



تحلیل انرژی، انرژی و بهینه‌سازی یک سیکل تولید همزمان تحت مدل دینامیکی تابش خورشیدی با الگوریتم ژنتیک

کاوه حنیفی میانگفشه¹، کوروش جواهرده^{2*}، مرتضی یاری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* رشت، صندوق پستی 1841، javaherdeh@guilan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 دی 1393

پذیرش: 16 اسفند 1393

ارائه در سایت: 15 فروردین 1394

کلیدواژگان:

انرژی - اقتصادی

گذر بحرانی دی اکسید کربن

ان اکتان

تولید همزمان

الگوریتم ژنتیک

در این مطالعه، عملکرد یک سیستم تولید همزمان با سیال عامل‌های مختلف و بهینه‌سازی آن از نظر اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است. از مدل انرژی و انرژی - اقتصادی برای بررسی عملکرد سیستم با تکیه بر هزینه محصولات، استفاده شده است. سه حالت برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم در نظر گرفته شده است که عبارتند از: میزان تولید هیدروژن، توان سرمایش تولید شده و هزینه‌های تولید. نتایج نشان می‌دهد که دی اکسید کربن و ان - اکتان عملکرد بهتری به ترتیب در میزان تولید هیدروژن و تولید سرمایش دارند. مجموع هزینه‌های محصولات برای هر دو سیال عامل با افزایش دمای ورودی توربین و کاهش دمای چگالش، کاهش می‌یابد؛ در حالی که، برای دی اکسید کربن، هزینه محصولات در یک فشار بهینه ورودی توربین به مینیمم مقدار خود می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد برای دی اکسید کربن با کاهش تولید هیدروژن از مقدار 1/811 لیتر بر ثانیه به 1/757 لیتر بر ثانیه، مجموع واحد هزینه‌های محصولات 8/5% کاهش می‌یابد و برای ان - اکتان با کاهش توان سرمایشی تولیدی از مقدار 9/599 کیلووات به 6/622 کیلووات، مجموع واحد هزینه‌های محصولات 47/7% کاهش می‌یابد. کندانسور بیشترین نرخ تخریب را در میان اجزای سیستم دارد بطوری که نرخ تخریب انرژی کندانسور در حالت بهینه هزینه تولید کمتر از حالت‌های دیگر است. در دو سیکل دی اکسید کربن و ان - اکتان، مجموع نرخ تخریب انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری در حالت بهینه توان سرمایشی بیشترین مقدار و در حالت بهینه هزینه کمترین مقدار است.

Exergy, exergoeconomic analysis and optimization of cogeneration cycle under solar radiation dynamic model by using Genetic Algorithm

Kaveh Hanifi¹, Kourosh Javaherdeh^{1*}, Mortaza Yari²

1- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B 1841 Rasht, Iran, javaherdeh@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 December 2014
Accepted 07 March 2015
Available Online 04 April 2015

Keywords:
Exergoeconomic
CO₂ transcritical
n-octane
Cogeneration
Genetic algorithm

ABSTRACT

The performance of a cogeneration cycle with various working fluids is investigated and optimized employing an economic approach. Exergy and exergoeconomic models are developed to investigate the thermodynamic performance of the cycle, and to assess the cost of products. In this study, the dynamic model would be registered to search the system behavior during a day. In this study, hydrogen production rate optimal design (HPROD), refrigeration power optimal design (RPOD) and cost optimal design (COD) are considered for analysis and optimization. According to recent parametric studies, boiler, turbine and condensation temperature and turbine inlet pressure affect the unit cost of products significantly. The results show carbon dioxide and n-octane has a better operation to produce hydrogen and refrigeration power among other working fluids, respectively. It is observed that, in carbon dioxide cycle, the SUCP is decreased by 8.5% when hydrogen production rate is decreased from 1.811 lit/s to 1.757 lit/s, therefore, in n-octane cycle, SUCP is decreased by 47.4% when refrigeration power is decreased from 9.599 kW to 6.622 kW. The evaluation of exergy destruction is demonstrated by the condenser, which has the highest exergy destruction, so its rate in COD case is the lowest among the three other states. The results indicate, in carbon dioxide and n-octane cycles, the total exergy destruction and the investment cost rates in the RPOD case is higher than any other cases.

1- مقدمه

توسعه کشورها است. بر اساس تحقیقات انجام شده، توسعه کشورها رابطه در سال‌های اخیر، دسترسی به منابع جدید انرژی یک فاکتور حیاتی برای مستقیمی با مصرف انرژی دارد. مصرف بی‌رویه انرژی، محدودیت منابع انرژی

Please cite this article using:

K. Hanifi, K. Javaherdeh, M. Yari, Exergy, exergoeconomic analysis and optimization of cogeneration cycle under solar radiation dynamic model by using Genetic Algorithm, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 205-216, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

K. Hanifi, K. Javaherdeh, M. Yari, Exergy, exergoeconomic analysis and optimization of cogeneration cycle under solar radiation dynamic model by using Genetic Algorithm, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 205-216, 2015 (In Persian)

ایزوبوتان بیشترین توان خالص خروجی را دارد، در حالی که بیشترین راندمان حرارتی و راندمان انرژی مربوط سیکل رنکین آلی با سیال عامل متیل پروپان است. آنها نشان دادند که افزایش فشار ورودی توربین، برای هر دو سیستم مورد نظر، هزینه بر توان خالص خروجی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

در این مطالعه از مدل‌سازی انرژی و انرژی - اقتصادی برای تحلیل بهینه اقتصادی یک سیکل تولید هیدروژن/سرمایش استفاده شده است. چهار سیال عامل دی اکسید کربن، ان - اکتان، کلرو دی فلورو متان¹ و تترا فلورو اتان² در این مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به دلیل متغیر بودن شار حرارتی تابشی خورشید در طول روز و ساعت، برای تحلیل سیستم خورشیدی از مدل دینامیکی استفاده شده است. اثر متغیرهای طراحی، دمای ورودی به دیگ بخار³، توربین⁴، کندانسور⁵ و سیستم گاز طبیعی مایع شده⁶ به عنوان مدفن حرارتی و فشار ورودی به توربین⁷ بر روی مجموع واحد هزینه‌های محصولات⁸ در سه حالت بهینه نرخ تولید هیدروژن⁹، بهینه توان سرمایش تولید شده¹⁰ و بهینه هزینه‌های تولید¹¹ مورد مطالعه قرار گرفت. سپس سیکل با استفاده از الگوریتم ژنتیک از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی با استفاده از نرم افزار ای ای اس¹² (ایز نیز خوانده می‌شود) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. توابع هدف مورد مطالعه در این مقاله عبارت از: بیشینه کردن تولید هیدروژن، بیشینه کردن توان سرمایش و کمینه کردن مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات سیستم می‌باشند.

2- مشخصات سیستم و تحلیل دینامیکی و ترمودینامیکی

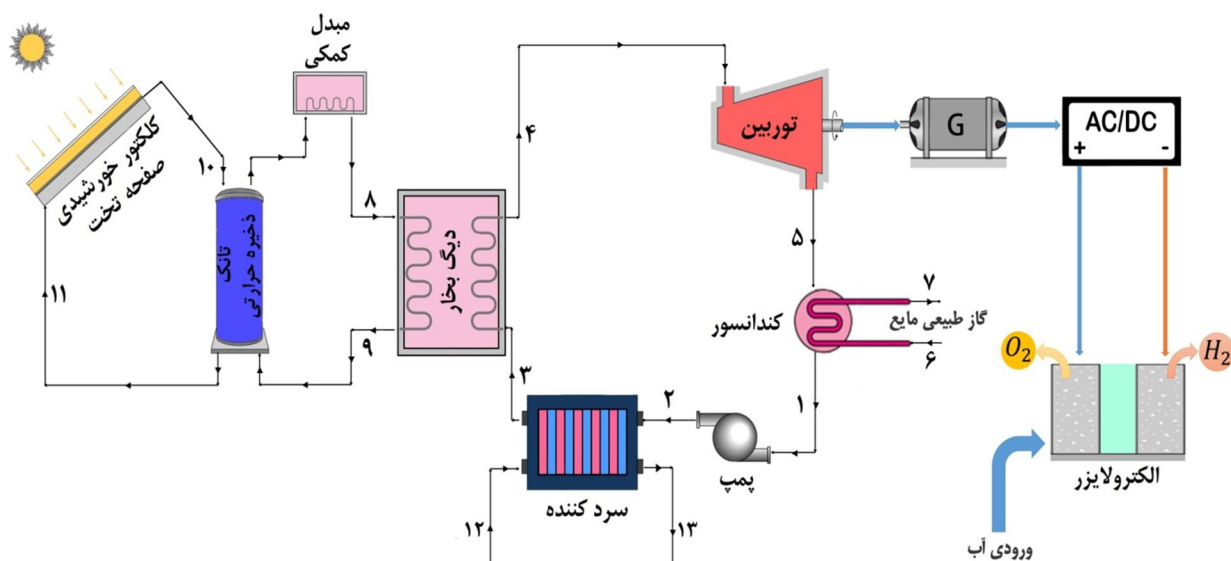
دیگرام شماتیک سیستم خورشیدی - گاز طبیعی مایع شده به همراه سیکل توان استفاده شده برای تولید هیدروژن/سرمایش در شکل 1 نشان داده شده است [5]. این سیستم از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: سیستم کلکتور خورشیدی، سیستم توان رنکین و سیستم تولید هیدروژن. از سیستم خورشیدی برای تأمین انرژی سیکل استفاده شده است. به دلیل نوسان دمای سیستم خورشیدی از تانک ذخیره برای ثابت کردن دمای انرژی ورودی به سیستم استفاده شده است. همچنین در قسمت سوم از یک الکتروایزر برای تولید هیدروژن استفاده شده است. برای ساده‌سازی تحلیل سیستم فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شده است [5]:

- 1- سیستم بصورت پایدار در نظر گرفته شده است و از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شده است.
- 2- حالت خروجی کندانسور بصورت مایع اشباع می‌باشد.
- 3- در این مطالعه برای تعیین و ارزیابی دقیق مقادیر پارامترهای عملکردی و توابع هدف با توجه به مقاله سان و همکاران [5] مقدار 2% افت فشار برای تمام مبدل‌های حرارتی در نظر گرفته شده است.
- 5- تمام محاسبات مربوط به هیدروژن در ارزش حرارتی بالا انجام شده است. ولتاژ مربوط به ارزش حرارتی بالا (1/48 ولت) از تقسیم ارزش حرارتی بالای

فسیلی مانند نفت و گاز طبیعی از یک طرف و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی از طرف دیگر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و زیست توده را اجتناب ناپذیر کرده است. علاوه بر استفاده از تولید فوتوولتائیک، سیکل توان رنکین و رنکین آلی نیز یکی رهیافت‌های مناسب برای تولید الکتریسیته با استفاده از انرژی خورشید است. برای بهتر کردن راندمان حرارتی، از مواد آلی و دی اکسید کربن، به عنوان سیال عامل، به جای آب در این سیکل‌ها استفاده می‌شود. افزایش راندمان تبدیل انرژی در سیستم‌های تولید همزمان به یکی از اهداف اصلی محققان تبدیل شده است [1]. در نتیجه بسیاری از مطالعات بر روی انتخاب سیال عامل در این سیکل‌ها می‌باشد [2، 3]. از این میان دی اکسید کربن به دلیل عدم اشتعال پذیری، غیر سمی بودن، غیر انفجاری بودن و فراوانی طبیعی، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، دی اکسید کربن با توجه به خواص ترمودینامیکی خوب، قابلیت رسیدن به حالت‌های فوق بحرانی را دارد [4]. در سال‌های اخیر سیستم‌های توان جدید و خلاقانه‌ای با استفاده از انرژی خورشیدی معرفی شده‌اند که از سیال عامل مختلف برای تولید چندانگانه، استفاده نموده‌اند [5، 6، 7].

در این راستا، اگر یک سیستم فقط از نظر ترمودینامیکی مورد توجه قرار گیرد، هزینه‌های سیستم و هزینه‌های تولید محصولات بسیار بالا خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل، سیستم‌های حرارتی باید از جنبه اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند [8]. ساهو [9] تحلیل انرژی - اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان را با استفاده از الگوریتم تکاملی انجام داد. او پس از بهینه‌سازی سیستم نتایج نشان داد که در حالت بهینه، هزینه الکتریسیته و تولید محصولات در مقایسه با حالت اولیه 9/9% پایین‌تر است. صیادی و سبزیگل [10] نیز بهینه‌سازی یک سیستم تولید چند گانه را با در نظر گرفتن 10 متغیر طراحی انجام دادند. آنها نشان دادند که هزینه سوخت سیستم بهینه شده بیشتر از حالت اولیه است؛ اما در حالت کلی در یک سیستم بهینه، در بخش اقتصادی، ذخیره‌سازی مالی بیشتری نسبت به حالت اولیه انجام می‌شود. احمدی و همکاران [11] با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفی نشان دادند که افزایش دمای ورودی توربین گاز باعث کاهش هزینه‌های تخریب انرژی می‌شود. زارع و همکاران [12] تحلیل انرژی - اقتصادی و بهینه‌سازی یک سیکل دوگانه آب - آمونیاک را انجام دادند. نتایج نشان داد که مجموع هزینه‌های تولید محصولات بدست آمده از بهینه‌سازی ترمو - اقتصادی به ترتیب حدودا 18% و 26% نسبت به حالت اولیه از دیدگاه قانون اول و دوم، کمتر است. ال سلیمان و همکاران [13] سه سیستم شامل: تولید چندانگانه - سلول‌های خورشیدی اکسید جامد، چندانگانه - زیست توده و چندانگانه - خورشیدی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بررسی‌های آنها نشان داد که سیستم چندانگانه - خورشیدی بهترین عملکرد ترمو - اقتصادی را به دلیل داشتن کمترین هزینه بر واحد انرژی بین سیستم‌های اشاره شده دارد. صنایع و شیرازی یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یخ را مورد تحلیل ترمو - اقتصادی و بهینه‌سازی قرار دادند. نتایج بهینه‌سازی نشان دادند که به طور میانگین، هزینه سرمایه‌گذاری و عملکرد سیستم در مصرف الکتریسیته و انتشار دی اکسید کربن نسبت به حالت اولیه به ترتیب 9% و 9/8% کمتر است [14]. لی و همکاران [15] یک سیکل گذر بحرانی دی اکسید کربن و سیکل رنکین آلی را برای یک نیروگاه حرارتی زمین گرمایی دما پایین با استفاده از سیال‌های عامل مختلف مورد تجزیه و تحلیل ترمو - اقتصادی قرار دادند. نتایج نشان داد که سیکل رنکین آلی با سیال عامل

1- R-22
2- R134a
3- Boiler Inlet Temperature (BIT)
4- Turbine Inlet Temperature (TIT)
5- Condensation Temperature (CT)
6- Liquid Natural Gas Inlet Temperature (LNG-IT)
7- Turbine Inlet Pressure (TIP)
8- Sum of the Unit Cost of Productions (SUCP)
9- Hydrogen Production Rate Optimal Design (HPROD)
10- Refrigeration Power Optimal Design (RPOD)
11- Cost Optimal Design (COD)
12- Engineering Equation Solver (EES)



شکل 1 دیاگرام شماتیک سیستم تولید همزمان هیدروژن/سرمايش

کل شامل سه بخش است که عبارتند از: ضریب افت تحتانی، فوقانی و کناری [7] (روابط ۷،۸).

$$U_l = U_h + U_t + U_s \quad (7)$$

$$U_b = \frac{K_i}{\delta_h}, \quad U_s = \frac{(L_1 + L_2)L_3 K_i}{L_1 L_2 \delta_c} \quad (8)$$

که در آن K_i ضریب انتقال حرارت هدایتی عایق و δ_b نیز ضخامت عایق است. اگر ابعاد صفحه جاذب کلکتور را به صورت $L_2 \times L_1$ در نظر گرفته شود آنگاه L_3 ارتفاع آن و δ_s ضخامت آن است. در این صورت مقدار ضریب افت کناری از رابطه زیر بدست می‌آید [6]:

ضریب افت فوقانی با استفاده از رابطه (9) که توسط کلین [16] بدست آمده، محاسبه می‌شود:

$$U_t = \left[\frac{M}{\left(\frac{C}{T_{pm}} \right) \left(\frac{T_{pm} - T_a}{M + f} \right)^{0.33}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[\frac{\sigma (T_{pm}^2 + T_a^2) (T_{pm} + T_a)}{1 + \frac{(2M + f - 1)}{\varepsilon + 0.05M(1 - \varepsilon_n)}} \frac{(T_{pm} + T_a)}{\varepsilon_c} - M \right] \quad (9)$$

در این مطالعه، تعداد صفحه‌های شیشه‌ای برای عبور اشعه تابشی خورشیدی برابر با $M = 2$ در نظر گرفته شده است. T_{pm} و T_a به ترتیب دمای میانگین صفحه کلکتور و دمای محیط می‌باشد. h_w نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی است. علاوه بر اینها f ، C و $F\theta$ ضریب راندمان کلکتور نیز از رابطه‌های (11-14) محاسبه می‌شوند [57]:

$$f = (1 - 0.04h_{\text{max}} + 0.0005h_{\text{max}}^2)(1 + 0.091M) \quad (10)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.0001298\beta^2) \quad (11)$$

$$F \dagger = \frac{1}{WU_L \left[\frac{1}{U_L((W - D_0)\varphi + D_0)} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]} \quad (12)$$

هیدروژن (285840 ژول بر مول) بر ثابت فارادی (96485 کولن بر مول) به ازای هر مول هیدروژن بدست می آید.

6- فشار بخار مربوط به گاز طبیعی مایع شده به دلیل اینکه معادل با فشار ایستگاه‌های گاز طبیعی است، 0/6 در نظر گرفته شده است.

7- برای کاهش هزینه‌های سیستم از الکترولایزر آلکالین به دلیل کیفیت مناسب نسبت به قیمت آن استفاده شده است. در این مطالعه با توجه به مقاله سان و همکاران [5]، اندامان الکترولایزر 77% در نظر گرفته شده است.

2-1- تحلیل دینامیکی تابش خورشیدی

در این مطالعه از کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت برای دریافت و جمع آوری اشعه‌های تابشی خورشید استفاده شده است. تشعشع ساعتی بر روی سطح شیب‌دار از رابطه (1) بدست می‌آید [6]:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \quad (1)$$

که در آن I_b و I_d به ترتیب تابش شعاعی و نفوذی R_d, R_b و R_r به ترتیب ضرایب شیب برای تابش‌های شعاعی، نفوذی و انعکاسی است که از رابطه‌های (5-2) محاسبه می‌شوند [6]:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} = \frac{\sin\delta\sin(\varphi - \beta) + \cos\delta\cos\omega\cos(\varphi - \beta)}{\sin\varphi\sin\delta + \cos\delta\cos\omega} \quad (2)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (3)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4)$$

$$R_r = \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (5)$$

شار حرارتی جذب شده خورشیدی در صفحه‌های جاذب از رابطه (6) بدست می‌آید:

$$S = I_h R_h (\tau \alpha)_h + I_d R_d + (I_h + I_d) R_e (\tau \alpha)_d \quad (6)$$

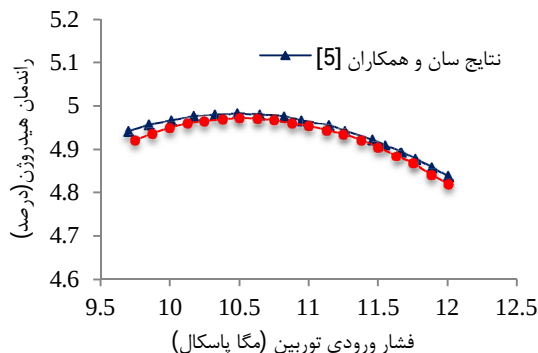
که در آن $(\tau\alpha)_b$ و $(\tau\alpha)_d$ به ترتیب حاصل ضرب ضریب جذب و ضریب عبور در شرایط تابش شعاعی و نفوذی می باشد، همچنین U_l ضریب افت

در اینجا $\dot{E}X_Q$ و $\dot{E}X_W$ به ترتیب نرخ انرژی مربوط به انتقال حرارت و کار از میان مرزهای حجم کنترل می‌باشند. T دمای مطلق و زیر نویس 0 مشخص کننده شرایط محیط است. روابط حاکم بر نرخ تخریب انرژی و راندمان انرژی در اجزای سیستم نیز در جدول 1 مشخص شده است [22,21].

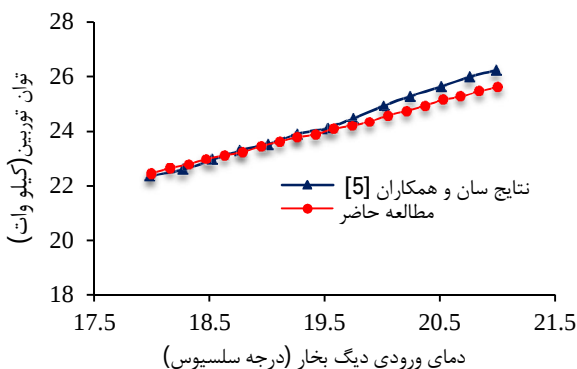
برای اعتبارسنجی مدل ترمودینامیکی ارائه شده، کار خروجی توربین و راندمان تولید هیدروژن سیستم خورشیدی با مقاله سان و همکاران [5] مقایسه شده است. شکل‌های 3-الف و ب مقایسه بین نتایج حاصل از مدل‌سازی مطالعه حاضر را با نتایج سان و همکاران [5] نشان می‌دهد. دیده می‌شود که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر سان و همکاران [5] و مقادیر مدل‌سازی شده وجود دارد. همچنین جدول 2 نیز مقادیر مدل‌سازی و بهینه‌سازی بدست آمده در این مطالعه را با مقادیر آن در مقاله مرجع [5] نشان می‌دهد.

جدول 1 روابط نرخ تخریب و راندمان انرژی در اجزای سیستم [21,22]

اجزا	تخریب انرژی	راندمان انرژی
دیگ بخار	$\dot{E}X_D = (\dot{E}X_3 + \dot{E}X_9) - (\dot{E}X_4 + \dot{E}X_8)$	$\eta = \frac{\dot{E}X_4 - \dot{E}X_3}{\dot{E}X_8 - \dot{E}X_9}$
توربین	$\dot{E}X_D = \dot{E}X_4 - \dot{E}X_5 - \dot{W}_{Tf}$	$\eta = \frac{\dot{W}_{TUR}}{\dot{E}X_4 - \dot{E}X_5}$
کندانسور	$\dot{E}X_D = (\dot{E}X_5 + \dot{E}X_6) - (\dot{E}X_1 + \dot{E}X_7)$	$\eta = (1 - \frac{\dot{E}X_6}{\dot{E}X_5 - \dot{E}X_6})$
پمپ	$\dot{E}X_D = \dot{E}X_1 - \dot{E}X_2 + \dot{W}_p$	$\eta = \frac{\dot{E}X_2 - \dot{E}X_1}{\dot{W}_p}$
سردکن	$\dot{E}X_D = (\dot{E}X_2 + \dot{E}X_{12}) - (\dot{E}X_3 + \dot{E}X_{13})$	$\eta = (1 - \frac{\dot{E}X_{12}}{\dot{E}X_2 + \dot{E}X_{12}})$
تانک ذخیره	$\dot{E}X_D = (\dot{E}X_9 + \dot{E}X_{10}) - (\dot{E}X_8 + \dot{E}X_{11})$	$\eta = \frac{\dot{E}X_8 - \dot{E}X_9}{\dot{E}X_{11} - \dot{E}X_{10}}$



شکل 3-الف اعتبارسنجی راندمان تولید هیدروژن با نتایج سان و همکاران [5]



شکل 3-ب اعتبارسنجی مقادیر کار خروجی توربین با نتایج سان و همکاران [5]

$$F_R = \frac{m_W C_{PW}}{U_L A_P} [1 - \exp(-\frac{F \psi_L A_P}{m_W C_{PW}})] \quad (13)$$

$$Q_U = F_R A_P [S - U_L (T_{ff} - T_a)] \quad (14)$$

که در آن که در آن W گام لوله و D_i ، D_o به ترتیب قطر خارجی و داخلی لوله می‌باشند. A_p مساحت جذب حرارت کلکتور است. همچنین T_{ff} دمای جریان آب ورودی به کلکتور از میان لوله است. مقادیر داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از مقاله وانگ و همکاران [6]، سان و همکاران [5] و مرجع [17] بدست آمده است.

شکل 2 تغییرات شار حرارتی تابشی، مقدار گرمای مفید دریافتی از خورشید، مقدار حرارت مفید وارد شده به سیستم توان و همچنین دمای آب خروجی از تانک ذخیره بر حسب ساعت در طول روز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که شار حرارتی مفید و شار حرارتی سیکل به شدت به شار حرارتی بدست آمده از خورشید وابسته می‌باشند، بطوریکه در وسط روز به بیشترین مقدار خود می‌رسند و با غروب کردن خورشید به شدت به سمت صفر نزول می‌کنند.

2-2- تحلیل ترمودینامیکی

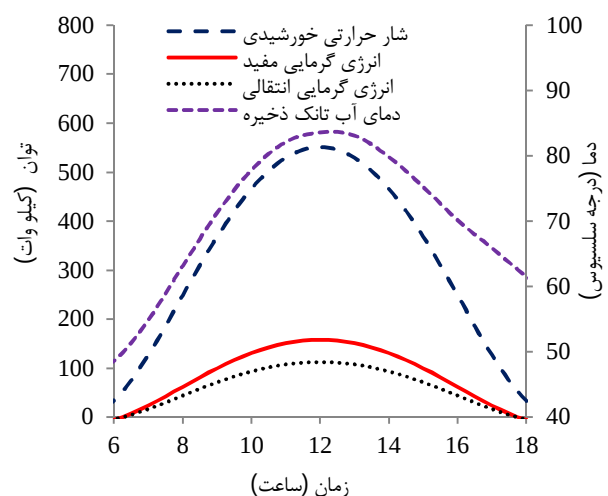
هر ترم معادله انرژی (15) به چهار جزء اصلی تقسیم بندی می‌شود. دو تا از آنها انرژی جنبشی و پتانسیل هستند که در این مدل‌سازی از آنها به دلیل تغییرات بسیار کوچک ارتفاع و سرعت چشم پوشی می‌شود [19,18,1]. انرژی فیزیکی به عنوان ماکزیم کار مفید تئوری بدست آمده سیستم در اندرکنش با محیط در شرایط تعادل در نظر گرفته می‌شود [20]. معادله بالانس هزینه بصورت رابطه (15) نوشته می‌شود [1]:

$$\dot{E}X_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}X_W + \dot{E}X_D \quad (15)$$

بطوری که زیر نویس‌های i و e نرخ انرژی ورودی و خروجی به داخل حجم کنترل هستند. $\dot{E}X_D$ نیز نرخ تخریب انرژی (بازگشت ناپذیری) می‌باشد. دیگر ترم‌ها نیز با رابطه (16) محاسبه می‌شوند [1]:

$$\dot{E}X_Q = [1 - \frac{T_0}{T_i}] \dot{Q}_i, \quad \dot{E}X_W = \dot{W} \quad (16)$$

$$ex = ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (17)$$



شکل 2 تغییرات شار حرارتی خورشیدی، انرژی مفید، انرژی گرمایی انتقالی به سیکل و دمای آب تانک ذخیره بر حسب ساعت در طول روز

جدول 2 مقایسه مقادیر مدل‌سازی ترمودینامیکی پارامترهای سیستم با مقاله سان و همکاران [5].

مقادیر پارامترهای سیستم		مقادیر حالت پایه		مقادیر حالت بهینه	
سان و همکاران [5]	مطالعه حاضر	سان و همکاران [5]	مطالعه حاضر	سان و همکاران [5]	مطالعه حاضر
مقدار انرژی کلکتور (کیلو وات)	145/6	146/1	-----	-----	-----
توان توربین (کیلو وات)	24/22	24/28	41/66	42/56	7/898
توان پمپ (کیلو وات)	5/77	5/782	7/16	34/67	11/498
توان خالص خروجی (کیلو وات)	18/45	18/50	11/52	2/315	10/95
توان سرمایشی (کیلو وات)	3/66	3/691	2/1	34/67	19/543
نرخ تولید هیدروژن (لیتر بر ثانیه)	1/12	1/236	11/38	22/25	115/6
راندمان انرژی خورشید- هیدروژن (%)	4/98	4/333	32/05	9/27	115/27
راندمان انرژی دی اکسید کربن- هیدروژن (%)	9/26	9/27	115/6	115/27	115/27
نرخ تخریب انرژی (کیلو وات)	115/27	115/6	115/6	115/27	115/27

3- تحلیل انرژی - اقتصادی

هدف اصلی آنالیز انرژی - اقتصادی مشخص نمودن جریان هزینه و محاسبه هزینه بر واحد انرژی تولید سیستم است. هزینه واحد انرژی محصولات برای بهینه‌سازی اقتصادی سیکل مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای یک سیستم دریافت کننده انرژی گرمایی و تولید توان، معادله بالانس هزینه به صورت روابط (18،19) می‌باشد [1]:

$$\dot{a}_{e,k} \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{a}_{i,k} \dot{C}_{i,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (18)$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}x_j \quad (19)$$

که C هزینه بر واحد هر جریان انرژی است. $\dot{C}_{q,k}$ و $\dot{C}_{w,k}$ نیز به ترتیب نرخ هزینه توان خروجی از اجزای سیستم و نرخ انرژی گرمایی ورودی به اجزا می‌باشند. معادله (18) نشان می‌دهد که نرخ کل هزینه‌های انرژی جریان خروجی مساوی با نرخ کل هزینه‌های انرژی جریان ورودی بعلاوه نرخ کل هزینه‌های انجام شده در فرایندها است. در معادله (18) هیچ ترمی که مستقیماً مربوط به نرخ تخریب انرژی باشد، وجود ندارد. بر همین اساس، نرخ تخریب انرژی در هر یک از اجزا بصورت هزینه مخفی است. بنابراین، با ترکیب معادله بالانس انرژی و معادله انرژی - اقتصادی با یکدیگر می‌توان هزینه نرخ تخریب انرژی را تعیین کرد (روابط 20-22) [11،1].

$$\dot{E}x_{F,K} = \dot{E}x_{P,K} + \dot{E}x_{D,K} \quad (20)$$

$$\dot{C}_{F,K} = c_{F,K} \dot{E}x_{D,K} \quad (21)$$

$$\dot{C}_{P,K} = c_{P,K} \dot{E}x_{D,K} \quad (22)$$

برای حل معادلات بالانس هزینه و تعیین نرخ انرژی هر یک از اجزای سیستم باید هزینه هر یک از اجزای سیستم معلوم باشد. ترم $\dot{Z}_k$ در معادله (18) مجموع نرخ هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملکرد و نگهداری هر یک از اجزای سیستم است و از رابطه (23) بدست می‌آید [12]:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (23)$$

نرخ هزینه سرمایه‌گذاری سالانه برای هر یک از اجزای سیستم با استفاده از معادله (24) تعیین می‌گردد [23،1]:

$$\dot{Z}_k^{CI} = \left(\frac{CRF \cdot \varphi}{\tau} \right) Z_k \quad (24)$$

بطوری که CRF ، τ و φ به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه، تعداد ساعت‌های عملکرد دستگاه در طول سال و ضریب نگهداری می‌باشد که مقدار

آن 1/06 است. معادلات مورد نیاز برای تعیین هزینه‌های سرمایه‌گذاری هر یک از اجزای سیستم Z_k مانند: مبدل‌های حرارتی، پمپ، توربین و کلکتور خورشیدی در مقاله [15] و تانک ذخیره حرارتی در مرجع [1] توضیح داده شده است. ضریب بازگشت سرمایه تابعی از نرخ سود است و با رابطه (25) محاسبه می‌شود [21]:

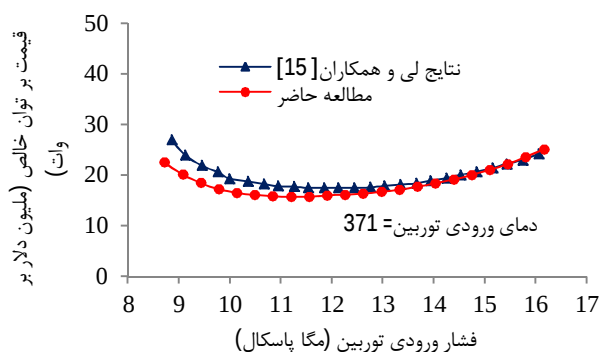
$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (25)$$

که i_r نرخ سود سالیانه و n تعداد سال‌های عملکرد مفید دستگاه است. نرخ هزینه عملکرد و نگهداری سالانه برای هر یک از اجزای سیستم با استفاده از معادله (26) تعیین می‌شود [12]:

$$\dot{Z}_k^{OM} = \gamma_k Z_k + \omega_k \dot{E}x_{p,k} + R_k \quad (26)$$

که در آن γ_k و ω_k به ترتیب مقادیر ضرایب مربوط به هزینه‌های عملکرد و نگهداری ثابت و متغیر می‌باشد. R_k شامل تمام هزینه‌های عملکرد و نگهداری متفرقه‌ای است که مستقل از هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی محصولات است. [24،21].

برای اعتبارسازی مدل‌سازی انرژی - اقتصادی بدست آمده در این مقاله راندمان حرارتی، کار خالص خروجی، مجموع مساحت انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی و نرخ هزینه بر واحد توان یک سیکل ساده گذر بحرانی دی اکسید کربن شبیه‌سازی شد. شکل‌های 4 و 5 و همچنین جدول 3 مقایسه مقادیر مدل‌سازی و بهینه‌سازی بدست آمده در این مقاله با مقادیر آن در مقاله مرجع [15] را نشان می‌دهد. در شکل 4 مقدار درصد خطای نسبی برای مقدار راندمان حرارتی و کار خالص خروجی به ترتیب 2% و 3% است. در شکل 5 نشان داده می‌شود که در دماهای پایین ورودی توربین اختلاف بین مقادیر مدل شده و نتایج لی و همکاران [15] بیشتر است. دلیل اصلی این اختلاف مربوط به نوع مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در این تحقیق می‌باشند (مبدل حرارتی صفحه ای). در این نوع مبدل‌ها جریان سیال در فشارهای کمتر از 2/5 مگا پاسکال عملکرد خوبی دارد. در حالی که در این سیستم اختلاف فشار در ورودی و خروجی توربین بیشتر از این مقدار است. از طرف دیگر این اختلاف به دلیل استفاده از مراجع ترمودینامیکی مختلف (در مقاله لی و همکاران [15] از مرجع رفرپاپ استفاده شده است و در مطالعه حاضر از مرجع ایز) مربوط به خواص مواد می‌باشد [12].



شکل 5- ب اعتبارسنجی مقادیر هزینه واحد توان با مقادیر مقاله لی و مکاران [15]

3-1- معادلات بالانس هزینه

فرمول‌بندی معادلات بالانس هزینه و معادلات کمکی با استفاده از معادله (18) برای هر یک از اجزای سیکل بدست آمده است (روابط 27-40):

پمپ:

$$\dot{C}_2 = \dot{C}_1 + \dot{C}_{WP} + \dot{Z}_p \quad (27)$$

سردکننده:

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_{13} = \dot{C}_2 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{ref} \quad (28)$$

$$\frac{\dot{C}_2}{\dot{E}x_2} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{E}x_3} \quad \text{یا} \quad c_2 = c_3 \quad (29)$$

دیگ بخار:

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_9 = \dot{C}_3 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{bail} \quad (30)$$

$$\frac{\dot{C}_8}{\dot{E}x_8} = \frac{\dot{C}_9}{\dot{E}x_9} \quad \text{یا} \quad c_8 = c_9 \quad (31)$$

توربین:

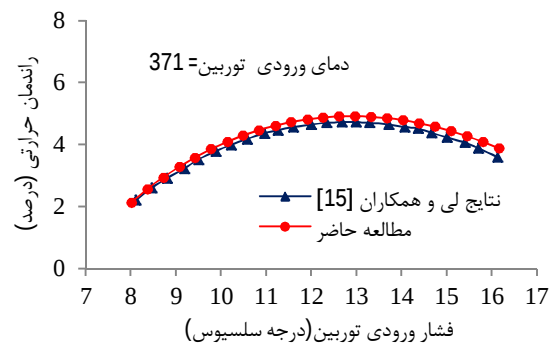
$$\dot{C}_5 + \dot{C}_{WT} = \dot{C}_4 + \dot{Z}_{tur} \quad (32)$$

$$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}x_4} = \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}x_5} \quad \text{یا} \quad c_4 = c_5 \quad (33)$$

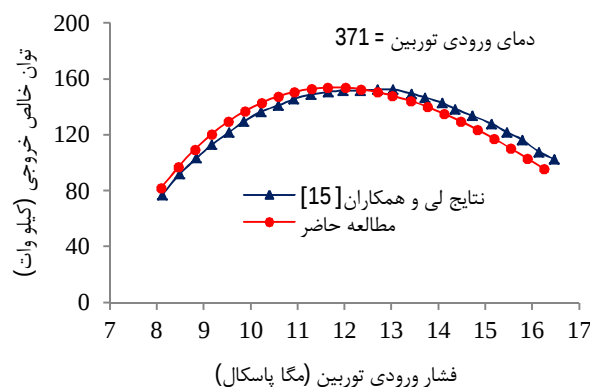
کندانسور:

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_7 = \dot{C}_5 + \dot{C}_6 + \dot{Z}_{cond} \quad (34)$$

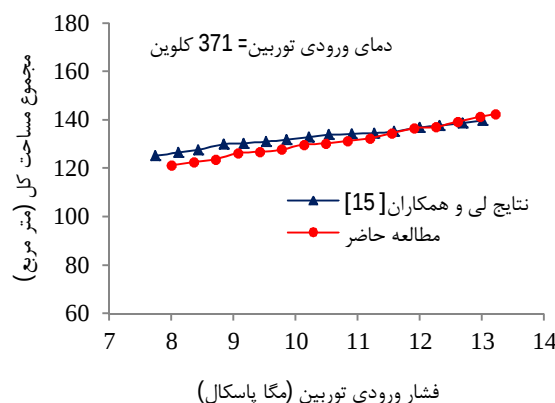
$$\frac{\dot{C}_6}{\dot{E}x_6} = \frac{\dot{C}_7}{\dot{E}x_7} \quad \text{یا} \quad c_6 = c_7 \quad (35)$$



شکل 4- الف اعتبارسنجی مقادیر راندمان حرارتی با مقادیر مقاله لی و همکاران [15]



شکل 4- ب اعتبارسنجی مقادیر کار خروجی با مقادیر مقاله لی و همکاران [15]



شکل 5- الف اعتبارسنجی مقادیر مجموع مساحت با مقادیر مقاله لی و همکاران [15]

جدول 3 مقادیر حالت پایه و بهینه در این مقاله و مقاله لی و همکاران [15]

مقادیر حالت بهینه		مقادیر حالت پایه		مقادیر پارامترهای سیستم
مطالعه حاضر	لی و همکاران [15]	مطالعه حاضر	لی و همکاران [15]	
177/4	173/57	153/72	153/635	کار خالص خروجی (کیلو وات)
5/707	5/50	4/846	4/7368	راندمان حرارتی (%)
55/451	54/40	48/026	47/235	راندمان انرژی (%)
1/549×10 ⁷	1/750×10 ⁷	1/668×10 ⁷	1/88×10 ⁷	هزینه بر واحد توان (دلار بر وات)

تانک ذخیره گرمایی:

$$\dot{C}_8 + \dot{C}_{11} + \dot{C}_{Q_{hst}} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{st} \quad (36)$$

$$\frac{\dot{C}_{10}}{\dot{E}x_{10}} = \frac{\dot{C}_{11}}{\dot{E}x_{11}} \quad \text{یا} \quad c_{10} = c_{11} \quad (37)$$

$$\dot{C}_{Q_{hst}} = 0 \quad \text{یا} \quad c_{10} = c_{11} \quad (38)$$

کلکتور خورشیدی صفحه تخت:

$$\dot{C}_{10} = \dot{C}_{11} + \dot{C}_{fpst} + \dot{Z}_{fpst} \quad (39)$$

الکتروایزر:

$$\dot{C}_{H_2} = \dot{C}_{W_T} + \dot{Z}_{elec} \quad (40)$$

معادله کمکی دیگری نیز برای کامل کردن آنالیز اقتصادی سیکل مورد نیاز می باشد (رابطه 41):

$$\frac{\dot{C}_{W_T}}{W_T} = \frac{\dot{C}_{W_P}}{W_P} \quad c_{W_T} = c_{W_P} \quad (41)$$

4- بحث و نتایج

اثر متغیرهای طراحی مانند دمای ورودی توربین، دمای ورودی دیگ بخار، دمای چگالش، فشار ورودی توربین و دمای ورودی گاز طبیعی مایع شده، فرضیات اولیه و پارامترهای ورودی مورد استفاده در این تحقیق بر روی توابع هدف، بیشینه نمودن نرخ تولید هیدروژن، بیشینه نمودن میزان سرمایش تولید شده و کمینه کردن مجموع هزینه های واحد اگزرژی محصولات مورد بررسی قرار گرفت. هزینه واحد سرمایش یکی از پارامترهای مهم در تعیین هزینه محصولات می باشد. به دلیل گستره زیاد آن مقادیر متفاوتی در هنگام بهینه سازی ترمو- اقتصادی مورد استفاده قرار می گیرد. در این مطالعه از مقدار هزینه واحد سرمایش 0/09 دلار بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته شده است [14]. سیستم خطی معادلات حاکم بر آنالیز اقتصادی اشاره شده در این مقاله، شامل 18 متغیر (مجهول) می باشد، که عبارتند از: $X = \{\dot{C}_1, \dot{C}_2, \dot{C}_3, \dots, \dot{C}_{H_2}\}$. با توجه به این حقیقت که هزینه واحد اگزرژی آب سرد قابل چشم پوشی است، $c_{12} = 0$ می باشد و هزینه واحد اگزرژی گرمای هدر رفته از سیستم صفر فرض می شود $\dot{C}_{Q_{hst}} = 0$ [1]؛ در نتیجه هزینه واحد اگزرژی کل جریان سیستم را می توان با حل نمودن سیستم معادلات خطی با 18 معادله و 18 مجهول بدست آورد. فرضیات اولیه و پارامترهای ورودی مورد استفاده در این تحقیق در جدول 4 نشان داده شده است. مراحل انجام کار در این مطالعه شامل گام های زیر است:

1- مدل سازی ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان در حالت پایه (تعیین دما، فشار، آننتالپی، انتروبی، اگزرژی و جرم عبوری نقاط مختلف سیستم) و تعیین نرخ تولید هیدروژن و توان سرمایشی در حالت پایه با استفاده از معادلات بالانس انرژی.

2- تعیین مساحت سطح انتقال حرارت در مبدل های حرارتی با توجه به نوع رژیم جریان در آنها.

3- تعیین قیمت هر یک از اجزای سیستم براساس پارامترهای ترمودینامیکی سیستم (برای پمپ و توربین براساس تغییرات فشار و توان مصرفی و برای مبدل های حرارتی براساس سطوح انتقال حرارت و افت فشار در آنها).

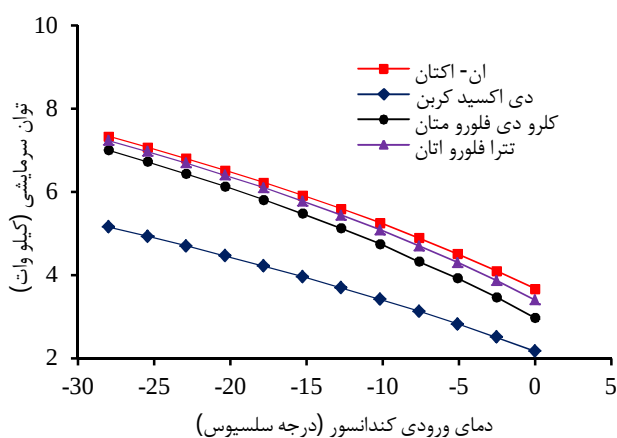
4- مدل سازی اگزرژی- اقتصادی فرایندها و اجزای سیستم با استفاده از روابط بالانس هزینه.

5- بهینه سازی سیستم تحت توابع هدف مورد مطالعه در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

اثر دمای ورودی کندانسور و توربین بر روی توان سرمایشی در شکل های 6 و 7 نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که ان- اکتان عملکرد بهتری در تولید توان سرمایشی در بین سیال های دیگر دارد. در هر دو شکل، توان سرمایشی با افزایش دما کاهش می یابد زیرا با افزایش دمای ورودی کندانسور دمای سیال عامل در خروجی پمپ افزایش یافته در نتیجه توان سرمایشی کاهش می یابد. از طرف دیگر مقدار راندمان حرارتی سیکل افزایش می یابد و در نتیجه توان سرمایشی کاهش می یابد. جدول های 5 و 6 خواص ترمودینامیکی- اقتصادی جریان هزینه را برای نقاط مختلف سیکل در حالت پایه برای دو سیال عامل دی اکسید کربن و ان- اکتان را نشان می دهند.

جدول 4 داده های ورودی فرض شده برای مدل سازی ترمودینامیکی- اقتصادی

پارامترها	مقادیر
دمای محیط (درجه سلسیوس)	25
فشار محیط (مگا پاسکال)	0/1
دمای ورودی دیگ بخار (درجه سلسیوس)	20
دمای ورودی توربین (درجه سلسیوس)	65
فشار ورودی توربین (مگا پاسکال)	10
دمای چگالش (درجه سلسیوس)	-20
زاویه شیب کلکتور (درجه)	8
قطر ورودی و خروجی لوله جاذب (متر)	0/018 و 0/014
مساحت صفحه های جاذب (متر مربع)	450
شیب خمیدگی (درجه)	20/4416
مساحت کلکتور (متر مربع)	1/6x1/1
ضریب گذردهی صفحه	0/92
ضریب گذردهی پوشش	0/88
راندمان ایزنتروپیک پمپ و توربین (%)	80
ساعت کارکرد (ساعت در سال)	7000
نرخ سود (%)	12
سال کارکرد اجزای سیستم	20



شکل 6 اثر دمای ورودی کندانسور روی توان سرمایشی در سیال عامل های مختلف

جدول 5 خواص ترمودینامیکی و هزینه جریان در حالت پایه برای سیستم گذر حرانی دی اکسید کربن

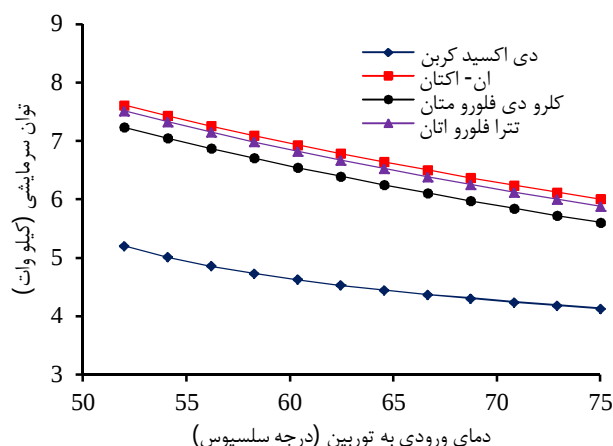
جریان	دما (درجه سلسیوس)	فشار (مگا پاسکال)	جریان جرم (کیلوگرم بر ثانیه)	نرخ انرژی (کیلو وات)	هزینه نرخ هزینه انرژی (\$/h)	هزینه انرژی بر واحد (\$/MJ)
1	-20	1/97	0/5696	123/6	853/3	1/918
2	-14/69	10/41	0/5696	128/1	917/6	1/99
3	20	10/2	0/5696	124/4	891/3	1/99
4	65	10	0/5696	130/6	1091	2/322
5	-20	1/97	0/5696	99/13	828/6	2/322
6	-161/48	0/6	0/176	190/8	17/17	0/025
7	-30	0/6	0/176	50/74	4/569	0/025
8	83/41	0/11	0/8	16/99	232/4	3/8
9	50	0/11	0/8	3/33	45/66	3/8
10	89/53	0/11	5/799	149/9	1009	1/869
11	83/41	0/11	5/799	123/1	828/6	1/869
12	25	0/1	1/059	0	0	0
13	15	0/1	1/059	0/759	39/16	14/32

جدول 6 خواص ترمودینامیکی و هزینه جریان در حالت پایه برای سیستم رنگین آلی با سیال عامل ان - اکتان

جریان	دما (درجه سلسیوس)	فشار (مگا پاسکال)	جریان جرم (کیلوگرم بر ثانیه)	نرخ انرژی (کیلو وات)	هزینه نرخ هزینه انرژی (\$/h)	هزینه انرژی بر واحد (\$/MJ)
1	-20	0/00076	0/832	16/577	223	3/416
2	-16/49	10/41	0/832	17/86	37/13	0/5776
3	20	10/2	0/832	12/05	25/06	0/5776
4	65	10	0/832	16/47	222/3	3/749
5	-20	0/00076	0/832	18/47	249/2	3/749
6	-161/48	0/6	0/176	190/8	17/17	0/025
7	-30	0/6	0/176	50/74	4/569	0/025
8	75/43	0/11	0/8	12/85	249/7	5/396
9	50	0/11	0/8	3/33	64/7	5/396
10	82/12	0/11	5/799	118	856	2/015
11	75/43	0/11	5/799	93/17	675/8	2/015
12	25	0/1	1/55	0	0	0
13	15	0/1	1/55	1/112	24/23	6/052

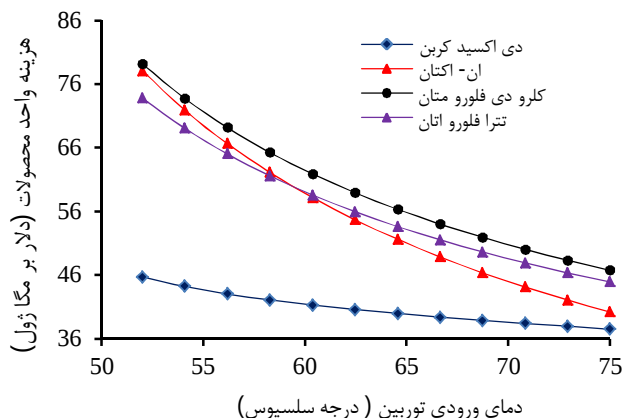
دمای چگالش برای سیال عامل‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش دمای ورودی کندانسور مجموع هزینه‌های واحد انرژی باعث افزایش می‌شود، زیرا این کار باعث کاهش راندمان حرارتی و انرژی سیکل و در نتیجه افزایش هزینه سیستم می‌شود که به وضوح با نمودار سازگاری دارد. همچنین از نمودار دیده می‌شود که در دماهای پایین، هزینه محصولات برای هر دو سیال عامل دی اکسید کربن و ان - اکتان تقریباً برابر می‌باشد، در حالی که در دماهای بالا آنها اختلاف زیادی با یکدیگر دارند.

تأثیر تغییرات فشار ورودی به توربین بر روی هزینه‌های واحد انرژی برای سیال عامل‌های مختلف در شکل 9 نشان داده شده است. شکل 9 مشخص می‌کند که برای دی اکسید کربن یک مقدار ویژه برای فشار ورودی به توربین وجود دارد که به ازای آن مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات کمینه می‌شود. در حالی که برای سیال عامل‌های دیگر هزینه محصولات با افزایش فشار افزایش می‌یابد. همان‌طور از شکل دیده می‌شود که در فشارهای پایین (حدود 8 مگا پاسکال) مجموع هزینه‌های محصولات برای ان - اکتان کمتر از دی اکسید کربن است.



شکل 7 اثر دمای ورودی به توربین بر روی توان سرمایشی در سیال عامل‌های مختلف

شکل 8 اثر تغییرات مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات را با



شکل 11 اثر تغییرات دمای ورودی توربین بر روی مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات برای سیال عامل‌های مختلف

براساس این واقعیت است که با افزایش دمای توربین کار خالص خروجی سیکل افزایش یافته در نتیجه راندمان حرارتی و انرژی سیکل افزایش می‌یابد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در دماهای بالا (حدود 75 درجه سلسیوس) مجموع هزینه‌های محصولات برای هر دو سیال عامل دی اکسید کربن و ان-اکتان بسیار به یکدیگر نزدیک است.

5- بهینه‌سازی انرژی - اقتصادی

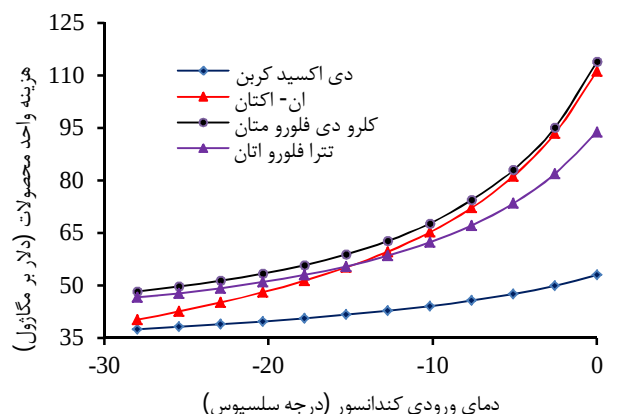
5-1- روش بهینه‌سازی و نتایج آن

روش‌های بهینه‌سازی مختلفی در نرم‌افزار ایز وجود دارد که عبارتند از روش جستجوی مستقیم، روش الگوریتم ژنتیک و روش متغیر متریک. برای این مقصود به دلیل اینکه الگوریتم ژنتیک یک روش پایدار و قابل دسترس می‌باشد، از آن استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک برعکس روش جستجوی مستقیم و روش متغیر متریک، وابسته به حدس اولیه متغیرهای مستقل نیست [16]. بعضی از محققان معتقدند که الگوریتم ژنتیک نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی متداول [25] و روش جستجوی مستقیم [26] موثرتر است. در مطالعه حاضر، از روش الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به قیود بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و محدوده تغییرات متغیرهای طراحی به تناسب کارکرد بهینه سیستم در جدول 7 توضیح داده شده است. سه پارامتر اول جدول 7 توسط کاربر به سیستم داده می‌شود و پارامترهای دیگر بصورت پیش فرض توسط برنامه بهینه‌سازی پیشنهادی بر پایه الگوریتم ژنتیک پی-کا-1 در نرم‌افزار ایز پیشنهاد داده شده‌اند و تغییر نمی‌کنند [25, 26]. مقادیر بهینه متغیرهای طراحی در سه حالت بهینه تولید هیدروژن، حالت بهینه توان سرمایشی و حالت بهینه هزینه محصولات با دو سیال عامل دی اکسید کربن و ان-اکتان، که عملکرد بهتری نسبت به دیگر سیال‌ها داشتند، در جداول 8 و 9 نشان داده شده است.

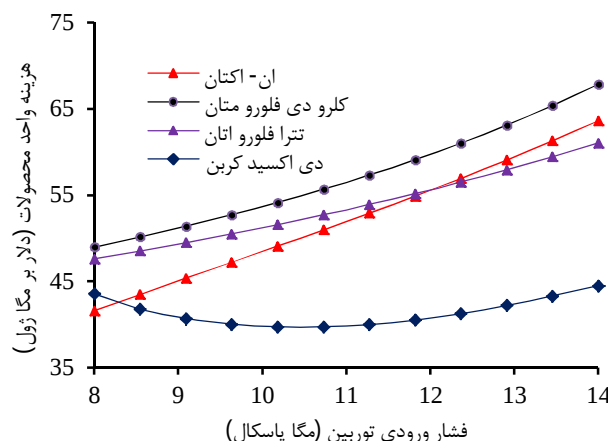
مقادیر بهینه متغیرهای طراحی برای سیال عامل دی اکسید کربن در جدول 8 نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که راندمان انرژی هیدروژن در حالت بهینه تولید هیدروژن از مقدار 4/33 % به مقدار 8/5 % و توان سرمایشی در حالت بهینه توان سرمایشی از مقدار 4/33 کیلو وات به مقدار 6/515 کیلو وات نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد.

به دلیل متفاوت بودن عملکرد دی اکسید کربن در فشارهای مختلف، اثر تغییرات فشار در دماهای مختلف ورودی توربین برای دی اکسید کربن در شکل 10 نشان داده شده است. شکل 10 نشان می‌دهد که در دماهای پایین، هزینه محصولات بیشتر افزایش می‌یابد، زیرا در دماهای پایین ورودی توربین، راندمان حرارتی و انرژی بیشتر کاهش می‌یابد.

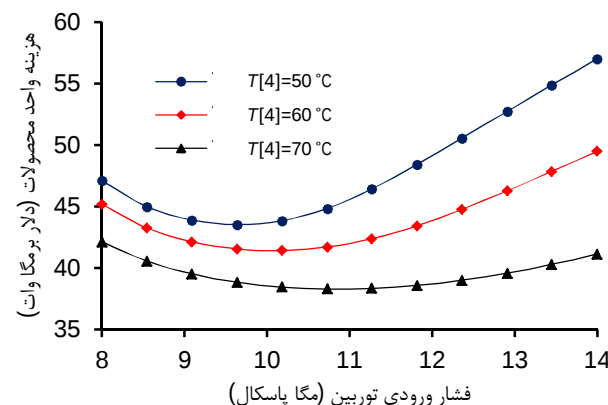
اثر مافوق گرم کردن دمای سیال عامل در ورود به توربین بر روی هزینه محصولات در شکل 11 نشان داده شده است. شکل 11 نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی توربین، هزینه محصولات کاهش می‌یابد. این نتایج



شکل 8 تغییرات مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات با دمای چگالش در سیال عامل‌های مختلف



شکل 9 اثر تغییرات فشار ورودی توربین بر روی مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات برای سیال عامل‌های مختلف



شکل 10 اثر تغییرات فشار ورودی توربین برای سیال عامل دی اکسید کربن در دماهای مختلف ورودی توربین بر روی مجموع هزینه‌های واحد انرژی محصولات

جدول 7 پارامترهای الگوریتم ژنتیک و شرایط بهینه‌سازی سیستم

پارامترها	مقادیر
تعداد افراد در جمعیت	34
تعداد جمعیت	72
ماکزیمم نرخ جهش	0/25
نرخ جهش اولیه	0/005
مینیمم نرخ جهش	0/0005
احتمال ترکیب ژنی	0/85
تغییرات دمای ورودی به دیگ بخار (درجه سلسیوس)	18 تا 23
تغییرات دمای ورودی به کندانسور (درجه سلسیوس)	0 تا -50
تغییرات دمای ورودی به توربین (درجه سلسیوس)	50 تا 75
تغییرات دمای ورودی به گاز مایع شده (درجه سلسیوس)	-70 تا -161/48
تغییرات فشار ورودی به توربین (مگا پاسکال)	8 تا 14

کاهش می‌یابد، ولی توان سرمایشی تولید شده افزایش پیدا می‌کند. همچنین در هر دو سیستم مطابق آنچه انتظار می‌رفت، میزان هزینه محصولات در حالت بهینه توان سرمایشی بیشتر از دو حالت دیگر است.

مقادیر ضرایب حاصل از تحلیل انرژی - اقتصادی هر یک از اجزای سیستم برای سیال عامل‌های دی اکسید کربن و ان - اکتان در جداول 10 و 11 نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در هر سه حالت بهینه، هزینه سرمایه‌گذاری برای کندانسور بیشترین است، در حالی که برای پمپ کمترین مقدار را دارد. برای کل سیستم، همان‌طور که انتظار می‌رفت کمترین نرخ تخریب انرژی و کمترین هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به حالت بهینه هزینه می‌باشد. در حالیکه بیشترین نرخ تخریب انرژی مربوط به حالت توان سرمایش است. همچنین نتایج دو جدول نشان می‌دهد که در تمام حالت‌های بهینه‌سازی، نرخ تخریب انرژی برای سیال عامل ان - اکتان بیشتر از دی اکسید کربن است در حالی که هزینه سرمایه‌گذاری آن کمتر از دی اکسید کربن است.

شکل 12 نرخ تخریب انرژی را در هر یک از اجزای سیستم نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کندانسور و تانک ذخیره گرمایی به ترتیب بیشترین نرخ تخریب انرژی را به دلیل اختلاف دمای بالا دارند. پمپ نیز کمترین مقدار تخریب انرژی را در بین اجزای سیستم دارد.

همچنین مقدار مجموع هزینه‌های واحد انرژی نیز در حالت بهینه هزینه، 32/7 % کمتر از حالت پایه است. مقادیر جدول نشان می‌دهد که هزینه‌های انرژی محصولات هنگامی که بهینه‌سازی بر اساس هزینه محصولات باشد، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که توان خالص خروجی در حالت بهینه هزینه نسبت به حالت‌های دیگر قابل مقایسه است. در سیکل توان با سیال عامل ان - اکتان میزان هیدروژن تولید شده

جدول 8 مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و توابع هدف در حالت‌های بهینه مختلف برای سیستم گذرچرائی دی اکسید کربن

متغیرهای طراحی / توابع هدف	حالت پایه	تولید هیدروژن	تولید سرمایش	هزینه محصولات	حالت بهینه
دمای ورودی دیگ بخار (درجه سلسیوس)	20	22/85	23	23	23
دمای ورودی توربین (درجه سلسیوس)	65	75	75	75	75
فشار ورودی توربین (مگا پاسکال)	10	8	8	9/152	8
دمای ورودی کندانسور (درجه سلسیوس)	-20	-30	-30	-30	-30
دمای ورودی گاز مایع شده (درجه سلسیوس)	-161/48	-70	-134/5	-70	-70
توان خالص خروجی (کیلو وات)	18/5	27/12	27	26/32	27
توان سرمایشی (کیلو وات)	4/429	6/469	6/515	6/164	6/515
نرخ تولید هیدروژن (لیتر بر ثانیه)	1/235	1/817	1/7	1/757	1/7
راندمان انرژی خورشید - هیدروژن (%)	4/33	8/5	8/324	8/338	8/324
راندمان انرژی هیدروژن - دی اکسید کربن (%)	9/27	28/36	28/67	28/84	28/67
مجموع هزینه واحد محصولات (دلار بر مگاژول)	43/54	31/01	33/69	29/23	33/69

جدول 9 مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و توابع هدف در حالت‌های بهینه مختلف برای سیستم رنگین آلی با سیال عامل ان - اکتان

متغیرهای طراحی / توابع هدف	حالت پایه	تولید هیدروژن	تولید سرمایش	هزینه محصولات	حالت بهینه
دمای ورودی دیگ بخار (درجه سلسیوس)	20	23	23	18	23
دمای ورودی توربین (درجه سلسیوس)	65	75	50	75	50
فشار ورودی توربین (مگا پاسکال)	10	8	8	8	8
دمای ورودی کندانسور (درجه سلسیوس)	-20	-30	-30	-30	-30
دمای ورودی گاز مایع شده (درجه سلسیوس)	-161/48	-161/48	-161/48	-161/48	-161/48
توان خالص خروجی (کیلو وات)	18/97	19/21	25/44	18/97	25/44
توان سرمایشی (کیلو وات)	6/463	6/832	9/599	6/622	9/599
نرخ تولید هیدروژن (لیتر بر ثانیه)	0/918	1/469	0/895	1/261	0/895
راندمان انرژی خورشید - هیدروژن (%)	2/281	4/451	6/816	9/442	6/816
راندمان انرژی هیدروژن - دی اکسید کربن (%)	6/313	9/799	7/574	9/714	7/574
مجموع هزینه واحد محصولات (دلار بر مگاژول)	48/46	25/42	42/01	23/86	42/01

جدول 10 ضرایب انرژی و اقتصادی اجزای سیستم در حالت‌های بهینه مختلف برای سیستم گذرانی دی اکسید کربن

اجزا	حالت بهینه تولید هیدروژن		حالت بهینه تولید سرمایش		حالت بهینه هزینه محصولات	
	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)
سرد کن	5/112	12/44	5/124	12/48	4/779	12/41
دیگ بخار	10/49	12/12	10/46	12/12	8/347	11/52
توربین	9/7	2/756	9/667	2/745	9/671	2/751
کندانسور	19/02	22/158	23/9	22/33	18/55	21/73
پمپ	1/094	1/066	1/097	1/067	1/276	1/148
تانک ذخیره	11/17	6/52	11/25	6/55	11/81	6/555
الکتروایزر	6/235	2/145	6/21	2/13	6/053	2/1
کل سیستم	62/821	59/2.5	67/708	59/436	60/486	58/224

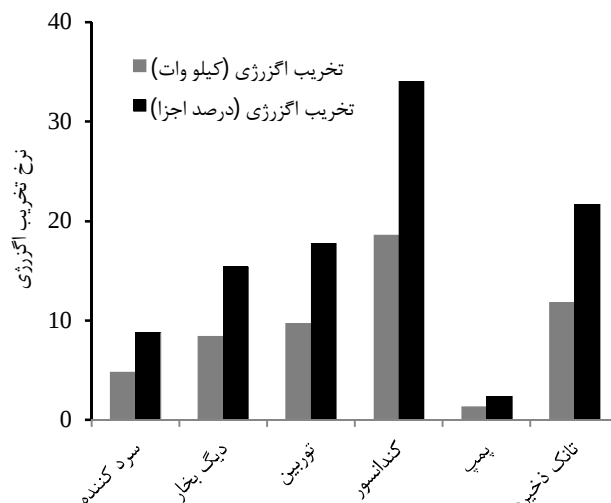
جدول 11 ضرایب انرژی و اقتصادی اجزای سیستم در حالت‌های بهینه مختلف برای سیستم رنگین آلی با سیال عامل ان-اکتان

اجزا	حالت بهینه تولید هیدروژن		حالت بهینه تولید سرمایش		حالت بهینه هزینه محصولات	
	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)	تخریب انرژی (kW)	هزینه سرمایه (\$/MJ)
سرد کن	6/476	12/15	8/378	12/15	6/438	12/12
دیگ بخار	4/138	12/38	3/644	13/06	4/481	12/37
توربین	8/838	2/517	7/839	2/251	8/824	2/515
کندانسور	26/25	20/27	28/523	21/28	23/19	17/16
پمپ	2/354	1/346	3/056	1/484	2/355	1/346
تانک ذخیره	15/11	4/752	16/53	4/752	14/96	4/752
الکتروایزر	14/62	2/145	14/698	2/13	14/6	2/105
کل سیستم	77/786	55/56	82/668	57/107	74/84	52/368

- نتایج نشان می‌دهد که نرخ کل تخریب انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری در حالت بهینه توان سرمایشی بیشتر از حالت‌های دیگر است، در حالی که نرخ هزینه در حالت بهینه هزینه کمترین مقدار است.
- مجموع هزینه‌های محصول برای هر دو سیال عامل مورد نظر با افزایش دمای ورودی دیگ بخار و توربین و کاهش دمای چگالش، کاهش می‌یابد. در حالی که، برای دی اکسید کربن، هزینه محصولات در یک فشار بهینه ورودی توربین به پایین ترین مقدار خود می‌رسد.
- با مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی دیده می‌شود که دی اکسید کربن و ان-اکتان به ترتیب عملکرد بهتری در تولید هیدروژن و سرمایش دارند.
- نتایج نشان می‌دهد در دمای چگالش پایین، فشارهای بالای توربین، دمای بالای دیگ بخار و توربین، مجموع هزینه‌های واحد محصولات ان-اکتان مساوی با دی اکسید کربن است در حالی که در شرایط دیگر دی اکسید کربن عملکرد بهتری دارد.
- در سیکل دی اکسید کربن، کاهش هزینه‌های محصولات در حالت بهینه هزینه نسبت به حالت پایه 32/7 % و نسبت به حالت‌های بهینه تولید هیدروژن و سرمایش به ترتیب 8/5 % و 8/7 % کمتر است. در حالی که در سیکل ان-اکتان کاهش هزینه محصولات در حالت بهینه هزینه نسبت به حالت پایه 50/72 % و نسبت به حالت‌های بهینه تولید هیدروژن و سرمایش به ترتیب 3/5 % و 37/7 % است.

7- فهرست علائم

$\dot{C}$	نرخ هزینه (\$h ⁻¹)
c	هزینه بر واحد انرژی (\$MJ ⁻¹)
e	انرژی مخصوص (kJkg ⁻¹)



شکل 12 نرخ تخریب انرژی در هر یک از اجزای سیستم

6- نتیجه‌گیری

- تحلیل ترمودینامیکی- اقتصادی و بهینه‌سازی یک سیکل تولید همزمان (هیدروژن/سرمایش) با دی اکسید کربن و ان-اکتان همراه با محرک خورشیدی در این مطالعه انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید:
- کندانسور، به دلیل اختلاف دمای بالا، بیشترین نرخ تخریب انرژی را بین اجزای سیستم دارد، ولی نرخ تخریب آن در حالت بهینه هزینه و توان سرمایش به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را در میان سه حالت دیگر است.

- [5] Z. Sun, J. Wang, Y. Dai, J. Wang, Exergy analysis and optimization of a hydrogen production process by solar-liquefied natural gas hybrid driven transcritical CO₂ power cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 4, pp. 18731-39, 2012.
- [6] M. Wang, J. Wang, Y. Zhao, P. Zhao, Y. Dai, Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No.1, pp. 816-825, 2013.
- [7] Y. Song, J. Wang, Y. Dai, E. Zhao, Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy with liquefied natural gas as its heat sink. *Applied Energy*, Vol. 92, No. 12, pp. 194-203, 2012.
- [8] G. Tsatsaronis, I. Lin, J. Pisa, Exergy costing in exergoeconomics, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 115:9-16, 1993.
- [9] P.K. Sahoo, Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 13, No. 28, pp. 1580-88, 2008.
- [10] H. Sayyaadi, T. Sabzaligol, Exergoeconomic optimization of a 1000MW light water reactor power generation system. *International Journal of Energy Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 378-395, 2009.
- [11] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, Exergy, Exergoeconomic and Environmental analysis and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants. *Energy*, Vol. 36, No.2, pp. 5886-98, 2011.
- [12] V. Zare, S.M.S. Mahmoudi, M. Yari, M. Amidpour. Thermoeconomic analysis and optimization of an ammonia-water power/cooling cogeneration cycle. *Energy*, Vol. 47, No. 1, pp. 271-83, 2012.
- [13] F.A. Al-Sulaiman, I. Dincer, F. Hamdullahpur, Thermoeconomic optimization of three generation using organic Rankine cycle: Applications. *Energy Conversion and Management*, Vol. 69, No. 4, pp. 209-216, 2013.
- [14] S. Sanaye, A. Shirazi, Thermo-economic optimization of an ice thermal storage system for air-conditioning applications. *Energy and Building*, Vol. 60, No. 2, pp. 100-109, 2013
- [15] M. Li, J. Wang, S. Li, X. Wang, W. He, Y. Dai, Thermo-economic analysis and comparison of a CO₂ transcritical power cycle and an organic Rankine cycle. *Geothermic*, Vol. 50, No.6, pp. 101-111, 2014.
- [16] S.A. Klein, *Engineering Equation Solver User's Manual*. pp. 230-311, Middleton,WI:F-chart software; 2008.
- [17] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering and Thermal Processes*. Third edition, pp. 274-320, New York: Wiley; 2006
- [18] M. Ameri, P. Ahmadi, The study of ambient temperature effects on exergy losses of a heat recovery steam generator. In: *Proceeding of the international conference on power eng*. Paris, France, 2007
- [19] I. Dincer, H. Al-Muslim, Thermodynamic analysis of reheats cycle steam power plants. *International Journal of Energy*, Vol. 25, No. 4, pp. 727-39, 2001.
- [20] I. Dincer, M.A. Rosen, *Exegy, energy, environment and sustainable development*. pp. 35-39, Elsevier 2007.
- [21] Ahmadi P, Dincer I. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. *Applied Thermal Engineering*; 31: pp. 2529-40, 2011.
- [22] P. Ahmadi, M.A. Rosen, I. Dincer, Greenhouse gas emission and exergoenvironmental analyses of a trigeneration energy system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*., Vol. 5, No.12, pp. 1540-49, 2011.
- [23] R.D. Misra, P.K. Sahoo, A. Gupta, Thermoeconomic optimization of a single effect water/LiBr vapour absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 26, No. 3, pp. 158-69, 2003.
- [24] L.S. Vieira, J.L. Donatelli, M.E. Cruz, Exergoeconomic improvement of a complex cogeneration system integrated a professional process simulator. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 16, pp. 1955-67, 2009.
- [25] A. Baghernejad, M. Yaghoubi, Exergoeconomic analysis and optimization of integrated solar combined cycle system (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 23, pp. 2193-203, 2011.
- [26] C. Maschio, A.C. Vidal, D.J. Schiozer, A framework to integrate history matching and geostatistical modeling using genetic algorithm and direct search methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 63, No.2, pp. 34-42, 2008.

h	انتالپی مخصوص (kJkg^{-1})
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg s^{-1})
P	فشار (MPa)
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت (kW)
s	انتروپی مخصوص ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T	دما ($^\circ\text{C}$ یا K)
Z	هزینه سرمایه‌گذاری اجزا (\$)
$\dot{Z}$	نرخ هزینه سرمایه‌گذاری اجزا ($\text{\$h}^{-1}$)

علائم یونانی

α	ضریب جذب
β	زاویه شیب کلکتور ($^\circ$)
δ	شیب خمیدگی ($^\circ$)
ρ	ضریب انعکاس
τ	زمان عملکرد دستگاه (hour)، ضریب گذردهی
ϕ	عرض جغرافیایی ($^\circ$)
θ	زاویه شیب تابش خورشید ($^\circ$)
ω	زاویه جغرافیایی ساعت ($^\circ$)
ε	ضریب انتشار

بالا نویس‌ها

CI	هزینه سرمایه‌گذاری
OM	تعمیرات و نگهداری

زیر نویس‌ها

b	شعاعی، پایینی
$boil$	دیگ بخار
$cond$	کندانسور
d	نفوذی
e	خروجی
$fp\text{sc}$	کلکتور خورشیدی صفحه ای تخت
i	ورودی
k	اجزا
p	پمپ
ref	سرد کننده
s	کناری
st	تانک ذخیره
t	بالایی
tur	توربین

8- مراجع

- [1] A. Bejan, G. Tsatsaronis, Moran M. *Thermal Design and Optimization*. New York: Wiley, pp. 333-405, 1996.
- [2] A.M. Delgado-Torres, L. Garcia-Rodriguez, Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine Cycle (ORC). *Energy conversion and Management*, Vol. 51, No. 12, pp. 2846-56, 2010.
- [3] Y. Chen, P. Lundqvist, A. Johnsson, P. Platell, A comparative study of the carbon dioxide to transcritical power cycle compared with an organic Rankine cycle with R123 as a working fluid in waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 17, pp. 2142-47, 2006.
- [4] E.J. Beckman, Supercritical and near-critical CO₂ in green chemical synthesis and processing. *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 28, No. 2, pp. 121-91, 2004.