتون بهبود یافته بر روی توابع هدف

جدول ۹: نتایج بهینه‌سازی چندهدفه

واحد	مقدار بهینه شده	اختصار	مؤلفه
kW	۳۶۴۱	$\dot{W}_{net}$	توان خالص تولیدی سامانه
kW	۱۸۰۳۸	$\dot{Q}_{heating}$	نرخ حرارت جریان آب گرم
%	۵۸/۶۳	$\eta_{en}$	بازده انرژی کل سامانه
%	۵۱/۳۶	$\eta_{ex}$	بازده انرژی کل سامانه
kW	۴۲۲۷	$\dot{I}_{tot}$	تخریب انرژی کل سامانه
\$/kWh	۰/۰۰۸۰۵۶	LCOP	هزینه هم‌سطح شده تولید محصولات
-	۰/۴۰۱۷	EEI	شاخص انرژی محیط‌زیستی

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه نوین تولید هم‌زمان برق و حرارت بر پایه انرژی زمین‌گرمایی معرفی و از منظر انرژی، انرژی و اقتصادی به هدف ارائه راهکاری پایدار برای استفاده از منابع تجدیدپذیر در نرم‌افزار EES مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تلفیق دو چرخه رانکین آلی و برایتون بهبود یافته در کنار یک مبدل حرارتی به جهت گرمایش آب، می‌تواند بهره‌وری از انرژی زمین‌گرمایی را به طور چشمگیری افزایش دهد؛ بنابراین، نتایج برجسته این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

- این سامانه توانایی تولید توان خالص  $3585 \text{ kW}$  و نرخ حرارت  $12278 \text{ kW}$  را بر عهده دارد.
- بازده انرژی و انرژی سامانه پیشنهادی به ترتیب  $58.63\%$  و  $51.36\%$  است.
- نرخ تخریب انرژی کل این سامانه و هزینه هم‌سطح شده محصولات به ترتیب  $4706 \text{ kW}$  و  $0.1153 \text{ kWh}/\text{\$}$  است.
- با افزایش هر  $100 \text{ kPa}$  فشار بیشینه چرخه رانکین آلی، بازده انرژی، بازده انرژی و هزینه هم‌سطح شده محصولات به ترتیب  $11.2\%$ ،  $6.29\%$  و  $4.7\%$  افزایش می‌یابد.



شکل ۸: تأثیر دمای چاه زمین‌گرمایی بر روی توابع هدف مؤثر

#### ۵-۳- بهینه‌سازی

نتایج فرایند بهینه‌سازی چندهدفه با کمک الگوریتم ژنتیک در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج بهینه‌سازی سه تابع هدف اصلی یعنی بازده انرژی، انرژی و هزینه سطحی محصولات و دیگر مؤلفه‌های کلیدی مانند توان خالص تولیدی، نرخ حرارت آب گرم، نرخ کل تخریب انرژی و شاخص انرژی محیط‌زیستی در این جدول به اشتراک گذاشته شده است. در این راستا، تعداد نسل‌ها برابر ۶۴ و اندازه جمعیت برابر ۱۶ محاسبه شده‌اند که این مقادیر به صورت پیش‌فرض توسط ساختار داخلی رمز الگوریتم ژنتیک تولید شده‌اند. بازده انرژی و بازده انرژی نسبت به نتایج ارائه شده قبل از بهینه‌سازی به ترتیب حدود  $36.6\%$  و  $8.5\%$  افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده عملکرد چشمگیر سامانه پیشنهادی پس از فرایند بهینه‌سازی است. همچنین، مقدار LCOP و شاخص انرژی محیط‌زیستی به ترتیب حدود  $30\%$  و  $9/4$  نسبت به حالت پایه کاهش یافته‌اند. این کاهش علاوه بر تأیید توجیه‌پذیری اقتصادی سامانه پیشنهادی، حاکی از عملکرد زیست‌محیطی مطلوب‌تر آن نیز هست. به علاوه، سایر مؤلفه‌های مهم از جمله توان خالص تولیدی، نرخ حرارت آب گرم و نرخ کل تخریب انرژی نیز در این جدول ارائه گردیده‌اند. بر اساس داده‌های موجود، مقدار این مؤلفه‌ها پس از بهینه‌سازی به ترتیب  $3641 \text{ kW}$ ،  $18038 \text{ kW}$  و  $4227 \text{ kW}$  برآورد شده است.

dioxide and organic Rankine cycles for waste heat cascade utilization," *Energy*, vol. 2025, p. 136547, May 2025. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2025.136547](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136547)

[2] A. K. Sarker, A. K. Azad, M. G. Rasul, and A. T. Doppalapudi, "Prospect of green hydrogen generation from hybrid renewable energy sources: A review," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 1556, 2023. [Online]. Available: doi: [10.3390/en16031556](https://doi.org/10.3390/en16031556)

[3] H. H. Cho, V. Strezov, and T. J. Evans, "A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 35, p. e00567, Apr. 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.susmat.2023.e00567](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00567)

[4] M. Mamorian, S. Akbari, and Y. Javanshir, "Energy and exergy analysis of the organic Rankine cycle used for waste heat recovery from the cement industry," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 7–25, 2023. [Online]. Available: doi: [10.22034/stme.2023.408480.1040](https://doi.org/10.22034/stme.2023.408480.1040)(in Persian)

[5] B. Zamanipour, H. Ghadaksaz, I. Keppo, and Y. Saboohi, "Electricity supply and demand dynamics in Iran considering climate change-induced stresses," *Energy*, vol. 263, p. 126118, Jan. 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2022.126118](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126118)(in Persian)

[6] M. E. Ramazankhani, A. Mostafaeipour, H. Hosseinasab, and M. B. Fakhrzad, "Feasibility of geothermal power assisted hydrogen production in Iran," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 41, pp. 18351–18369, Nov. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijhydene.2016.08.150](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.150)(in Persian)

[7] A. Souhankar, A. Mortezaee, and R. Hafezi, "Potentials for energy-saving and efficiency capacities in Iran: An interpretive structural model to prioritize future national policies," *Energy*, vol. 262, p. 125500, Jan. 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2022.125500](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125500)(in Persian)

[8] H. Yousefi, S. Roumi, H. Ármannsson, and Y. Noorollahi, "Cascading uses of geothermal energy for a sustainable energy supply for Meshkinshahr

• با افزایش هر یک درجه اختلاف دمای مبادله‌کن حرارتی HR، بازده حرارتی حدود ۲/۲۹٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر مطالب ذکر شده، نتایج بهینه‌سازی حاکی از آن است که بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک به پایداری و توجه‌پذیری تولید انرژی توسط انرژی زمین‌گرمایی کمک کرده و بازده‌های انرژی و انرژی به ترتیب پس از فرایند بهینه‌سازی حدود ۳۶/۶٪ و ۸/۵٪ بهبود یافته و هزینه سطحی محصولات حدود ۳۰٪ کاهش یافته است؛ بنابراین، این پژوهش با ارائه یک راهکار جامع و انعطاف‌پذیر، گامی روبه‌جلو در زمینه بهره‌گیری انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید هم‌زمان توان و حرارت برداشت و می‌تواند به‌عنوان یک الگوی عملیاتی در مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد ضمن صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی، شاخص انرژی‌محیط‌زیستی را کاهش می‌دهد و امکان استفاده گسترده در بخش‌های صنعتی و مسکونی با پتانسیل زمین‌گرمایی را فراهم می‌سازد.

## ۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
نیروگاه تولید هم‌زمان	CHP
انرژی مخصوص (kJ/kg)	ex
آنتالپی مخصوص (kJ/kg)	h
شدت جریان جرمی (m)	m
فشار (kPa)	P
نرخ انتقال حرارت (kW)	Q̇
آنتروپی مخصوص (kW/kg-K)	s
دما (C)	T
توان (kW)	Ẇ
علائم یونانی	
بازده	η
زیرنویس	
حجم واپایش	Cv
خروجی	e
ورودی	i
خالص	Net
مجموع	Tot
حرارتی	th

## ۸- منابع

[1] N. Zheng, Q. Zhang, Y. Ren, L. Duan, Q. Wang, X. Ding, Y. Zhou, X. Wang, L. Liu, M. Sun, and W. Jiao, "Thermodynamic analysis of a novel SOFC-based CCHP system integrated supercritical carbon

- solar energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 611–616, Feb. 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2013.11.025](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.025)
- [17] A. Mohammadi and M. Mehrpooya, "Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 116, pp. 685–694, Apr. 2017. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.01.114](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.114)(in Persian)
- [18] X. Zhang et al., "Thermodynamic and economic assessment of a novel CCHP integrated system taking biomass, natural gas and geothermal energy as co-feeds," *Energy Conversion and Management*, vol. 172, pp. 105–118, Sep. 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.002)
- [19] S. Van Erdeweghe, J. Van Bael, B. Laenen, and W. D'haeseleer, "Optimal combined heat-and-power plant for a low-temperature geothermal source," *Energy*, vol. 150, pp. 396–409, May 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2018.01.136](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.136)
- [20] Y. Chen, J. Wang, and P. D. Lund, "Thermodynamic performance analysis and multi-criteria optimization of a hybrid combined heat and power system coupled with geothermal energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112741, Apr. 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2020.112741](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112741)
- [21] Q. Wang, C. Liu, R. Luo, D. Li, and R. Macián-Juan, "Thermodynamic analysis and optimization of the combined supercritical carbon dioxide Brayton cycle and organic Rankine cycle-based nuclear hydrogen production system," *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 2, pp. 832–859, Feb. 2022. [Online]. Available: doi: [10.1002/er.7179](https://doi.org/10.1002/er.7179)
- [22] H. Kianfard, S. Khalilarya, and 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 Conversion and Management*, vol. 177, pp. 339–349, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2018.09.078](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.078)(in Persian)
- City, Northwest, Iran," *Geothermics*, vol. 79, pp. 152–163, May 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.geothermics.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.01.012)(in Persian)
- [9] M. Mohammadnejad, M. Ghazvini, T. M. I. Mahlia, and A. Andriyana, "A review on energy scenario and sustainable energy in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4652–4658, Dec. 2011. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2011.07.087](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.087)(in Persian)
- [10] K. Bareiß, C. de la Rua, M. Möckl, and T. Hamacher, "Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 862–872, Mar. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.apenergy.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001)
- [11] M. Soltani et al., "A comprehensive review of geothermal energy evolution and development," *International Journal of Green Energy*, vol. 16, no. 13, pp. 971–1009, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1080/15435075.2019.1592104](https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1592104)
- [12] P. Kazemiani-Najafabadi and E. Amiri Rad, "Optimization of an improved power cycle for geothermal applications in Iran," *Energy*, vol. 209, p. 118381, Oct. 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2020.118381](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118381)(in Persian)
- [13] R. Loni et al., "A critical review of power generation using geothermal-driven organic Rankine cycle," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, p. 101028, Oct. 2021. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.tsep.2021.101028](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101028)
- [14] M. Liu, Y. Shi, and F. Fang, "Combined cooling, heating and power systems: A survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 1–22, Jul. 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2014.03.054](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.054)
- [15] J. L. Wang, J. Y. Wu, and C. Y. Zheng, "Simulation and evaluation of a CCHP system with exhaust gas deep-recovery and thermoelectric generator," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 992–1000, Oct. 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2014.06.036](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.036)
- [16] F. Ruzzenenti, M. Bravi, D. Tempesti, E. Salvatici, G. Manfrida, and R. Basosi, "Evaluation of the environmental sustainability of a micro CHP system fueled by low-temperature geothermal and

- Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 8, p. 100432, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.cscee.2023.100432](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100432)
- [30] X. Xia, C. Yang, Z. Wang, T. Sun, H. Zhang, and J. Wu, "Multi-objective optimization of the dual-pressure organic Rankine cycle system based on the orthogonal design method under different external conditions," *Energy*, vol. 296, p. 131109, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2024.131109](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131109)
- [31] L. F. Moreira and F. R. P. Arrieta, "Thermal and economic assessment of organic Rankine cycles for waste heat recovery in cement plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109315, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2019.109315](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109315)
- [32] S. B. Mousavi, P. Ahmadi, A. Pourahmadiyan, and P. Hanafizadeh, "A comprehensive techno-economic assessment of a novel compressed air energy storage (CAES) integrated with geothermal and solar energy," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101418, Oct. 2021. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.seta.2021.101418](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101418) (in Persian)
- [33] Q. Wang, L. Duan, N. Zheng, and Z. Lu, "4E Analysis of a novel combined cooling, heating and power system coupled with solar thermochemical process and energy storage," *Energy*, vol. 275, p. 127498, Jul. 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2023.127498](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127498)
- [34] F. Liu, M. Asadollahzadeh, B. S. Chauhan, I. Elbadawy, M. Abouelela, B. Salah, and H. Nhang, "Exergoeconomic and environmental analyses of a geothermal-powered tri-generation system: A study of CO<sub>2</sub> emission reduction," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 177, pp. 1321–1335, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.psep.2023.06.018](https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.018) (in Persian)
- [35] S. C. Toker, "A Comprehensive Thermodynamic Assessment of an Innovative Solar-Geothermal Driven Multigeneration System for Sustainable Production of Energy, Hydrogen, Freshwater, Heating and Cooling," *Renewable Energy*, p. 123571, May 2025. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.renene.2025.123571](https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123571)
- [23] E. Ruiz-Casanova, C. Rubio-Maya, J. J. Pacheco-Ibarra, V. M. Ambriz-Díaz, C. E. Romero, and X. Wang, "Thermodynamic analysis and optimization of supercritical carbon dioxide Brayton cycles for use with low-grade geothermal heat sources," *Energy Conversion and Management*, vol. 216, p. 112978, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.enconman.2020.112978](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112978)
- [24] N. Shokati, F. Ranjbar, and M. Yari, "Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study," *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 527–542, Nov. 2015. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.renene.2015.04.069](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.069) (in Persian)
- [25] D. Mignard, "Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 2, pp. 285–294, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.cherd.2013.07.021](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.021)
- [26] A. Ahmadzadeh, M. R. Salimpour, and A. Sedaghat, "Thermal and exergoeconomic analysis of a novel solar driven combined power and ejector refrigeration (CPER) system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 83, pp. 143–156, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijrefrig.2017.07.015](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.07.015) (in Persian)
- [27] S. M. Miri, M. Farzaneh-Gord, and A. Kianifar, "Triple-objective MPSO of zeotropic-fluid solar ejector cycle integrated with cold storage tank based on techno-economic criteria," *Energy*, vol. 283, p. 128998, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.energy.2023.128998](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128998) (in Persian)
- [28] S. M. Seyed Mahmoudi, R. Ghiami Sardroud, M. Sadeghi, and M. A. Rosen, "Integration of Supercritical CO<sub>2</sub> Recompression Brayton Cycle with Organic Rankine/Flash and Kalina Cycles: Thermoeconomic Comparison," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8769, 2022. [Online]. Available: doi: [10.3390/su14148769](https://doi.org/10.3390/su14148769) (in Persian)
- [29] P. Saetiao, N. Kongrit, C. K. Cheng, J. Jitjamnong, C. Direksilp, and N. Khantikulanon, "Catalytic conversion of palm oil into sustainable biodiesel using rice straw ash supported-calcium oxide as a heterogeneous catalyst: Process simulation and techno-economic analysis," *Case*