



Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization for single, double and triple flash cycles for utilization of booshli's Geothermal well

Mehran Abdolalipouradi *, Mohamad Namkhah

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

ABSTRACT: In recent years increasing the energy demand and limited resources of fossil fuels have led us to develop and pay more attention to renewable energies, especially geothermal energy. Due to recent investigations, it has been realized that Iran has substantial geothermal potential. Booshli in northwestern Iran is one of the regions with the most geothermal potential. In the present study, single, double, and triple flash cycles for producing power from Booshli's geothermal well have been investigated. Then, the presented cycles have been analyzed from energy, exergy, and economic viewpoints. Furthermore, different single-objective approaches (energy efficiency, exergy efficiency, and power-specific cost) and multi-objective approaches, are optimized relative to their separator's Pressure, respectively. Moreover, a parametric study has been carried out on the separator's pressure to establish the effect on performance parameters for each cycle. It has been revealed that triple flash has a better performance compared to single and double flash cycles for power production from Booshli's geothermal well, both in thermodynamics and economic aspects. The results show that for a triple flash cycle in multi-objective optimum condition (at pressure 1351 kPa for the first, 440.9 kPa for the second, and 80.09 kPa for the third separator), the net output power, energy efficiency, exergy efficiency, exergoeconomic factor, and the power specific cost rate were calculated to be 8463 kW, 15.24%, 57.01, 79.7% and 4.853 \$/GJ, respectively.

Review History:

Received: Jul. 22, 2024
Revised: Oct. 13, 2024
Accepted: Nov. 17, 2024
Available Online: Nov. 24, 2024

Keywords:

Energy & Exergy
Exergoeconomic Analysis
Geothermal Energy
Flash Cycle
Multi-Objective Optimization

1- Introduction

In recent decades, the use of renewable energy sources, particularly geothermal energy, has grown rapidly. Iran has several potential geothermal areas that have been investigated recently. Furthermore, dry steam cycles for lower temperature wells, Organic Rankine cycle (ORC), and single, double, and triple flash cycles for power generation from geothermal wells have been studied by Fallah et al. [1]. They revealed that among flash cycles, the triple, double, and single flash cycles exhibit better performance from an energy efficiency viewpoint, respectively. Abdolalipouradi et al. [2] investigated the triple flash-ORC cycle for the Sabalan geothermal well located in northwestern Iran. Their results show power generation, energy, and exergy efficiencies of 23,703 kW, 19.73%, and 75.76%, respectively. In another research, they also compared the performance of three different types of triple flash and double flash cycles from an exergoeconomic viewpoint [3]. In the present study, a comprehensive exergoeconomic analysis and multi-objective optimization have been conducted for single, double,

and triple flash cycles for Booshli's geothermal wells in northwestern Iran.

2- System description

The characteristics of Booshli's geothermal well, are shown in "Table 1".

Table 1. Booshli's geothermal well specifications

Parameter	Value
Temperature (°C)	240
Mass flow rate (kg/s)	57
Ambient temperature (°C)	15
Ambient Pressure(kPa)	101.3

*Corresponding author's email: m.abdolalipour@jsu.ac.ir



The thermal and exergy efficiencies and the power-specific cost rate can be calculated as follows:

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in} \tag{1}$$

$$\eta_{ex} = \dot{E}x_{prod} / \dot{E}x_{heat} \tag{2}$$

$$c_{P,total} = \frac{\dot{Z}_{overall} + \dot{C}_{F,overall}}{\dot{E}x_{P,overall}} \tag{3}$$

The geothermal fluid, which is considered to be water, is extracted from the geothermal well, enters the expansion valve, becomes two-phase, and is then separated into vapor and liquid water in the separator. Afterward, steam enters the turbine to produce power, while the exiting liquid water from the separator can repeat this process to generate even more power. Thus, when the cycle has only one separator (flash), it is called a Single Flash (SF) cycle, as shown in “Figure 1 (a)”. Similarly, for the Double (DF) and Triple Flash (TF) cycles, refer to “Figure 1 (b) and (c)”.

3- Result and discussion

A parametric study was conducted to find out the influence of decision variables on objective functions, such as net power output. The effects of the pressure in the first to third separators are shown in “Figure 2”. According to “Figure 2”, it is clear that the TF cycle has better power production than the other two cycles. As the pressure of the separators increases, the enthalpy of the output content also rises, while its quality decreases. Additionally, the produced power of the turbine before the separator (if applicable) also decreases. This contrasting trend results in an optimum pressure point for the separators. Furthermore, from Equation (3), it can be observed that maximizing output power leads to minimizing the specific cost rate of power. Moreover, increasing power output results in increased energy and exergy efficiencies, as indicated by Equations (1) and (2). The results of the optimization of the triple flash cycle, which demonstrates better performance than the other studied cycles, are shown in “Figure 3”. The optimization was carried out using A genetic algorithm and considered three single-objective modes: Thermal Efficiency Optimal Design (TEOD), Exergy Efficiency Optimal Design (EEOD), and Cost Optimal Design (COD), along with Multi-Objective Optimization MOOD, using weight functions. The results revealed that multi-objective optimization minimizes the specific cost rate of power while maximizing the amount of produced power, which in turn maximizes the energy and exergy efficiencies.

4- Conclusion

The present study focuses on the exergoeconomic analysis of SF, DF, and TF for Booshli’s geothermal well. Furthermore, multi-objective optimization has been conducted for each cycle, along with three single-objective analyses, and the

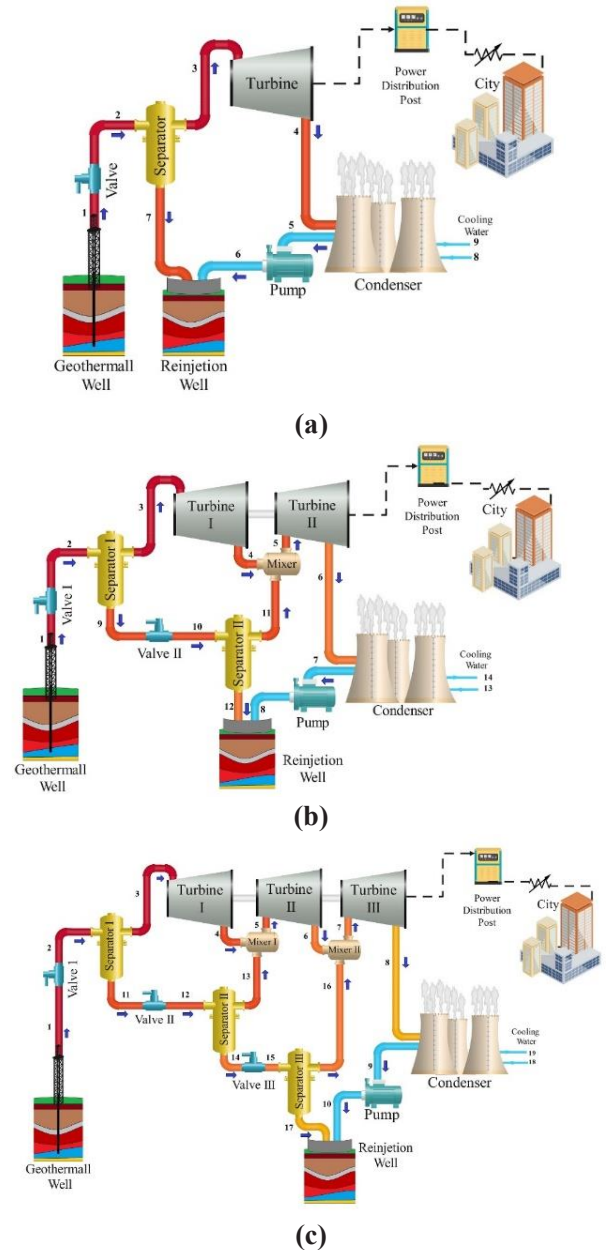
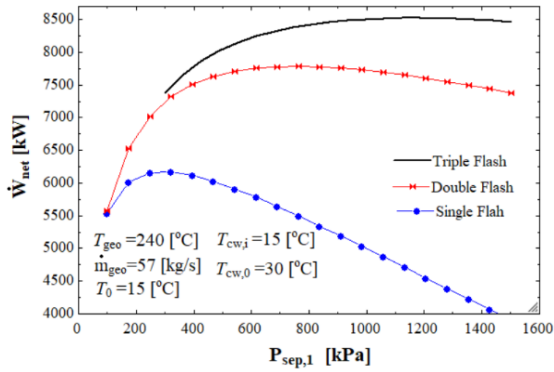


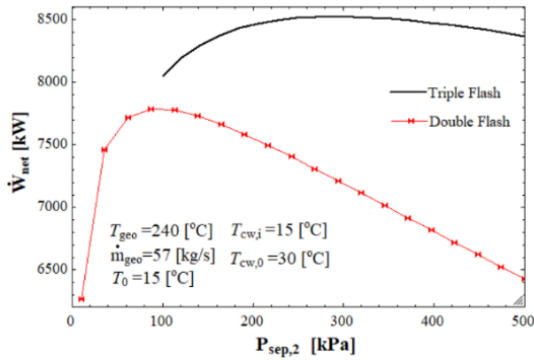
Fig. 1. Configuration of (a) SF, (b) DF, and (c) TF

results are compared to each other. Prominent outcomes are listed below:

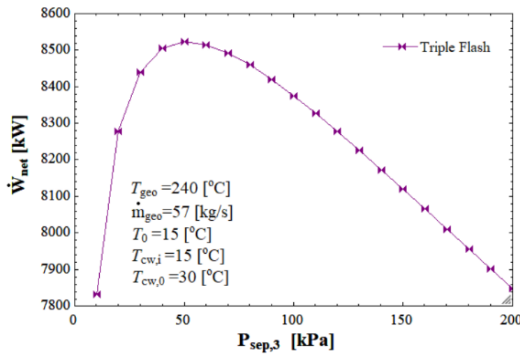
- For each cycle, a thermodynamic analysis from an exergoeconomic viewpoint and four modes of optimization were carried out.
- A parametric study was also conducted to determine the influence of decision variables on the objective functions.
- The results show that the triple flash cycle for Booshli’s geothermal well performs better than the others from both an exergy and economic viewpoint.
- In a multi-objective optimization scenario, the triple flash cycle yields net power output, exergy efficiency, and



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Effects of (a) first ($P_{sep,1}$), (b) second ($P_{sep,2}$), and (c) third ($P_{sep,3}$) separator pressure on the net power output of the SF, DF, and TF

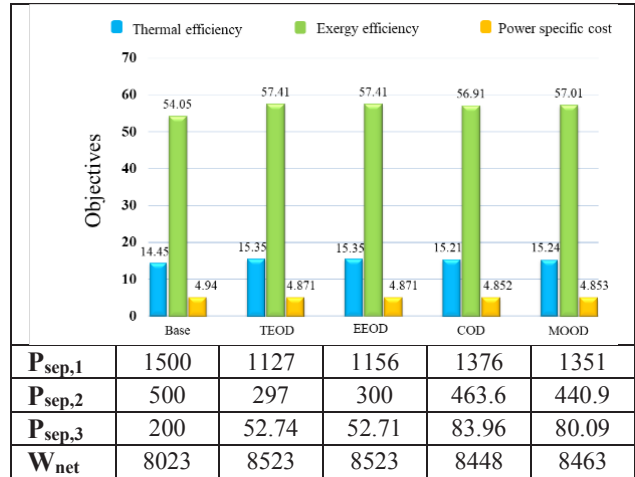


Fig. 3. The optimization results of TF on three single-objective and MOOD.

specific power cost rates of 8,436 kW, 57.01%, and \$4.853/GJ, respectively.

References

- [1] M. Fallah, R.A. Ghiasi, N.H. Mokarram, A comprehensive comparison among different types of geothermal plants from exergy and thermoeconomic points of view, Thermal Science and Engineering Progress, 5 (2018) 15-24.
- [2] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Use of Integrated Single and Triple flashes with Organic Rankine cycle to Generate Power from Sabalan Geothermal Wells, Journal of Mechanical Engineering, 50(3) (2020) 155-164. (In persian)
- [3] M. Abdolalipouradl, V. Mousavi, F. Mohammadkhani, M. Yari, Proposing new configurations of flash cycle for effective utilization of geothermal resources: thermodynamic and exergoeconomic assessments, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44(10) (2022) 465.



تحلیل اگزرتواکونومیک و بهینه‌سازی چندهدفه برای چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای بهره‌برداری از چاه زمین‌گرمایی بوشلی

مهران عبدالعلی پورعدل*، محمد نام‌خواه

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

کلمات کلیدی:

انرژی و اگزرتی
تحلیل اگزرتواکونومیک
انرژی زمین‌گرمایی
چرخه تبخیر آبی
بهینه‌سازی چندهدفه

خلاصه: در سال‌های اخیر به سبب افزایش تقاضای انرژی و به دنبال جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، توجهات بسیاری معطوف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص انرژی زمین‌گرمایی شده است. مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی بسیاری در ایران طی مطالعات گذشته معرفی شده است که یکی از این مناطق که دارای بیشترین پتانسیل می‌باشد، منطقه بوشلی در شمال غرب ایران می‌باشد. در مطالعه حاضر سه چرخه تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای به منظور تولید توان از چاه‌های زمین‌گرمایی منطقه بوشلی در ایران، مطالعه و مدل‌سازی شده و سپس مورد تحلیل انرژی، اگزرتی و اقتصادی قرار گرفته است. هر سه چرخه ابتدا نسبت به بازده انرژی و اگزرتی به صورت مستقل بهینه‌سازی شده و به صورت جداگانه، هزینه تولید توان واحد کمینه‌سازی شد. همچنین با هدف بهینه‌سازی همزمان بازده انرژی و اگزرتی و کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد، مورد بهینه‌سازی چند هدفه قرار گرفت. بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک و در نرم افزار ای.ای.اس انجام شد. در نهایت نیز یک مطالعه پارامتری به منظور بررسی تاثیر فشار جداسازهای هر سه چرخه بر توابع عملکردی انجام گرفت. در مطالعه حاضر مشاهده شد که چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی از دیگر چرخه‌های مورد بررسی دارای عملکرد بهتری از لحاظ ترمودینامیکی و اقتصادی می‌باشد. برای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای در حالت بهینه چند هدفه (به‌ازای فشار جداساز اول ۱۳۵۱ کیلوپاسکال و فشار جداساز دوم ۴۴۰/۹ کیلوپاسکال، فشار جداساز سوم ۸۰/۰۹ کیلوپاسکال)، توان خالص، بازده انرژی، بازده اگزرتی، ضریب اگزرتواکونومیک و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۸۴۶۳ کیلووات، ۱۵/۲۴ درصد، ۵۷/۰۱ درصد، ۷۹/۷ درصد و ۴/۸۵۳ دلار بر گیگاژول حاصل شده است.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه بخش اعظمی از نیروگاه‌های زمین‌گرمایی شامل چرخه‌ای تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای بوده مطالعات مختلفی روی چرخه‌هایی متشکل از این نوع چرخه‌ها انجام شده است. فلاح و همکاران [۵] در مطالعه‌ای به بررسی و مقایسه انواع چرخه‌های زمین‌گرمایی، شامل بخار خشک، تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای و چرخه باینری رانکین آبی پرداختند و نشان دادند که چرخه بخار خشک دارای بیشترین میزان بازده انرژی و اگزرتی بوده و همچنین در چرخه‌های تبخیر آبی، به ترتیب چرخه‌های سه، دو و یک مرحله‌ای توان بیشتری تولید می‌کنند. راتلاموالا [۶] در مطالعه‌ای به بررسی ترمودینامیکی چرخه‌های تبخیر آبی یک تا پنج مرحله‌ای برای تولید توان و هیدروژن پرداخت و نشان داد که با اضافه کردن مرحله‌های بیشتر به چرخه تبخیر، توان خالص افزایش خواهد یافت. جلیلی نصرآبادی و همکاران [۷] به بررسی ترمودینامیکی چرخه تبخیر آبی یک و دو مرحله‌ای پرداختند و سپس این چرخه‌ها را نسبت به فشار جداسازها، بهینه‌سازی

امروزه افزایش تقاضای انرژی و منابع محدود سوخت‌های فسیلی موجب شده است که توجه بیشتری معطوف انرژی‌های تجدیدپذیر شود. انرژی‌هایی نظیر انرژی بادی، زیست‌توده، خورشیدی و زمین‌گرمایی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند [۱، ۲]. انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر بوده که در زیرلایه‌های زمین، پایین‌تر از قسمت پوسته زمین، قرار دارد. امروزه انرژی زمین‌گرمایی برای استفاده‌های مستقیم، گرمایش، سرمایش، تولید هیدروژن، آب شیرین و البته تولید توان بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در مطالعات گذشته برای تولید توان از انرژی زمین‌گرمایی چرخه‌های مختلفی پیشنهاد شده است، چرخه‌هایی نظیر تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای و چرخه‌های تحتانی مختلف مانند رانکین آبی و کالینا، مورد تحلیل و بررسی گسترده‌ای قرار گرفته است [۴].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: M.abolalipour@jstu.ac.ir

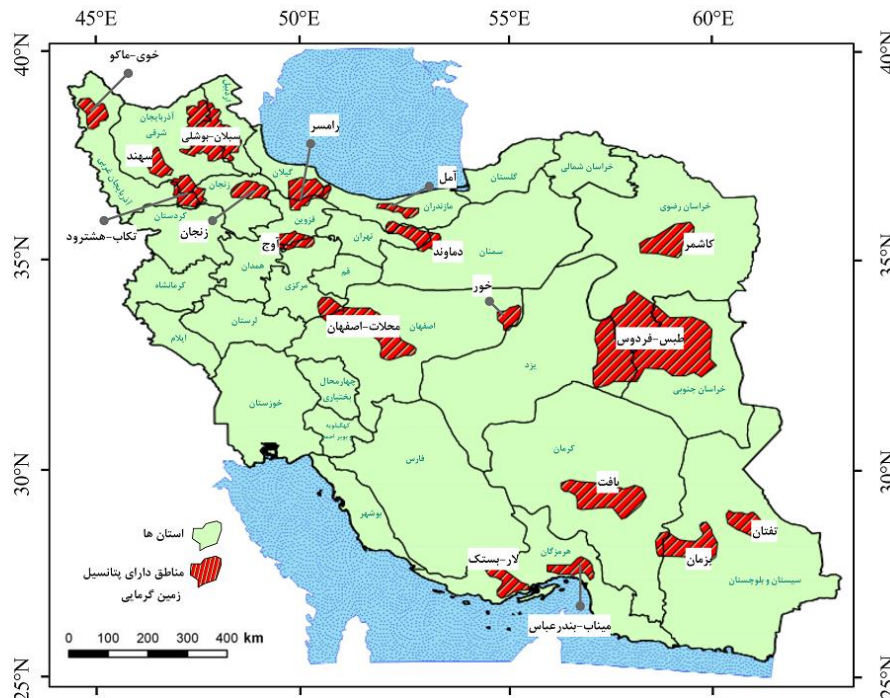
همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای، برای چاه‌های زمین‌گرمایی مشگین شهر چهار آرایش مختلف برای تولید توان بر مبنای چرخه تبخیر آبی یک و دو مرحله‌ای و استفاده مستقیم از انرژی زمین‌گرمایی برای سیستم گرمایش، معرفی کردند. عبدالعلی‌پور و همکاران [۱۶] برای چاه زمین‌گرمایی سبلان چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای باینری با رانکین آبی را مورد تحلیل انرژی و انرژی را قرار دادند و این مطالعه منتج به توان خالص و بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۲۳۰۷۳ کیلووات، ۱۹/۷۳ و ۷۵/۶۷ درصد شد. چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای باینری با رانکین آبی برای چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان توسط عالی و همکاران [۱۷] مورد تحلیل انرژی و کوانتومیک و بهینه‌سازی چندهدفه قرار گرفت که در حالت بهینه‌سازی چندهدفه، بازده انرژی و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۵۴/۸۷ درصد و ۵/۰۶۸ دلار بر گیگاژول حاصل شد. کاظمیانی و امیری‌راد [۱۸] در پژوهشی برای نقاط مختلف ایران (سهند، خوی-ماکو، سبلان، دماوند و بوشلی) چرخه تولید توان آب-آمونیاک را بر اساس چرخه کالینا پیشنهاد و مورد بررسی ترمودینامیکی قرار دادند، در بهترین حالت برای تولید توان منطقه بوشلی شناسایی گردید که دارای تولید توان ۷۱۸۶ کیلووات می‌باشد. طبق مطالعه کاظمیانی و امیری‌راد [۱۸]، منطقه بوشلی دارای بیشترین پتانسیل تولید توان از انرژی زمین‌گرمایی در کشور معرفی گردید. اما با بررسی دقیق می‌توان فهمید که هیچ بررسی برای تولید توان این منطقه از چرخه‌های تبخیر آبی انجام نگرفته است. از سوی دیگر خلا بهینه‌سازی چند هدفه برای انواع آرایش‌های تبخیر آبی در ادبیات فن مشهود است. پس در ابتدا تحلیل انرژی، انرژی و انرژی و کوانتومیک روی چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی انجام خواهد گرفت. در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سه بهینه‌سازی تک‌هدفه که به صورت جداگانه با هدف بهینه‌سازی بازده انرژی، بهینه‌سازی بازده انرژی و کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد، برای هر سه چرخه انجام شده و یک بهینه‌سازی جامع چندهدفه نیز با هدف بهبود تمام پارامترهای مذکور بطور همزمان برای چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای منطقه بوشلی صورت خواهد پذیرفت. نتایج چهار حالت مختلف بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده و در ادامه نیز بر روی پارامترهای موثر هر سه چرخه، یک مطالعه پارامتری جامع انجام خواهد شد.

۲- توصیف چرخه‌ها، فرضیات و مدل‌سازی

مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی در ایران در تعدادی از مطالعات گذشته معرفی شدند [۱۳، ۱۹، ۲۰]. در شکل ۱ این مناطق روی نقشه

کردند. طبق نتایج حاصله، توان خالص برای چرخه تبخیر آبی یک و دو مرحله‌ای به ترتیب به ۳۱ و ۴۹/۷ مگاوات حاصل شد. بینا و همکاران [۸] مطالعه‌ای روی بهینه‌سازی و تحلیل انرژی و کوانتومیک چرخه تبخیر آبی تک و دو مرحله‌ای برای سبلان انجام دادند، طبق نتایج حاصله، برای چرخه تبخیر آن دو مرحله‌ای توان و بازده انرژی و انرژی بالاتری را داشته در حالی که تبخیر آبی تک مرحله‌ای دارای هزینه تولید توان واحد کمتری می‌باشد. در پژوهشی چرخه رانکین آبی برای قسمت تحتانی چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای توسط عبدالعلی‌پور عدل و همکاران [۹] مورد تحلیل ترمودینامیکی و انرژی و کوانتومیک قرار گرفت و مشاهده شد که چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای نوع اول-رانکین آبی نسبت به دیگر چرخه‌ها توان خالص، بازده انرژی و بازده انرژی بیشتری دارد و همچنین چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای-رانکین آبی نیز نسبت به دیگر چرخه‌ها از لحاظ اقتصادی بهتر بوده و هزینه تولید توان واحد آن برابر ۳/۶۲ دلار بر گیگاژول می‌باشد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر عبدالعلی‌پور عدل و همکاران [۱۰] سه چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای مختلف و یک چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای را در مطالعه‌ای دیگر مورد تحلیل انرژی و کوانتومیک قرار دادند. طبق نتایج حاصله چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای نوع سوم با هزینه تولید توان واحد ۳/۷۶۲ دلار بر گیگاژول، دارای کمترین مقدار هزینه تولید توان واحد در بین چرخه‌های مورد بررسی می‌باشد. بهینه‌سازی به روش گرگ خاکستری برای چهار آرایش تبخیر آبی-رانکین آبی توسط ون و همکاران [۱۱] انجام گرفت، نتایج بهینه‌سازی نشان داد که چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای-دو مرحله‌ای رانکین در حالت بهینه، بهره‌وری و کارایی بهتری نسبت به چرخه‌های دیگر از خود نشان داد. بهینه‌سازی شبکه عصبی برای پیکربندی جدید چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای توسط های و همکاران [۱۲] انجام گرفت، که برای این آرایش بازده انرژی و انرژی به ترتیب، ۲۶/۸ و ۶۴/۸ درصد محاسبه شد.

ایران دارای نقاط زیادی با پتانسیل زمین‌گرمایی بالا می‌باشد و در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران و محققان زیادی معطوف انرژی زمین‌گرمایی در ایران بوده است و مطالعات وسیعی بر چاه‌های زمین‌گرمایی مختلف ایران انجام پذیرفته است. نواحی دارای پتانسیل بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی در ایران و دمای حدودی چاه زمین‌گرمایی این مناطق توسط قبادیان و نجفی [۱۳] معرفی شد. عامری [۱۴] در پژوهشی چرخه تبخیر آبی یک و دو مرحله‌ای را برای چاه زمین‌گرمایی مشگین شهر مدل‌سازی ترمودینامیکی کرد و دریافت که چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای دارای بازده انرژی بیشتری نسبت به تبخیر آبی یک مرحله‌ای خواهد بود. یوسفی و



شکل ۱. مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی در ایران [۲۱].

Fig. 1. Areas with geothermal potential in Iran.

جدول ۱. مشخصات منطقه بوشلی [۱۸].

Table 1. Booshli's geothermal well specifications.

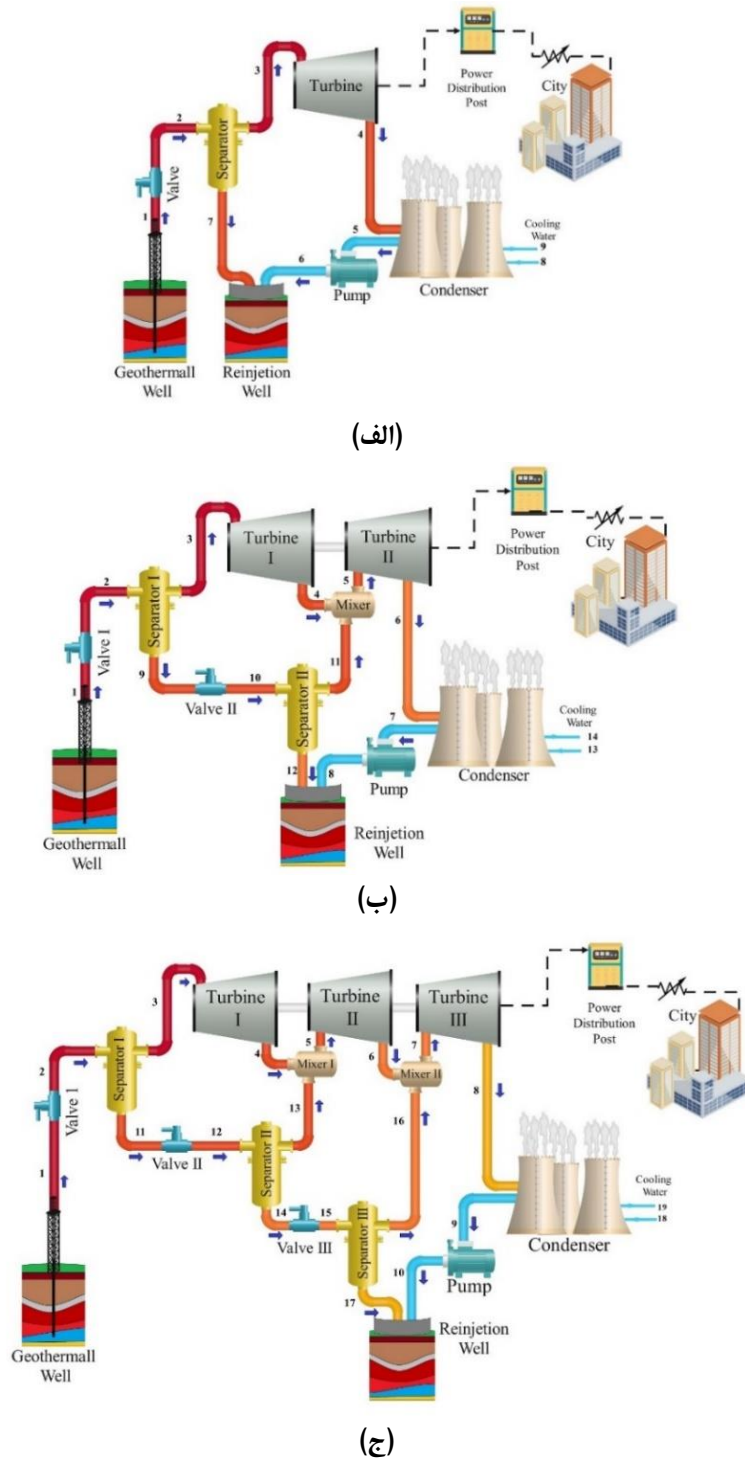
مقدار	پارامتر
۲۴۰	دمای چاه زمین گرمایی (°C)
۵۷	دبی چاه زمین گرمایی (kg/s)
۱۵	دمای محیط (°C)
۱۰۱/۳	فشار محیط (kPa)

بوشلی (شامل دما و دبی چاه زمین گرمایی) و همچنین دما و فشار محیطی این منطقه در جدول ۱ بیان شده است [۱۸].

۲-۱- توصیف چرخه‌های مورد بررسی

چرخه‌های مورد بررسی برای چاه زمین گرمایی بوشلی، چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای می‌باشند که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشند. در شکل ۲ (الف)، چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای به نمایش درآمده است. در این چرخه، آب استخراج شده از چاه زمین گرمایی با عبور از شیر انبساط تبدیل به

مشاهده می‌شود [۲۱]. بوشلی (سیلان) طبق مطالعات گذشته بدلیل وجود سنگ‌های آتشفشانی، گسل، چشمه‌های آب گرم و نواحی دارای دگرگونی، جزو مناطقی از ایران است که دارای پتانسیل زمین گرمایی بسیار بالایی می‌باشد [۲۲]. همچنین در بسیاری از مطالعات گذشته نیز به پتانسیل زمین گرمایی این منطقه اشاره شد و همچنین دمای چاه زمین گرمایی و عمق چاه‌های این منطقه برابر ۲۴۰ درجه سلسیوس و عمق این چاه‌ها بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر تخمین زده شد [۱۳، ۱۹، ۲۰]. مشخصات چاه زمین گرمایی



شکل ۲. چرخه‌های مدل‌سازی شده: (الف) چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای، (ب) چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای، (ج) تبخیر آبی سه مرحله‌ای.

Fig. 2. Modeled cycles: a) single flash, b) double flash, and c) triple flash.

- هر یک از اجزا چرخه‌ها در حالت پایا کار می‌کند.
- از میزان تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم‌پوشی شده است.
- بازده آیزنتروپیک پمپ‌ها و توربین‌ها به ترتیب برابر ۹۰ و ۸۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند.
- از تلفات حرارتی و افت فشار در سیستم لوله‌کشی و تمامی اجزا صرف نظر شده است.
- دما و فشار محیطی منطقه بوشلی برابر ۱۵ درجه سلسیوس و $1.01/3$ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.
- مقدار انرژی جنبشی، پتانسیل و شیمیایی تمام جریان‌ها برابر صفر در نظر گرفته شده است.
- هزینه واحد انرژی جریان استخراج شده زمین‌گرمایی برابر $1/3$ دلاربرگیگاژول می‌باشد [۱۷، ۲۳].
- دبی و دمای چاه زمین‌گرمایی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- تحلیل انرژی و انرژی

از آنجا که فرض شد تمامی اجزا در حالت پایا کار می‌کنند و همچنین از انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است، معادله بقای جرم و بقای انرژی برای هر یک از اجزا، بصورت زیر نوشته می‌شوند [۹، ۱۷]:

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

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

بازده آیزنتروپیک توربین‌ها و توان تولیدی طبق روابط (۳) و (۴) و بازده آیزنتروپیک پمپ‌ها و توان مصرفی مطابق روابط (۵) و (۶) محاسبه خواهند شد [۹، ۱۷]:

$$\eta_{Turb} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,s}} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Turb} = \dot{m}_{in} (h_{in} - h_{out}) \quad (4)$$

یک مخلوط دوفازی شده و سپس وارد جداساز می‌شود. در جداساز به منظور تولید توان، بخار از مخلوط دوفازی جدا شده و به توربین فرستاده می‌شود تا در توربین تولید توان کند. بخار خروجی از توربین در چگالنده خنک شده و تبدیل به مایع اشباع می‌شود، سیال خروجی از چگالنده با عبور از پمپ به فشار بالای چرخه رسیده و در نهایت به زمین بازگردانده می‌شود. مایع جدا شده در جداساز نیز مستقیماً به زمین برمی‌گردد. در شکل ۲ (ب) چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای مشاهده می‌گردد. عملکرد این چرخه مشابه چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای می‌باشد با این تفاوت که از اتلاف گرمای موجود در مایع خروجی از جداساز جلوگیری می‌گردد. در این چرخه، با علم به این موضوع که جریان مایع خروجی از جداساز ۱ دارای انرژی حرارتی بالایی می‌باشد، پس از عبور این جریان از شیر انبساط و تبدیل شدن به مخلوط دو فازی، به جداساز دوم فرستاده می‌شود. بخار جدا شده در جداساز دوم با بخار خروجی از توربین ۱ (توربین فشار بالا) ترکیب شده و برای تولید توان بیشتر به توربین دوم (توربین فشار پایین) که در فشاری کمتر از توربین اول کار می‌کند، فرستاده می‌شود. بخار خروجی از توربین دوم پس از خنک شدن در چگالنده و افزایش فشار توسط پمپ، به همراه مایع خروجی از جداساز دوم به اعماق زمین بازگردانده می‌شود. در شکل ۲ (ج) نیز چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای مشاهده می‌شود. در این چرخه نیز آب خروجی از چاه زمین‌گرمایی پس از عبور از شیر انبساط تبدیل به سیال دو فازی می‌گردد و در جداساز بخار آن برای تولید توان به توربین اول (توربین فشار بالا) فرستاده می‌شود. مایع خروجی از جداساز اول با عبور از شیر انبساط دوم تبدیل به سیال دو فازی شده و سپس بخار خروجی از توربین اول ترکیب شده و برای تولید توان بیشتر وارد توربین دوم (توربین فشار میانی) می‌گردد. برای جلوگیری از بازگرداندن مایع جدا شده در جداساز دوم به چاه زمین‌گرمایی و استفاده از حرارت باقی مانده در مایع جدا شده در دومین جداساز، با عبور آن از شیر انبساط سوم، این جریان تبدیل به سیال دو فازی شده و سپس در جداساز سوم بخار آن جدا شده و با بخار خروجی از توربین دوم ترکیب و سپس برای تولید توان بیشتر وارد توربین سوم (توربین فشار پایین) می‌شود. در نهایت پس از خروج از توربین سوم و عبور از چگالنده و پمپ، به زمین برگردانده می‌شود.

۲-۲- فرضیات

فرضیات زیر برای ساده‌تر شدن شبیه‌سازی و محاسبات چرخه‌های معرفی شده، در نظر گرفته شده‌اند [۱۸، ۲۳]:

جدول ۲. هزینه اولیه هر عضو [۱۷، ۱۰].

Table 2. The investment costs of components [17, 10].

معادله هزینه اولیه	عضو
$Z = 0$	شیر اختناق و میکسر
$Z = 1.218 * (42 + 1.63 * \dot{m} / 3.6) / 1000$	جداساز
$Z = 2143 * (A)^{-0.514}$	کندانسور
$Z = 600 * (\dot{W}_{Tur})^{-0.7}$	توربین
$Z = 354 * (\dot{W}_{Pump})^{-0.71}$	پمپ

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_{fuel} - \dot{E}x_{prod} \quad (9)$$

$$\eta_{Pump} = \frac{v_{in}(P_{out} - P_{in})}{h_{out} - h_{in}} \quad (5)$$

که در این رابطه $\dot{E}x_{fuel}$ و $\dot{E}x_{prod}$ بترتیب برابر آگرژی سوخت و محصول می‌باشند [۱۷، ۹].

$$\dot{W}_{Pump} = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (6)$$

۲-۴- تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی در کنار تحلیل انرژی و آگرژی کمک می‌کند تا با دید عمیق‌تری به عملکرد هر چرخه پرداخته شود و همچنین از نظر اقتصادی نیز چرخه‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شوند. در ادامه با استفاده از روش برآورد هزینه آگرژی مخصوص^۱ هر سه چرخه تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی مورد تحلیل آگرژی و اکونومیکی قرار خواهند گرفت. هزینه اولیه برای هر جزء در جدول ۲ استفاده شده است [۱۷، ۱۰].

با صرف نظر از آگرژی پتانسیل و جنبشی، مقدار آگرژی کل هر جریان برابر است با [۱۷، ۹]:

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (7)$$

آهنگ هزینه اولیه هر عضو از طریق رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۰، ۱۷]:

$$\dot{Z}_k = \left(\frac{CRF \cdot \Phi}{N * 3600} \right) Z_k \quad (10)$$

که در آن $\dot{E}x_{ph}$ آگرژی فیزیکی و $\dot{E}x_{ch}$ آگرژی شیمیایی جریان می‌باشد. آگرژی شیمیایی مقدار کار قابل دسترس است که در آن ماده در شرایط محیط تولید می‌کند بطوریکه ماده با اجزاء تشکیل دهنده محیط واکنش شیمیایی داده و محصولات نیز در نهایت به حالت محیط برسند. با توجه به عدم واکنش شیمیایی آب با اجزاء تشکیل دهنده محیط، آگرژی شیمیایی آب صفر در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار آگرژی فیزیکی برای هر جریان نیز مطابق رابطه (۸) بدست خواهد آمد [۱۷، ۹]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}(h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)) \quad (8)$$

که در آن Φ ضریب نگهداری، N ساعت عملکرد سیستم در سال CRF دوره بازگشت سرمایه که بوده از طریق رابطه زیر بدست خواهد آمد [۱۰، ۱۷، ۲۴]:

در ادامه با در نظر گرفتن حجم کنترل مناسب برای هر عضو، میزان تخریب آگرژی آن عضو از طریق رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۷، ۹]:

جدول ۳. پارامترهای ثابت تحلیل اگزورژواکونومیک [۱۰].

Table 3. The constant values of exergoeconomic analysis [10]

پارامتر	مقدار
کارکرد سیستم، N (تعداد ساعات در سال)	۷۴۴۶
ضریب نگهداری، φ (-)	۱/۰۶
نرخ سرمایه‌گذاری، i_r (%)	۱۰
عمر سیستم، n (سال)	۲۰

از این مقادیر، پارامترهای مهم تحلیل اگزورژواکونومیک محاسبه خواهند شد. پارامترهایی نظیر هزینه متوسط اگزورژی سوخت ($c_{F,k}$)، هزینه متوسط اگزورژی محصول ($c_{P,k}$)، نرخ هزینه اگزورژی تخریب شده ($\dot{C}_{D,k}$) هر عضو، ضریب اگزورژواکونومیک (f_k) مطابق روابط (۱۴) تا (۱۷) محاسبه خواهند شد، همچنین مقدار آهنگ هزینه کل برای هر عضو ($\dot{C}_{tot,k}$) نیز مطابق رابطه (۱۸) بدست می‌آید [۱۰، ۱۷، ۲۴]:

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (14)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \quad (15)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (16)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,overall} + \dot{C}_{I,overall}} * 100 \quad (17)$$

$$\dot{C}_{tot,k} = \dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k} \quad (18)$$

در نهایت مهم‌ترین پارامتر تحلیل اگزورژواکونومیک، یعنی هزینه تولید توان واحد ($C_{P,tot,k}$) مطابق رابطه زیر بدست خواهد آمد [۱۰]:

$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} n \quad (11)$$

که در رابطه بالا مقادیر i_r و n به ترتیب برابر آهنگ بهره‌وری سیستم‌های مالی و عمر سیستم می‌باشند. مقادیر مذکور در روابط (۱۰) و (۱۱) که پارامترهای ثابت مرتبط با تحلیل اگزورژواکونومیک می‌باشند، در جدول ۳ مشاهده می‌گردند.

در ادامه موازنه هزینه برای هر عضو مطابق رابطه (۱۲) نوشته می‌شود [۱۰، ۱۷، ۲۴]:

$$\dot{Z}_k + \sum \dot{C}_{j,k} + \dot{C}_{q,k} = \sum \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} \quad (12)$$

در این معادله $\dot{C}_{w,k}$ و $\dot{C}_{q,k}$ بترتیب هزینه‌های مربوط به انتقال حرارت و تولید توان در هر عضو می‌باشند. همچنین $\dot{C}_{e,k}$ و $\dot{C}_{j,k}$ آهنگ هزینه جریان‌های ورودی و خروجی به عضو هستند که مطابق رابطه زیر بدست خواهند آمد [۱۰، ۱۷، ۲۴]:

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}x_j \quad (13)$$

در معادله بالا c آهنگ هزینه مخصوص هر جریان و $\dot{E}x$ مقدار اگزورژی هر جریان می‌باشد. حال با استفاده از معادله موازنه انرژی و معادلات کمکی مقدار آهنگ هزینه هر جریان بدست می‌آید. این معادلات برای هر عضو از هر چرخه در جدول ۴ مشخص شده اند [۱۰، ۱۷]. در ادامه با استفاده

جدول ۴. معادلات موازنه هزینه و کمکی برای هر عضو.

Table 4. Cost flow rate balance equation and auxiliary equations for each component.

معادلات کمکی	معادله موازنه هزینه	عضو
		تبخیر آنی یک مرحله‌ای
-	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{Valve} = \dot{C}_2$	شیر انبساط
$c_3 = c_7$	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{Sep} = \dot{C}_3 + \dot{C}_7$	جداساز
$c_3 = c_4$	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{Turb} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{W,Turb}$	توربین
$c_8 = 0, c_4 = c_5$	$\dot{C}_4 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{Cond} = \dot{C}_5$	چگالنده
$c_{W,P} = c_{W,T}$	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{Pump} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{W,Pump}$	پمپ
		تبخیر آنی دو مرحله‌ای
-	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{Valve} = \dot{C}_2$	شیر انبساط ۱
$c_3 = c_9$	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{Sep1} = \dot{C}_3 + \dot{C}_9$	جداساز ۱
$c_3 = c_4$	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{Turb1} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{W,Turb1}$	توربین ۱
-	$\dot{C}_9 + \dot{Z}_{Valve2} = \dot{C}_{10}$	شیر انبساط ۲
$c_{11} = c_{12}$	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{Sep} = \dot{C}_3 + \dot{C}_7$	جداساز ۲
-	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{Mixer} = \dot{C}_5$	میکسر
$c_5 = c_6$	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{Turb2} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{W,Turb2}$	توربین ۲
$c_{13} = 0, c_6 = c_7$	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{Cond} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{14}$	چگالنده
$c_{W,Pump} = c_{W,Turb2}$	$\dot{C}_7 + \dot{Z}_{Pump} = \dot{C}_8 + \dot{C}_{W,Pump}$	پمپ
		تبخیر آنی سه مرحله‌ای
-	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{Valve} = \dot{C}_2$	شیر انبساط ۱
$c_3 = c_{11}$	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_{Sep1} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{11}$	جداساز ۱
$c_3 = c_4$	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{Turb1} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{W,Turb1}$	توربین ۱
-	$\dot{C}_{11} + \dot{Z}_{Valve2} = \dot{C}_{12}$	شیر انبساط ۲
$c_{13} = c_{14}$	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_{Sep2} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{14}$	جداساز ۲
-	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{Mixer1} = \dot{C}_5$	میکسر ۱
$c_5 = c_6$	$\dot{C}_5 + \dot{Z}_{Turb2} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{W,Turb2}$	توربین ۲
-	$\dot{C}_{14} + \dot{Z}_{Valve3} = \dot{C}_{15}$	شیر انبساط ۳
$c_{16} = c_{17}$	$\dot{C}_{15} + \dot{Z}_{Sep3} = \dot{C}_{16} + \dot{C}_{17}$	جداساز ۳
-	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{Mixer2} = \dot{C}_7$	میکسر ۲
$c_7 = c_8$	$\dot{C}_7 + \dot{Z}_{Turb3} = \dot{C}_8 + \dot{C}_{W,Turb3}$	توربین ۳
$c_9 = c_8, c_{18} = 0$	$\dot{C}_8 + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{Cond} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{19}$	چگالنده
$c_{W,Pump} = c_{W,Turb3}$	$\dot{C}_9 + \dot{Z}_{Pump} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{W,Pump}$	پمپ

همان آخرین نسل ادامه داده و با توجه به تابع هدف بهترین نسل یا همان پارامترها را برمی‌گزیند. به‌طور کلی روند این بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی ترمودینامیکی مشاهده شد که فشار جداسازها یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد چرخه‌های تبخیر آبی می‌باشند. بنابراین برای هر سه چرخه تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای، بازده انرژی نسبت به فشار جداسازها بهینه‌سازی شده، تا بیشینه مقدار بازده انرژی هر چرخه حاصل شود. همچنین، بازده انرژی هر سیستم که نشان‌دهنده میزان توانایی استفاده چرخه از انرژی حرارت ورودی به آن است نیز، نسبت به فشار جداسازهای هر چرخه، مورد بهینه‌سازی قرار گرفت تا بیشینه مقدار بازده انرژی برای هر چرخه محاسبه شود. اگرچه بازده انرژی و بازده انرژی دو تابع عملکردی مهم برای هر چرخه می‌باشند اما، جنبه اقتصادی (هزینه تولید توان واحد) هر چرخه نیز دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. به همین خاطر به منظور کمینه‌سازی مقدار هزینه تولید توان واحد، یک بهینه‌سازی برای این تابع نسبت به فشار جداسازها برای هر چرخه صورت گرفته است. درنهایت، برای جامعیت بخشیدن به مطالعه حاضر، یک بهینه‌سازی چندهدفه نیز، برای توابع ذکرشده با استفاده از توابع وزنی، صورت گرفته است. در بهینه‌سازی چندهدفه ضمن بیشینه‌سازی بازده انرژی و بازده انرژی هر چرخه، کمینه هزینه تولید توان واحد هر چرخه نیز به طور همزمان حاصل خواهد شد. روابط توابع وزنی مرتبط با بهینه‌سازی چندهدفه طبق روابط ۲۴-۲۶ استفاده خواهد شد:

$$\text{Max}(MOF = w_1(\eta_{th}) + w_2(\eta_{ex}) + w_3(1 - c_{P,total} / c_1)) \quad (24)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (25)$$

$$0 \leq w_1, w_2, w_3 \leq 1 \quad (26)$$

که در رابطه بالا w_1 ، w_2 و w_3 توابع وزنی می‌باشند. به صورت کلی، چهار حالت طراحی بهینه عبارت‌اند از طراحی بهینه با هدف بیشینه‌سازی بازده انرژی^۱، طراحی بهینه با هدف بیشینه‌سازی بازده انرژی^۲، طراحی بهینه با هدف کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد^۳ و طراحی با بهینه‌سازی

$$c_{P,total} = \frac{\dot{Z}_{overall} + \dot{C}_{F,overall}}{\dot{E}x_{P,overall}} \quad (19)$$

۲-۵- ارزیابی کل سیستم

حرارت ورودی به چرخه و توان خالص تولیدی از طریق روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شوند [۹، ۱۷]:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{Geo} (h_1 - h_0) \quad (20)$$

$$\dot{W}_{net} = \sum \dot{W}_{Turb} - \sum \dot{W}_{Pump} \quad (21)$$

بازده انرژی و انرژی نیز با توجه به رابطه‌های زیر محاسبه خواهند شد [۹، ۱۷]:

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in} \quad (22)$$

$$\eta_{ex} = \dot{E}x_{prod} / \dot{E}x_{heat} \quad (23)$$

که $\dot{E}x_{heat}$ انرژی حرارت ورودی به چرخه بوده و $\dot{E}x_{prod}$ انرژی تولیدی چرخه می‌باشد. محصول کل چرخه و برابر توان خالص تولیدی چرخه می‌باشد.

۲-۶- بهینه‌سازی

برای مدل‌سازی و تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای بوشلی و در ادامه بهینه‌سازی این چرخه‌ها در سه حالت تک‌هدفه و یک بهینه‌سازی چندهدفه، از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ مورد استفاده شده است. در فرایند بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک [۲۵]، کار خالص، ابتدا با در گرفتن تعدادی از متغیرهای زیر به عنوان نسل اولیه، پس از حل روابط گفته شده حاصل می‌شود، سپس داده‌های دیگری از محدوده فشار جداسازها در جدول ۵ به عنوان نسل جدید استفاده کرده و سپس با توجه به تابع هدف مقدار را سنجش و انتخاب کرده، و این فرایند را تا سنجش آخرین داده‌ها یا

3 Thermal efficiency optimal design (TEOD)

4 Exergy efficiency optimal design (EEOD)

5 Total product cost optimal design (COD)

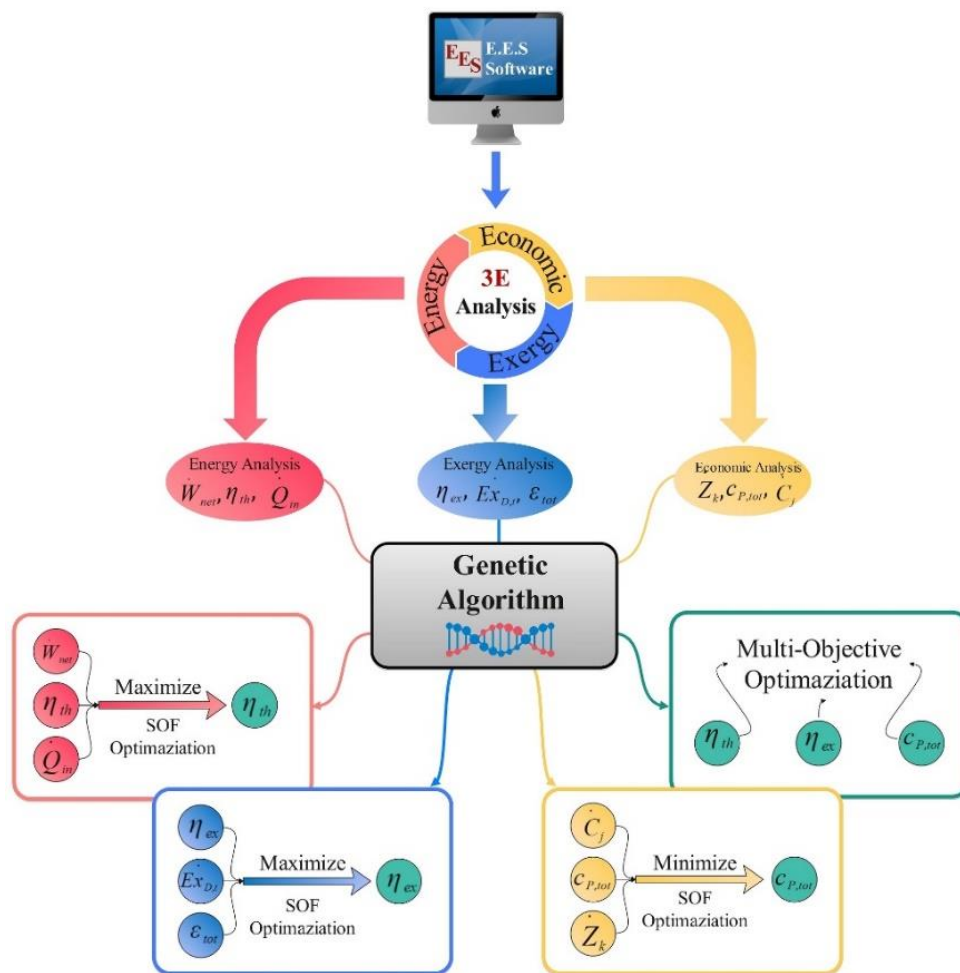
1 E.E.S

2 Genetic Algorithm

جدول ۵. بازه بهینه‌سازی فشار جداسازها.

Table 5. Pressure range of separators in optimization.

چرخه‌ها	تبخیر آبی یک مرحله‌ای	تبخیر آبی دو مرحله‌ای	تبخیر آبی سه مرحله‌ای
بازه فشار جداساز اول	$P_{cond} < P_2 < P_{Geo}$	$P_{10} < P_2 < P_{Geo}$	$P_{10} < P_2 < P_{Geo}$
بازه فشار جداساز دوم	-	$P_{cond} < P_{10} < P_2$	$P_{15} < P_{10} < P_2$
بازه فشار جداساز سوم	-	-	$P_{cond} < P_{15} < P_{10}$



شکل ۳. روند مدل‌سازی و بهینه‌سازی چرخه‌های مورد بررسی.

Fig. 3. The methodology of the simulation and optimization for the considered cycle.

جدول ۶. اعتبارسنجی مطالعه حاضر با منبع [۱۰].

Table 6. Verification of present study with Ref. [10].

s (kJ/kgK)		h (kJ/kg)		\dot{m} (kg/s)		P (kPa)		T (°C)		نقطه
مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	مطالعه حاضر [۱۰]	
۳/۲۵	۳/۲۵	۱۳۴۴	۱۳۴۴	۱۰۰	۱۰۰	۸۵۸۴	۸۵۸۴	۳۰۰	۳۰۰	۱
۳/۳۴	۳/۳۴	۱۳۴۴	۱۳۴۴	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۱۴	۲۰۱۴	۲۱۲/۸	۲۱۲/۸	۲
۶/۳۴	۶/۳۴	۲۷۹۹	۲۷۹۹	۲۲/۹۷	۲۲/۹۷	۲۰۱۴	۲۰۱۴	۲۱۲/۸	۲۱۲/۸	۳
۶/۴۹	۶/۴۹	۲۴۶۴	۲۴۶۴	۲۲/۹۷	۲۲/۹۷	۲۱۱/۹	۲۱۱/۹	۱۲۲/۱	۱۲۲/۱	۴
۶/۷۲	۶/۷۲	۲۵۵۶	۲۵۵۶	۳۶/۹۱	۳۶/۹۱	۲۱۱/۹	۲۱۱/۹	۱۲۲/۱	۱۲۲/۱	۵
۶/۹۴	۶/۹۴	۲۱۶۳	۲۱۶۳	۳۶/۹۱	۳۶/۹۱	۷/۳۸	۷/۳۸	۴۰	۴۰	۶
۰/۵۷	۰/۵۷	۱۶۷/۵	۱۶۷/۵	۳۶/۹۱	۳۶/۹۱	۷/۳۸	۷/۳۸	۴۰	۴۰	۷
۰/۵۷	۰/۵۷	۱۶۷/۶	۱۶۷/۶	۳۶/۹۱	۳۶/۹۱	۱۱۰	۱۱۰	۴۰/۰۱	۴۰/۰۱	۸
۲/۴۵	۲/۴۵	۹۱۰/۳	۹۱۰/۳	۷۷/۰۳	۷۷/۰۳	۲۰۱۴	۲۰۱۴	۲۱۲/۸	۲۱۲/۸	۹
۲/۵۶	۲/۵۶	۹۱۰/۳	۹۱۰/۳	۷۷/۰۳	۷۷/۰۳	۲۱/۹	۲۱/۹	۱۲۲/۱	۱۲۲/۱	۱۰
۷/۱۱	۷/۱۱	۲۷۰۹	۲۷۰۹	۱۳/۹۵	۱۳/۹۵	۲۱۱/۹	۲۱۱/۹	۱۲۲/۱	۱۲۲/۱	۱۱
۱/۵۵	۱/۵۵	۵۱۲/۶	۵۱۲/۶	۶۳/۰۹	۶۳/۰۹	۲۱۱/۹	۲۱۱/۹	۱۲۲/۱	۱۲۲/۱	۱۲
۰/۳۷	۰/۳۷	۱۰۴/۸	۱۰۴/۸	۱۷۶۱	۱۷۶۱	۱۰/۱/۱	۱۰/۱/۱	۲۵	۲۵	۱۳
۰/۵۱	۰/۵۱	۱۴۶/۷	۱۴۶/۷	۱۷۶۱	۱۷۶۱	۱۰/۱/۱	۱۰/۱/۱	۳۵	۳۵	۱۴

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج، به مطالعه پارامتری و همچنین نتایج بهینه‌سازی هر سه چرخه تبخیرآنی یک تا سه مرحله‌ای برای چاه زمین‌گرمایی بوشلی پرداخته خواهد شد. در جدول ۷ خواص ترمودینامیکی (دما، فشار، دبی، آنتالپی، آنترپی و اگزرژی) تمام نقاط هر سه چرخه تبخیر آنی یک تا سه مرحله‌ای مشاهده می‌گردد.

۳-۱- مطالعه پارامتری

در قسمت مطالعه پارامتری، تاثیر فشارجداسازهای هر چرخه، بر پارامترهایی نظیر توان خالص، بازده انرژی، بازده اگزرژی و هزینه تولید توان واحد بررسی شده است. شایان ذکر است در بررسی پارامتری تمام مقادیر استفاده شده از مقادیر و نتایج بهینه از دیدگاه انرژی استفاده شده است، به عبارتی برای بررسی فشار بهینه هر جداساز، فشار در نظر گرفته شده برای

چندهدفه^۱. لازم به ذکر است که در سه حالت بهینه‌سازی تک‌هدفه، تابع وزنی مرتبط با تابع عملکردی موردنظر برابر ۱ و سایر توابع وزنی برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. در حالت طراحی با بهینه‌سازی چندهدفه هر سه تابع وزنی $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شده است.

۲-۷- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مقادیر محاسبه شده برای مقادیر ترمودینامیکی (دما، فشار، دبی، آنتالپی و آنترپی) چرخه تبخیر آنی دو مرحله‌ای در هر نقطه در با نتایج بدست‌آمده توسط عبدالعلی‌پور و همکاران [۱۰] بصورت نقطه به نقطه مقایسه شده که در جدول ۶ قابل مشاهده است. نتایج نشان از انطباق پارامترهای ترمودینامیکی (دما، فشار، دبی، آنتالپی و آنترپی) با مطالعه قبلی می‌باشد.

1 Multi-Objective optimal design (MOOD)

جدول ۷. خواص ترمودینامیکی نقاط مختلف تمام چرخه‌ها(ادامه دارد)

Table 7. Thermodynamic properties of states for all cycles(Continued).

$\dot{E}x (kW)$	$s(kJ / kg.K)$	$h(kJ / kg)$	$\dot{m}(kg / s)$	$P(kPa)$	$T (^{\circ}C)$	سیال	نقطه
چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای							
-	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۱۰/۱/۱	۱۵	-	۰
۱۴۵۴۸	۲/۷۰۱	۱۰۳۷	۵۷	۳۳۴۵	۲۴۰	زمین گرمایی	۱
۱۲۵۱۲	۲/۸۴۳	۱۰۳۷	۵۷	۲۹۴/۵	۱۳۲/۹	زمین گرمایی	۲
۸۹۳۲	۶/۹۹۸	۲۷۲۴	۱۲/۵۹	۲۹۴/۵	۱۳۲/۹	زمین گرمایی	۳
۱۷۴۰	۷/۲۷۹	۲۲۳۴	۱۲/۵۹	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۴
۳۳/۷۵	۰/۵۰۵	۱۴۶/۶	۱۲/۵۹	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۵
۳۵/۰۹	۰/۵۰۵	۱۴۶/۷	۱۲/۵۹	۱۱۰	۳۵/۰۱	زمین گرمایی	۶
۳۵۷۹	۱/۶۶۵	۵۵۸/۹	۴۴/۴۱	۲۹۴/۵	۱۳۲/۹	زمین گرمایی	۷
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	۴۱۸/۹	۱۰/۱/۱	۱۵	آب	۸
۲	۰/۴۳۶۵	۱۲۵/۸	۴۱۸/۹	۱۰/۱/۱	۳۰	آب	۹
چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای							
0	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۱۰/۱/۱	۱۵	-	۰
۱۴۸۴۵	۲/۷۰۱	۱۰۳۷	۵۷	۳۳۴۵	۲۴۰	زمین گرمایی	۱
۱۳۸۳۰	۲/۷۶۳	۱۰۳۷	۵۷	۷۵۲	۱۶۷/۹	زمین گرمایی	۲
۷۶۳۷	۶/۶۸۴	۲۷۶۶	۹/۰۶۹	۷۵۲	۱۶۷/۹	زمین گرمایی	۳
۴۵۶۴	۶/۸۲۵	۲۴۶۸	۹/۰۶۹	۹۵/۰۴	۹۸/۲۲	زمین گرمایی	۴
۸۰۳۹	۷/۰۵۲	۲۵۵۲	۱۵/۴	۹۵/۰۴	۹۸/۲۲	زمین گرمایی	۵
۲۱۱۵	۷/۲۴۱	۲۲۲۲	۱۵/۴	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۶
۴۱/۲۷	۰/۵۰۵	۱۴۶/۶	۱۵/۴	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۷
۴۲/۹۱	۰/۵۰۵	۱۴۶/۷	۱۵/۴	۱۱۰	۳۵/۰۱	زمین گرمایی	۸
۶۱۹۴	۲/۰۲۱	۷۱۰/۱	۴۷/۹۳	۷۵۲	۱۶۷/۹	زمین گرمایی	۹
۵۲۳۷	۲/۰۹۱	۷۱۰/۱	۴۷/۹۳	۹۵/۰۴	۹۸/۲۲	زمین گرمایی	۱۰
۳۴۷۴	۷/۳۷۶	۲۶۷۳	۶/۳۲۸	۹۵/۰۴	۹۸/۲۲	زمین گرمایی	۱۱
۱۷۶۳	۱/۲۸۷	۴۱۱/۵	۴۱/۶	۹۵/۰۴	۹۸/۲۲	زمین گرمایی	۱۲
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	۵۰۹/۳	۱۰/۱/۱	۱۵	آب	۱۳
۸۰۴	۰/۴۳۶۵	۱۲۵/۸	۵۰۹/۳	۱۰/۱/۱	۳۰	آب	۱۴
چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای							
0	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۱۰/۱/۱	۱۵	-	۰
۱۴۸۴۵	۲/۷۰۱	۱۰۳۷	۵۷	۳۳۴۵	۲۴۰	زمین گرمایی	۱
۱۴۲۵۲	۲/۷۳۷	۱۰۳۷	۵۷	۱۱۲۷	۱۸۵/۲	زمین گرمایی	۲
۶۴۳۸	۶/۵۴۴	۲۷۸۲	۷/۱۷	۱۱۲۷	۱۸۵/۲	زمین گرمایی	۳
۴۷۸۹	۶/۶۳۳	۲۵۷۸	۷/۱۷	۲۹۷	۱۳۳/۲	زمین گرمایی	۴
۸۴۸۶	۶/۷۸۶	۲۶۴۰	۱۲/۳۷	۲۹۷	۱۳۳/۲	زمین گرمایی	۵
۵۲۰۷	۶/۹۰۱	۲۴۰۸	۱۲/۳۷	۵۲/۷۴	۸۲/۶۷	زمین گرمایی	۶
۷۱۴۳	۷/۰۷	۲۴۶۸	۱۶/۵۲	۵۲/۷۴	۸۲/۶۷	زمین گرمایی	۷
۲۲۶۲	۷/۲۱۵	۲۲۱۴	۱۶/۵۲	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۸
۴۴/۲۸	۰/۵۰۵	۱۴۶/۶	۱۶/۵۲	۵/۶۲۷	۳۵	زمین گرمایی	۹
۴۶/۰۵	۰/۵۰۵	۱۴۶/۷	۱۶/۵۲	۱۱۰	۳۵/۰۱	زمین گرمایی	۱۰
۷۸۱۴	۲/۱۹	۷۸۶/۲	۴۹/۸۳	۱۱۲۷	۱۸۵/۲	زمین گرمایی	۱۱
۷۳۱۱	۲/۲۲۵	۷۸۶/۲	۴۹/۸۳	۲۹۷	۱۳۳/۲	زمین گرمایی	۱۲
۳۶۹۸	۶/۹۹۵	۲۷۲۵	۵/۲۰۳	۲۹۷	۱۳۳/۲	زمین گرمایی	۱۳

جدول ۷. خواص ترمودینامیکی نقاط مختلف تمام چرخه‌ها

Table 7. Thermodynamic properties of states for all cycles.

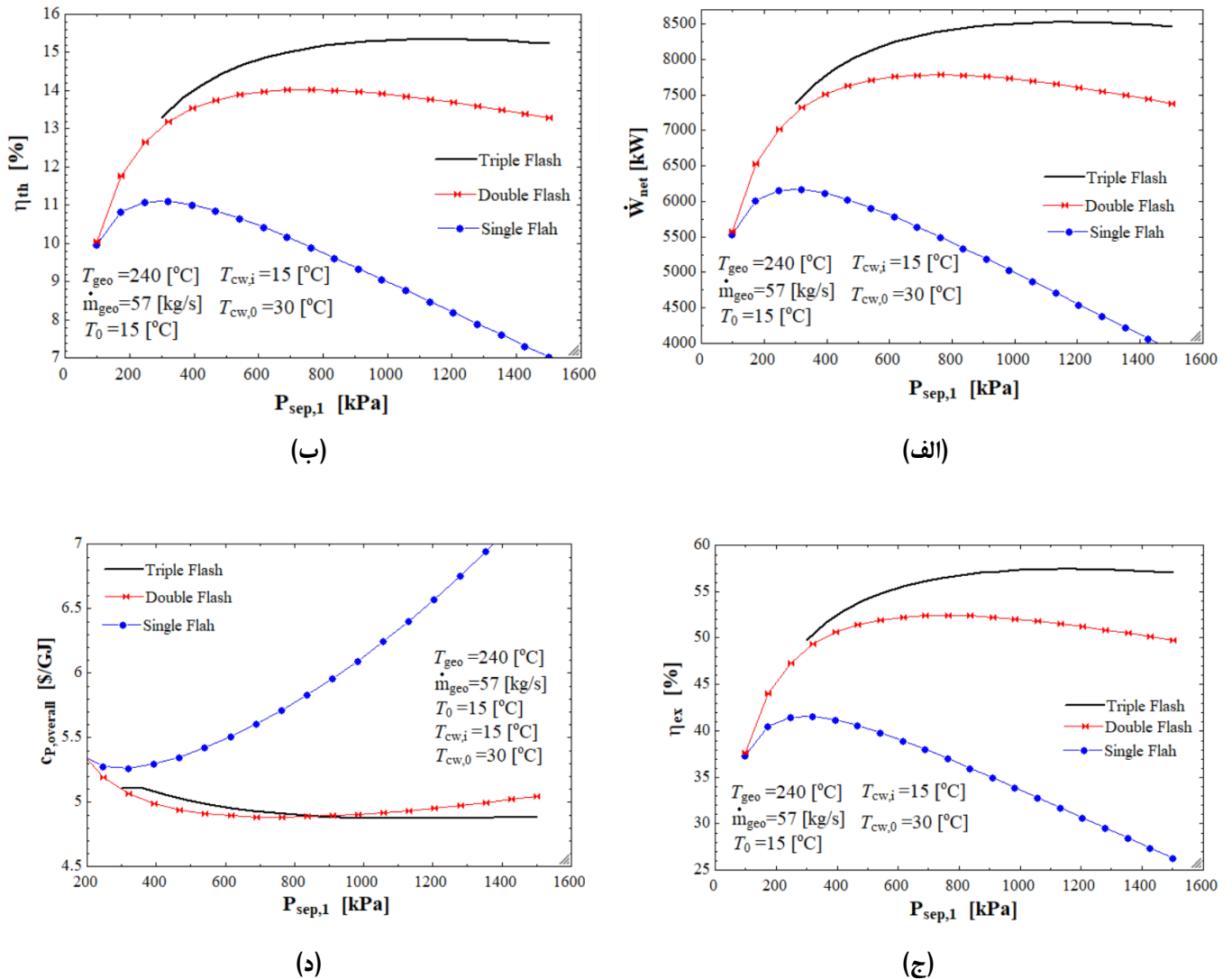
$\dot{E}x$ (kW)	s (kJ / kg.K)	h (kJ / kg)	\dot{m} (kg / s)	P (kPa)	T (°C)	سیال	نقطه
۳۶۱۳	۱/۶۶۹	۵۶۰/۱	۴۴/۶۳	۲۹۷	۱۳۳/۲	زمین‌گرمایی	۱۴
۳۱۰۱	۱/۷۰۸	۵۶۰/۱	۴۴/۶۳	۵۲/۷۴	۸۲/۶۷	زمین‌گرمایی	۱۵
۱۹۳۶	۷/۵۷۵	۲۶۴۸	۴/۱۵	۵۲/۷۴	۸۲/۶۷	زمین‌گرمایی	۱۶
۱۱۶۵	۱/۱۰۷	۳۴۶/۱	۴۰/۴۸	۵۲/۷۴	۸۲/۶۷	زمین‌گرمایی	۱۷
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	۵۴۴/۵	۱۰/۱/۱	۱۵	آب	۱۸
۸۵۹/۵	۰/۴۳۶۵	۱۲۵/۸	۵۴۴/۵	۱۰/۱/۱	۳۰	آب	۱۹

خود رسیده است که این موضوع با توجه به رابطه (۱۹) قابل بیان می‌باشد، شایان ذکر است تغییرات آهنگ هزینه اولیه کل نیز با فشار جداساز اول تغییر می‌کند اما روند تغییرات توان خالص بر روند تغییرات آهنگ هزینه اولیه کل غلبه کرده و باعث ایجاد کمینه برای هزینه تولید توان واحد می‌شود. از نتایج این چهار شکل قابل ملاحظه است که از دیدگاه ترمودینامیکی (توان خالص، بازده انرژی و بازده انرژی) و دیدگاه اقتصادی (هزینه تولید توان واحد)، به ترتیب چرخه سه‌مرحله‌ای، چرخه دومرحله‌ای و چرخه یک‌مرحله‌ای دارای بهترین نتایج می‌باشند.

روند تغییرات توابع عملکردی دو چرخه تبخیری دو و سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی برحسب فشارجداساز دوم در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. در شکل ۵ (الف) تغییرات توان خالص این دو چرخه نسبت به فشارجداساز دوم این چرخه‌ها نمایش داده شده است.

با افزایش فشار جداساز دوم، توان تولیدی توربین ۱ کم شده در حالیکه توان تولیدی توربین ۲ بیشتر می‌شود. بنابراین روند تغییرات توان خالص هرچرخه نسبت به تغییرات فشارجداساز دوم نیز دارای یک مقدار بیشینه خواهد بود. در شکل ۵ (ب) و (ج) نیز تغییرات بازده انرژی و انرژی نسبت به فشارجداساز دوم برای چرخه‌های تبخیری دو و سه مرحله‌ای نمایش داده شده است که روند این تغییرات مشابه با توان خالص خواهد بود. همچنین روند تغییرات هزینه تولید توان خالص بر حسب فشار جداساز دوم در شکل ۵ (د) مشاهده می‌گردد که همانطور که پیشتر به آن پرداخته شده است، طبق رابطه (۱۹) هزینه تولید توان واحد علاوه بر توان خالص، به آهنگ هزینه

سایر جداسازها مقادیر بهینه از دیدگاه انرژی می‌باشد. در شکل ۴ (الف) تاثیر فشار جداساز اول بر توان خالص تولیدی هر سه چرخه تبخیری آنی یک تا سه مرحله‌ای مشاهده می‌گردد. در هر سه چرخه، با افزایش فشار جداساز تا قبل از نقطه بیشینه دمای جریان ورودی به توربین و به تبع آن آنتالپی افزایش می‌یابد، اما از طرفی دیگر این افزایش فشار بر دبی جرمی تاثیر منفی خواهد داشت و دبی جرمی جریان ورودی به توربین ۱ با کاهش جزئی روبرو خواهد بود. اما پس از نقطه بیشینه مقدار کاهش دبی جرمی بر افزایش آنتالپی جریان غلبه خواهد کرد و توان خالص روند کاهشی خواهد داشت. این موضوع باعث شده که تغییرات توان خالص نسبت به فشار جداساز اول هر چرخه دارای یک مقدار بیشینه باشد. با توجه به این شکل مشخص است که برای یک فشار خاص، به ترتیب توان خالص چرخه تبخیری سه مرحله‌ای، دومرحله‌ای و یک مرحله‌ای دارای مقدار بیشتری خواهد بود. در شکل ۴ (ب) و (ج) تغییرات بازده انرژی و انرژی هر چرخه بر حسب فشار جداساز اول آن چرخه نمایش داده شده است. قابل مشاهده است که روند تغییرات بازده انرژی و انرژی مشابه با روند تغییرات توان خالص چرخه با فشار جداساز اول می‌باشد. این اتفاق به این علت رخ می‌دهد که بازده انرژی و بازده انرژی به ترتیب طبق روابط (۲۲) و (۲۳) در صورت کسر، وابسته به توان خالص چرخه می‌باشند. در شکل ۴ (د) نیز تغییرات هزینه تولید توان واحد نسبت به فشارجداساز اول برای هر سه چرخه نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد در فشاری از جداساز که در آن توان خالص هر چرخه به بیشترین مقدار خود رسیده، در همان مقدار فشار، هزینه تولید توان واحد آن چرخه به کمینه مقدار

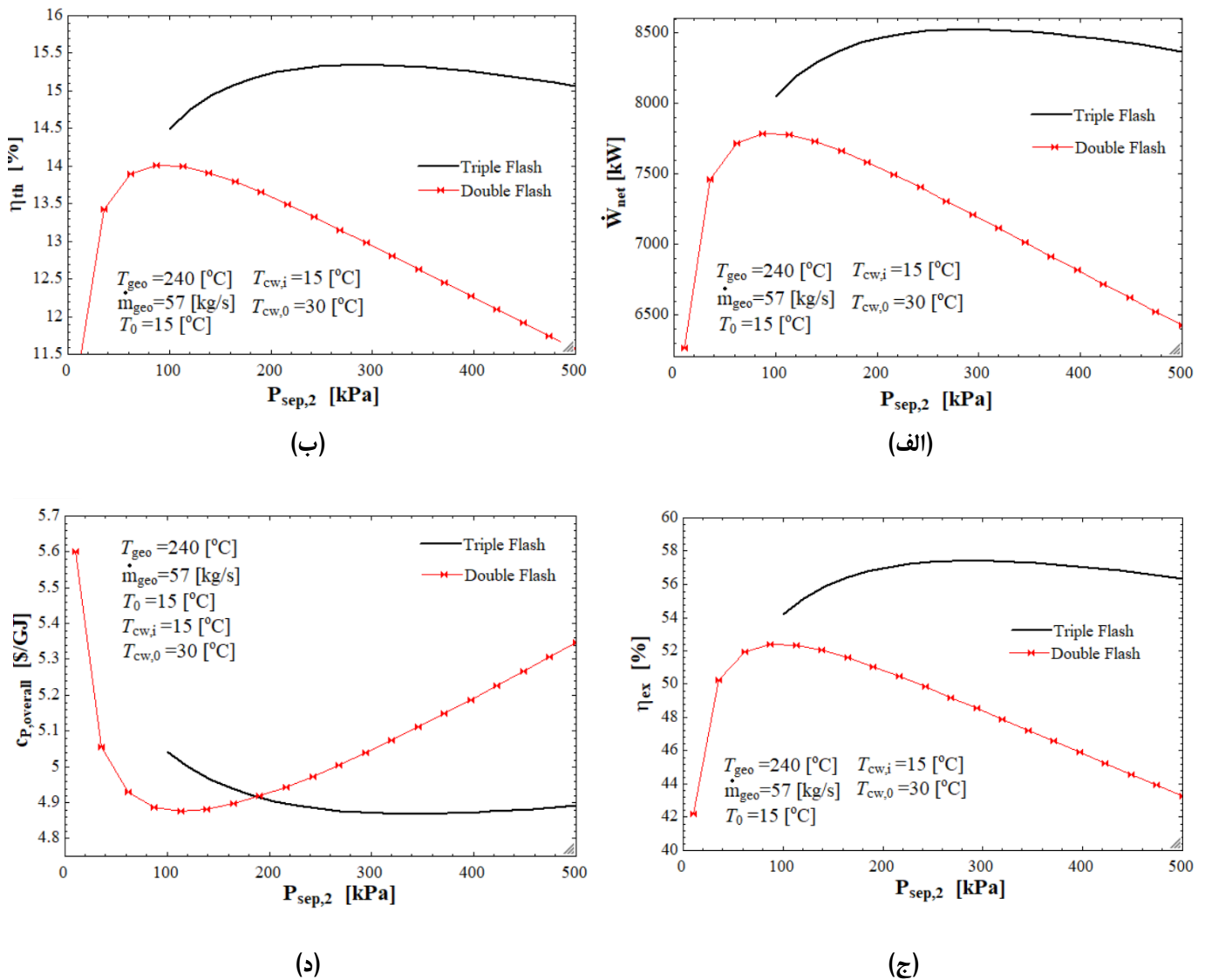


شکل ۴. تاثیر فشار جداساز اول روی الف) کارخالص چرخه، ب) بازده حرارتی، ج) بازده انرژی و د) هزینه تولید توان واحد برای سه آرایش بررسی برای منطقه بوشلی.

Fig. 4. Effects of first separator pressure on the a) net output power, b) thermal efficiency, c) exergy efficiency, and d) power specific cost of Booshli's geothermal area for three cycles.

آنی سه مرحله‌ای کمتر از هزینه توان واحد چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای در مقادیر بهینه است. همچنین برای تولید توان واحد، مقدار فشار بهینه جداساز دوم برای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای در مقدار بزرگتری نسبت به چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج این چهار شکل مشخص است که به لحاظ ترمودینامیکی و انرژی‌اقتصادی چرخه

اولیه کل و هزینه سوخت نیز وابسته است. با افزایش فشار جداساز دوم، انرژی سوخت دو چرخه ثابت بوده، آنگاه هزینه اولیه کل هر دو چرخه مقداری افزایش یافته درحالی‌که توان خالص دارای کمینه خواهد بود، که با توجه به نتایج روند تغییرات توان خالص بیشترین تاثیر را روی هزینه تولید توان واحد گذاشته است. مطابق این شکل نیز هزینه توان واحد چرخه تبخیر



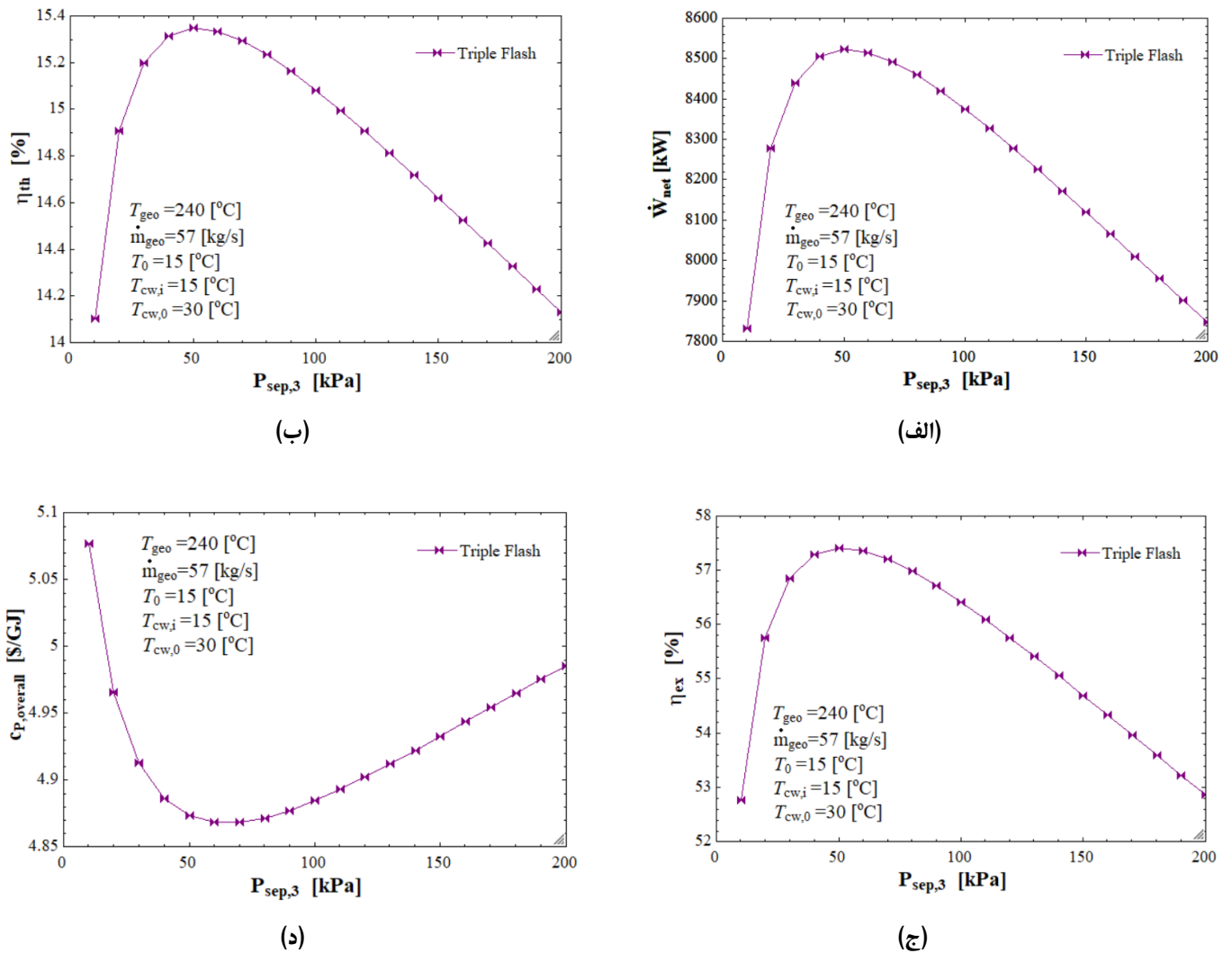
شکل ۵. تاثیر فشار جداساز دوم روی الف) کارخالص چرخه، ب) بازده حرارتی، ج) بازده انرژی و د) هزینه تولید واحد برای آرایش تبخیر آبی دو و سه مرحله ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 5. Effects of second separator pressure on the a) net output power, b) thermal efficiency, c) exergy efficiency, and d) power specific cost of Booshli's geothermal area for three cycles.

و توان توربین ۳ افزایش می‌یابد. چنین روند متضادی باعث می‌شود که توان خالص نسبت به فشار جداساز سوم دارای یک مقدار بیشینه باشد. در شکل ۶ (ب) و (ج) نیز روند تغییرات بازده انرژی و انرژی و آگرژی طبق روابط (۲۲) و (۲۳) بر حسب فشار جداساز سوم نیز، مشابه روند تغییرات توان خالص خواهد بود. در نهایت در شکل ۶ (د) نیز تغییرات هزینه تولید واحد نسبت به فشار جداساز سوم در چرخه تبخیر آن سه مرحله‌ای بررسی شده است. قابل

تبخیر آبی سه مرحله‌ای نسبت به چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای دارای شرایط بهتری می‌باشد.

روند تغییرات توابع عملکردی چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی بر حسب فشار جداساز سوم در شکل ۶ نمایش داده شده است. در شکل ۶ (الف) تغییرات توان خالص بر حسب فشار این جداساز مشاهده می‌گردد. با افزایش فشار جداساز سوم توان تولیدی توسط توربین ۲ کاهش

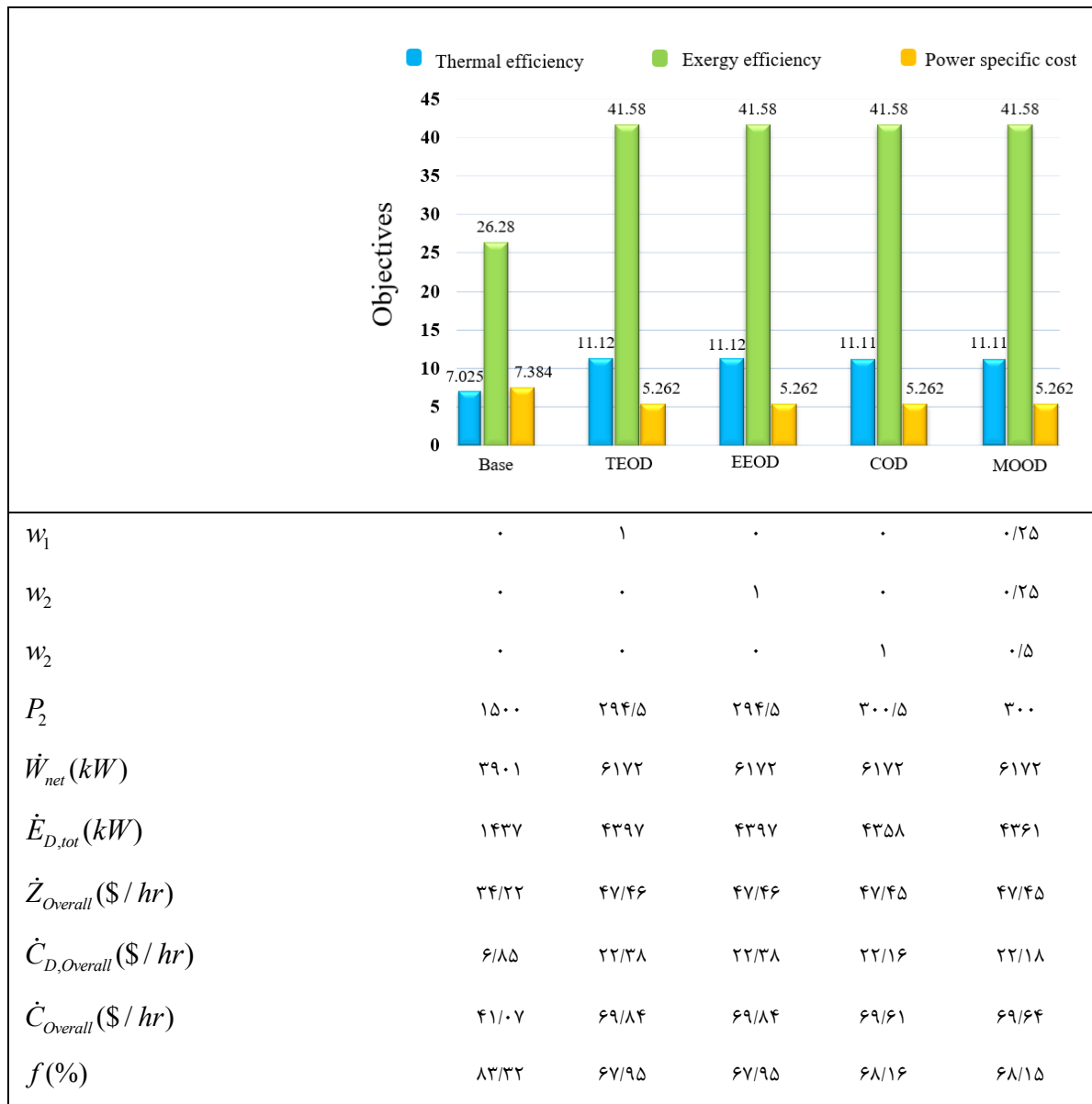


شکل ۶. تاثیر فشار جداساز سوم روی الف) کارخالص چرخه ب) بازده حرارتی ج) بازده انرژی د) هزینه تولید واحد برای آرایش تبخیر آبی سه مرحله ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 6. Effects of third separator pressure on the a) net output power, b) thermal efficiency, c) exergy efficiency, and d) power specific cost of Booshli's geothermal area for three cycles.

خالص برابر ۸۵۲۳ کیلووات در بیشینه مقدار خود و به دنبال آن هزینه تولید توان واحد در کمترین میزان خود و بصورت تقریبی برابر ۴/۸۷ دلاربرگیگاژول بدست خواهد آمد. همچنین در این مقدار فشار، بازده انرژی و انرژی برای چرخه تبخیرآبی سه مرحله‌ای برابر ۱۵/۳۵ و ۵۷/۴۱ درصد بدست آمده است.

مشاهده است که در فشاری از جداساز سوم که توان خالص بیشینه است، هزینه تولید توان واحد به کمینه مقدار خود می‌رسد، علت کمینه مقدار هزینه تولید توان در این شکل این است که روند تغییرات توان خالص بر تغییرات هزینه سوخت و آهنگ هزینه اولیه کل غلبه کرده است. این اتفاق در حدود فشار ۵۰ کیلوپاسکال رخ داده شده است. جایی که توان



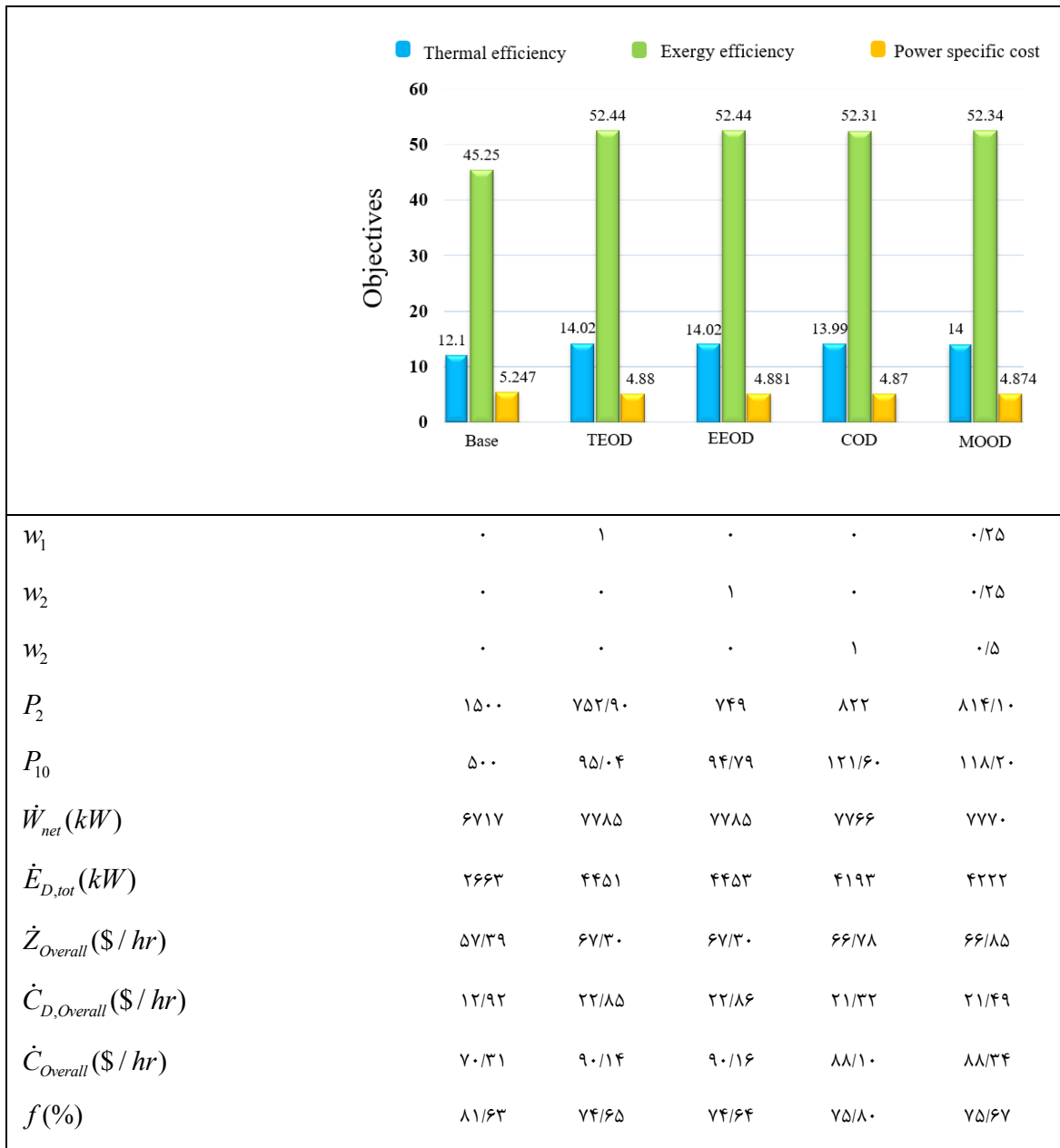
شکل ۷. نتایج بهینه تک هدفه و چند هدفه برای آرایش تبخیر آبی تک مرحله ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 7. Single-objective and multi-objective optimization results for the single flash cycle in Booshli's geothermal area.

یکسانی حاصل خواهد شد که منجر به بهبود بترتیب ۴/۰۸۵ و ۱۵/۳ درصدی بازده انرژی و انرژی و انرژی و همچنین کاهش ۲۸/۷۳ درصدی هزینه تولید توان واحد نسبت به حالت اولیه (حالت قبل از بهینه‌سازی) خواهد شد. مطابق نتایج حاصل شده در حالت بهینه چند هدفه و به‌ازای فشار بهینه ۳۰۰ کیلوپاسکال، توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی، ضریب انرژی و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۶۱۷۲ کیلووات، ۱۱/۱۱ درصد، ۴۱/۵۸ درصد،

۳-۲ نتایج بهینه‌سازی

در شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج بهینه‌سازی در سه حالت تک‌هدفه و حالت جامع چندهدفه برای چرخه تبخیر آبی تک مرحله‌ای برای منطقه بوشلی مشاهده می‌گردد. در شکل ۷ نتایج مربوط به حالت‌های مختلف بهینه‌سازی چرخه تبخیر آبی تک‌مرحله‌ای نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر چهار حالت بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه نتایج تقریباً



شکل ۸. نتایج بهینه تک هدفه و چند هدفه برای آرایش تبخیر آبی دو مرحله ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 8. Single-objective and multi-objective optimization results for the double flash cycle in Booshli's geothermal area.

در شکل ۸ نتایج بهینه‌سازی در حالت‌های مختلف برای چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای برای منطقه بوشلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در حالت بهینه چند هدفه (به‌ازای فشار جداساز اول ۸۱۴/۱ کیلوپاسکال و فشار جداساز دوم ۱۱۸/۲ کیلوپاسکال)، توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی، ضریب انرژی و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۷۷۷۰ کیلووات،

۶۸/۱۵ درصد و ۵/۲۶۲ دلار بر گیگاژول حاصل شده است. شایان ذکر است نتایج بهینه منطبق برای نتایج بررسی پارامتری به ازای فشار جداساز اول در چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای برای بوشلی می‌باشد. پس با توجه به نتایج این شکل، برای چرخه تبخیر آبی تک مرحله‌ای، نتایج بهینه‌سازی تک هدفه قابل استفاده در نتایج بهینه‌سازی چند هدفه نیز می‌باشد.

۱۴ درصد، ۵۲/۳۴ درصد، ۷۵/۶۷ درصد و ۴/۸۷۴ دلاربرگیگاژول حاصل شده است. مشاهده می‌شود که اگرچه در حالت بهینه‌سازی چندهدفه بازده انرژی و انرژی نسبت به بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه در حالات بیشینه‌سازی بازده انرژی و بیشینه‌سازی بازده انرژی با کاهش جزئی مواجه بوده‌اند، اما هزینه تولید توان واحد نیز در حالت بهینه‌سازی چندهدفه دچار کاهش شده است، با این حال هزینه تولید توان واحد نسبت به بهینه‌سازی تک‌هدفه در حالت کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد با افزایش جزئی روبرو شده است. همچنین آهنگ هزینه اولیه، آهنگ هزینه تخریب انرژی و آهنگ هزینه کل اگرچه در حالت بهینه‌سازی چندهدفه با کاهش اندک نسبت به مقادیر بدست آمده در حالات بیشینه‌سازی بازده انرژی و بیشینه‌سازی بازده انرژی مواجه بوده‌اند، اما نسبت به حالت بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد این پارامترها دچار افزایش جزئی شده‌اند. همچنین در هر چهار حالت بهینه برای چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای بوشلی نتایج بهتری نسبت به هر چهار حالت بهینه برای چرخه تبخیر آبی تک‌مرحله‌ای بوشلی از خود نشان داد. پس با توجه به مطالب گفته شده در این قسمت می‌توان گفت که برای چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای نتایج بهینه‌سازی تک هدفه متفاوت از نتایج بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد.

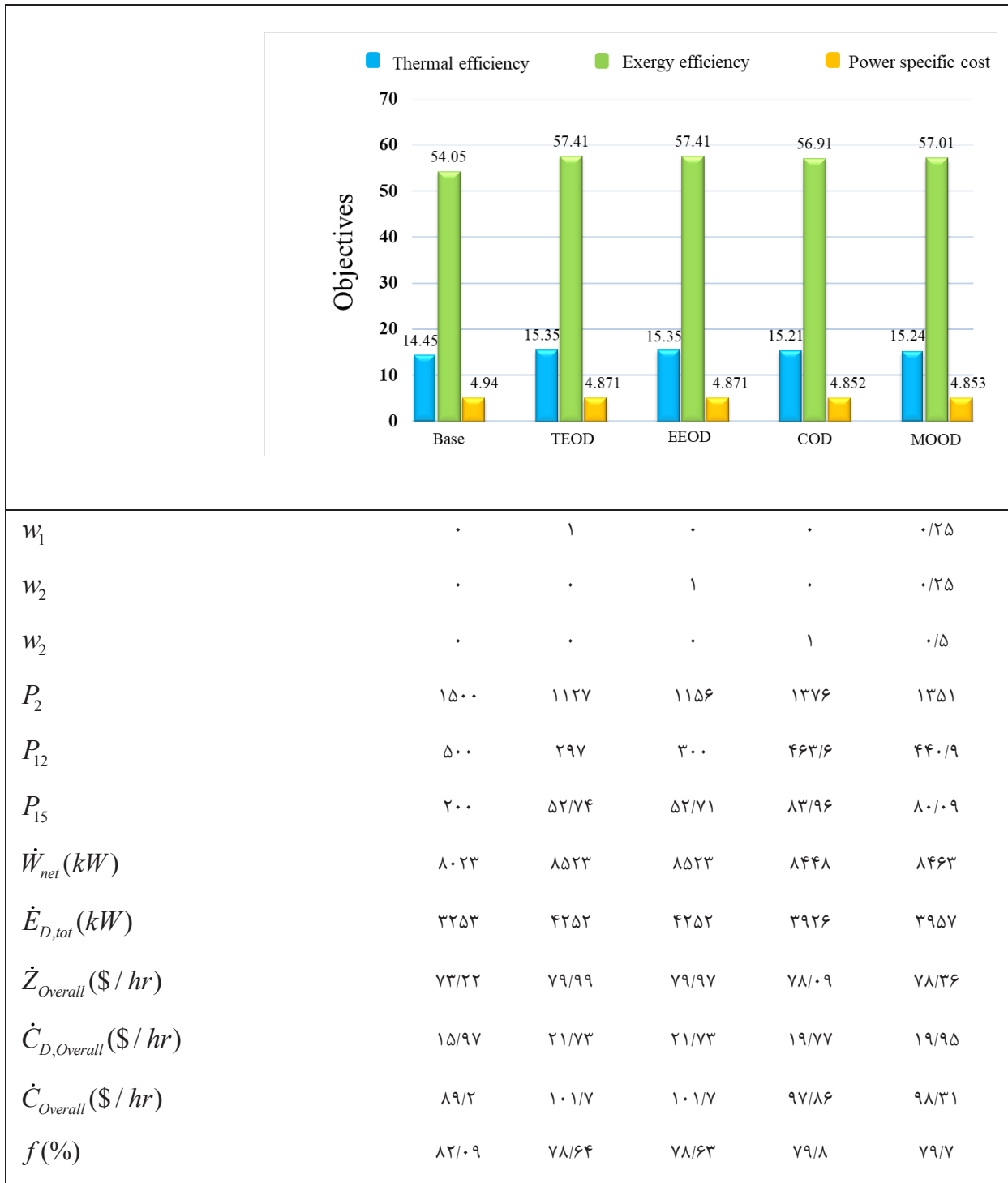
در شکل ۹ نیز نتایج بهینه‌سازی چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی به نمایش درآمده است. در حالت بهینه چند هدفه (به‌ازای فشار جداساز اول ۱۳۵۱ کیلوپاسکال و فشار جداساز دوم ۴۴۰/۹ کیلوپاسکال، جداساز سوم ۸۰/۰۹ کیلوپاسکال)، توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی، ضریب انرژی‌اکنونومیک و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۸۴۶۳ کیلووات، ۱۵/۲۴ درصد، ۵۷/۰۱ درصد، ۷۹/۷ درصد و ۴/۸۵۳ دلاربرگیگاژول حاصل شده است. در حالت بهینه‌سازی چندهدفه مشاهده می‌گردد که مقادیر توان خالص، بازده انرژی و انرژی، دچار کاهش جزئی نسبت به حالت بیشینه‌سازی بازده انرژی و بیشینه‌سازی بازده انرژی شده است اما از نظر اقتصادی عملکرد بهتری نسبت به بیشینه‌سازی بازده انرژی و بیشینه‌سازی بازده انرژی خواهد داشت. پارامترهای مربوط به تحلیل انرژی‌اکنونومیک نظیر آهنگ هزینه اولیه، آهنگ هزینه تخریب انرژی و آهنگ هزینه کل نیز در حالت کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد بهترین عملکرد را از خود نشان داد. پس با توجه به این نتایج که برای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای نتایج بهینه‌سازی تک هدفه متفاوت از نتایج بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد. همچنین در هر چهار حالت بهینه برای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای بوشلی پارامترهای عملکردی (توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی و هزینه تولید

توان واحد) نتایج بهتری نسبت به پارامترهای عملکردی هر چهار حالت بهینه برای چرخه تبخیر آبی تک و دو مرحله‌ای بوشلی را از خود نشان داد. شایان ذکر است روند و نتایج بهینه‌سازی منطبق بر روند تغییرات پارامترهای عملکردی نسبت به سه فشار جداساز در بررسی پارامتری برای منطقه بوشلی در آرایش چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای می‌باشد.

همچنین با توجه به نتایج پارامترهای مهم تحلیل انرژی‌اکنونومیک موجود در شکل ۷ تا ۹ مشخص است که با افزایش مراحل تبخیر آبی، آهنگ هزینه اولیه و آهنگ هزینه کل به شدت افزایش می‌یابد، در حالیکه هزینه تولید توان واحد کاهش می‌یابد. این به این علت می‌باشد که با افزایش تعداد مراحل، توان خالص به شدت افزایش یافته است، که شدت افزایش توان خالص بر شدت افزایش آهنگ هزینه اولیه کل غلبه کرده و باعث می‌شود هزینه تولید توان واحد چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای کمتر از دو و تک مرحله‌ای شود. همچنین بیشترین ضریب انرژی‌اکنونومیک متعلق به چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای می‌باشد.

در جداول ۸ تا ۱۰ نیز مقدار پارامترهای تاثیرگذار تحلیل انرژی و انرژی‌اکنونومیک مربوط به تمامی اجزای هر سه چرخه تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که چگالنده موجود در هر چرخه علاوه بر اینکه دارای کمترین مقدار بازده انرژی در میان تمامی اجزای چرخه‌ها می‌باشد، در چرخه‌های تبخیر آبی دو و سه مرحله‌ای دارای بیشترین نرخ هزینه تخریب انرژی نیز می‌باشد. در صورتی که در چرخه تبخیر آبی یک مرحله‌ای بیشترین نرخ هزینه تخریب انرژی متعلق به شیر انبساط می‌باشد. بیشتر بودن نرخ هزینه تخریب انرژی در چگالنده و شیر انبساط به دلیل بالا بودن تخریب انرژی این اعضا می‌باشد. همچنین در میان تمام اجزا جداسازها از دیدگاه انرژی، دارای بهترین عملکرد هستند زیرا مقدار تخریب انرژی جداسازها برابر صفر و همچنین بازده انرژی جداسازها برابر ۱۰۰ درصد می‌باشد. بعد از آن پمپ‌ها نیز با کمترین نرخ تخریب انرژی و بازده انرژی بالا، دارای عملکرد قابل قبولی از دیدگاه انرژی می‌باشند.

در شکل ۱۰ مقدار تخریب انرژی مربوط به اجزای هر سه چرخه تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که در چرخه تبخیر آبی تک مرحله‌ای شیر انبساط دارای بیشترین مقدار تخریب انرژی می‌باشد چرا که مقدار افت فشار جریان ورودی به شیر انبساط در این چرخه بسیار بالا می‌باشد و به تبع آن دمای این جریان نیز با افت مواجه خواهد بود



شکل ۹. نتایج بهینه تک هدفه و چند هدفه برای آرایش تبخیر آبی سه مرحله ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 9. Single-objective and multi-objective optimization results for the triple flash cycle in Booshli's geothermal area.

جدول ۸. پارامترهای تاثیرگذار تحلیل انرژی و اجزای چرخه تبخیر آبی در حالت بهینه

Table 8. Effective parameters of exergy and exergoeconomic analysis for all components of the single flash cycle in the optimal state.

$f(\%)$	$\dot{C}_{tot,k} (\$/hr)$	$\dot{C}_{D,k} (\$/hr)$	$\dot{Z}_k (\$/hr)$	$\varepsilon(\%)$	$\dot{E}_{D,k} (kW)$	$\dot{E}_{P,k} (kW)$	$\dot{E}_{F,k} (kW)$	عضو
۰	۱۰/۹۱۸۸	۱۰/۹۱۸۸	۰	۸۴/۲۸	۲۳۳۳	۱۲۵۱۲	۱۴۸۴۵	شیر انبساط
۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۲۵۱۲	۱۲۵۱۲	جداساز
۸۸/۸۷	۵۰/۸۴	۵/۶۶	۴۵/۱۸	۸۵/۸۴	۱۰۱۹	۶۱۷۴	۷۱۹۳	توربین
۲۷/۵۸	۸/۰۱	۵/۸۰	۲/۲۱	۳۸/۷۶	۱۰۴۴/۸۰	۶۶۱/۲۰	۱۷۰۶	چگالنده
۹۵/۲۰	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۸	۸۱/۳۰	۰/۳۱	۱/۳۴	۱/۶۵	پمپ

جدول ۹. پارامترهای تاثیرگذار تحلیل انرژی و اجزای چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای در حالت بهینه

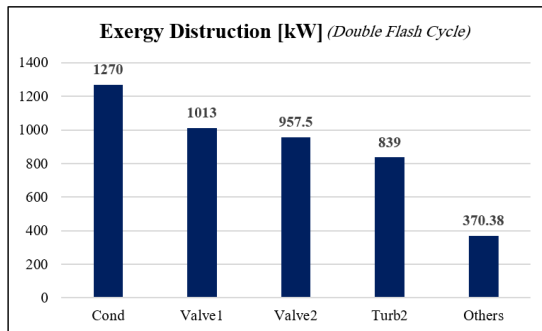
Table 9. Effective parameters of exergy and exergoeconomic analysis for all components of the double flash cycle in the optimal state.

$f(\%)$	$\dot{C}_{tot,k} (\$/hr)$	$\dot{C}_{D,k} (\$/hr)$	$\dot{Z}_k (\$/hr)$	$\varepsilon(\%)$	$\dot{E}_{D,k} (kW)$	$\dot{E}_{P,k} (kW)$	$\dot{E}_{F,k} (kW)$	عضو
۰	۴/۷۴	۴/۷۴	۰	۹۳/۱۷	۱۰۱۳	۱۳۸۳۲	۱۴۸۴۵	شیر انبساط ۱
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۳۸۳۲	۱۳۸۳۲	جداساز ۱
۹۳/۱۶	۲۷/۱۹	۱/۸۶	۲۵/۳۳	۸۷/۹۶	۳۷۰	۲۷۰۲	۳۰۷۲	توربین ۱
۰	۴/۸۱	۴/۸۱	۰	۸۴/۵۵	۹۵۸	۵۲۴۰	۶۱۹۸	شیر انبساط ۲
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۵۲۴۰	۵۲۴۰	جداساز ۲
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۸۰۳۹	۸۰۳۹	میکسر
۸۹/۶۶	۴۳/۹۷	۴/۵۵	۳۹/۴۲	۸۵/۸۴	۸۳۹	۵۰۸۴	۵۹۲۳	توربین ۲
۲۶/۱۹	۹/۳۳	۶/۸۸	۲/۴۴۲۶	۳۸/۷۶	۱۲۷۰	۸۰۴	۲۰۷۴	چگالنده
۹۴/۸۳	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۱۰	۸۱/۳۰	۰/۳۸	۱/۶۴	۲/۰۲	پمپ

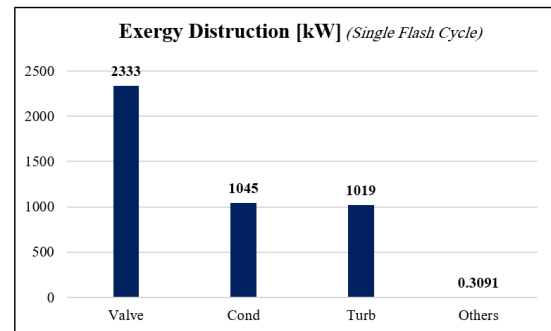
جدول ۱۰. پارامترهای تاثیرگذار تحلیل انرژی و اکسرژی و اجزای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای در حالت بهینه.

Table 10. Effective parameters of exergy and exergoeconomic analysis for all components of the triple flash cycle in the optimal state.

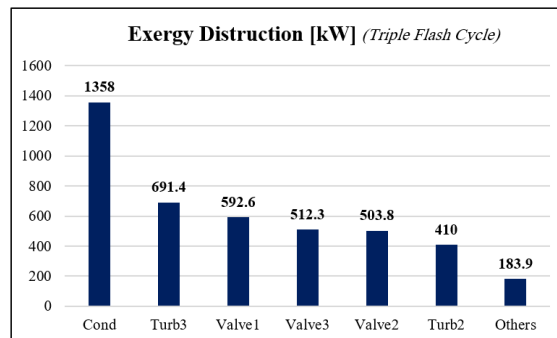
$f(\%)$	$\dot{C}_{tot,k} (\$/hr)$	$\dot{C}_{D,k} (\$/hr)$	$\dot{Z}_k (\$/hr)$	$\varepsilon(\%)$	$\dot{E}_{D,k} (kW)$	$\dot{E}_{P,k} (kW)$	$\dot{E}_{F,k} (kW)$	عضو
۰	۲/۷۷	۲/۷۷	۰	۹۶/۰۱	۵۹۳	۱۴۲۵۲	۱۴۸۴۵	شیرانبساط ۱
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۴۲۵۲	۱۴۲۵۲	جداساز ۱
۹۴/۸۶	۱۷/۴۰	۰/۹۰	۱۶/۵۱	۸۸/۸۸	۱۸۴	۱۴۶۶	۱۶۵۰	توربین ۱
۰	۲/۴۶	۲/۴۶	۰	۹۳/۵۵	۵۰۳	۷۳۱۱	۷۸۱۴	شیرانبساط ۲
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۷۳۱۱	۷۳۱۱	جداساز ۲
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۸۴۸۶	۸۴۸۶	میکسر ۱
۹۲/۷۷	۲۸/۴۷	۲/۰۶	۲۶/۴۱	۸۷/۵۰	۰	۲۸۶۹	۲۸۶۹	توربین ۲
۰	۲/۶۷	۲/۶۷	۰	۸۵/۸۲	۵۱۲	۳۱۰۱	۳۶۱۳	شیرانبساط ۳
-	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۳۱۰۱	۳۱۰۱	جداساز ۳
۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۷۱۴۳	۷۱۴۳	میکسر ۲
۹۰/۳۷	۳۸/۱۰	۳/۶۷	۳۴/۴۳	۸۵/۸۴	۶۹۱/۴۰	۴۱۹۰	۴۸۸۱	توربین ۳
۲۵/۹۷	۹/۷۳	۷/۲۰	۲/۵۳	۳۸/۷۶	۱۳۵۷/۱۰	۸۵۹/۹۰	۲۲۱۷	چگالنده
۹۴/۶۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۱۰	۸۱/۳۰	۰/۴۱	۱/۷۶	۲/۱۷	پمپ



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰. مقدار تخریب انرژی و اکسرژی برای اجزای چرخه تبخیر آبی (الف) یک مرحله‌ای، (ب) دو مرحله‌ای و (ج) سه مرحله‌ای برای منطقه بوشلی.

Fig. 10. The exergy destruction of a) single flash, b) double flash, and c) triple flash in Booshli's geothermal area.

درصد، ۵۲/۳۴ درصد، ۷۵/۶۷ درصد و ۴/۸۷۴ دلاربرگیگاژول حاصل شده است.

✓ برای چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای در حالت بهینه‌سازی چندهدفه توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی و هزینه تولید واحد بترتیب برابر ۸۴۶۳ کیلووات، ۱۵/۲۴ و ۵۷/۰۱ درصد و ۴/۸۵۳ دلاربرگیگاژول بدست آمد. همچنین فشار جداسازهای یک تا سه این چرخه نیز در حالت بهینه به ترتیب برابر ۱۳۵۱، ۴۴۰/۹ و ۸۰/۰۹ محاسبه شد.

✓ برای بوشلی، در چرخه‌های تبخیر آبی یک و دو مرحله‌ای شیرفشارشکن و چگالنده دارای بیشترین میزان تخریب انرژی بوده در حالیکه در چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای بیشترین میزان تخریب انرژی متعلق به چگالنده و توربین فشار پایین می‌باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

c	آهنگ هزینه انرژی و ویژه، \$/GJ
\dot{c}	آهنگ هزینه انرژی، \$/hr
CRF	دوره بازگشت سرمایه
\dot{E}_x	آهنگ انرژی، kW
f	ضریب انرژی و اکونومیک، %
h	آنتالپی، kJ/kg
\dot{m}	دبی جرمی، kg/s
P	فشار، kPa
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت، kW
s	آنتروپی، kJ/kg.K
T	دما، °C
v	حجم مخصوص، m ³ /kg
\dot{Q}	توان خالص، kW
Z	هزینه اولیه، \$
\dot{Z}	آهنگ هزینه اولیه، \$/hr

علائم یونانی

η	بازده، %
ϕ	ضریب تعمیرات و نگهداری

زیرنویس

ch	شیمیایی
D	تخریب شده
E_x	انرژی
F	سوخت
in	ورودی

و در نتیجه مقدار تخریب انرژی این عضو را افزایش خواهد داد. همچنین در چرخه‌های تبخیر آبی دو و سه مرحله‌ای چگالنده به این علت دارای بیشترین میزان تخریب انرژی می‌باشد که جریان خروجی از توربین آخر این چرخه‌ها همچنان محتوای مقدار زیادی حرارت می‌باشد که در چگالنده مجبور به دفع این حرارت به محیط می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری و بحث

در مطالعه حاضر از بین نقاط دارای پتانسیل زمین‌گرمایی در ایران، چاه زمین‌گرمایی بوشلی که دارای دمای چاه نسبتاً بالایی بوده انتخاب شده است و چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای برای بهره‌برداری از این چاه مدل‌سازی شد. چرخه‌های تبخیر آبی یک تا سه مرحله‌ای مورد تحلیل انرژی و اکونومیک قرار گرفتند تا پارامترهای اقتصادی هر چرخه نیز مورد مطالعه قرار گیرد. در ادامه نیز سه چرخه مذکور در سه حالت تک‌هدفه شامل بهینه‌سازی بازده انرژی، بهینه‌سازی بازده انرژی و کمینه‌سازی هزینه تولید توان واحد، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. در نهایت نیز در یک حالت جامع بهینه‌سازی چندهدفه و یک بررسی پارامتری برای چرخه‌های مذکور انجام شد. بطور کلی نتایج زیر از این مطالعه حاصل شد:

- ✓ توان خالص، بازده انرژی و انرژی در تمام چرخه‌های تبخیر آبی نسبت به فشار جداسازها دارای مقدار بیشینه‌ای می‌باشند.
- ✓ هزینه تولید توان واحد در تمام چرخه‌های تبخیر آبی نسبت به فشار جداسازها دارای مقدار کمینه‌ای می‌باشند.
- ✓ چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای نسبت به دیگر چرخه‌ها دارای بازده انرژی، انرژی و توان خالص بیشتری بود و همچنین هزینه تولید توان واحد و نرخ هزینه انرژی تخریب‌شده این چرخه نیز، نسبت به دیگر چرخه‌ها کمتر بوده که نشان از صرفه اقتصادی این چرخه می‌دهد. بعد از چرخه تبخیر آبی سه مرحله‌ای نیز چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای دارای بهترین عملکرد بود.

✓ در حالت بهینه چند هدفه برای چرخه تبخیر آبی دو مرحله‌ای (به‌ازای فشار جداساز اول ۸۱۴/۱ کیلوپاسکال و فشار جداساز دوم ۱۱۸/۲ کیلوپاسکال)، توان خالص، بازده انرژی، بازده انرژی، ضریب انرژی و اکونومیک و هزینه تولید توان واحد به ترتیب ۷۷۷۰ کیلووات، ۱۴

cycles for Sabalan geothermal power plant, *Geothermics*, 72 (2018) 74-82.

- [9] M. Abdolalipouradl, F. Mohammadkhani, S. Khalilarya, A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints, *Energy*, 209 (2020) 118235.
- [10] M. Abdolalipouradl, V. Mousavi, F. Mohammadkhani, M. Yari, Proposing new configurations of flash cycle for effective utilization of geothermal resources: thermodynamic and exergoeconomic assessments, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(10) (2022) 465. (in persian)
- [11] L.-H. Wen, H.-Y. Liu, D. Heydarian, Multi-objective grey wolf optimization of four different geothermal flash-organic Rankine power cycles, *Process Safety and Environmental Protection*, 180 (2023) 223-241.
- [12] T. Hai, M. Asadollahzadeh, B.S. Chauhan, T. AlQemlas, I. Elbadawy, B. Salah, M. Feyzbaxsh, 3E investigation and artificial neural network optimization of a new triple-flash geothermally-powered configuration, *Renewable Energy*, 215 (2023) 118935.
- [13] G. Najafi, B. Ghobadian, Geothermal resources in Iran: The sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8) (2011) 3946-3951.
- [14] M. Ameri, S. Amanpour, S. Amanpour, Energy and exergy analysis and optimization of a double flash power plant for meshkin shahr region, in: *World Renewable Energy Congress*, Linkoping, Sweden, 2011, pp. 1297-1304.
- [15] H. Yousefi, S. Roumi, H. Ármannsson, Y. Noorollahi, Cascading uses of geothermal energy for a sustainable energy supply for Meshkinshahr City, Northwest, Iran, *Geothermics*, 79 (2019) 152-163.
- [16] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Use of Integrated Single and Triple flashes with Organic Rankine cycle to Generate Power from Sabalan Geothermal Wells, *Journal of Mechanical Engineering*, 50(3) (2020) 155-164. (In persian)
- [17] A. Aali, N. Pourmahmoud, V. Zare, Exergoeconomic

خروجی	<i>out</i>
کل	<i>overall</i>
فیزیکی	<i>ph</i>
محصول	<i>P</i>
پمپ	<i>pump</i>
انتقال حرارت	<i>q</i>
جداساز	<i>sep</i>
گرمایی	<i>th</i>
کل	<i>tot</i>
توربین	<i>Tur</i>

منابع

- [1] J.W. Lund, D.H. Freeston, T.L. Boyd, Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review, *Geothermics*, 34(6) (2005) 691-727.
- [2] O. Kizilkan, H. Yamaguchi, Feasibility research on the novel experimental solar-assisted CO₂ based Rankine cycle integrated with absorption refrigeration, *Energy conversion and management*, 205 (2020) 112390.
- [3] J.-A.R. Sarr, F. Mathieu-Potvin, Improvement of Double-Flash geothermal power plant design: A comparison of six interstage heating processes, *Geothermics*, 54 (2015) 82-95.
- [4] M. Yari, Exergetic analysis of various types of geothermal power plants, *Renewable energy*, 35(1) (2010) 112-121.
- [5] M. Fallah, R.A. Ghiasi, N.H. Mokarram, A comprehensive comparison among different types of geothermal plants from exergy and thermoeconomic points of view, *Thermal Science and Engineering Progress*, 5 (2018) 15-24.
- [6] T. Ratlamwala, I. Dincer, Comparative efficiency assessment of novel multi-flash integrated geothermal systems for power and hydrogen production, *Applied Thermal Engineering*, 48 (2012) 359-366.
- [7] S. Jalilinasrabad, R. Itoi, P. Valdimarsson, G. Saevarsdottir, H. Fujii, Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept, *Geothermics*, 43 (2012) 75-82.
- [8] S.M. Bina, S. Jalilinasrabad, H. Fujii, Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash

- [22] H. Yousefi, Y. Noorollahi, S. Ehara, R. Itoi, A. Yousefi, Y. Fujimitsu, J. Nishijima, K. Sasaki, Developing the geothermal resources map of Iran, *Geothermics*, 39(2) (2010) 140-151.
- [23] M. Abdolalipouradl, F. Mohammadkhani, S. Khalilarya, M. Yari, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy, *Energy Conversion and Management*, 226 (2020) 113544.
- [24] V. Zare, A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants, *Energy conversion and management*, 105 (2015) 127-138.
- [25] M. Sadeghi, A. Nemati, M. Yari, Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures, *Energy*, 109 (2016) 791-802.
- analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran, *Energy Conversion and Management*, 143 (2017) 377-390.
- [18] P. Kazemiani-Najafabadi, E.A. Rad, Optimization of an improved power cycle for geothermal applications in Iran, *Energy*, 209 (2020) 118381.
- [19] Y. Noorollahi, M.S. Shabbir, A.F. Siddiqi, L.K. Ilyashenko, E. Ahmadi, Review of two decade geothermal energy development in Iran, benefits, challenges, and future policy, *Geothermics*, 77 (2019) 257-266.
- [20] Y. Noorollahi, H. Yousefi, Geothermal energy resources and applications in Iran, in: *Proceedings world geothermal congress*. Bali, Indonesia, 2010.
- [21] H. Yousefi, S. Ehara, Y. Noorollahi, Geothermal potential site selection using GIS in Iran, in: *Proceedings of the 32nd workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, California, 2007, pp. 174-182.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Abdolalipouradl, M. Namkhah, Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization for single, double and triple flash cycles for utilization of booshli's Geothermal well , Amirkabir J. Mech Eng., 56(7) (2024) 955-982.

DOI: [10.22060/mej.2024.23369.7750](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23369.7750)

