Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(5) (2022) 229-232
DOI: 10.22060/mej.2022.20369.7217

Multiobjective Optimization of a Tri-Generation Organic Rankine Cycle for Power, Freshwater and Heat: Suitable Mixture of Three Fluid

M. Rahmdel, A. Behzadmehr* , H. Farzaneh, F. Sarhaddi

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT: Improving the performance of a tri-generation organic Rankine cycle for the production of power, fresh water and heat using solar energy to respond to the needs in remote areas is very important. One of the effective factors in the performance of such a cycle is the thermodynamic behavior of its working fluid. Finding a suitable working fluid that has a good behavior on power generation, freshwater production and heat are of particular importance. This study aims to find an appropriate working fluid by analyzing, simulating, and optimizing a tri-generation Rankine cycle powered by solar parabolic trough collectors for simultaneous production of power, fresh water, and heat. The performance of this cycle is investigated with various mixtures of organic fluids R152a, R600a, and R1234yf which are categorized as wet, dry, and isotropic fluids, respectively. Therefore, first, a parametric study is conducted and followed by a multi-objective optimization for which power, fresh water, and heat are the objective functions. While the various mixture of these three working fluids are considered to be optimized. The results show that three-component mixture is more suitable for achieving three goals simultaneously, while if one of the objectives is considered, only one of these fluids should be used.

Review History:

Received: Aug. 05, 2021
Revised: Jan. 04, 2022
Accepted: Feb. 04, 2022
Available Online: Feb. 21, 2022

Keywords:

Three-component mixture
Organic working fluid
Tri-generation Rankine cycle
Organic Rankine cycle
multi-objective optimization

1- Introduction

Thermodynamic characteristics and behavior of organic working fluids (dry, wet and isentropic) have a great influence on the performance of the organic Rankine cycles. On the other hand, none of the organic fluids alone have all the characteristics of the working fluid that are suitable for different types of these cogeneration cycles, and therefore the appropriate working fluid should be selected according to the desired cycle and the amount of demand for each of the generation. Tchanche et al. [1], by comparing different working fluids in an Organic Rankine Cycle (ORC) that is operated with solar energy, showed that R134a and R600a have the best performance. Yang and Ye [2], investigated six working fluids in the organic Rankine cycle and observed that R600a, R1234ze, and R1234yf have the best performance. Satanphol et al. [3], optimized the types of organic fluids and their mixtures in an ORC to maximize the net power production. Georgousopoulos et al. [4], showed that the best thermodynamic and economic performance happened for a mixture of R600a and R1234yf with mass fractions of 0.4 and 0.6, respectively. In this study, at first, the effects of three working fluids R152a, R600a, and R1234yf, which are wet, dry, and isentropic, respectively, on the performance of an ORC trigeneration have been studied. Then the effects of the mixture of these three working on the production of power, fresh water, and heat, on two days, 25 June and 25 December in Zahedan city in the optimum tilt angle of parabolic solar collector have been investigated.

2- System Description and Governing Equations

The considered tri-generation system is presented in Fig. 1, this system consists of a solar cycle, a main ORC power cycle, and a single-stage flash water desalination unit.

The amount of absorbed energy by the solar collector is calculated from Eq. (1) [5].

$$\dot{Q}_u = \left[K_4 \dot{Q}_S - K_5 \left(T_1^4 - T_{amb}{}^4 \right) \right] \tag{1}$$

Net power output, freshwater production, condenser heat output, and the overall energy efficiency of the tri-generation cycle are calculated from Eqs. (2) to (5), respectively.

$$\dot{W}_{Net} = \left(\eta_{Tur,mec} \eta_{Tur,gen} \dot{W}_{Tur} \right) - \left(\frac{\dot{W}_{pump1}}{\eta_{pump1,mec}} \right) - \left(\frac{\dot{W}_{pump2}}{\eta_{pump2,mec}} \right) \tag{2}$$

*Corresponding author's email: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

$$\dot{m}_{dis} = \dot{m}_7 = \frac{\dot{m}_5 c_{p,W}\left(T_5 - T_{Sat}\right)}{h_{fg@Sat}} \tag{3}$$

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20} h_{20} - \dot{m}_9 h_9 \tag{4}$$

$$\eta_{Overall} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{Cond} + \dot{m}_{dis} h_{fg@Sat}}{\dot{Q}_S} \tag{5}$$

3- Results and Discussion

To find the optimum mass fraction of each component of the mixture multi-objective optimization using the genetic algorithm method is adopted. In this algorithm, the mass fractions of fluids R152a, R1234yf, and R600a are defined as variables, and the net power, the mass flow rate of fresh water, and the heat generated in the condenser are selected as objective functions. Different optimum scenarios have been obtained by using the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method. Table 1 briefly shows the performance of the ORC trigeneration system using either one of the three working fluids or an optimum mixture of these three working fluids.

4- Conclusions

The main results of this research are summarized as follows:

For both selected days, if the goal is only freshwater production, fluid R600a is suitable. If the only heat output is considered, fluid R1234yf is suitable, and if the objective is only the output of electrical power, mixture fluid R152a and R600a are suitable with mass fractions, respectively. 0.815, and 0.185.

The optimization results show that to provide the desired conditions, the acceptable mass fractions for fluid R152a are between 0 and 0.355, for fluid R1234yf, 0 to 0.74, and for fluid R600a, between 0.25 and 0.865.

Optimal scenarios are determined according to the user's needs. For example, in Scenario 2 of this study, on 25 June, for mass fractions of 0.2, 0.068, and 0.732 in a three-component mixture for fluids R152a, R1234yf, and R600a, the amount of produced net power, the flow of produced fresh water, the produced heat in the condenser and the overall energy efficiency of the cycle are 1325.3 W, 27.37 kg/h, 17698 W and 66.75%, respectively. Whereas on 25 December, these values were 947.2 W, 19.31 kg/h, 12613 W, and 65.32%, respectively, in which case the mass fractions in the three-component mixture for fluids R152a, R1234yf, and R600a, respectively, are 0.105, 0.514 and 0.381.

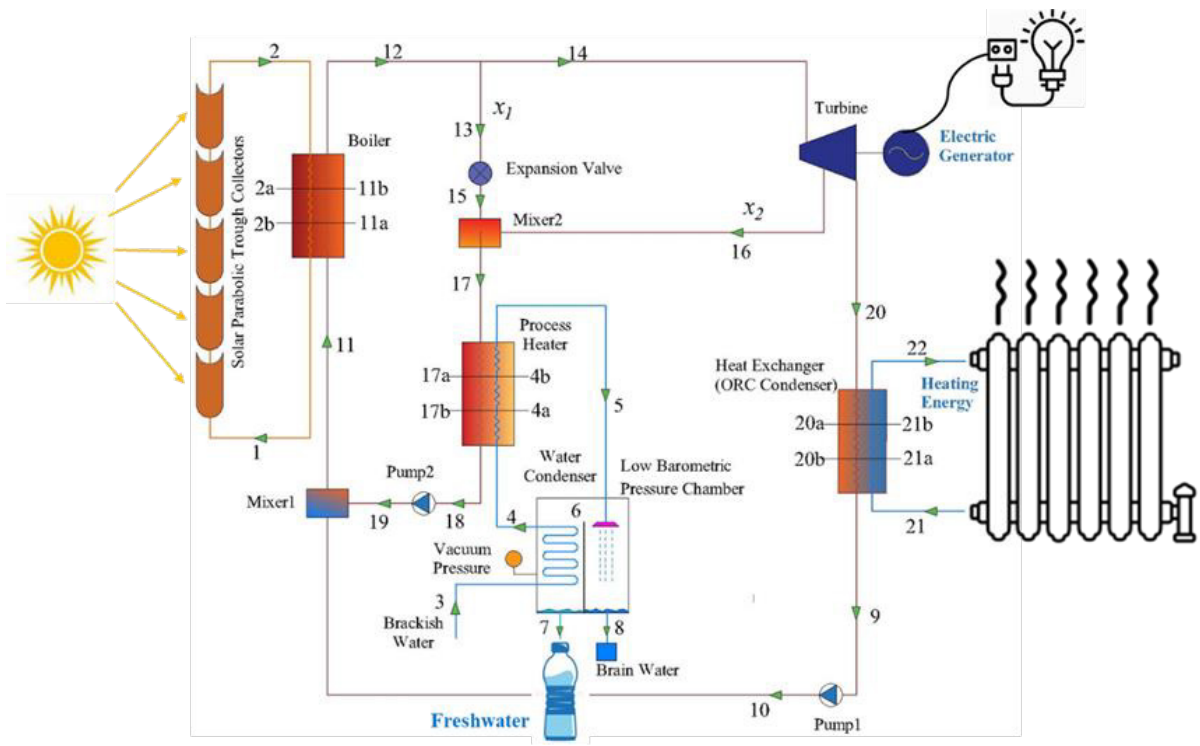


Fig. 1. The schematic design of the tri-generation cycle.

Table 1. Comparison of objective functions, overall energy efficiency, and temperature of the water entering the heating system for pure fluids and three-component mixture optimized in two days, 25 June and 25 December

date	fluids	$\dot{W}_{Net}$(W)	$\dot{m}_{dis}$(kg/h)	$\dot{Q}_{Cond}$(W)	$\eta_{Overall}$(%)	T_{22}(K)
25 June	R152a	1471.2	27.34	17568	66.74	312.1
	R1234yf	1407.2	26.73	18076	66.8	308.6
	R600a	1213	27.55	17693	66.75	339.1
	R152a/R1234yf/R600a (0.2/0.068/0.732)	1325.3	27.37	17698	66.75	329.05
25 December	R152a	1043.1	19.39	12456	65.29	312.1
	R1234yf	997.7	18.95	12816	65.36	308.6
	R600a	860	19.54	12545	65.3	339.1
	R152a/R1234yf/R600a (0.105/0.514/0.381)	947.2	19.31	12613	65.32	323.75

References

[1] B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering. 29 (2009) 2468–2476.

[2] M. Yang, R. Yeh, Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system, Energy Conversion and Management. 88 (2014) 999–1010.

[3] K. Satanphol, W. Pridasawas, B. Suphanit, A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery, Energy. 123 (2017) 326–339.

[4] S. Georgousopoulos, K. Braimakis, D. Grimekis, S. Karellas, Thermodynamic and techno-economic assessment of pure and zeotropic fluid ORCs for waste heat recovery in a biomass IGCC plant, Applied Thermal Engineering Journal. 183 (2021) 116202.

[5] E. Bellos, C. Tzivanidis, Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance, Designs. 2 (2018) 9.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Rahmdel, A. Behzadmehr , H. Farzaneh, F. Sarhaddi, Multiobjective Optimization of a Tri-Generation Organic Rankine Cycle for Power, Freshwater and Heat: Suitable Mixture of Three Fluid, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 229-232.

DOI: 10.22060/mej.2022.20369.7217

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۵، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۱۲۵ تا ۱۱۴۸
DOI: 10.22060/mej.2022.20369.7217

بهینه‌سازی چندهدفه چرخه رانکین آلی تولید همزمان توان، آب‌شیرین و حرارت: تعیین سیال سه‌جزئی مناسب

مهدی رحمدل ، امین بهزادمهر*، حامد فرزانه ، فرامرز سرحدی

دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

خلاصه: بهبود عملکرد چرخه رانکین آلی برای تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با استفاده از انرژی خورشیدی برای پاسخگویی به نیاز در مناطق دور از مرکز از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از عوامل مؤثر در عملکرد این چرخه، رفتار ترمودینامیکی سیال آلی آن می‌باشد. تعیین گزینه مطلوب سیال عامل که هم در چرخه توان، هم تولید آب شیرین و همچنین حرارت از رفتار مناسبی برخوردار باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش درصدد است تا با تحلیل، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک چرخه رانکین تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با استفاده از کلکتورهای سهموی خورشیدی به تعیین گزینه مطلوب بپردازد. لذا این چرخه با مخلوطی از سیالات آلی R۶۰۰a ، R۱۵۲a و R۱۲۳۴yf که به ترتیب از خانواده سیالات تر، خشک و آیزنتروپیک هستند شبیه‌سازی می‌گردد. لذا ابتدا یک مطالعه‌ی پارامتری و در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف توان، آب شیرین و حرارت به ازای کسر جرمی‌های مختلف از سیالات انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد مخلوط سه‌جزئی برای دستیابی همزمان به سه هدف مناسب‌تر است در حالیکه که اگر یکی از اهداف مد نظر باشد بهتر است فقط از یکی از این سیالات با توجه به هدف مورد نظر بهره جست.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
مخلوط سه‌جزئی
سیال آلی
چرخه تولید همزمان
سیکل رانکین آلی
بهینه‌سازی چندهدفه

۱- مقدمه

امروزه در توسعه پایدار جوامع، موضوع انرژی و آب شرب به‌عنوان عواملی مهم و کلیدی مد نظر قرار دارند. این در حالی است که تأمین این دو مهم بیشتر از طریق انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی و یا واحدهای شیرین‌سازی آب به روش‌های حرارتی و یا اسمز معکوس[1] انجام می‌گیرد. علیرغم مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی هنوز هم این سوخت‌ها بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در این میان قابل توجه نیست.

در سال‌های اخیر تولید توان با استفاده از چرخه‌های رانکین آلی[2] مورد توجه قرار گرفته است. این چرخه‌ها امکان بکارگیری منابع گرمایی با درجه حرارت نسبتاً پایین‌تری نظیر انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی و یا انرژی‌های تلف‌شونده را برای تولید توان فراهم می‌سازند. در این چرخه‌ها به‌جای آب از مبردها یا هیدروکربن‌ها به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود.

1 Reverse Osmosis (RO)
2 Organic Rankine Cycle (ORC)

این مبردها جرم مولکولی بالاتر، نقطه جوش و دمای بحرانی کمتری نسبت به آب دارند که باعث می‌شود تغییر فاز مایع – بخار در دماهای پایین‌تر از دمای تغییر فاز آب رخ دهد. همچنین این مبردها انرژی کمتری نسبت به آب لازم دارند تا در آن تغییر فاز مایع – بخار صورت گیرد. لذا مشخصات و رفتار ترمودینامیکی آنها تأثیر بسزایی در عملکرد این چرخه‌ها دارد. این مبردها (سیالات آلی) به سه دسته کلی خشک، تر و آیزنتروپیک تقسیم می‌شوند که هرکدام از آن‌ها مزایا و معایبی دارند و باید در انتخاب سیال عامل مناسب برای چرخه مورد توجه قرار گیرد. از جمله مشخصات سیال عامل مناسب می‌توان به گرمای نهان و چگالی بالا، حجم مخصوص و گرمای مخصوص پایین، ظرفیت پایین تخریب لایه ازون[3]، ظرفیت پایین گرمایش جهانی[4]، غیر سمی‌بودن و غیر قابل اشتعال‌بودن آن اشاره کرد [۱]. با توجه به مشخصات سیالات آلی موجود، هیچ‌کدام از سیالات آلی به تنهایی، تمام مشخصات سیال عامل را که برای انواع این چرخه‌ها مناسب باشد را ندارند و در نتیجه باید سیال عامل مناسب را با توجه به چرخه مورد نظر و میزان تقاضا برای

3 Ozone Depletion Potential (ODP)
4 Global Warming Potential (GWP)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

هر کدام از توابع هدف انتخاب کرد.

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی سیالات آلی مختلف از جمله سیالات آلی R۱۵۲a، R۶۰۰a و R۱۲۳۴yf انجام شده است ولی تحقیقات محدودی روی استفاده از مخلوط‌های دوجزئی و بخصوص مخلوط‌های سه‌جزئی این سیالات انجام گرفته است.

تچانچ و همکاران [۲]، سیالات آلی مختلف را از نظر بازده انرژی و اگزرژی، دبی جرمی، نسبت فشار، اشتعال‌پذیری، سمی‌بودن، قابلیت گرمایش زمین و میزان آسیب‌رسانی به لایه‌ی اوزون، در چرخه رانکین آلی با منبع دما پایین خورشیدی (۹۰ درجه سانتی‌گراد)، مقایسه کردند و مشاهده نمودند سیالات R۱۳۴a و R۶۰۰a بهترین عملکرد را دارند. یک چرخه تولید همزمان که از چرخه رانکین آلی برای حرارت و توان، از روش آب‌شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای[1] برای تولید آب شیرین و برای سرمایش از چیلر جذبی[2] استفاده می‌کند را با سیالات مختلف (از جمله سیال R۱۵۲a و R۶۰۰a) توسط ماراور و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفت آن‌ها نشان دادند که سیالات فلوروبنزن[3] و اکتامتیل تری سیلوکسان[4] مناسب‌ترین هستند. شو و همکاران [۴]، یک چرخه رانکین آلی دوحلقه‌ای با شش سیال آلی را بررسی و سیالات R۱۲۳۴yf، R۶۰۰a، R۶۰۰، R۲۴۵fa، R۱۳۴a، R۱۲۴ را به‌ترتیب برای چرخه دما پایین پیشنهاد کردند. همچنین مشاهده کردند هنگامی که توان خروجی موتور (به عنوان منبع حرارتی) در حداکثر مقدار خود باشد، سیال R۱۲۳۴yf بهترین عملکرد را دارد. یانگ و یه [۵] یک بررسی ترمودینامیکی روی شش سیال با پتانسیل گرمایش جهانی پایین و تخریب لایه اوزون صفر در چرخه رانکین آلی انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که سیال R۶۰۰a و به‌دنبال آن R۱۲۳۴ze و R۱۲۳۴yf بهترین عملکرد را در دمای اواپراتور ۵۸ تا ۶۸ درجه سانتی‌گراد و دمای کندانسور ۳۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد خواهند داشت. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۱۵ [۶]، یک بهینه‌سازی ترمو – اقتصادی روی چرخه رانکین آلی با سیالات R۲۴۵fa، R۶۰۰a، R۱۵۲a، R۱۲۳۴ze و R۱۲۳۴yf انجام دادند و مشاهده کردند که به‌ترتیب سیالات R۱۲۳۴yf، R۱۲۳۴ze، R۱۵۲a، و R۶۰۰a بهترین عملکرد ترمو – اقتصادی را دارند. کانگ و همکاران [۷]، عملکرد ۱۰ گروه مخلوط سیال آلی (از جمله مخلوط R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a) را روی چرخه رانکین که از منبع دما پایین زمین گرمایی استفاده می‌کنند را بررسی کردند.

1 Multiple Effect Distillation (MED)
2 Absorption chiller
3 fluorobenzene
4 octamethyl trisiloxane

بررسی‌ها نشان داد بیشینه توان خالص تولیدی در چرخه رانکین آلی در نسبتی از کسر جرمی مخلوط اتفاق می‌افتد که بیشترین اختلاف دمای بخار اشباع و مایع اشباع در فشار ثابت را داشته باشد. همچنین براساس معیارهای اشتعال‌پذیری، توان خالص خروجی، هزینه و ملاحظات زیست‌محیطی، مخلوط (۰/۱، ۰/۹) R۲۴۵fa/R۶۰۰a بهترین عملکرد را دارد. ژو و همکاران [۸] یک چرخه رانکین دو حلقه‌ای که برای حلقه دما بالا از آب و برای حلقه دما پایین از مخلوط‌های RC۳۱۸/R۱۲۳۴yf، RC۳۱۸/R۲۴۵fa و مخلوط R۱۲۳۴yf و بوتان[5] استفاده می‌کند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مخلوط RC۳۱۸/R۱۲۳۴yf حدود ۱۷/۳ درصد از حرارت آب سردکننده موتور را بازیابی می‌کند. همچنین مشاهده کردند که مخلوط R۱۲۳۴yf و بوتان بهترین راندمان حرارتی را در مقایسه با مخلوط‌های دیگر و سیالات خالص بوتان، RC۳۱۸، R۱۲۳۴yf، R۲۴۵fa دارد. ساتانفول و همکاران [۹]، انواع سیالات آلی و مخلوط آن‌ها را در یک چرخه آلی رانکین با هدف بیشینه‌کردن توان خالص تولیدی بهینه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند در بین سیالات خالص و مخلوط به ترتیب سیال R۲۲۷ea و مخلوط R۲۱۸/R۲۲۷ea/RC۳۱۸/R۲۴۵fa با ترکیب (۰/۱۵۷، ۰/۳۸۸، ۰/۱۳۴، ۰/۳۲۱) بهترین عملکرد را خواهند داشت، در صورتی‌که اگر از مخلوط سیالات با پتانسیل گرمایش جهانی پایین استفاده شود، مخلوط R۲۹۰/R۱۵۲a/R۶۰۰a/R۶۰۱a با ترکیب (۰/۰۴۴، ۰/۲۲۴، ۰/۳۸۱، ۰/۳۵۱) بهترین عملکرد را خواهد داشت. یک سیستم هیبریدی تولید چندگانه شامل توان، سرمایش و آب شیرین که از سیال مخلوط ایزوبوتان و پنتان استفاده می‌کند توسط صادقی و همکاران [۱۰] مطالعه گردید. نتایج نشان داد که بیشترین توان خالص خروجی و کمترین ظرفیت سرمایشی در کسر مولی ۰/۵ سیال ایزوبوتان در مخلوط، بدست می‌آید درحالی‌که بیشترین تولید آب شیرین وقتی است که فقط از سیال پنتان استفاده شود. وانگ و همکاران [۱۱] یک بهینه‌سازی چند هدفه با توابع هدف نسبت هزینه به انرژی و راندمان اگزرژی برای چرخه رانکین با شش سیال آلی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که سیال R۷۱۷ بهترین نسبت هزینه به انرژی با مقدار ۰/۳۴ و راندمان اگزرژی ۲۸/۱۷ درصد را خواهد داشت. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۲] چرخه رانکین آلی را که از منبع زمین گرمایی استفاده می‌کند را در حالت‌های زیر بحرانی، مافوق‌گرم و مافوق‌بحرانی را با سیالات مختلف بررسی کردند. مشاهده شد سیالات مرطوب، توان خالص تولیدی بالاتری در چرخه فوق بحرانی دارند. همچنین نشان داده شد که از جمله سیالات مناسب

5 butane

برای چرخه زیر بحرانی، R۲۳۶ea، R۶۰۰a برای چرخه مافوق‌گرم، R۶۰۰a، R۱۵۲a و برای چرخه فوق‌بحرانی R۱۳۴a، R۳۲ و R۶۰۰a می‌باشند. یانگ در سال ۲۰۱۹ [۱۳] به بررسی اقتصادی روی نسبت کسرهای جرمی مخلوط چند جزئی سیالات R۲۳۶fa، R۲۴۵fa و R۱۳۳۶mzz(Z) در چرخه رانکین آلی پرداخت. نتایج وی نشان داد در بین سیالات خالص، سیال R۲۴۵fa و در بین مخلوط‌های دوجزئی با کسرهای جرمی ۰/۵ و ۰/۵، مخلوط R۲۳۶fa/R۱۳۳۶mzz(Z) بهترین هزینه نسبت به انرژی را دارد. همچنین مشاهده شد که در بین سیالات خالص و نیز مخلوط‌های دوجزئی با کسرهای جرمی ۰/۵ و ۰/۵، همچنین مخلوط سه‌جزئی با کسرهای جرمی ۰/۳۳۳، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۳۳ بهترین نسبت هزینه به انرژی را دارند. وانگ و همکاران [۱۴]، ۱۴ سیال آلی از جمله R۶۰۰a , R۱۵۲a R۱۲۳۴yf را به لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی برای رنج دمایی ۹۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بر روی یک چرخه رانکین آلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که سیالات R۶۰۰a، R۶۰۰، R۱۵۲a و R۲۴۵fa به‌ترتیب بیشترین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در دمای منبع ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد خواهند داشت. جئورگوزوپلاس و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۵]، یک بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی روی چرخه رانکین با سیالات آلی خالص و مخلوط را در سناریوهای مختلف انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تقریباً در هر سه سناریو بهترین عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی برای مخلوط R۶۰۰a و R۱۲۳۴yf با کسرهای جرمی به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۶ اتفاق می‌افتد. فخری و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۶] یک بهینه‌سازی تک‌هدفه و چند هدفه روی یک چرخه رانکین آلی با بیست مخلوط از سیالات آلی را انجام دادند. نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان داد که مخلوط‌های R۶۰۱/Cis-۲-Butene و R۶۰۱a/Cis-۲-Butene بهترین راندمان اگزرژی را دارند، در صورتی‌که مخلوط R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a از راندمان اگزرژی پایینی برخوردار است. نتایج بهینه‌سازی دوهدفه نشان داد که مخلوط‌های هگزان و R۶۰۱a و R۶۰۱a/C−۲−Butene بهترین عملکرد را دارند.

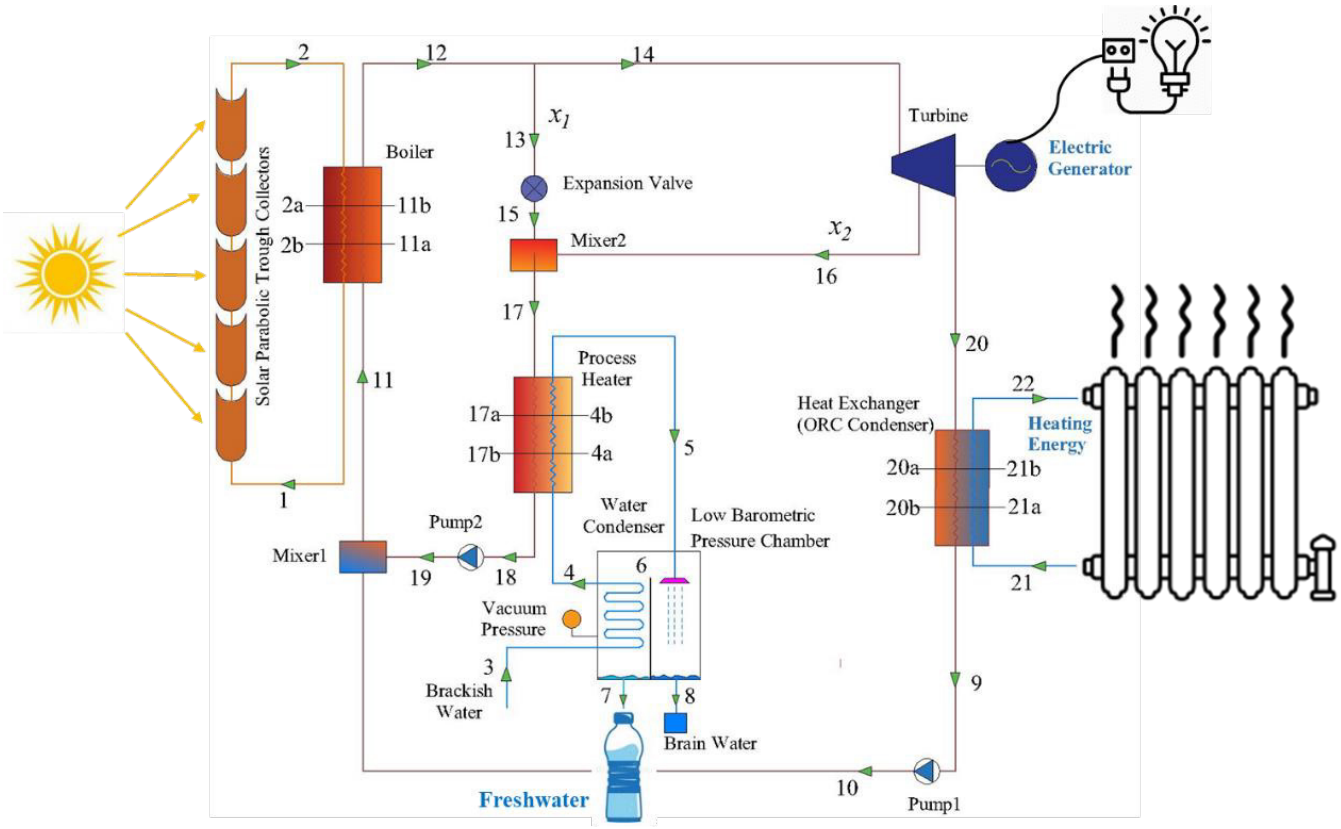
همانطورکه در بخش قبلی مشاهده شد در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در چرخه‌های رانکین و تولید همزمان، از مخلوط‌های دوجزئی از جمله مخلوط‌های R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a و R۱۵۲a/R۱۲۳۴yf استفاده شده است، اما تاکنون از مخلوط‌های سه‌جزئی سیالات آلی در چرخه‌های رانکین و بخصوص چرخه‌های تولید همزمان خیلی کم استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا سه سیال‌تر R۱۵۲a، خشک R۶۰۰a و آیزنتروپیک R۱۲۳۴yf در نظر گرفته شده و سپس تأثیر کسر جرمی هر یک از این سیالات در مخلوط سه‌جزئی بر تولید توان، آب شیرین و حرارت در چرخه تولید همزمان، بررسی شده است. در چرخه مورد بررسی سیالات طوری انتخاب شده‌اند که در دماهای پایین بتوانند عملکرد خوبی داشته باشند. همچنین این سیالات دارای پتانسیل تخریب لایه اوزون و پتانسیل گرمایش جهانی پایینی می‌باشند. لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده در زاویه بهینه کلکتور خورشیدی سهموی در دو روز ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و ۴ دی (۲۵ دسامبر) در شهر زاهدان انجام شده است.

۲- شرح سیستم

شکل۱، طرح کلی چرخه تولید همزمان را نشان می‌دهد. این چرخه از کلکتورهای خورشیدی سهموی، چرخه رانکین آلی و یک آب‌شیرین‌کن یک مرحله‌ای تبخیر آنی[1] تشکیل شده است. در این چرخه، ۵ عدد کلکتور خورشیدی مدل LS۲ [۱۷] که به‌صورت سری به هم متصل شده‌اند، جهت جذب انرژی خورشید، انتخاب شده است. سیال عامل در کلکتور خورشیدی، روغن SYLTHERM ۸۰۰ می‌باشد. روغن داغ‌شده در کلکتور خورشیدی، حرارت خود را توسط یک مبدل حرارتی به سیال آلی فشار بالا در چرخه رانکین می‌دهد و سیال آلی را مافوق‌گرم می‌کند. سیال مافوق‌گرم فشار بالا در توربین در فشار واحد گرمایش فرآیند، زیرکش‌شده و توان تولید می‌کند و با سیالی که قبل از ورود به توربین از شیر انبساط (در فرآیند انتالپی ثابت)، در همان فشار خارج می‌شود مخلوط شده و برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود. مابقی سیال مافوق‌گرم فشار بالا تا فشار کندانسور منبسط شده و توان تولید می‌کند. سیال خارج‌شده از توربین که به‌صورت بخار می‌باشد، وارد کندانسور شده و در آنجا چگالیده خواهد شد. سیال خروجی از کندانسور تا فشار بویلر پمپ می‌شود، همچنین سیالی که در واحد گرمایش فرآیند[2]، جهت تولید آب شیرین استفاده شده و درنهایت به‌صورت مایع می‌باشد، نیز تا فشار بویلر پمپ می‌شود و سپس این دو سیال با هم مخلوط شده و به بویلر منتقل می‌شود.

در چرخه آب‌شیرین‌کن، ابتدا آب خام ورودی توسط مبدل داخلی آب‌شیرین‌کن پیش‌گرم شده و سپس وارد مبدل حرارتی در واحد گرمایش فرآیند می‌شود و در آنجا گرمای سیال آلی را جذب کرده و دمای آب بالا می‌رود. آب گرم‌شده در محفظه‌ای که فشار آن پایین‌تر از فشار اتمسفر و متناظر فشار اشباع در دمای آب می‌باشد پاشیده می‌شود. سپس بخار آب

1 Single-stage flash water desalination
2 Process heating unit



شکل ۱. طرح شماتیکی از چرخه تولید همزمان

Fig. 1. The schematic of the tri-generation cycle.

تولیدشده در مبدل داخلی آب‌شیرین‌کن، چگالیده شده و به مخزن آب شیرین هدایت می‌شود. مقدار آبی که تبخیر نمی‌شود نیز به سمت مجرای پساب هدایت می‌شود.

برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی چرخه تولید همزمان، پارامترهای ثابت درنظر گرفته شده در اجزای چرخه در جدول ۱، آورده شده است.

۲- ۱- سیال عامل

سیالات آلی به سه دسته کلی‌تر، خشک و آیزنتروپیک تقسیم می‌شوند. در نمودار دما – آنتروپی سیال، شیب خط بخار اشباع برای سیالات تر منفی، برای سیالات خشک مثبت و برای سیالات آیزنتروپیک بی‌نهایت می‌باشد. سیالات خشک به‌دلیل شیب منفی خط بخار اشباع در نمودار دما – آنتروپی نیاز به سوپرهیت ندارند، در صورتی‌که سیالات تر به‌دلیل تشکیل قطرات مایع در توربین، نیاز به سوپرهیت دارند. به‌منظور بررسی تأثیر نوع سیال بر تولید توان، آب شیرین و حرارت، از یک سیال‌تر R۱۵۲a، یک سیال خشک R۶۰۰a و یک سیال آیزنتروپیک R۱۲۳۴yf استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲، آمده است [۲۰]. لازم به ذکر است، سیالات مورد بررسی طوری انتخاب شده‌اند که پتانسیل گرمایش جهانی و پتانسیل تخریب لایه اوزون پایینی دارند.

همانطورکه در جدول ۲، مشاهده می‌شود، هر کدام از سیالات انتخابی، خواص ترمودینامیکی متفاوتی با یکدیگر دارند، لذا جهت بهره‌مندی از خواص ترمودینامیکی هر سه این سیالات، از مخلوط سه‌جزئی R۱۵۲a/R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a با کسرهای جرمی مختلف استفاده شده است.

۲- ۲- مدل‌سازی مشخصات ترمودینامیکی مخلوط

برای اینکه رفتار سیالات انتخابی و مخلوط سه‌جزئی آن‌ها بهتر نشان داده شود، نمودار دما – آنتروپی و فشار – انتالپی این سیالات مطابق شکل ۲، رسم شده است. برای مخلوط سه‌جزئی از کسرهای جرمی ۰/۳۳۳، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۳۴ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a استفاده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود مخلوط سه‌جزئی درنظر گرفته شده، تقریباً رفتار سیال آیزنتروپیک را از خود نشان می‌دهد. لذا رفتارهای متنوعی

جدول ۱. مقادیر پارامترهای درنظر گرفته شده در اجزای چرخه

Table 1. The values of the cycle components

پارامتر	مقدار
کلکتور خورشیدی سهموی [۱۷]	
طول L	۵×۷/۸ متر
عرض W	۵ متر
فاصله کانونی F	۱/۷۱ متر
مساحت A_a	۵×۳۹ متر مربع
نسبت تمرکز C	۲۲/۷۴
قطر داخلی لوله جاذب D_{ri}	۰/۰۶۶ متر
قطر خارجی لوله جاذب D_{ro}	۰/۰۷ متر
قطر داخلی پوشش شیشه‌ای D_{ci}	۰/۱۰۹ متر
قطر خارجی پوشش شیشه‌ای D_{co}	۰/۱۱۵ متر
ضریب نشر پوشش ε_c	۰/۹
ضریب عبور پوشش τ	۰/۹۵
ضریب جذب جاذب α	۰/۹۶
ضریب انعکاس ρ_c	۰/۸۳
ضریب دریافت کلکتور γ	۰/۹۹
ماکزیمم راندمان نوری η_{opt}	۰/۷۵
ضریب اصلاح زاویه برخورد $K(\theta)$	۱
چرخه رانکین آلی [۱۸]	
راندمان آیزنتروپیک پمپ $\eta_{pump۱,is} = \eta_{pump۲,is}$	۰/۷۵
راندمان مکانیکی پمپ $\eta_{pump۱,mec} = \eta_{pump۲,mec}$	۰/۹۶
راندمان آیزنتروپیک توربین $\eta_{Tur,is}$	۰/۸
راندمان مکانیکی توربین $\eta_{Tur,mec}$	۰/۹۶
راندمان الکتریکی ژنراتور $\eta_{Tur,gen}$	۰/۹۵
واحد آب‌شیرین‌کن [۱۹]	
ضریب تأثیر آب‌شیرین‌کن ε_D	۰/۹
دمای آب ورودی $T_۳$	۲۹۸/۱۵ کلوین

جدول ۲. مشخصات سیالات آلی انتخاب شده در چرخه تولید همزمان [۲۰]

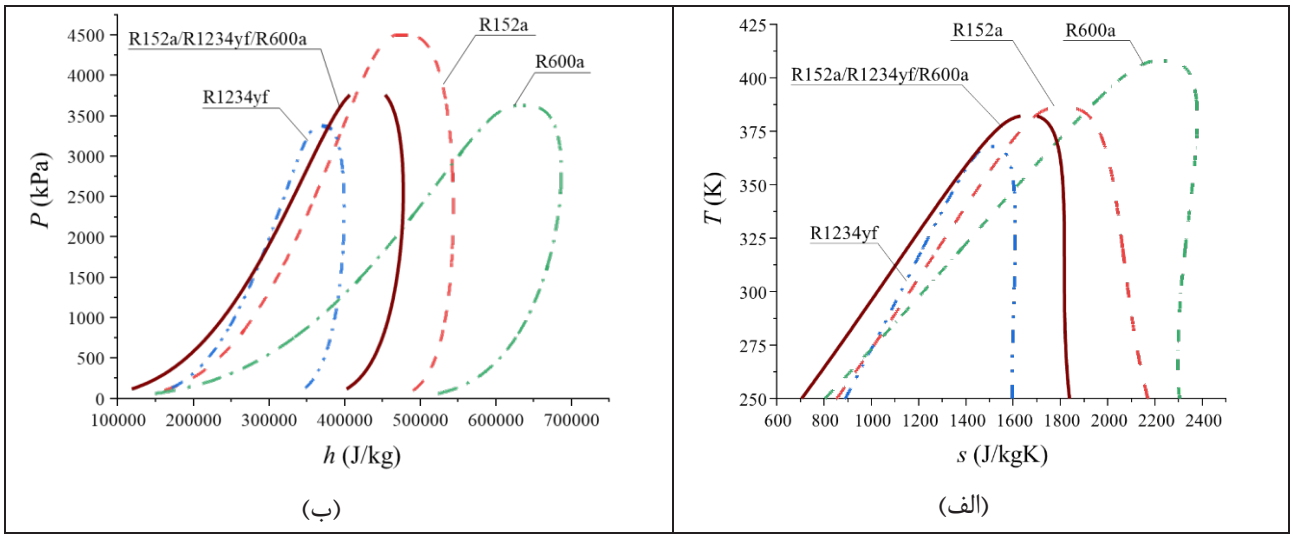
Table 2. Characteristics of selected organic fluids in the tri-generation cycle [20]

سیال	R152a	1234yf	R600a
وزن مولکولی (kg/kmol)	۶۶	۱۱۴	۵۸
دمای بحرانی (K)	۳۸۵/۱۵	۳۶۸/۱۵	۴۰۸/۱۵
فشار بحرانی (kPa)	۴۴۵۰	۳۳۸۲	۳۶۴۰
دمای نقطه جوش (K)	۲۴۹/۱۵	۲۴۴/۱۵	۲۶۱/۱۵
پتانسیل گرمایش جهانی* (دوره ۱۰۰ساله)	۱۲۴	<۴/۴	~۲۰
تخریب لایه اوزون**	۰	۰	۰
سطح ایمنی***	A1	A2	A3
نوع سیال	مرطوب	آیزنتروپیک	خشک

*پتانسیل گرمایش جهانی نسبت به دی اکسید کربن[۱].

** تخریب لایه اوزون نسبت به R۱۱.

***استاندارد اشری ۳۴/۲ A/: سمیت کم B/: سمیت زیاد / ۱: غیر اشتعال‌پذیر / ۲: اشتعال‌پذیری کم / ۳: اشتعال‌پذیری بالا



شکل ۲. نمودار دما – آنتروپی (الف) و فشار – انتالپی (ب) برای سیالات انتخابی و مخلوط سه‌جزئی آن‌ها (نسبت‌های جرمی ۰/۳۳۳، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۳۴)

Fig. 2. Temperature-entropy diagram (a) and pressure-enthalpy diagram (b) for selected fluids and their three-component mixtures (mass ratios 0.333, 0.333 and 0.334)

از ترکیب با کسرهای جرمی مختلف می‌توان انتظار داشت. برای تعیین خصوصیات ترمودینامیکی سیالات آلی انتخابی و مخلوط آن‌ها از داده‌های رفپراپ[1] استفاده شده است [۲۱].

۲- ۳- مدل‌سازی چرخه

جهت تحلیل چرخه تولید همزمان و هر یک از اجزای آن، ابتدا یک مدل ریاضی ارائه و سپس جهت ساده‌سازی این مدل، فرضیاتی در نظر گرفته شده که در زیر به آن اشاره می‌شود.

۱. سیستم در شرایط پایا کار می‌کند.

۲. به جزء کلکتورخورشیدی، سایر اجزا افت حرارتی به محیط ندارند.

۳. پرتوهای تابیده شده از خورشید به صورت موازی هستند.

۴. از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم‌پوشی شده است.

۵. افت‌های فشار در بویلر، کندانسور، مبدل‌های حرارتی و لوله‌ها درنظر گرفته نشده است.

۶. از گازهای غیر قابل چگالش در آب ورودی به آب‌شیرین‌کن چشم‌پوشی شده است.

۷. ترکیب مخلوط سه‌جزئی در طول چرخه ثابت است.

با توجه به اینکه مخلوط سه‌جزئی استفاده شده در چرخه مورد نظر در این پژوهش، خاصیت زئوتروپیک دارد و بیشترین اختلاف دمای ناحیه بخار و مایع در فشار ثابت برای ناحیه دو فاز[2] برای کندانسور $\Delta T_{g,Cond}$ ، ۷/۴ درجه، برای واحد گرمایش فرآیند $\Delta T_{g,PH}$، ۶/۳ درجه و برای بویلر $\Delta T_{g,Boil}$ ، ۵/۶ درجه می‌باشد. از آنجایی که ΔT_g برای هر سه مبدل کندانسور، واحد گرمایش فرآیند و بویلر کمتر از ۱۵ درجه می‌باشد لذا شرط ارائه شده در مراجع [۲۲-۲۳] برقرار بوده و تغییری در ترکیب اجزا پدید نمی‌آید. از طرف دیگر با توجه به کم بودن اختلاف دمای نقطه جوش سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf، R۶۰۰a که به ترتیب ۲۴۹/۱۵، ۲۴۴/۱۵ و ۲۶۱/۱۵ کلوین می‌باشد (حداکثر ۱۷ درجه اختلاف) و خیلی کمتر از ۴۵ کلوین می‌باشد [۲۴] لذا می‌توان از تغییر ترکیب اجزاء مخلوط چشم‌پوشی کرد و در نتیجه فرض ۷ صحیح می‌باشد.

۸. اختلاف دمای مادون سرد در فشار کندانسور $T_۹$ با دمای آب ورودی کندانسور $T_{۲۱}$ ، ۱۰ درجه می‌باشد.

۹. اختلاف دمای مادون سرد در فشار واحد گرمایش فرآیند $T_{۱۸}$ با دمای آب پیش‌گرم‌شده در کندانسور آب‌شیرین‌کن $T_۴$، ۱۰ درجه می‌باشد.

۱۰. اختلاف دمای بخار اشباع در کندانسور $T_{۲۰a}$ با دمای آب پیش‌گرم‌شده پس از ورود به کندانسور $T_{۲۱b}$، ۵ درجه می‌باشد.

۲- ۳- ۱- کلکتورهای خورشیدی سهموی

تابش مستقیم خورشید روی کلکتور $\dot{Q}_S$ و انرژی خورشیدی جذب‌شده توسط کلکتور $\dot{Q}_{abs}$ به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) به‌دست می‌آیند [۱۷].

$$\dot{Q}_s = \dot{G}_{b,\beta} A_a \tag{۱}$$

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_s \eta_{opt} \tag{۲}$$

راندمان نوری کلکتور η_{opt} از معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{opt} = \rho \alpha \tau \gamma K(\theta) \tag{۳}$$

بخشی از انرژی خورشیدی جذب‌شده توسط روغن در کلکتور خورشیدی به انرژی حرارتی مفید $\dot{Q}_u$ و مابقی آن $\dot{Q}_{loss}$ به محیط دفع می‌گردد.

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{loss} \tag{۴}$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{oil} c_{p,oil} (T_2 - T_1) \tag{۵}$$

از طرفی، مقادیر انرژی حرارتی جذب‌شده، حرارت اتلافی به محیط و دمای روغن خروجی از کلکتور توسط روابط (۶) تا (۸) محاسبه می‌شوند:

$$\dot{Q}_u = \left[K_4 \dot{Q}_S - K_5 \left(T_1^4 - T_{amb}{}^4 \right) \right] \tag{۶}$$

$$\dot{Q}_{loss} = \left(\eta_{opt} - K_4 \right) \dot{Q}_S + K_5 \left(T_1^4 - T_{amb}{}^4 \right) \tag{۷}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{K_4}{\dot{m}_{oil} c_{p,oil}} \dot{Q}_S - \frac{K_5}{\dot{m}_{oil} c_{p,oil}} \left(T_1^4 - T_{amb}{}^4 \right) \tag{۸}$$

1 Refprop
2 temperature glide

که K_1، K_2، K_3، K_4، K_5 و ε_r^* از روابط (۹) تا (۱۴) بدست می‌آیند:

$$K_1 = 4A_{co}\varepsilon_c\sigma T_{amb}^{\ 3} + A_{co}h_{out} \tag{۹}$$

$$K_2 = A_{ro}\varepsilon_r^*\sigma\left[1+\frac{4\varepsilon_r^*\sigma A_{ro}T_{amb}^{\ 3}}{K_1}\right]^{-1} \tag{۱۰}$$

$$K_3 = \left[\frac{1}{A_{ri}h_{oil}}+\frac{1}{2\dot{m}_{oil}c_{p,oil}}\right]^{-1} \tag{۱۱}$$

$$K_4 = \eta_{opt}\left[1+\frac{4T_1^3K_2}{K_3}\right]^{-1} \tag{۱۲}$$

$$K_5 = K_2\left[1+\frac{4T_1^3K_2}{K_3}\right]^{-1} \tag{۱۳}$$

$$\varepsilon_r^* = \left[\frac{1}{\varepsilon_r}+\frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c}+\frac{A_{ro}}{A_{ci}}\right]^{-1} \tag{۱۴}$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل لوله از رابطه (۱۵) حساب می‌شود.

$$h_{oil} = \frac{Nu_{oil}k_{oil}}{D_{ri}} \tag{۱۵}$$

عدد نوسلت برای جریان درهم درون لوله دایره‌ای، از رابطه دیتوس – بولتر بدست می‌آید.

$$Nu_{oil} = 0.023\,\mathrm{Re}_{oil}^{\ 0.8}\,\mathrm{Pr}_{oil}^{\ 0.4} \tag{۱۶}$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$h_{out} = 4V_{wind}^{\ 0.58}D_{co}^{\ -0.42} \tag{۱۷}$$

۲- ۳- ۲- چرخه رانکین آلی

موازنه جرمی برای چرخه رانکین آلی (با توجه به شکل ۱)، توسط معادلات (۱۸) تا (۲۳) محاسبه می‌شوند.

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{OWF} \tag{۱۸}$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{15} = x_1\dot{m}_{OWF} \tag{۱۹}$$

$$\dot{m}_{14} = \left(1-x_1\right)\dot{m}_{OWF} \tag{۲۰}$$

$$\dot{m}_{16} = x_2\left(1-x_1\right)\dot{m}_{OWF} \tag{۲۱}$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} = \left(x_1+x_2-x_1x_2\right)\dot{m}_{OWF} \tag{۲۲}$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{20} = \left(1-x_1-x_2+x_1x_2\right)\dot{m}_{OWF} \tag{۲۳}$$

نسبت‌های جرمی جریان x_1 و x_2 از روابط زیر حساب می‌شود.

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{13}}{\dot{m}_{12}} \tag{۲۴}$$

$$x_2 = \frac{\dot{m}_{16}}{\dot{m}_{14}} \tag{۲۵}$$

روابط ترمودینامیکی برای اجزای چرخه رانکین آلی در جدول ۳، آورده شده است.

جدول ۳. روابط ترمودینامیکی اجزای چرخه رانکین آلی

Table 3. Thermodynamic relationships of the organic Rankine cycle components

اجزا	معادلات
پمپ ۱	$\dot{W}_{pump1} = \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_{9}h_{9}$ $\eta_{pump1,is} = \frac{h_{10,is} - h_9}{h_{10} - h_9}$
پمپ ۲	$\dot{W}_{pump2} = \dot{m}_{19}h_{19} - \dot{m}_{18}h_{18}$ $\eta_{pump1,is} = \frac{h_{10,is} - h_9}{h_{10} - h_9}$
توربین	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{16}h_{16} - \dot{m}_{20}h_{20}$ $\eta_{Tur,is} = \frac{h_{14} - h_{16}}{h_{14} - h_{16,is}}$ $\eta_{Tur} = \frac{h_{14} - h_{20}}{h_{14} - h_{20,is}}$
شیر انبساط	$h_{13} = h_{15}$
مخلوط کننده ۱	$\dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{19}h_{19} = \dot{m}_{11}h_{11}$
مخلوط کننده ۲	$\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{16}h_{16} = \dot{m}_{17}h_{17}$
بویلر	$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{Boil} = \dot{m}_{12}h_{12} - \dot{m}_{11}h_{11}$
کندانسور	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20}h_{20} - \dot{m}_{9}h_{9}$
واحد گرمایش فرآیند	$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{18}h_{18}$

توان خالص تولیدی در چرخه تولید همزمان از رابطه (۲۶) بدست می‌آید.

$$\dot{W}_{Net} = \left(\eta_{Tur,mec}\eta_{Tur,gen}\dot{W}_{Tur}\right) - \left(\frac{\dot{W}_{pump1}}{\eta_{pump1,mec}}\right) - \left(\frac{\dot{W}_{pump2}}{\eta_{pump2,mec}}\right) \quad (۲۶)$$

۲- ۳- ۳- آب‌شیرین‌کن تبخیر آنی تک‌مرحله‌ای

معادلات بالانس جرمی و انرژی برای آب‌شیرین‌کن تبخیر آنی تک‌مرحله‌ای از روابط زیر به‌دست می‌آید [۱۹].

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (۲۷)$$

در محفظه فشار پایین، آب تبخیر شده در مبدل داخلی آب‌شیرین‌کن، چگالیده‌شده و آب خام ورودی را پیش‌گرم می‌کند. بنابراین:

$$\dot{Q}_{Cond,W} = \dot{m}_3 c_{p,W}(T_4 - T_3) \quad (۲۸)$$

ضریب تأثیر مبدل حرارتی کندانسور ε_D از رابطه (۲۹) بدست می‌آید.

$$\varepsilon_D = \frac{T_4 - T_3}{T_{Sat} - T_3} \quad (۲۹)$$

از ترکیب معادلات (۲۸) و (۲۹)، معادله (۳۰) بدست خواهد آمد.

$$\dot{Q}_{Cond,W} = \dot{m}_3 \varepsilon_D c_{p,W}(T_{Sat} - T_3) \quad (۳۰)$$

از طرفی، با درنظر گرفتن یک حجم کنترل روی محفظه فشار پایین معادله (۳۱) بدست می‌آید.

جدول ۴. مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۲۵] برای کلکتور خورشیدی سهموی

Table 4. Comparison between the present work and results of [25] for parabolic solar collectors

حالت	$\dot{G}_{b\beta}(\mathrm{W/m^2})$	$T_{amb}(\mathrm{K})$	$T_{in}(\mathrm{K})$	$\dot{m}_{oil}(\mathrm{kg/s})$	$T_{out}(\mathrm{K})$		$\eta_{th}(\%)$	
					مرجع [۲۵]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۵]	پژوهش حاضر
۱	۹۳۳/۷	۲۹۴/۳۵	۳۷۵/۳۵	۰/۶۸۶۴	۳۹۷/۱۵	۳۹۷/۵۳	۷۲/۵۱	۷۳/۱۰
۲	۹۲۰/۹	۳۰۴/۲۵	۶۵۲/۶۵	۰/۴۵۸۱	۶۷۱/۱۵	۶۷۱/۲۴	۶۲/۳۴	۶۲/۶۴

$$\dot{Q}_{Cond,Sat} = \dot{m}_7 c_{p,W} T_7 + \dot{m}_8 c_{p,W} T_8 - \dot{m}_5 c_{p,W} T_5 \quad (۳۱)$$

با فرض $T_۶ = T_۷ = T_۸ = T_{Sat}$ رابطه (۳۲) بدست می‌آید.

$$\dot{Q}_{Cond,Sat} = \dot{m}_5 c_{p,W} \left(T_{Sat} - T_5\right) \quad (۳۲)$$

با مساوی قرار دادن $\dot{Q}_{Cond,W} = -\dot{Q}_{Cond,Sat}$، دمای اشباع محاسبه می‌شود.

$$T_{Sat} = \frac{T_5 + \varepsilon_D T_3}{1 + \varepsilon_D} \quad (۳۳)$$

آب پیش‌گرم‌شده (حالت ۴) با عبور از واحد گرمایش فرآیند و جذب حرارت از آن، دمای خود را تا دمای $T_۵$ بالا می‌برد.

$$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_5 c_{p,W} \left(T_5 - T_4\right) \quad (۳۴)$$

با توجه به این که حرارت منتقل شده درکندانسور آب‌شیرین‌کن، معادل با حرارت نهان آب شیرین چگالیده‌شده در شرایط اشباع می‌باشد، نرخ جرمی آب شیرین تولید شده توسط رابطه (۳۵) بدست خواهد آمد.

$$\dot{m}_{dis} = \dot{m}_7 = \frac{\dot{m}_5 c_{p,W} \left(T_5 - T_{Sat}\right)}{h_{fg@Sat}} \quad (۳۵)$$

راندمان انرژی کلی چرخه تولید همزمان مطابق رابطه (۳۶) تعریف می‌گردد.

$$\eta_{Overall} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{Cond} + \dot{m}_{dis} h_{fg@Sat}}{\dot{Q}_S} \quad (۳۶)$$

۳- اعتبارسنجی مدل

برای حل معادلات شبیه‌سازی شده، کد عددی نوشته شده است. برای اینکه نشان داده شود مدل ریاضی این پژوهش با مدل‌های مشابه از دقت خوبی برخوردار است از پژوهش‌های مشابه در این زمینه استفاده شده است. از آنجایی‌که مدلی مشابه با مدل این پژوهش وجود ندارد، سه سیستم به صورت مجزا اعتبارسنجی خواهند شد. ابتدا کلکتور خورشیدی سهموی، سپس چرخه رانکین آلی و در نهایت آب‌شیرین‌کن تبخیر آنی یک‌مرحله‌ای اعتبارسنجی می‌شوند. برای شرایط مشابه جداول ۴ تا ۶ مقایسه نتایج مدل ریاضی این پژوهش را با نتایج در دسترس نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج این مدل و پژوهش‌های مشابه وجود دارد و لذا این مدل از دقت خوبی برای شبیه‌سازی این چرخه برخوردار است.

۴- پارامترهای محیطی

برای بررسی عملکرد چرخه تولید همزمان، به‌طور نمونه دو روز کاملاً صاف و آفتابی در فصل گرم ۴ تیر یا (۲۵ ژوئن) و فصل سرد ۴ دی یا (۲۵ دسامبر) با توجه به شرایط محیطی شهر زاهدان (طول و عرض جغرافیایی ۶۰/۸۶ درجه شرقی و ۲۹/۵ درجه شمالی) در نظر گرفته شده است. در

جدول ۵.مقایسه نتایج کار حاضر و مراجع [۹] و [۲۸-۲۶] برای چرخه رانکین آلی در حالت $x_۱ = x_۲ = ۰$

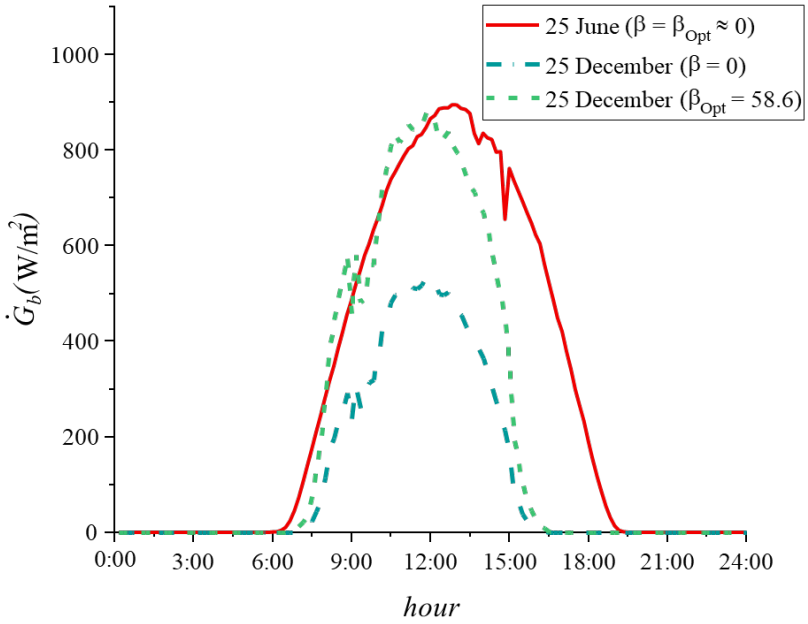
Table 5. Comparison between the present work and results of [9] and [26-28] for the organic Rankine cycle at $x_1=x_2=0$

سیال	R152a		R1234yf		R600a		R600a/R601a		R152a/R600a/R601a	
کسر جرمی	۱		۱		۱		(۰/۱ ،۰/۹)		(۰/۴۷۱ ،۰/۴۶۶ ،۰/۰۶۳)	
	مرجع [۲۶]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۷]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۸]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۸]	پژوهش حاضر	مرجع [۹]	پژوهش حاضر
P_9(kPa)	۷۰۷	۷۰۷	۷۷۹/۴۱	۷۷۹/۴۱	۴۸۰	۴۸۰	۱۵۰	۱۵۰	۸۲۰	۸۲۰
P_{12}(kPa)	۲۵۸۰	۲۵۸۰	۵۰۷۳/۳	۵۰۷۳/۳	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۵۵۰	۵۵۰	۲۶۷۰	۲۶۷۰
T_9(K)	۳۰۳/۹۷	۳۰۴/۱	۳۰۲/۹۶	۳۰۲/۹۶	۳۰۹/۱۵	۳۰۹/۳۴	۳۰۴/۱۵	۳۰۴/۰۵	-	۳۱۰/۴۹
T_{11}(K)	۳۰۵/۴	۳۰۵/۴۶	۳۰۶/۸۴	۳۰۶/۸۴	۳۱۰/۱۷	۳۱۰/۳۷	۳۰۴/۴۹	۳۰۴/۳۹	۳۱۲/۰۵	۳۱۱/۹۷
T_{12}(K)	۳۵۷/۷۲	۳۵۷/۷۸	۳۹۵/۴۲	۳۹۵/۴۲	۳۶۳/۹۲	۳۶۴/۰۴	۳۶۴/۶۳	۳۶۴/۵۸	۳۷۲/۰۵	۳۷۲/۰۷
T_{20}(K)	۳۰۳/۹۷	۳۰۴/۰۱	۳۰۸/۲۳	۳۰۸/۲۳	۳۳۱/۴۷	۳۳۱/۶۳	۳۳۸/۴۷	۳۳۸/۳۹	۳۱۹/۸۵	۳۱۹/۷۶
h_9(J/kg)	۲۵۴۶۰۰	۲۵۴۴۰۰	۷۶۸۲۰	۷۶۸۲۰	۲۸۶۱۸۰	۲۸۶۶۶۰	۳۴۲۳۰	۳۴۰۰۰	-	۲۸۲۳۶۰
h_{11}(J/kg)	۲۵۷۴۰۰	۲۵۷۲۰۰	۸۲۰۹۰	۸۲۰۹۰	۲۸۹۱۵۰	۲۸۹۶۴۰	۳۵۳۴۰	۳۵۱۰۰	-	۲۸۵۷۶۰
h_{12}(J/kg)	۵۴۲۹۰۰	۵۴۳۲۰۰	۲۴۸۳۳۰	۲۴۸۳۳۰	۶۷۹۱۸۰	۶۷۹۳۳۰	۴۷۱۳۱۰	۴۷۱۲۴۰	-	۵۹۵۸۰۰
h_{20}(J/kg)	۵۱۰۶۰۰	۵۱۰۸۰۰	۲۲۳۹۱۰	۲۲۳۹۱۰	۶۴۵۱۴۰	۶۴۵۳۷۰	۴۳۴۵۳۰	۴۳۴۴۰۰	-	۵۶۲۶۹۰
$\dot{m}_{OWF}$(kg/s)	۰/۱۴۴۳	۰/۱۴۴۱	۴/۱۴۵	۴/۱۴۴۹	۰/۶۷	۰/۶۷۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۱۲/۷۹	۱۲/۷۷۶
$\dot{W}_{Net}$(W)	۴۲۵۰	۴۲۶۵/۴	۷۹۳۴۰	۷۹۳۷۶/۷	۲۰۷۷۰	۲۰۷۸۷/۶	۲۱۷۵۸/۷	۲۱۸۰۱/۴	۳۷۸۵۲۰	۳۷۹۵۴۰

جدول ۶. مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۱۹] برای آب‌شیرین‌کن تبخیر آنی یک‌مرحله‌ای

Table 6. Comparison between the present work and results of [19] for single-stage flash desalination

	$\dot{Q}_{PH}$(W)	T_6(K)	P_6(kPa)	T_3(K)	ε_D	T_4(K)	T_5(K)	$\dot{m}_W$(kg/s)	$\dot{m}_{dis}$(kg/s)
مرجع [۱۹]	۵۰۰۰	۳۲۵/۷	۱۴/۰۲	۳۰۲/۸۹	۰/۹۷	۳۲۵/۰۱	۳۴۸/۷۹	۰/۰۵	۰/۰۰۱۹۴
پژوهش حاضر						۳۲۵/۰۴	۳۴۷/۸۹	۰/۰۵۲۳	۰/۰۰۲



شکل ۳. شدت تابش مستقیم تابیده‌شده خورشید در حالت افقی و زاویه بهینه کلکتور در روزهای ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و ۴ دی (۲۵ دسامبر) در زاهدان [۲۹]

Fig. 3. The solar radiation on the horizontal plane and optimal collector angle on 25 June and 25 December in Zahedan city [29]

محاسبات انجام‌شده، برای شدت تابش مستقیم تابیده‌شده خورشید، سرعت باد و دمای محیط برای دو روز انتخابی، از داده‌های هواشناسی شهر زاهدان استفاده شده است [۲۹]. شکل ۳، شدت تابش مستقیم اندازه‌گیری شده، وقتی کلکتور در حالت افقی قرار گرفته ($\beta = ۰$) و نیز وقتی کلکتور در حالت زاویه بهینه خود قرار دارد (β_{opt}) را نشان می‌دهد [۳۰]. سرعت باد و دمای محیط در دو روز انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده است.

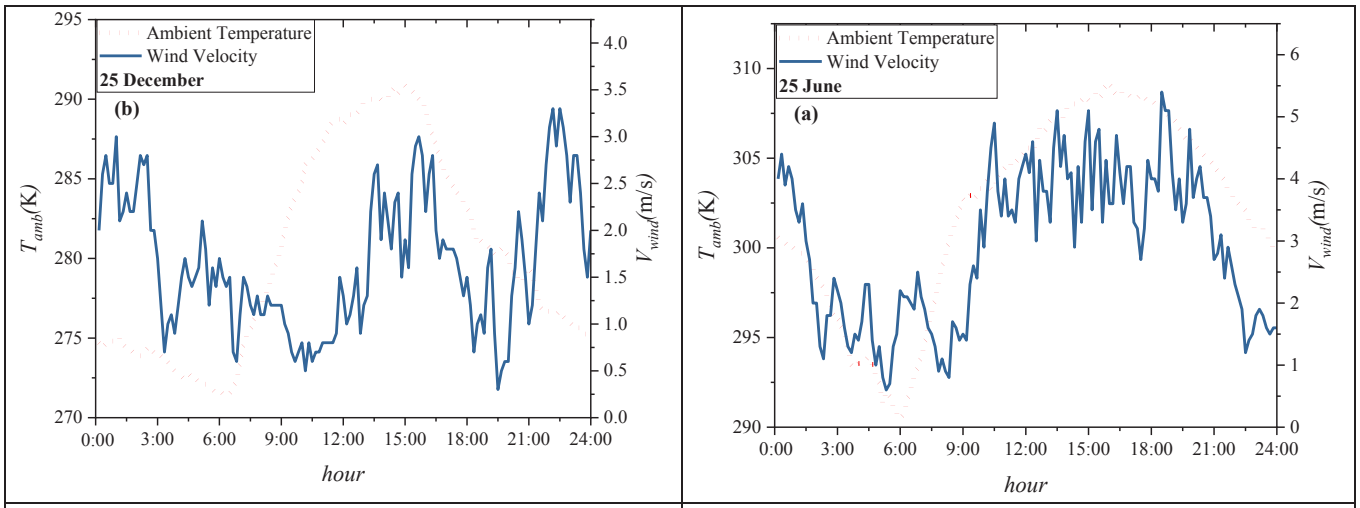
جدول ۷، مقدار متوسط روزانه دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش مستقیم خورشید در حالت زاویه بهینه کلکتور را نشان می‌دهد. توجه شود که در این پژوهش از متوسط روزانه این مقادیر استفاده می‌شود.

۵- بحث و بررسی نتایج

با توجه به مشخصات فیزیکی و ترمودینامیکی متفاوت هر یک از سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، رفتار این سیالات در کسرهای جرمی مختلف نیز با یکدیگر تفاوت دارد. عملکرد هر یک از سیالات به‌تنهایی به گونه‌ای است که در ناحیه دوفاز وقتی فشار ثابت است، دما نیز ثابت می‌ماند (شیب نمودار دما – فشار در ناحیه دوفاز صفر خواهد بود). اما در هنگام استفاده از سیالات مخلوط، در ناحیه دوفاز وقتی فشار ثابت است، دما ثابت نمی‌ماند و دما به اندازه ΔT_g (اختلاف دما در ناحیه مایع اشباع و ناحیه بخار اشباع) متفاوت است (شیب نمودار دما – فشار در ناحیه دوفاز صفر نخواهد شد). در این پژوهش فشار کندانسور در ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، فشار واحد فرآیند در ۲۰۰۰ کیلوپاسکال، فشار بویلر در ۲۵۰۰ کیلوپاسکال، دمای سوپرهیت در ۱۰ کلوین و فشار محفظه فشار پایین آب‌شیرین‌کن در ۱۰ کیلوپاسکال ثابت نگه داشته شده و تنها کسرهای جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a تغییر می‌کند. توجه شود که در محاسبات انجام‌شده در چرخه تولید همزمان، فرض شده که شیر شماره ۱، به اندازه ۱۰ درصد و شیر شماره ۲، به اندازه ۵۰ درصد باز باشد.

۵- ۱- مطالعه پارامتری

میزان تأثیر کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی روی توان، آب شیرین و حرارت تولیدی در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ آورده شده است. در این شکل‌های رسم‌شده، محور افقی، کسر جرمی سیال R۱۵۲a و محور عمودی، کسر جرمی سیال R۱۲۳۴yf را نشان داده و برای کسر جرمی سیال R۶۰۰a



(ب) (الف)

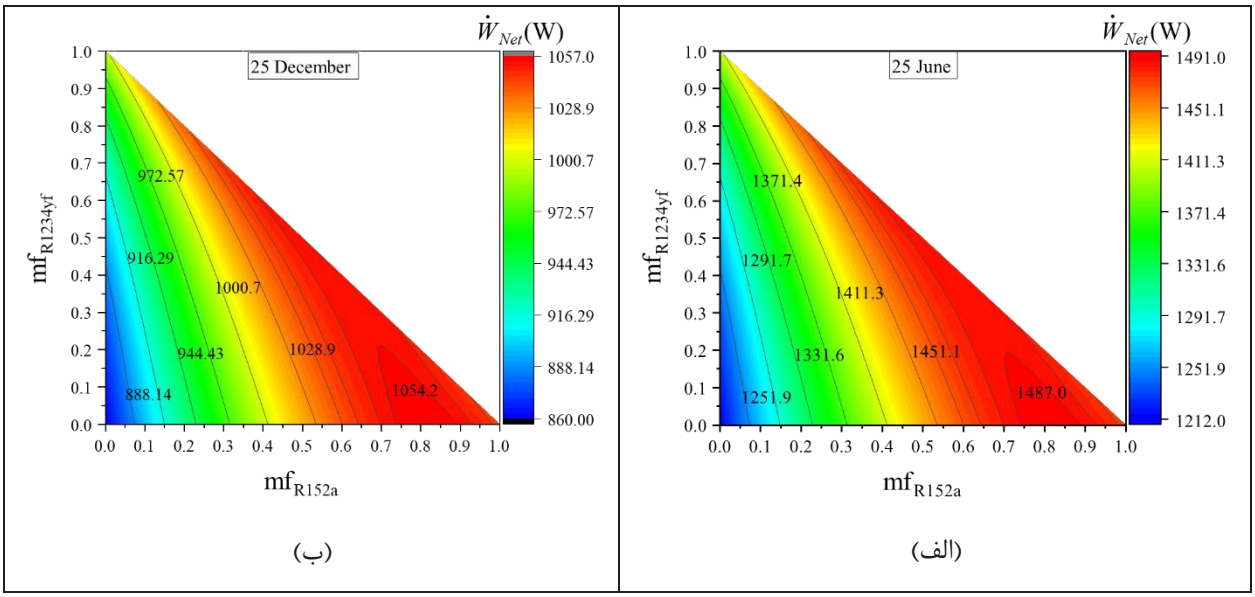
شکل ۴. دمای محیط و سرعت باد در زاهدان در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر) [۲۶]

Fig. 4. Ambient temperature and wind velocity in Zahedan city at (a) 25 June (b) 25 December

جدول ۷. شرایط محیطی دو روز انتخابی [۲۹]

Table 7. Environmental conditions in the two selected days [29]

روز	۴ تیر (25 June)	۴ دی (25 December)
$T_{amb}(K)$	۳۰۲/۱	۲۸۰/۳
$V_{wind}(\mathrm{m/s})$	۲/۹۱	۱/۶۶
$\dot{G}_{b\beta}(\mathrm{W/m^2})$	۲۸۵/۹	۲۰۷/۲



شکل ۵. توان تولیدی در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 5. Power production for different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December

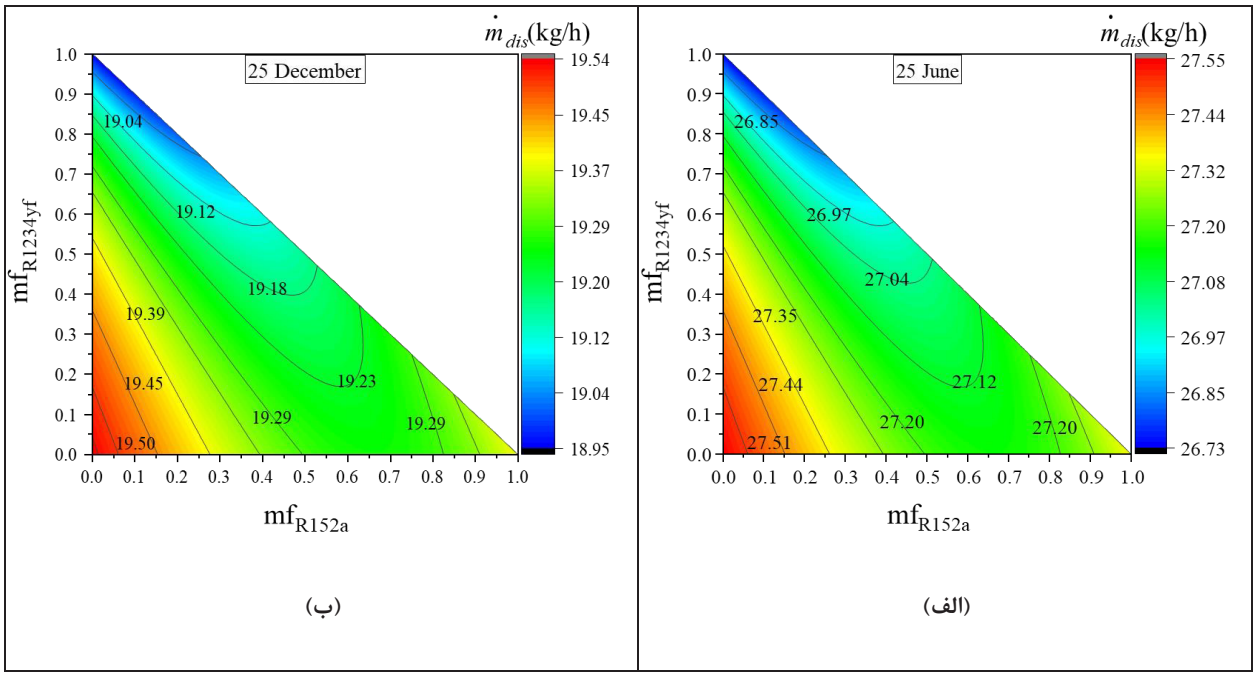
رابطه $mf_{R۶۰۰a} = ۱ - mf_{R۱۵۲a} - mf_{R۱۲۳۴yf}$ به‌کار خواهد رفت.

شکل ۵، مقدار توان تولیدی درروزهای ۴ تیر و ۴ دی در کسرهای مختلف جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a برای چرخه تولید همزمان را نشان می‌دهد.

همانطورکه کانتورهای رسم‌شده نشان می‌دهد، می‌توان برای یک مقدار مشخص از توان، الگوهای مختلفی از کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی را انتخاب کرد. توجه شود که انتخاب هر یک از این الگوها اگرچه توان یکسانی ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که آب شیرین و حرارت متفاوتی تولید کند. به‌عنوان نمونه برای اینکه توان در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به‌ترتیب در مقادیر ۱۴۱۱/۳ و ۱۰۰۰/۷ وات ثابت باشد می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۰۷، ۰/۸۸ و ۰/۰۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a و نیز کسرهای جرمی ۰/۳۶، ۰/۱۶۵ و ۰/۴۷۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a برای استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۰۷، ۰/۸۸ و ۰/۰۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۶/۸۵ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۷۹۸۱/۷ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۰۴ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۲۷۴۹/۴ وات خواهد بود. درصورتی‌که اگر از ترکیب ۰/۳۶، ۰/۱۶۵ و ۰/۴۷۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۲۱ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۷۷۲۴/۶ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۲۹ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۲۵۶۷/۱ وات می‌باشد. از مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر حرارت کندانسور بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر آب شیرین بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد. لازم به ذکر است که اگر صرفاً توان تولیدی مورد نظر باشد، باید از کسرهای جرمی ۰/۸۱۵، ۰ و ۰/۱۸۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a برای هر دو روز انتخابی استفاده کرد (سیال R۱۲۳۴yf تأثیری نخواهد داشت). بیشترین توان تولیدی در این مخلوط در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب ۱۴۹۱ و ۱۰۵۷ وات خواهد.

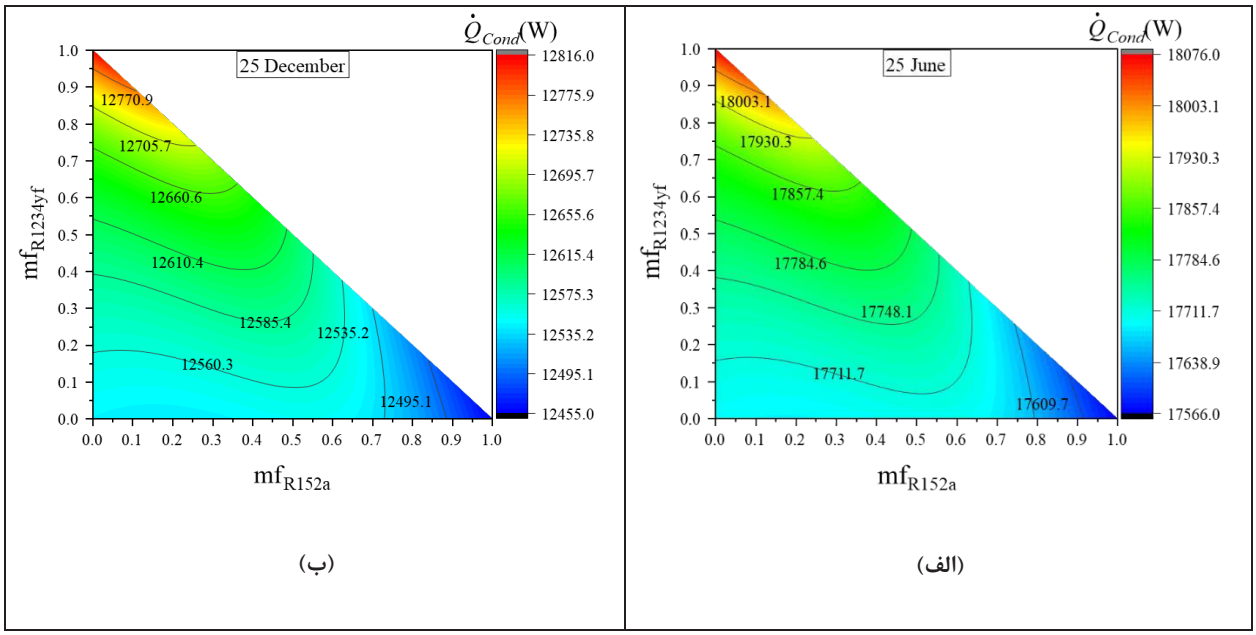
شکل ۶، مقدار دبی آب شیرین تولیدی در دو روز انتخابی برای کسرهای مختلف جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a را نشان می‌دهد.

همانطورکه مشاهده می‌شود، می‌توان برای یک مقدار مشخص از آب شیرین تولیدی، از کسرهای جرمی مختلفی در مخلوط سه‌جزئی استفاده کرد، اما توان و حرارت متفاوتی تولید می‌شود. به‌طور نمونه برای اینکه آب شیرین تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به‌ترتیب در مقادیر ۲۷/۲ و ۱۹/۲۹



شکل ۶. دبی آب شیرین تولیدی در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 6. Fresh water production on different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December



شکل ۷. حرارت تولیدی در کندانسور در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 7. Heating power production on different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December

کیلوگرم بر ساعت ثابت بماند، می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۸۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱۲ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a و نیز کسرهای جرمی ۰/۲۵۵، ۰/۳۳ و ۰/۴۱۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a ، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۸۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱۲ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار توان تولیدی، ۱۴۸۸/۱ وات و حرارت کندانسور ۱۷۶۵۰/۲ وات و در روز ۴ دی، مقدار توان تولیدی ۱۰۵۵/۱ وات و حرارت کندانسور ۱۲۵۱۴/۴ وات خواهد بود. درصورتی‌که اگر از ترکیب ۰/۲۵۵، ۰/۳۳ و ۰/۴۱۵ استفاده شود، در روز۴ تیر، مقدار توان تولیدی، ۱۳۸۸/۳ وات و حرارت کندانسور ۱۷۷۵۴/۶ وات و در روز ۴ دی، مقدار توان تولیدی ۹۸۴/۳ وات و حرارت کندانسور ۱۲۵۸۸/۴ وات خواهد بود. از مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر توان تولیدی بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر حرارت تولیدی در کندانسور بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد.

اگر هدف تنها تولید آب شیرین باشد، باید از سیال R۶۰۰a استفاده کرد که در این حالت بیشترین آب شیرین تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب ۲۷/۵۵ و ۱۹/۵۴ کیلوگرم بر ساعت خواهد بود.

شکل ۷، میزان حرارت تولیدی در کندانسور در دو روز انتخابی برای کسرهای مختلف جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a را نشان می‌دهد. شکل ۸، نشان می‌دهد که می‌توان برای یک مقدار مشخص از حرارت تولیدی در کندانسور، الگوهای مختلفی از مخلوط سه‌جزئی را انتخاب کرد. توجه شود که انتخاب هر یک از این الگوها اگرچه حرارت تولیدی یکسانی ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که توان و آب شیرین متفاوتی ایجاد کند. به‌عنوان نمونه برای اینکه حرارت تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به‌ترتیب در مقادیر ۱۷۷۴۸/۱ و ۱۲۵۸۵/۴ وات ثابت باشد می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۰۴۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵۸ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a ، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a و نیز کسرهای جرمی ۰/۴۹۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۳۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a برای استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۰۴۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵۸ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۳۸ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۲۷۵/۴ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۴۱ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۹۰۴/۳ وات خواهد بود. درصورتی‌که اگر از ترکیب ۰/۴۹۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۳۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۰۹ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۴۶۶/۷ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۲۱ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۰۳۹/۹ وات می‌باشد. از مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر آب شیرین بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر توان بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد.

لازم به ذکر است اگر تنها حرارت تولیدی در کندانسور، مورد نظر باشد، باید از سیال R۱۲۳۴yf استفاده کرد که در این حالت، بیشترین حرارت تولیدی در کندانسور در روزهای ۴ تیر و ۴ دی، به‌ترتیب ۱۸۰۷۵/۲ و ۱۲۸۱۵/۷ وات خواهد بود.

۵- ۲- بهینه‌سازی چند هدفه

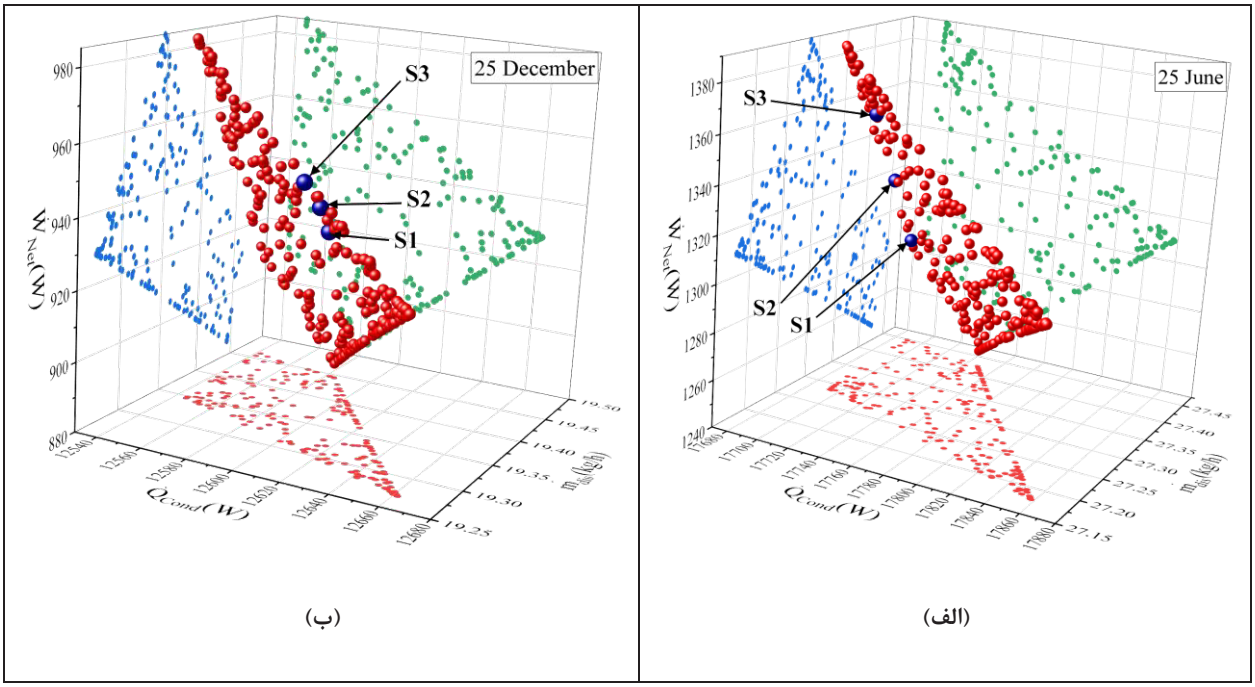
برای بهینه‌سازی چندهدفه از روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب چند هدفه[1] استفاده می‌شود. برای این منظور تعداد جمعیت ۲۰۰، بیشترین تکرار ۵۰۰، نرخ تقاطع[2] ۰/۷ ، درصد جهش[3] ۰/۰۳ روش رقابتی[4] به‌عنوان پارامترهای کنترلی الگوریتم بهینه‌سازی درنظر گرفته شده است. کسرهای جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a بعنوان متغیرها انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است که مجموع کسر جرمی سه سیال مورد نظر همواره برابر یک می‌باشد. همچنین با توجه به دمای مناسب آب گرم برای مصارف حرارتی قید نشان داده شده در معادله (۳۷) نیز در نظر گرفته شده است.

$$323.15 \le T_{22}(\mathrm{K}) \le 333.15 \qquad (۳۷)$$

لازم به ذکر است که توابع هدف در این پژوهش، توان خالص، دبی آب شیرین و حرارت تولیدی در کندانسور می‌باشد. پس از بهینه‌سازی چندهدفه چرخه تولید همزمان، نمودارهای جبهه پرتو آن‌ها به صورت جداگانه برای روزهای انتخابی در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) رسم شده است. نقاط مشخص‌شده با رنگ قرمز در نمودار جبهه پرتو (شکل ۸) در هر دو روز انتخابی، بهترین نقاط انتخاب‌شده برای توابع هدف می‌باشند.

شکل ۹، توزیع کسرهای جرمی (متغیرهای بهینه‌سازی) بهینه‌شده پس از بهینه‌سازی چندهدفه را برای سه سیال R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹، مشاهده می‌شود، برای سیال R۱۵۲a، کسرهای جرمی مورد قبول بین ۰ تا ۰/۳۵۵ می‌باشد، در صورتی‌که برای سیال R۱۲۳۴yf، باید از کسرهای جرمی ۰ تا ۰/۷۴

1 Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)
2 Crossover
3 Mutation
4 Tournament



شکل ۸. نمودار جبهه پرتو چرخه تولید همزمان، برای توان، آب شیرین و حرارت در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 8. Pareto front diagram of the tri-generation cycle, for power, fresh water and heat at (a) 25 June and (b) 25 December

استفاده شود، همچنین کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال R۶۰۰a، بین ۰/۲۵ تا ۰/۸۶۵ خواهد بود.

انتخاب نقاط از نمودار جبهه پرتو (شکل‌های ۸-الف و ۸-ب)، سناریوهای (S۳، S۲ و S۱) بر این اساس بوده که در تابستان، تولید توان و آب شیرین مهم‌تر از حرارت تولیدی کندانسور می‌باشد، در حالی‌که برای زمستان توان و حرارت تولیدی در کندانسور اهمیت بیشتری نسبت به آب شیرین دارد. سه سناریو (S۳، S۲ و S۱) در دو روز ۴ تیر و ۴دی (۲۵ ژوئن و ۲۵ دسامبر) مطابق جدول ۸، درنظر گرفته شده است.

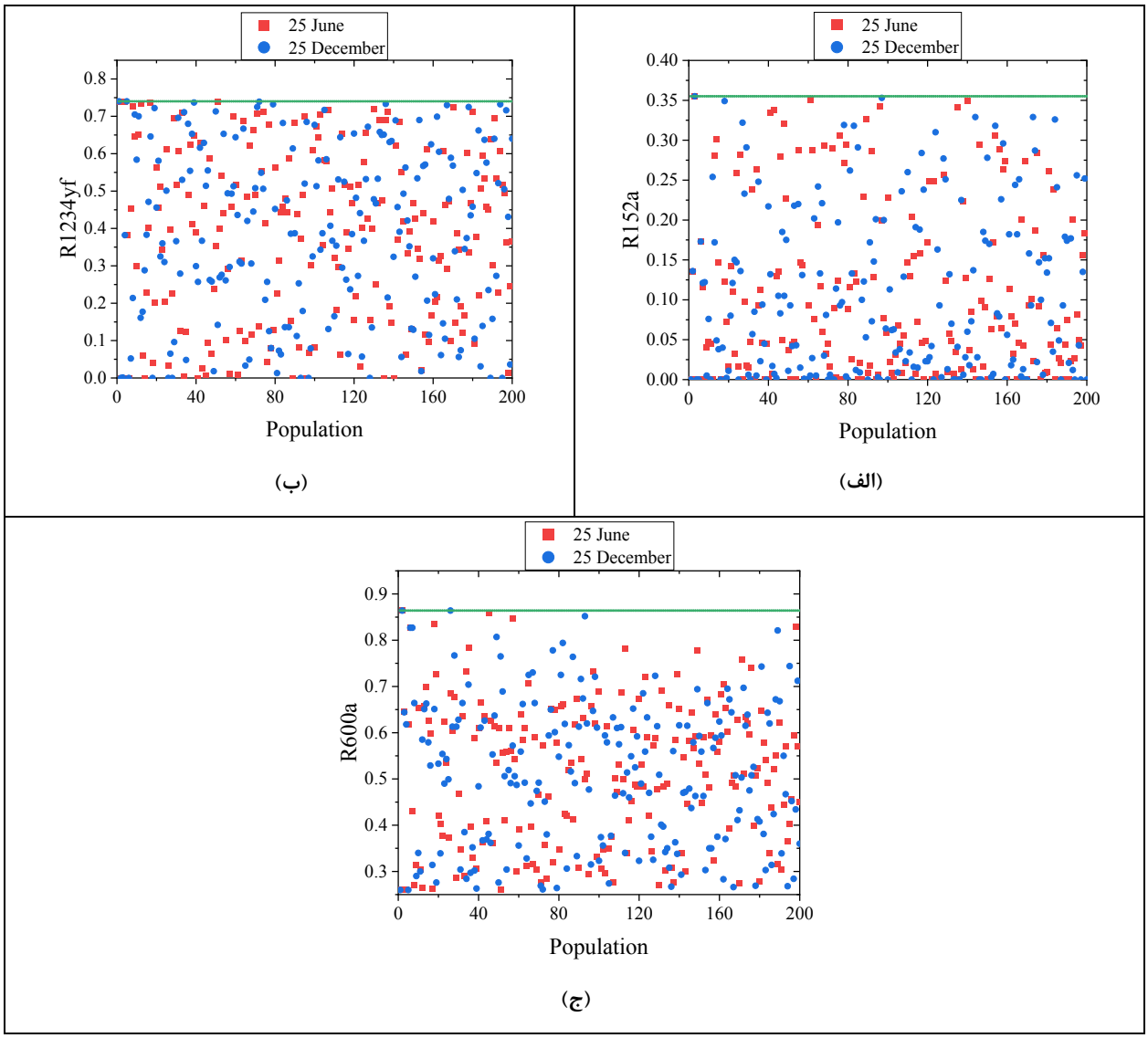
به‌عنوان نمونه سناریوی S۲ درنظر گرفته شده و نمودار دما – آنتروپی در شکل ۱۰، برای آن‌ها رسم شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برای روز ۴ تیر، مخلوط سه‌جزئی تقریباً رفتار سیال آیزنتروپیک، در صورتی‌که برای روز ۴ دی، مخلوط سه‌جزئی تقریباً رفتار سیال خشک را خواهد داشت. در شکل ۱۰، نشان داده شده است که برای بهره برداری بیشتر از چرخه، دمای مادون سرد در فشار کندانسور تا دمای نقطه ۹ و در فشار واحد گرمایش فرآیند تا نقطه ۱۸ پایین می‌آید.

میزان توابع هدف، راندمان کلی و دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی برای هر کدام از سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a و مخلوط سه‌جزئی انتخاب‌شده در جدول ۹، برای دو روز ۴ تیر و ۴ دی نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۱۰مشاهده می‌شود برای هر دو روز انتخابی، سیال R۱۵۲a بیشترین توان خالص، سیال R۱۲۳۴yf بیشترین حرارت کندانسور و سیال R۶۰۰a بیشترین آب شیرین تولیدی را خواهند داشت.

سیال R۱۵۲a، نسبت به مخلوط سه‌جزئی توان بیشتری تولید می‌کند ولی به دلیل اینکه هم آب شیرین و حرارت کمتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی خواهد داشت و هم دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی پایینی دارد (کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، لذا استفاده از این سیال به تنهایی برای شرایط ذکر شده مناسب نخواهد بود.

سیال R۱۲۳۴yf نیز اگرچه توان و حرارت بیشتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی تولید می‌کند ولی چون هم آب شیرین کمتری نسبت به مخلوط سه‌جزئی داشته و هم نمی‌تواند دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی را تأمین کند (دمای آن کمتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد)، نباید از این سیال به تنهایی برای تأمین شرایط مورد نظر استفاده کرد. سیال R۶۰۰a، آب شیرین



شکل ۹. توزیع کسرهای جرمی بهینه برای سیال R152a (الف)، سیال R1234yf (ب)، سیال R600a (ج) در مخلوط سه‌جزئی در دو روز انتخابی

Fig. 9. Distribution of optimal mass fractions for R152a (a), R1234yf (b), R600a (c) in a three-component mixture in two selected days

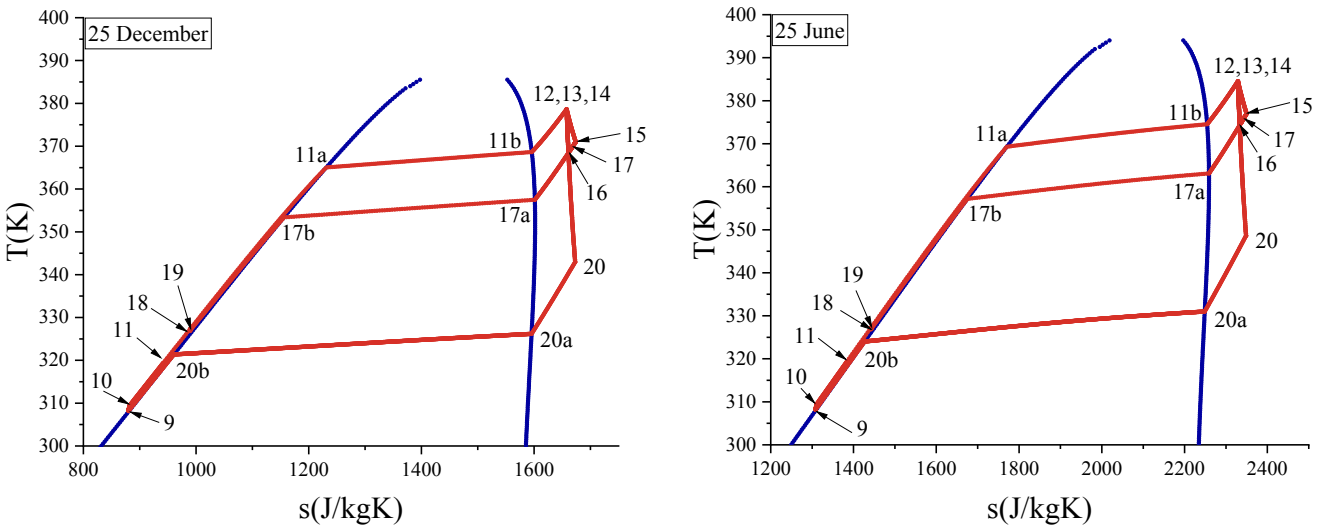
تولیدی بالاتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی دارد، اما به این دلیل که هم کمترین توان را در مقایسه با سیالات دیگر و مخلوط سه‌جزئی داشته و هم دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی، (حدود ۶۶ درجه) بیشتر از حد طراحی بوده (می‌توان از حرارت دما بالای آن، توان تولید کرد)، لذا استفاده از این سیال به تنهایی توصیه نمی‌شود.

همانطور که مشاهده شد استفاده از هیچ‌کدام از سیالات انتخابی به تنهایی نتوانست شرایط مناسب برای چرخه مورد نظر را تأمین کند. لذا برای دستیابی به هر سه هدف توان، آب شیرین و حرارت بهتر است از مخلوط سه‌جزئی استفاده کرد. به‌عنوان نمونه از مخلوط سه‌جزئی ارائه‌شده در جدول ۱۰، برای دو روز ۴ تیر و ۴ دی می‌توان استفاده کرد. نتایج نشان داد که در روز ۴ تیر، مقدار تولید توان، آب شیرین، حرارت و راندمان کلی چرخه به ترتیب ۱۳۲۵/۳ وات، ۲۷/۳۷ کیلوگرم بر ساعت، ۱۷۶۹۸ وات و ۶۶/۷۵ درصد بوده که در این حالت، کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، به‌ترتیب ۰/۲، ۰/۰۶۸ و ۰/۷۳۲ می‌باشد. در روز ۴ دی، برای کسرهای جرمی ۰/۱۰۵، ۰/۵۱۴ و ۰/۳۸۱ در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، مقدار

جدول ۸. نقاط بهینه برای سه سناریوی درنظر گرفته‌شده دو روز انتخابی

Table 8. Optimal points for the three scenarios considered for the two selected days

روز	سناریو	متغیرهای تصمیم‌گیری			توابع هدف		قید
		mf_{R152a}	$mf_{R1234yf}$	mf_{R600a}	$\dot{W}_{Net}$(W)	$\dot{m}_{dis}$(kg/h)	$\dot{Q}_{Cond}$(W)	T_{22}(K)
۴ تیر (25 June)	S1	۰/۱۴۳	۰/۰۱	۰/۸۴۷	۱۲۸۹/۹	۲۷/۴۴	۱۷۶۸۹/۹	۳۳۲/۷
	S2	۰/۲	۰/۰۶۸	۰/۷۳۲	۱۳۲۵/۳	۲۷/۳۸	۱۷۶۹۸/۴	۳۲۹
	S3	۰/۲۶۴	۰/۰۹۶	۰/۶۴	۱۳۶۰/۱	۲۷/۳۱	۱۷۷۰۵/۲	۳۲۵/۵
۴ دی (25 December)	S1	۰/۰۸۵	۰/۵۳	۰/۳۸۵	۹۴۰/۱	۱۹/۳۲	۱۲۶۱۴/۹	۳۲۳/۷
	S2	۰/۱۰۵	۰/۵۱۴	۰/۳۸۱	۹۴۷/۲	۱۹/۳۱	۱۲۶۱۳/۳	۳۲۳/۴
	S3	۰/۱۳۲	۰/۴۶۷	۰/۴۰۱	۹۵۳	۱۹/۳۱	۱۲۶۰۵/۶	۳۲۳/۵



(ب) (الف)

شکل ۱۰. نمودار دما-انتروپی نقاط مختلف چرخه و مخلوط سه‌جزئی برای سناریوی دوم برای دو روز انتخابی

Fig. 10. Temperature-entropy diagram of different points of the cycle and three-component mixture for the second scenario for two selected days

جدول ۹. مقایسه مقدار توابع هدف، راندمان کلی و دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی برای سیالات خالص و مخلوط سه‌جزئی بهینه‌شده در دو روز ۴ تیر و ۴ دی

Table 9. Comparison between the desired outputs, overall energy efficiency and temperature of water heating system for pure fluids and the optimized three-component mixture at 25 June and 25 December

روز	سیال	$\dot{W}_{Net}$(W)	$\dot{m}_{dis}$(kg/h)	$\dot{Q}_{Cond}$(W)	$\eta_{Overall}$(%)	T_{22}(K)
۴ تیر (25 June)	R152a	۱۴۷۱/۲	۲۷/۳۴	۱۷۵۶۸	۶۶/۷۴	۳۱۲/۱
	R1234yf	۱۴۰۷/۲	۲۶/۷۳	۱۸۰۷۶	۶۶/۸	۳۰۸/۶
	R600a	۱۲۱۳	۲۷/۵۵	۱۷۶۹۳	۶۶/۷۵	۳۳۹/۱
	R152a/R1234yf/R600a (0.2/0.068/0.732)	۱۳۲۵/۳	۲۷/۳۷	۱۷۶۹۸	۶۶/۷۵	۳۲۹/۰۵
۴ دی (25 December)	R152a	۱۰۴۳/۱	۱۹/۳۹	۱۲۴۵۶	۶۵/۲۹	۳۱۲/۱
	R1234yf	۹۹۷/۷	۱۸/۹۵	۱۲۸۱۶	۶۵/۳۶	۳۰۸/۶
	R600a	۸۶۰	۱۹/۵۴	۱۲۵۴۵	۶۵/۳	۳۳۹/۱
	R152a/R1234yf/R600a (0.105/0.514/0.381)	۹۴۷/۲	۱۹/۳۱	۱۲۶۱۳	۶۵/۳۲	۳۲۳/۷۵

تولید توان، آب شیرین، حرارت و راندمان کلی چرخه به ترتیب ۹۴۷/۲ وات، ۱۹/۳۱ کیلوگرم بر ساعت، ۱۲۶۱۳ وات و ۶۵/۳۲ درصد می‌باشد. نتایج این جدول همچنین نشان می‌دهد که برای هر دو روز انتخابی، راندمان کلی چرخه برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a و نیز مخلوط سه‌جزئی، تفاوت چندانی ندارد.

۶- نتیجه‌گیری

چرخه رنکین آلی برای تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با بهره گیری از کلکتورهای خورشیدی سهموی شبیه‌سازی عددی شده است. با توجه به اهمیت رفتار ترمودینامیکی سیال عامل در عملکرد این چرخه، سه سیال‌تر R۱۵۲a، خشک R۶۰۰a و آیزنتروپیک R۱۲۳۴yf که پتانسیل تخریب لایه اوزون و گرمایش جهانی پایینی دارند در نظر گرفته شده است. با توجه به رفتار عملکردی متفاوت هر یک از خروجی‌های مورد نظر این چرخه همزمان، لذا جهت بهره مندی از خواص ترمودینامیکی هر سه این سیالات، مخلوط سه‌جزئی R۱۵۲a/R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a با کسرهای جرمی مختلف در عملکرد این چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به ترکیب مناسب ابتدا یک مطالعه‌ی پارامتری و سپس برای رسیدن به شرایط مطلوب، یک بهینه‌سازی چندهدفه با روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب چند هدفه و توابع هدف توان، آب شیرین و حرارت و با لحاظ کسر جرمی سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a بین ۰ و ۱ بعنوان متغیرها انجام شده است. و نتایج حاصله بصورت تیتروار به شرح زیر ارائه می‌گردد:

• برای یک مقدار ثابت از توابع هدف (مثلاً توان)، می‌توان الگوهای مختلفی از کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی را انتخاب کرد. انتخاب هر یک از این الگوها باعث می‌شود که سایر توابع هدف (آب شیرین و حرارت) تولید متفاوتی داشته باشند و براساس میزان تقاضا باید تصمیم‌گیری شود که کدام مخلوط انتخاب شود.

• اگر هدف تنها تولید آب شیرین باشد، بهتر است از سیال R۶۰۰a استفاده کرد درصورتی‌که اگر فقط حرارت تولیدی مد نظر باشد، بهتر است سیال R۱۲۳۴yf مورد استفاده قرار گیرد. همچنین اگر صرفاً توان تولیدی مد نظر باشد، مناسب است از کسرهای جرمی ۰/۸۱۵، ۰ و ۰/۱۸۵ به‌ترتیب برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a برای هر دو روز انتخابی استفاده کرد. (سیال R۱۲۳۴yf تأثیری نخواهد داشت).

• با توجه به اینکه استفاده از سیالات R۱۵۲a و R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a به تنهایی نمی‌توانند شرایط مطلوب را برای هر سه توان، آب شیرین و حرارت (طوری‌که دمای ورودی به سیستم گرمایشی بین ۳۲۳/۱۵ تا ۳۳۳/۱۵ کلوین باشد) را تأمین کنند، لذا استفاده از این سیالات به تنهایی

برای چرخه مناسب نخواهند بود و بهتر است از مخلوط سه‌جزئی استفاده شود.

• نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد برای برآورده کردن شرایط مطلوب و قید مورد نظر (دمای $T_{۲۲}$ بین ۳۲۳/۱۵ تا ۳۳۳/۱۵ کلوین)، کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال R۱۵۲a، بین ۰ تا ۰/۳۵۵ بوده، در صورتی‌که برای سیال R۱۲۳۴yf، باید از کسرهای جرمی ۰ تا ۰/۷۴ استفاده شود، همچنین کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال R۶۰۰a، نیز بین ۰/۲۵ تا ۰/۸۶۵ خواهد بود.

• مشاهده شد که برای اینکه چرخه از توان، آب شیرین و حرارت مناسبی برخوردار باشد، باید از مخلوط‌های سه‌جزئی استفاده کرد، که کسرهای جرمی مورد قبول برای این مخلوط‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

• با توجه به نیاز کاربر سناریوهای بهینه مشخص می‌گردد. بعنوان نمونه در سناریوی انتخابی در این تحقیق، در روز ۴ تیر، برای کسرهای جرمی ۰/۲، ۰/۰۶۸ و ۰/۷۳۲ در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، مقدار توان خالص تولیدی، دبی آب شیرین تولیدی، حرارت تولیدی در کندانسور و راندمان کلی چرخه به ترتیب ۱۳۲۵/۳ وات، ۲۷/۳۷ کیلوگرم بر ساعت، ۱۷۶۹۸ وات و ۶۶/۷۵ درصد می‌باشد. درصورتی‌که در روز ۴ دی، این مقادیر به‌ترتیب ۹۴۷/۲ وات، ۱۹/۳۱ کیلوگرم بر ساعت، ۱۲۶۱۳ وات و ۶۵/۳۲ درصد بوده که در این حالت کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R۱۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، به‌ترتیب ۰/۱۰۵، ۰/۵۱۴ و ۰/۳۸۱ می‌باشد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، $m^۲$
C	نسبت تمرکز
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
D	قطر (m)
F	فاصله کانونی کلکتور (m)
$\dot{G}_{b\beta}$	تابش خورشیدی (β_{opt}) ($W/m^۲$)
h	انتالپی (J/kg)
h_{fg}	انتالپی تبخیر (J/kg)
h_{oil}	ضریب انتقال حرارت بین روغن و کلکتور ($W/m^۲K$)
h_{out}	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش و محیط ($W/m^۲K$)
k	هدایت حرارتی (W/mK)
$K(\theta)$	اصلاح زاویه برخورد
L	طول کلکتور (m)
M	وزن مولکولی (kg/kmol)
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی (kg/s)
mf	کسر جرمی
Nu	عدد ناسلت متوسط
P	فشار (kPa)
Pr	عدد پرانتل
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت (W)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
V	سرعت باد (m/s)
W	عرض کلکتور (m)
$\dot{W}$	نرخ توان (W)
x	نسبت جریان جرمی

علائم یونانی

α	جذب کنندگی
β	زاویه شیب
β_{opt}	زاویه شیب بهینه
γ	ضریب دریافت کلکتور
ε	ضریب تأثیر
ε_c	ضریب انتشار پوشش
ε_r	ضریب انتشار جاذب
η	راندمان
ρ_c	ضریب انعکاس
σ	ثابت استفان-بولتزمان ($۵/۶۷\times۱۰^{-۸}$ $W/m^۲K^۴$)
τ	ضریب عبور پوشش

زیرنویس

a	دهانه
abs	جذب شده
amb	محیط
$Boil$	دیگ
ci	پوشش داخلی
co	پوشش خارجی
$crit$	بحرانی
$Cond$	چگالنده
D	نمک‌زدایی
dis	تقطیر شده
Tur	توربین
gen	ژنراتور
is	آیزنتروپیک
$loss$	اتلافات
mec	مکانیکی
Net	خالص
oil	روغن حرارتی
opt	نوری، بهینه

Overall	کلی
OWF	سیال کاری آلی
PH	واحد گرمایش فرآیند
*pump*۱	پمپ ۱
*pump*۲	پمپ ۲
ri	قسمت داخلی جاذب
ro	قسمت خارجی جاذب
S	خورشید
Sat	اشباع
u	مفید
W	آب
wind	باد
۱, ۲, ۳, ...	حالت سیستم

منابع

[1] A.I. Papadopoulos, M. Stijepovic, P. Linke, On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles, Applied Thermal Engineering. 30 (2010) 760–769.

[2] B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering. 29 (2009) 2468–2476.

[3] D. Maraver, J. Uche, J. Royo, Assessment of high temperature organic Rankine cycle engine for polygeneration with MED desalination : A preliminary approach, Energy Conversion and Management. 53 (2012) 108–117.

[4] G. Shu, L. Liu, H. Tian, H. Wei, G. Yu, Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery, Applied Energy. 113 (2014) 1188–1198.

[5] M. Yang, R. Yeh, Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system, Energy Conversion and Management. 88 (2014) 999–1010.

[6] M. Yang, R. Yeh, Thermo-economic optimization of an organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery, Energy. 82 (2015) 256–268.

[7] Z. Kang, J. Zhu, X. Lu, T. Li, X. Wu, Parametric optimization and performance analysis of zeotropic mixtures for an organic Rankine cycle driven by low-medium temperature geothermal fluids, Applied Thermal Engineering. 89 (2015) 323–331.

[8] Y. Zhou, Y. Wu, F. Li, L. Yu, Performance analysis of zeotropic mixtures for the dual-loop system combined with internal combustion engine, Energy Conversion and Management. 118 (2016) 406–414.

[9] K. Satanphol, W. Pridasawas, B. Suphanit, A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery, Energy. 123 (2017) 326–339.

[10] M. Sadeghi, M. Yari, S.M.S. Mahmoudi, M. Jafari, Thermodynamic analysis and optimization of a novel combined power and ejector refrigeration cycle – Desalination system, Applied Energy. 208 (2017) 239–251.

[11] M. Wang, R. Jing, H. Zhang, C. Meng, N. Li, Y. Zhao, An innovative Organic Rankine Cycle (ORC) based Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system with performance simulation and multi-objective optimization, Applied Thermal Engineering. 145 (2018) 743–754.

[12] X. Wang, E.K. Levy, C. Pan, C.E. Romero, A. Banerjee, C. Rubio-maya, L. Pan, Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO2 from a geothermal reservoir, Applied Thermal Engineering. 149 (2019) 1287–1304.

[13] M. Yang, Optimum composition ratios of multicomponent mixtures of organic Rankine cycle for engine waste heat recovery, International Journal of Energy Research. 44 (2020) 1012–1030.

[14] S. Wang, C. Liu, Q. Li, L. Liu, E. Huo, C. Zhang, Selection principle of working fluid for organic Rankine cycle based on environmental benefits and economic

[22] G. Bamorovat Abadi, K.C. Kim, Investigation of organic Rankine cycles with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 73 (2017) 1000–1013.

[23] F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann, Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources, Renewable Energy. 37 (2012) 364–370.

[24] M. Chys, M. van den Broek, B. Vanslambrouck, M. De Paepe, Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles, Energy. 44 (2012) 623–632.

[25] E. Dudley, J. Kolb, A. Mahoney, T. Mancini, S. M, D. Kearney, Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector, Sandia National Laboratory., New Mexico, US, 1994. Report: SAND94- 1884.

[26] Y. Ding, C. Liu, C. Zhang, X. Xu, Q. Li, L. Mao, Exergoenvironmental model of Organic Rankine Cycle system including the manufacture and leakage of working fluid, Energy. 145 (2018) 52–64.

[27] C. Zhang, C. Liu, X. Xu, Q. Li, S. Wang, Energetic, exergetic, economic and environmental (4E) analysis and multi-factor evaluation method of low GWP fluids in trans-critical organic Rankine cycles, Energy. 168 (2019) 332–345.

[28] W. Su, Y. Hwang, S. Deng, L. Zhao, D. Zhao, Thermodynamic performance comparison of Organic Rankine Cycle between zeotropic mixtures and pure fluids under open heat source, Energy Conversion and Management. 165 (2018) 720–737.

[29] Https://data.irimo.ir.

[30] H. Moghadam, F.F. Tabrizi, A.Z. Sharak, Optimization of solar flat collector inclination, Desalination. 265 (2011) 107–111.

performance, Applied Thermal Engineering. 178 (2020) 115598.

[15] S. Georgousopoulos, K. Braimakis, D. Grimekis, S. Karellas, Thermodynamic and techno-economic assessment of pure and zeotropic fluid ORCs for waste heat recovery in a biomass IGCC plant, Applied Thermal Engineering Journal. 183 (2021) 116202.

[16] I. Fakhari, A. Behzadi, E. Gholamian, P. Ahmadi, A. Arabkoohsar, Comparative double and integer optimization of low-grade heat recovery from PEM fuel cells employing an organic Rankine cycle with zeotropic mixtures, Energy Conversion and Management. 228 (2021) 113695.

[17] E. Bellos, C. Tzivanidis, Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance, Designs. 2 (2018) 9.

[18] A.M. Pantaleo, S.M. Camporeale, A. Sorrentino, A. Miliozzi, N. Shah, C.N. Markides, Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas, Renewable Energy. 147 (2020) 2913–2931.

[19] I.W. Eames, G.G. Maidment, A.K. Lalzad, A theoretical and experimental investigation of a small-scale solar-powered barometric desalination system, Applied Thermal Engineering. 27 (2007) 1951–1959.

[20] H.E. Bekiloğlu, H. Bedir, G. Anlaş, Multi-objective optimization of ORC parameters and selection of working fluid using preliminary radial inflow turbine design, Energy Conversion and Management. 183 (2019) 833–847.

[21] E.W. Lemmon, M.L. Huber, M.O. Mclinden, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP, NIST Standard Reference Database 23 NIST. V9.1 (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rahmdel, A. Behzadmehr, H. Farzaneh, F. Sarhaddi, Multiobjective Optimization of a Tri-Generation Organic Rankine Cycle for Power, Freshwater and Heat: Suitable Mixture of Three Fluid, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1125-1148.

DOI: 10.22060/mej.2022.20369.7217