



ارزیابی سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر بر اساس معیار توان بیشینه در ترمودینامیک زمان محدود

امیر قاسم‌خانی¹، سعید فراحت^{2*}، محمدمهدی ناصریان³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

3- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* زاهدان، صندوق پستی 987-98155، farahat@hamoon.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 شهریور 1396

پذیرش: 03 آبان 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر

ترمودینامیک زمان محدود

معیار بیشینه توان

چکیده

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای کارنو ایجاد یک محدودیت برای موتورهای حرارتی بوده است. این محدودیت، معیاری برای سنجش و مقایسه عملکرد موتورهای حرارتی است. ترمودینامیک کلاسیک به صورت جامع به فرایندهای برگشت‌پذیر و تعادلی می‌پردازد، اما اثرات پدیده‌های انتقال را نادیده می‌گیرد، درحالی‌که فرایندهای واقعی برگشت‌ناپذیر و دارای محدودیت‌های زمان و اندازه هستند، نکته دیگر این است که همه‌ی فرایندهای واقعی، برگشت‌ناپذیر هستند. از سوی دیگر ارتباط بسیار نزدیک ترمودینامیک، مکانیک سیالات و انتقال حرارت باعث شده است، ترمودینامیک از تحلیل تئوری به سمت تحلیل جامع و حقیقی حرکت کند. در این مطالعه به تحلیل سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر در ترمودینامیک زمان محدود پرداخته شده است. سیکل ترکیبی مورد مطالعه از دو سیکل برگشت‌پذیر داخلی و سه منبع حرارتی تشکیل شده است. برگشت‌ناپذیری در مرزهای سیستم، بین زیرسیستم‌ها، منابع و چاه حرارتی اتفاق افتاده است. با حل معادلات جبری توان کل بی‌بعد و بازده بر حسب متغیرهای بی‌بعد بدست آمده است، برای حل معادلات جبری از کد نویسی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در نهایت بازده حرارتی و توان کل بی‌بعد به صورت تابعی از دمای منابع حرارتی، دمای سیال عامل و هدایت حرارتی بدست آمده است. همچنین اثرات هر یک از متغیرهای بی‌بعد تعریف‌شده نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از مطالعه پارامتری به عنوان معیاری برای بهبود سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر در ترمودینامیک زمان محدود استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج بهینه سازی نشان داده است که بیشینه توان کل بی‌بعد و بازده حرارتی مرتبط به آن به ترتیب برابر با 0.086102 و 47.81% است.

Evaluation combined cycle irreversible on the criteria of maximum power in finite time thermodynamics

Amir Ghasemkhani, Said Farahat*, Mohammad Mahdi Naserian

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

* P.O.B. 98155-987 Zahedan, Iran, farahat@hamoon.usb.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 September 2017
Accepted 25 October 2017
Available Online 18 November 2017

Keywords:

Combined cycle irreversible
Finite time thermodynamics
The criteria of maximum power

ABSTRACT

One of the most important achievements of the Carnot was creating a limit for heat engines; this limitation is a criterion for measuring and comparing the performance of heat engines. Classical thermodynamics studies completely the equilibrium and reversible processes but transfer phenomena effects have been ignored, while in the real irreversible process, there are finite time processes and finite size systems. On the other hand, the close relationship between thermodynamics, fluid mechanic and heat transfer has caused thermodynamics to move from theoretical analysis toward a comprehensive and real analysis. Another point is that all the practical processes are irreversible. This study analyzed the irreversible combined cycle in finite time thermodynamics. The combined cycle studied consists two endoreversible cycles and three thermal sources. The irreversibility has occurred between the subsystems and the thermal sources and sink on the system boundaries. By solving algebraic equations, obtained dimensionless total power and efficiency were calculated based on dimensionless variables. The MATLAB programming code is used to solve algebraic equations. Finally, it is obtained that the thermal efficiency and dimensionless total power functions of the heat sources temperature, working fluid temperature and thermal conductance. Also, the effects of each dimensionless variable were investigated to the proportion of dimensionless total power and efficiency. In this study, the parameter study has been used for improving the irreversible combined cycle in the finite time thermodynamics. In addition, Optimization results have shown that the maximum dimensionless total power and thermal efficiency associated with it are 0.086102 and 47.81%, respectively.

Please cite this article using:

A. Ghasemkhani, S. Farahat, M. M. Naserian, Evaluation combined cycle irreversible on the criteria of maximum power in finite time thermodynamics, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 333-342, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

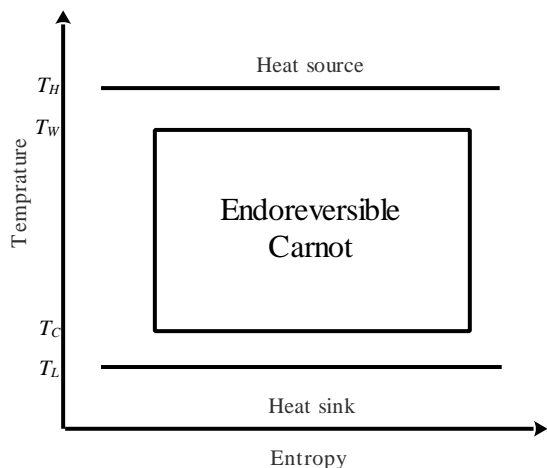


Fig.1 temperature-entropy diagram of the Carnot cycle of the Curzon-Ahlborn model

شکل 1 دیاگرام دما-آنترپوی سیکل کارنو مدل کورزن-آلبورن

تشکیل شده است. فرضیات آن‌ها شامل اختلاف دمای ثابت بین سیال عامل و منابع حرارتی، جایگزینی قانون انتقال حرارت نیوتن با قانون انتقال حرارت خطی دیگری ($Q \propto \Delta(1/T)$) است. آن‌ها در این پژوهش به محاسبه توان خروجی مطلوب و بازده پرداخته‌اند. علاوه بر این رابطه بین توان خروجی بیشینه و بازده را نیز به دست آوردند. دیگر نتایج آن‌ها شامل مقایسه بازده سیکل کارنو براساس قانون انتقال حرارت نیوتن و حالت تعمیم‌یافته است. چن و یان [5] به بررسی یک سیکل برگشت‌پذیر داخلی با دو منبع حرارتی در حالت‌های متفاوت قوانین انتقال حرارت (به ازای مقادیر مختلف n) پرداخته‌اند. در نتیجه آن‌ها رابطه بین بازده بهینه و توان خروجی در هر یک از مقادیر n براساس تغییرات ضریب انتقال حرارت را به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که توان بیشینه علاوه بر دمای منابع به ضریب انتقال حرارت و قانون انتقال حرارت وابسته است. وو [6] توان خروجی یک موتور حرارتی کارنو زمان محدود را مورد بررسی قرار داده که دارای منبع و چاه حرارتی با ظرفیت حرارت محدود است. او به محاسبه بیشینه توان خروجی این موتور حرارتی پرداخته و همچنین به مقایسه عملکرد موتور حرارتی کارنو زمان محدود با یک نیروگاه واقعی پرداخته است. نتایج وو [6] نشان می‌دهد که سیکل موتور حرارتی کارنو زمان محدود نسبت به سیکل کارنو ایده آل به حالت واقعی نزدیک‌تر است. چن و یان [7] به اختلاف مفهوم بازده کارنو و بازده کورزن-آلبورن اشاره کرده‌اند و بیان کردند که این اختلاف ناشی از برگشت‌ناپذیری‌های داخلی سیستم است؛ بنابراین در بعضی موارد برگشت‌ناپذیری‌های داخلی سیستم سبب می‌شود که بازده موتورهای حرارتی واقعی از بازده کورزن-آلبورن بیشتر شود و بازده کورزن-آلبورن را نمی‌توان حد بالای موتورهای حرارتی قرار داد. نتایج آنها نشان داده است که فقط موتور حرارتی کارنو باید به عنوان معیار بیشینه بازده موتورهای حرارتی در ارزیابی سیستم‌ها استفاده شود. این نتیجه در گسترش ترمودینامیک زمان محدود اهمیت بسزایی است.

ناصریان و همکاران [8-10] سیکل برایتون بسته با بازیاب را براساس تابع اکولوژی، توان و بازده در ترمودینامیک زمان محدود مورد بررسی قرار داده‌اند. متغیرهای تصمیم آن‌ها شامل نسبت هدایت حرارتی مبدل حرارتی دما بالا نسبت هدایت حرارتی مبدل حرارتی دما پایین و نسبت فشار بوده است. در پژوهش‌های آن‌ها محدودیت زمان و اندازه براساس تعریف دبی جرمی بی‌بعد (F) اعمال شده است. با اصلاح مفهوم تابع اکولوژی از آن در

انرژی یکی از پیچیده‌ترین مفاهیم بشری است که به صورت کاربردی در ترمودینامیک بر پایه انواع انرژی و تبدیل انرژی بیان شده است. ترمودینامیک کلاسیک به طور کلی براساس مفاهیم و انواع تبدیل میکروسکوپیکی انرژی به میکروسکوپیکی انرژی بر پایه تعادل تعریف شده است. ترمودینامیک زمان محدود در 1975 توسط بری و سلامون ابداع شد [1]. ترمودینامیک زمان محدود ناشی از یک نگاه واگرای به علم ترمودینامیک است. ترمودینامیک زمان محدود با توجه مباحث انتقال حرارت مانند هدایت حرارتی یک شکل توسعه یافته میکروسکوپیکی و از سوی دیگر ترکیبی از ایده‌های کلاسیک مانند انرژی، دسترس‌پذیری و مفاهیم جدید ترمودینامیکی مانند معیارهای مطلوب، محدودیت‌های ترمودینامیکی و بیشینه توان است؛ بنابراین این ویژگی‌های ترمودینامیک زمان محدود سبب می‌شود که ترمودینامیک به سمت بهینه‌سازی کاربردی سوق پیدا کند. ترمودینامیک زمان محدود در حقیقت شکل بهبود یافته ترمودینامیک کلاسیک است و اثرات برگشت‌ناپذیری‌ها و محدودیت‌های فیزیکی را در نظر می‌گیرد و در نهایت به کمینه کردن آن‌ها می‌پردازد. از نگاه جامع‌تر ترمودینامیک زمان محدود همان کمینه کردن آنترپوی تولیدی است [2]. کورزن و آلبورن [3] با هدف به دست آوردن بیشینه توان به بررسی سیکل کارنو برگشت‌ناپذیر یا به عبارت دیگر سیکل کارنو تعمیم یافته با فرض مقاومت حرارتی محدود پرداخته‌اند. سیکل کورزن-آلبورن بین یک منبع حرارتی با دمای T_H و یک چاه حرارتی با دمای T_L کار می‌کند و فرایندهای جذب و دفع حرارت طی فرایندهای دما ثابت انجام می‌شود. انتقال حرارت محدود \dot{Q}_H ناشی از اختلاف دمای محدود بین منبع حرارتی و سیال عامل و همچنین انتقال حرارت محدود \dot{Q}_L ناشی از اختلاف دمای محدود بین چاه حرارتی و سیال عامل اتفاق افتاده است. انتقال حرارت در این سیکل فقط در مرزها اتفاق افتاده است، در نتیجه سیکل کارنو تعمیم یافته یک سیکل برگشت‌پذیر داخلی² است. تحلیل مدل کورزن-آلبورن با استفاده از فرضیات حالت پایا، ثابت بودن سطح انتقال حرارت، منبع حرارتی با ظرفیت محدود انجام شده است. شکل 1 دیاگرام دما-آنترپوی سیکل کارنو برگشت‌پذیر داخلی یا مدل کورزن-آلبورن را نشان می‌دهد. موتور حرارتی کورزن-آلبورن ساده‌ترین موتورهای حرارتی برگشت‌ناپذیر است که برگشت‌ناپذیری خارجی یا اثرات انتقال حرارت را در مرز سیستم مورد بررسی قرار داده است. آن‌ها با حل معادلات جبری توان را به صورت تابعی از دمای منابع که به صورت متغیرهای تعریف شده x و y ³ و هدایت حرارتی به دست آورده‌اند، سپس با مشتق‌گیری توان نسبت به متغیرهای x و y مقدار بهینه این متغیرها را محاسبه کرده و در نهایت با جایگزینی متغیرهای بهینه در معادله توان، بیشینه توان و بازده متناظر با آن را به صورت رابطه (1) محاسبه کردند.

$$\eta_{\text{maximum power}} = 1 - \frac{T_C}{T_W} = 1 - \sqrt{\frac{T_L}{T_H}} \quad (1)$$

سیکل کارنو برگشت‌ناپذیر یا سیکل کورزن-آلبورن سرآغاز توجه محققان به موتورهای حرارتی برگشت‌پذیر داخلی بوده است. موتور حرارتی که بین یک منبع حرارتی دما بالا با ظرفیت حرارتی محدود و یک مخزن دما پایین با ظرفیت حرارتی نامحدود کار می‌کند، توسط یان و چن [4] مطالعه و ارائه شده است. سیکل آن‌ها از دو فرایند آدیباتیک و دو فرایند با شار ثابت

¹ Curzon-Ahlborn

² Endoreversible

³ $x = T_H - T_W$ و $y = T_L - T_C$

بی‌بعد که نشان‌دهنده اهمیت توان مکانیکی است و علاوه بر این عبارت هدایت حرارتی کل در توان کل بی‌بعد نشان‌دهنده مفاهیم انتقال حرارت مانند سطح انتقال حرارت و اتلافات حرارتی است. در حال حاضر بیشتر تحقیقات فقط محدودیت زمان و محدودیت اندازه را اعمال کردند. این موضوع سبب شده است که در مدل‌سازی ریاضی داده‌هایی که ناقص قانون دوم ترمودینامیک هستند در تحلیل قرار گیرند و در نهایت منجر به نتایج غیرواقعی می‌شود. در این مطالعه قانون دوم ترمودینامیک به عنوان محدودیت سوم در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مطالعه پارامتریک هر یک از متغیرهای بی‌بعد تعریف‌شده نسبت به بازده حرارتی و توان کل بی‌بعد نیز بررسی شده است. نوآوری دیگر این پژوهش بهینه‌سازی توان کل بی‌بعد براساس محدودیت اندازه، زمان و قانون دوم ترمودینامیک است.

2- توصیف سیستم

سیستم مورد مطالعه یک سیکل ترکیبی است که از دو موتور حرارتی برگشت‌پذیر داخلی تشکیل شده است. شکل 2 شماتیک سیکل ترکیبی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حرارت از منابع حرارتی با دماهای T_{h1} و T_{h2} به موتور حرارتی برگشت‌پذیر دما بالا منتقل می‌شود، حرارت اتلافی موتور برگشت‌پذیر دما بالا و گرمای انتقالی از منبع حرارتی با دمای T_{h3} ، گرمای موتور حرارتی دما پایین را تأمین می‌کند و گرمای موتور حرارتی دما پایین به چاه حرارتی دما پایین منتقل می‌شود. اثرات برگشت‌ناپذیری‌های خارجی ناشی از انتقال حرارت در مرزهای سیستم، اثرات محدودیت زمان و اندازه در تحلیل در نظر گرفته شده است. هدایت حرارتی در کل سیستم ثابت فرض شده است. جهت ساده‌سازی معادلات جبری از $C = UA$ استفاده شده است.

فرضیات سیستم شامل موارد زیر است:

- 1- سیستم از دو سیکل برگشت‌پذیر داخلی تشکیل شده است.
- 2- برگشت‌ناپذیری‌ها ناشی از انتقال حرارت در مرز زیرسیستم، منابع حرارتی و چاه حرارتی رخ داده است.
- 3- اطلاعات ورودی سیستم در جدول 1 نشان داده شده است. اطلاعات ورودی براساس مراجع [14,6] فرض شده‌اند.
- 4- سیستم پایا فرض شده است.
- 5- ظرفیت حرارتی منابع حرارتی محدود فرض شده است.
- 6- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- 7- بازگشت‌ناپذیری خارجی فقط ناشی از اختلاف دمای محدود در نظر گرفته شده است یا به عبارت دیگر عامل اصلی برگشت‌ناپذیری، انتقال حرارت محدود در مرز بین زیرسیستم‌ها، منابع حرارتی و چاه حرارتی در مبدل‌های حرارتی است.

3- تحلیل سیستم براساس ترمودینامیک زمان محدود

تحلیل ترمودینامیک زمان محدود ترکیبی از تحلیل براساس مفاهیم ترمودینامیک و انتقال حرارت است؛ بنابراین نرخ گرمای منتقل شده از منبع حرارتی در دمای T_{h1} به سیکل برگشت‌پذیر داخلی دما بالا توسط رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q}_{h1} = C_{h1} \cdot (T_{h1} - T_{a1}) \quad (2)$$

جدول 1 اطلاعات ورودی در سیستم مورد مطالعه

Table 1 Input data system studied			
T_{h1} (K)	T_{h2} (K)	T_{h3} (K)	T_{t1} (K)
1600	1000	600	300

تحلیل انرژی و اقتصاد انرژی استفاده شده است. براساس مطالعات آن‌ها، بیشینه تابع اکولوژی در $F=0.1$ ، 72 درصد حالت توان بیشینه است، درحالی که در $F=0.3$ فقط 24 درصد انرژی، تخریب‌شده و کاهش 60% هزینه نسبت به حالت بیشینه توان از جمله مهم‌ترین نتایج آن‌ها بوده است. دیووس [11] به بررسی ترموآکونومیک یک نیروگاه برگشت‌پذیر داخلی پرداخته است. او یک نیروگاه برگشت‌پذیر داخلی را نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه سوخت بهینه‌سازی کرده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که محدوده بازده بهینه، بین بازده کارنو و بازده بیشینه توان است.

چن و وو [12] به بررسی سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر پرداخته‌اند، آن‌ها نشان دادند که بازده سیکل ترکیبی در حالت بیشینه توان ممکن برابر با بازده کورزن-آلبورن است و همچنین دمای بهینه سیال عامل را در مبدل حرارتی بررسی کرده‌اند. بیشینه توانی که آن‌ها محاسبه کردند می‌تواند معیاری برای تعیین دمای سیال عامل و طراحی مبدل‌های حرارتی در سیکل‌های ترکیبی باشد. وو [13] به بررسی سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیری پرداخته که شکل تعمیم‌یافته سیکل کورزن-آلبورن برگشت‌پذیر داخلی است و همچنین حد بالای توان این سیکل را نیز محاسبه کرده است. نتایج او می‌تواند یک معیار اعتبارسنجی مناسب برای تحلیل سیکل‌های ترکیبی واقعی باشد. وو [14] به تجزیه و تحلیل سیکل ترکیبی برگشت‌پذیر داخلی پرداخته است. این سیکل یک سیکل آبشاری است که از چند سیکل برگشت‌پذیر داخلی تشکیل شده است. ارزیابی براساس توان بیشینه در ترمودینامیک زمان محدود انجام شده است. در عمل بازده یک سیکل بخار رانکین در مقایسه با سیکل‌های دیگر به بازده کارنو نزدیک‌تر است. با توجه به آن‌که یک موتور حرارتی با یک سیال عامل در محدوده دمایی وسیع به دلیل مشکلات متالورژی و نشت در دیگ بخار و کندانسور محدود شده است؛ بنابراین هیچ سیال عاملی در موتور حرارتی واقعی نمی‌تواند در یک محدوده دمایی وسیع کار کند و در نتیجه بازده موتورهای حرارتی پایین است. نتایج او نشان داده است که بازده یک سیکل آبشاری با چند سیال عامل در مقایسه با بازده یک سیکل با یک سیال عامل بیشتر است. ساهین و کادال [15] به مطالعه سیکل کارنو ترکیبی برگشت‌ناپذیر داخلی در حالت پایا براساس ترمودینامیک زمان محدود پرداخته‌اند، آن‌ها برگشت‌ناپذیری‌های داخلی در حالت بیشینه توان ممکن را با دو پارامتر برگشت‌ناپذیری نشان دادند که این دو پارامتر با نسبت اختلاف آنتروپی متناظر است. آن‌ها اثرات این دو پارامتر برگشت‌ناپذیری را نسبت به توان و بازده حرارتی مورد بررسی قرار دادند و همچنین نشان دادند که بیشینه توان سیکل کارنو ترکیبی برگشت‌ناپذیر داخلی نمی‌تواند از سیکل برگشت‌پذیر در همان محدوده دمایی تجاوز کند. در نهایت اثبات کردند که بازده در بیشینه توان برای یک سیکل ترکیبی برگشت‌پذیر داخلی برابر با بازده کورزن-آلبورن است.

نکته قابل توجه این پژوهش‌ها اشتراک آن‌ها در ارزیابی معیار بیشینه توان خروجی سیستم‌های برگشت‌ناپذیر خارجی در تحلیل زمان محدود است. در حال حاضر پژوهش‌های که بر پایه ترمودینامیک زمان محدود انجام شده فقط به سیکل‌های ساده مانند کارنو، برایتون، استرلینگ و غیره پرداخته است. در حالی که سیستم‌های واقعی از ادغام چند سیکل تشکیل شدند. تاکنون سیکل‌های ترکیبی برگشت‌پذیر داخلی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، فقط از یک منبع حرارتی و یک چاه حرارتی تشکیل شده‌اند که در این شرایط محاسبه توان و بازده براساس متغیرهای بی‌بعد تعریف‌شده بسیار ساده خواهد بود. در این پژوهش سیکل ترکیبی با سه منبع حرارتی مدل‌سازی و بررسی شده است. یکی از نوآوری‌های این مقاله تعریف مفهومی توان کلی

$$C_{h1} + C_{h2} + C_{h3} + C_m + C_{l1} = C_T \quad (12)$$

در سیکل ترکیبی حرارت بین منابع حرارتی، چاه حرارتی و موتورهای حرارتی دما بالا و دما پایین توسط پنج مبدل حرارتی منتقل شده است، یا به عبارت دیگر سیکل ترکیبی دارای پنج منبع انتقال حرارتی بازگشت‌ناپذیر^۱ است. نسبت هدایت حرارتی هر یک از مبدل‌های حرارتی سیستم به هدایت حرارتی کل، در واقع غالباً معرف اندازه مبدل حرارتی است. نسبت‌های هدایت حرارتی از تقسیم رابطه (12) به هدایت حرارتی کل به صورت روابط (13,14) به دست آمده است.

$$\begin{aligned} r_1 &= C_{h1}/C_T \\ r_2 &= C_{h2}/C_T \\ r_3 &= C_{h3}/C_T \\ r_4 &= C_m/C_T \\ r_5 &= C_{l1}/C_T \end{aligned} \quad (13)$$

$$r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 = 1 \quad (14)$$

در این پژوهش فرض شده که مبدل‌های حرارتی یکسان است؛ بنابراین نسبت‌های حرارتی مبدل‌های حرارتی کل سیستم برابر با 0.2 است. مجهولات سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر شامل متغیرهای مستقل ترمودینامیکی سیستم $T_{c1}, T_{c2}, T_{b1}, T_{b2}, T_{a1}, T_{a2}$ و متغیرهای مستقل انتقال حرارتی در مبدل‌های حرارتی T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 هستند. تحلیل ترمودینامیکی - انتقال حرارتی موجب افزایش درجه آزادی سیستم شده است. متغیرهای بی‌بعد برای بررسی سیستم و ساده‌سازی مسأله به صورت نسبت دمایی، روابط (15-19)، تعریف شده‌اند [16].

$$\tau_1 = T_{b1}/T_{a1} \quad (15)$$

$$\tau_2 = T_{b2}/T_{a2} \quad (16)$$

$$k = T_{b2}/T_{b1} \quad (17)$$

$$\sigma_1 = T_{c1}/T_{b1} \quad (18)$$

$$\sigma_2 = T_{c2}/T_{b2} \quad (19)$$

متغیرهای بی‌بعد $\sigma_1^{-1}, \sigma_2^{-1}, \tau_1, \tau_2$ و k بین صفر و یک هستند، بی‌بعدسازی هدفمند باعث شده است که متغیرهای بی‌بعد محدود شوند [17].

متغیرهای بی‌بعد برای ایجاد تمایز به سه گروه شامل نسبت دمایی اصلی $(\tau_1$ و $\tau_2)$ ، نسبت دمایی فرعی $(\sigma_1$ و $\sigma_2)$ و نسبت دمایی مشترک (k) تقسیم شده‌اند؛ بنابراین معکوس نسبت دمایی $(\sigma_1^{-1}$ و $\sigma_2^{-1})$ فرعی برابر با

0.86 فرض شده است. با جایگزینی روابط (15-19) در روابط (10,9)، T_{a1} به صورت رابطه (20) محاسبه می‌شود.

$$T_{a1} = r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2} / (r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 / \tau_2) \quad (20)$$

با جایگزینی T_{a1} توان کل بی‌بعد سیکل ترکیبی براساس تابعی از دمای منابع حرارتی، دمای چاه حرارتی و هدایت‌های حرارتی در مبدل‌های حرارتی بین مرزها به صورت رابطه (21) به دست آمده است [17].

$$\begin{aligned} \dot{W}_{cc}/T_{l1} \cdot C_T = r_1/T_{l1} \cdot (T_{h1} - r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2} / (r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 / \tau_2)) + r_2/T_{l1} \cdot (T_{h2} - \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2} / (r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 / \tau_2)) + r_3/T_{l1} \cdot (T_{h3} - k \cdot \sigma_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2} / (r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 / \tau_2)) - r_5/T_{l1} \cdot (T_{h1} \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot k + r_2 \cdot T_{h2} / (r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 / \tau_2 - T_{l1})) \end{aligned} \quad (21)$$

و بازده حرارتی سیستم به صورت رابطه (22) نوشته می‌شود.

$$\eta = (\dot{W}_{cc}/T_{l1} \cdot C_T) / (\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T + \dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T + \dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T) \quad (22)$$

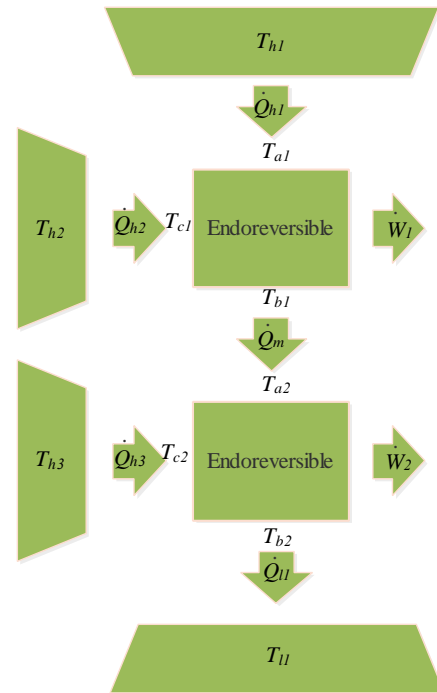


Fig. 2 Schematic system studied

شکل 2 شماتیک سیستم مورد مطالعه

نرخ گرمای انتقالی از منبع حرارتی به سیکل برگشت‌پذیر داخلی دما بالا در دمای T_{h2} به صورت رابطه (3) تعیین می‌شود.

$$\dot{Q}_{h2} = C_{h2} \cdot (T_{h2} - T_{c1}) \quad (3)$$

گرمای اتلافی سیکل دما بالا به سیکل دما پایین داده شده است، نرخ گرمای انتقالی بین دو سیکل برگشت‌پذیر داخلی به صورت رابطه (4) بیان می‌شود.

$$\dot{Q}_m = C_m \cdot (T_{b1} - T_{a2}) \quad (4)$$

توان تولیدی در سیکل برگشت‌پذیر داخلی دما بالا به صورت رابطه (5) نوشته می‌شود.

$$\dot{W}_1 = \dot{Q}_{h1} + \dot{Q}_{h2} - \dot{Q}_m \quad (5)$$

نرخ گرمای منتقل‌شده از منبع حرارتی در دمای T_{h3} به سیکل برگشت‌پذیر داخلی دما پایین به صورت رابطه (6) نوشته می‌شود.

$$\dot{Q}_{h3} = C_{h3} \cdot (T_{h3} - T_{c2}) \quad (6)$$

نرخ گرمای انتقالی به چاه حرارتی در دمای T_{l1} مطابق رابطه (7) نوشته می‌شود.

$$\dot{Q}_{l1} = C_{l1} \cdot (T_{b2} - T_{l1}) \quad (7)$$

توان تولیدی در سیکل برگشت‌پذیر داخلی دما پایین به صورت رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$\dot{W}_2 = \dot{Q}_m + \dot{Q}_{h3} - \dot{Q}_{l1} \quad (8)$$

سیکل ترکیبی از دو زیرسیستم برگشت‌پذیر داخلی تشکیل شده است؛ بنابراین قانون دوم ترمودینامیک برای هر یک از زیرسیستم‌ها به صورت روابط (10,9) بیان می‌شود.

$$\dot{Q}_{h1}/T_{a1} + \dot{Q}_{h2}/T_{c1} = \dot{Q}_m/T_{b1} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_m/T_{a1} + \dot{Q}_{h3}/T_{c2} = \dot{Q}_{l1}/T_{b2} \quad (10)$$

توان کل بی‌بعد سیکل ترکیبی از مجموع توان سیکل‌های برگشت‌پذیر داخلی به صورت رابطه (11) به دست آمده است.

$$\dot{W}_{cc} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2 \quad (11)$$

با توجه به آن‌که هدایت حرارتی کل ثابت فرض شده، رابطه (12) به صورت زیر است.

¹ Five sources of heat transfer irreversibility

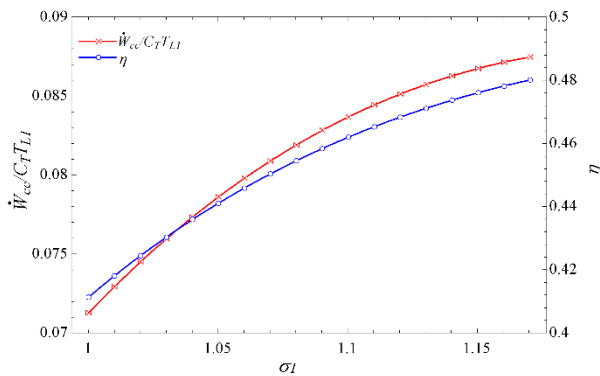


Fig. 3 Variations dimensionless total power and efficiency versus σ_1
 شکل 3 تغییرات توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به σ_1

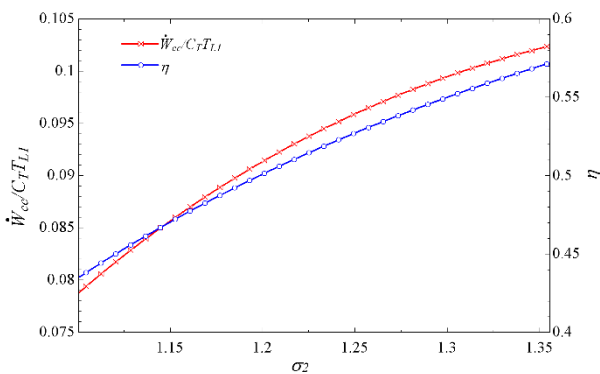


Fig. 4 Variations dimensionless total power and efficiency versus dimensionless variable σ_2
 شکل 4 رفتار توان کل بی‌بعد و بازده با تغییر متغیر بی‌بعد σ_2

در $r_1 = 0.18$ افزایش r_1 دمای متغیرهای سیستم شامل T_{a2}, T_{a1} بیشینه شده است. افزایش r_1 دما را T_{c2} و T_{c1}, T_{b2}, T_{b1} در مقایسه با سایر دماهای سیال عامل بیشتر است. نسبت هدایت حرارتی بیشتر تحت تأثیر سطح انتقال حرارت است، اما برای افزایش r_1 علاوه بر افزایش سطح انتقال حرارت، عوامل مرتبط به انتقال حرارت و طراحی مبدل‌های حرارتی مانند اتلافات حرارتی، عدد پرانتل¹، عدد رینولدز²، اصطکاک و نوع مبدل حرارتی و غیره نیز مؤثر هستند، بررسی این مفاهیم نیازمند فرضیات نوع

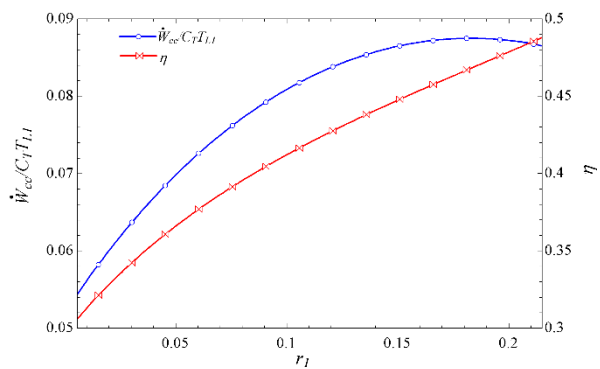


Fig.5 Variations dimensionless total power and efficiency versus r_1
 شکل 5 تغییرات توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به r_1

¹ Prandtl number
² Reynolds number

بازده نیز مشابه توان کل بی‌بعد براساس متغیرهای بی‌بعد محاسبه می‌شود؛ بنابراین بازده حرارتی سیستم به صورت رابطه (23) به دست آمده است.

$$\eta = \frac{(r_1/T_{l1} \cdot (T_{h1} - r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) + r_2/T_{l1} \cdot (T_{h2} - \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2))) + r_3/T_{l1} \cdot (T_{h3} - k \cdot \sigma_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) - r_5/T_{l1} \cdot (k \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2 - T_{l1})))/\{(r_1/T_{l1} \cdot (T_{h1} - r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) + r_2/T_{l1} \cdot (T_{h2} - \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2))) + r_3/T_{l1} \cdot (T_{h3} - k \cdot \sigma_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2))\} \quad (23)$$

بازده حرارتی سیکل ترکیبی برگشت‌ناپذیر برخلاف بازده کارنو به هدایت حرارتی وابسته است. تولید توان مکانیکی هدف اصلی علم مهندسی ترمودینامیک است. افزایش معیارهای تحلیل مانند بازده انرژی، بازده انرژی، نرخ هزینه تولید، نرخ هزینه سرمایه‌گذاری، انرژی تخریب‌شده و هزینه اثرات محیط‌زیستی سبب شده محققان به جای تحلیل و تلاش برای افزایش توان خروجی که هدف ترمودینامیک است، معیاری را انتخاب کنند که در تناقض با هدف اصلی ترمودینامیک است.

4- مطالعه پارامتریک

در این بخش رفتار بازده و توان کل بی‌بعد نسبت به تغییرات نسبت‌های دمایی اصلی، فرعی و مشترک بررسی شده است. در ارزیابی یک متغیر سایر متغیرها ثابت فرض شده‌اند؛ بنابراین با در نظر گرفتن قیدهای سیستم هر متغیر در محدوده خاصی دارای پاسخ است. فرضیات پارامترها به شیوه‌ای تعیین شده‌اند که نتایج محاسبات تناقضی با قانون دوم ترمودینامیک نداشته باشند. در پیاده‌سازی سیستم‌هایی که بر پایه ترمودینامیک زمان محدود تحلیل می‌شوند می‌توان از ترسیم منحنی توان برحسب بازده به عنوان یک ابزار صحت‌سنجی محاسبات و نتایج استفاده کرد. براساس شکل 3 با افزایش σ_1 توان کل بی‌بعد و بازده افزایش یافته است، اما در ابتدا شیب توان کل بی‌بعد بیشتر از شیب بازده است، سپس شیب توان کل بی‌بعد و بازده یکسان شده است. افزایش σ_1 نشان می‌دهد که نرخ افزایش دمای T_{c1} در مقایسه با نرخ افزایش T_{b1} بیشتر است.

شکل 4 نشان‌دهنده رفتار توان بی‌بعد و بازده با تغییر σ_2 است. با افزایش σ_2 توان کل بی‌بعد و بازده افزایش یافته است. مشابه σ_1 ، افزایش σ_2 نشان می‌دهد نرخ افزایش دمای T_{c2} نسبت به نرخ افزایش T_{b2} بیشتر است. همان‌طور که در شکل 3 و 4 مشاهده می‌شود، رفتار نسبت‌های دمایی فرعی (σ_1 و σ_2) یکسان است؛ بنابراین فرض یکسان بودن مقدار 1.163، معقول و منطقی به نظر می‌رسد.

شکل 5 نشان‌دهنده رفتار توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به متغیر بی‌بعد r_1 است. براساس شکل 5 با افزایش r_1 بازده و توان کل بی‌بعد افزایش یافته است. افزایش r_1 سبب افزایش $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ شده است. این افزایش دلیل اصلی افزایش توان کل بی‌بعد است. در ابتدا عبارت گرمای انتقالی به چاه حرارتی یا $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ بر عبارت $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ غلبه کرده است و سپس با افزایش متغیر بی‌بعد r_1 ، جمله $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ اثر افزایشی جمله

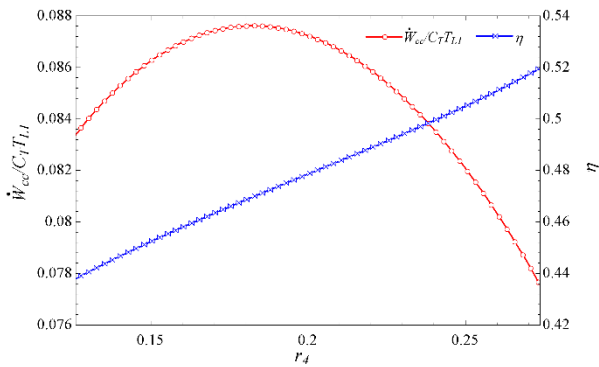


Fig.8 dimensionless total power and efficiency versus r_4
 شکل 8 توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به r_4

یافته‌اند. توان کل بی‌بعد در $r_4 = 0.183$ به بیشینه‌ترین مقدار خود رسیده است. روشن است که افزایش r_4 سبب افزایش T_{a2} , T_{c1} و T_{c2} با شیب به نسبت تندی شده است.

شکل 9 نشان‌دهنده تغییرات τ_1 نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده است. براساس شکل 9 با افزایش τ_1 ، توان کل بی‌بعد و بازده افزایش یافته است. از نظر رفتاری متغیرها مقدار جمله‌های $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ هر دو افزایش یافته‌اند و شیب جمله $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ در مقایسه با $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ بیشتر است.

شکل 10 اثر افزایش τ_2 را نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده نشان می‌دهد. هر دو متغیر وابسته ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته‌اند؛ بنابراین دارای یک بیشینه هستند. رفتار بازده و توان کلی بی‌بعد ناشی از افزایش عبارت‌های بی‌بعد $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$, $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$, $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ و کاهش $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ است. نرخ افزایشی $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ ابتدا تند و به تدریج کاهش یافته است. در نتیجه عامل اصلی افزایش بازده و توان کلی بی‌بعد افزایش دمای T_{b2} و کاهش T_{a2} است.

براساس شکل‌های 9 و 10 مقدار بیشینه توان کل بی‌بعد به ازای نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا برابر با 0.7576 و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما پایین برابر با 0.849 به دست آمده است. نتایج مربوط به بیشینه توان کل بی‌بعد براساس شکل 9 و 10 در جدول 2 نشان داده شده است. به منظور ارزیابی و محاسبه دماهای مختلف سیکل ترکیبی مورد تحلیل از مفهوم فناوری پینچ استفاده شده است. فناوری پینچ در سال 1982 توسط لینهوف به منظور کمینه کردن نیازهای انرژی ارائه شده است [18].

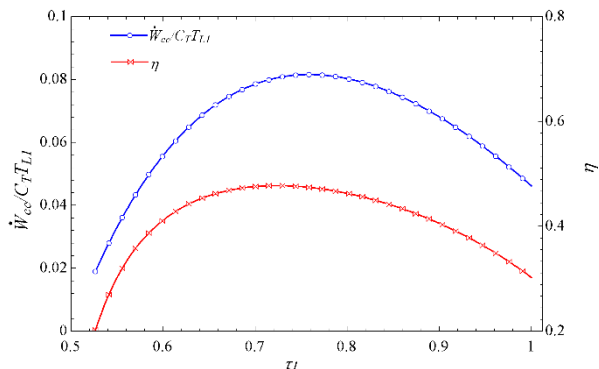


Fig.9 Efficiency and dimensionless total power versus τ_1
 شکل 9 تغییرات توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به τ_1

سیال عامل، نوع جریان و نوع مبدل حرارتی است که با نگاه کلی و جامع این پژوهش در تناقض است.

شکل 6 نشان می‌دهد که با افزایش r_2 توان کل بی‌بعد کاهش یافته است. دلیل کاهش توان کل بی‌بعد کاهش جمله $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ با نرخ به نسبت تندی است. براساس شکل 6 بازده افزایش یافته است. برای ارزیابی دقیق‌تر بازده باید اثرات عبارت‌های بی‌بعد $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$, $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ مورد بررسی قرار گیرد؛ بنابراین با افزایش r_2 عبارت‌های بی‌بعد $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$, $\dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ در حال کاهش و عبارت بی‌بعد $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است؛ بنابراین عبارت $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ در $r_2 = 0.12$ به بیشینه مقدار خود رسیده است.

شکل 7 نشان‌دهنده تأثیر متغیر بی‌بعد r_3 نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده است. با افزایش r_3 توان کل بی‌بعد و بازده کاهش یافته است. عامل اصلی کاهش توان کل بی‌بعد و بازده ناشی از کاهش عبارت‌های بی‌بعد $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ است، همچنین با افزایش r_3 جمله‌های $\dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ با شیب کمی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته‌اند.

شکل 8 اثر r_4 را نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده نشان می‌دهد. با افزایش r_4 توان کل بی‌بعد افزایش و سپس کاهش یافته است و بازده با افزایش r_4 افزایش یافته است. با افزایش r_4 عبارت‌های $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ با شیب به نسبت تندی در حال کاهش هستند، اما عبارت‌های $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ در ابتدا افزایش و سپس کاهش

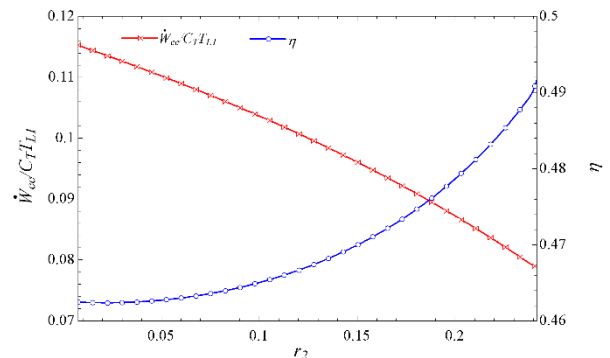


Fig.6 Variations dimensionless total power and efficiency versus r_2
 شکل 6 تغییرات توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به r_2

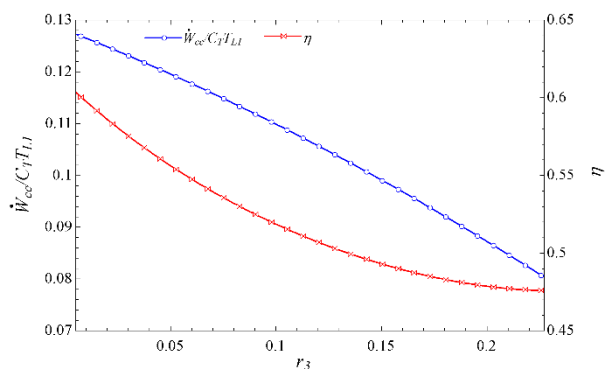


Fig.7 Variations dimensionless total power and efficiency versus r_3
 شکل 7 تغییرات توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به r_3

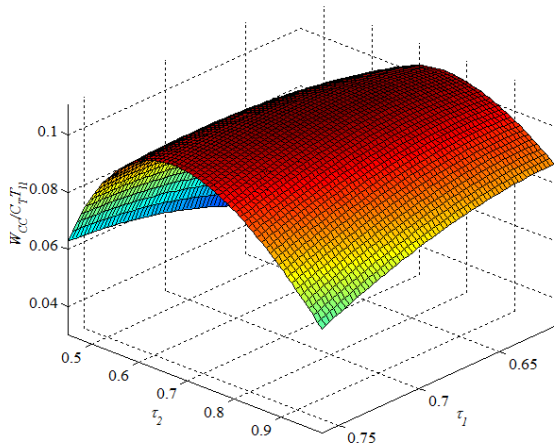


Fig.11 Variations dimensionless total power versus τ_1 و τ_2

شکل 11 تغییرات توان کل بی‌بعد نسبت به τ_1 و τ_2

به منظور محاسبه بیشینه توان کل بی‌بعد باید گرادیان رابطه (21) نسبت به نسبت‌های دمایی τ_1 و τ_2 برابر با صفر قرار گیرد و در نتیجه رابطه (24) به دست می‌آید. به عبارت دیگر اگر نسبت دمایی اصلی سیکل ترکیبی در رابطه (24) صدق کند، بیشینه‌ترین توان کل بی‌بعد سیکل ترکیبی در شرایط مبدل‌های حرارتی یکسان به دست می‌آید.

$$119.511913 \cdot \tau_1 / (0.978 \cdot \tau_1 - 0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / \tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \cdot \tau_1 + 200) + 0.6) \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200) - 0.7734) / (0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / ((\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) - (0.00108667 \cdot \tau_1 - (0.326(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / (0.978 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))) / ((\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \cdot ((0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)) - (22221.0363 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2) + (\tau_1 \cdot 7407.012096 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot ((43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2) - 0.978) / ((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / \tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) / ((\tau_1 \cdot (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / \tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) - (0.0017533 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / ((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / \tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) - (0.9145386667 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / ((\tau_1 \cdot (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / \tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) - (0.001086667 \cdot \tau_1 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200) \cdot ((0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 200.0)) / (\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)) - (\tau_1 \cdot 22221.03) / (\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / ((\tau_2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / (\tau_2^2 \cdot ((43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2)$$

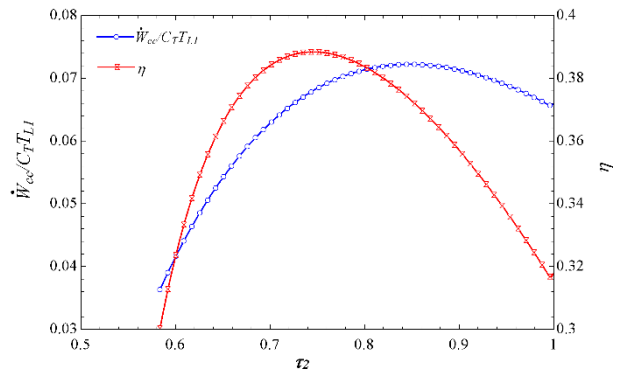


Fig.10 Efficiency and dimensionless total power changes versus τ_2

شکل 10 توان کل بی‌بعد و بازده نسبت به τ_2

جدول 2 نتایج بیشینه توان کل بی‌بعد براساس شکل‌های 9 و 10

Table 2 Results maximum dimensionless total power based on figures 9 and 10

متغیرها	حالت بیشینه توان کل بی‌بعد شکل 10	حالت بیشینه توان کل بی‌بعد شکل 9
T_{a1} (K)	1485.43	1286.95
T_{a2} (K)	568.14	868.99
T_{b1} (K)	742.71	974.96
T_{b2} (K)	482.06	434.49
T_{c1} (K)	863.62	994.9
T_{c2} (K)	560.54	505.09
τ_1	0.5	0.7576
τ_2	0.849	0.5
$\dot{W}_{cc} / T_{l1} \cdot C_T$	0.072	0.0816
η (%)	37.10	47.45

پینچ به کمترین دمای بین منبع و چاه حرارتی اطلاق می‌شود. به منظور ارزیابی دقیق‌تر و انتخاب بهینه‌ترین پاسخ فرض شده که اختلاف دما در نقطه پینچ¹ برابر با 5 کلوین است [19].

5- بهینه‌سازی توان کل بی‌بعد

بهینه‌سازی، بیشینه یا کمینه کردن متغیر وابسته با تغییر متغیرهای تصمیم است. بهینه‌سازی یکی از ابزارهای کاربردی مهندسی برای ارتقا سیستم است. در بخش مطالعه پارامتریک هر یک از متغیرهای بی‌بعد شامل نسبت‌های دمایی و نسبت‌های هدایت حرارتی به طور مجزا نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده در شکل‌های 2-10 مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین به منظور ارزیابی دقیق‌تر با جایگزینی پارامترهای ثابت در رابطه (21) شکل 11 به دست آمده است. شکل 11 اثرات توان کل بی‌بعد، نسبت به تغییرات نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما پایین را نشان می‌دهد. شکل 11 نشان‌دهنده ارتباط و وابستگی نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما پایین به یکدیگر است. به منظور اطمینان این نتیجه براساس مرجع [2] قابل صحت‌گذاری است. به منظور بهینه‌سازی سیکل ترکیبی باید بیشینه تابع هدف که در حقیقت توان کل بی‌بعد است، نسبت به تغییرات نسبت‌های دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا و دما پایین محاسبه شود.

¹ pinch-point

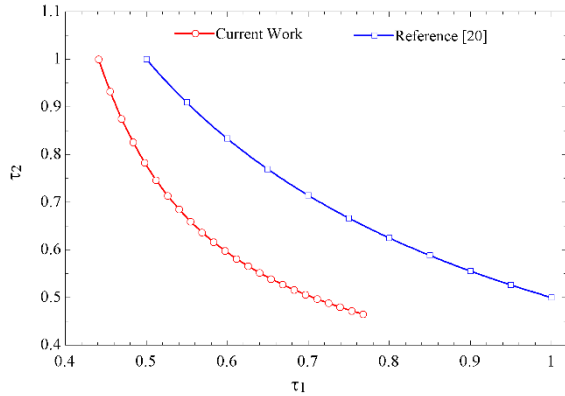


Fig.12 Variations thermal efficiency versus τ_1 و τ_2

شکل 12 رابطه بین τ_1 و τ_2

دما بالا و نسبت دمایی موتور حرارتی دما پایین است. علاوه بر این نتایج نسبت‌های دمایی این پژوهش و مرجع [17] نشان داده که بیانگر صحت محاسبات است. همان‌طور که در شکل 13 به درستی مشخص است، در کل داده‌هایی که از رابطه (24) به دست آمده است، نقاط بیشینه بازده و بیشینه توان کل بی‌بعد، برهم منطبق نیستند؛ بنابراین افزایش بازده تضمین‌کننده افزایش توان کل بی‌بعد نیست، اما در این مسأله خاص بعضی از داده‌ها قید $T_{h2} > T_{c1}$ یا به عبارت دیگر قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کنند.

به منظور محاسبه بیشینه توان کل بی‌بعد داده‌های ناقص قانون دوم ترمودینامیک حذف شده‌اند. رفتار کل داده‌ها نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش نسبت دمای τ_1 و کاهش نسبت دمای τ_2 بازده و توان کل بی‌بعد افزایش یافته و به نقطه بیشینه توان کل بی‌بعد رسیده است، سپس با افزایش نسبت دمای τ_1 و کاهش نسبت دمای τ_2 توان کل بی‌بعد کاهش یافته و بازده افزایش یافته است و در نهایت به نقطه بیشینه بازده رسیده، بازده و توان کل بی‌بعد، هردو کاهش پیدا کرده است. نتایج بیشینه توان کل بی‌بعد در جدول 3 نشان داده شده است.

براساس جدول 3 نتایج براساس دو پاسخ بیان شده است پاسخ اول به دلیل نقض شرط نقطه پینچ قابل قبول نیست، در نتیجه پاسخ دوم که قیده‌های قانون دوم ترمودینامیک سیستم و نقطه پینچ را ارضا کرده قابل قبول و منطقی است. براساس جدول 3 کمترین تغییرات مربوط به T_{b2} و T_{c2} است.

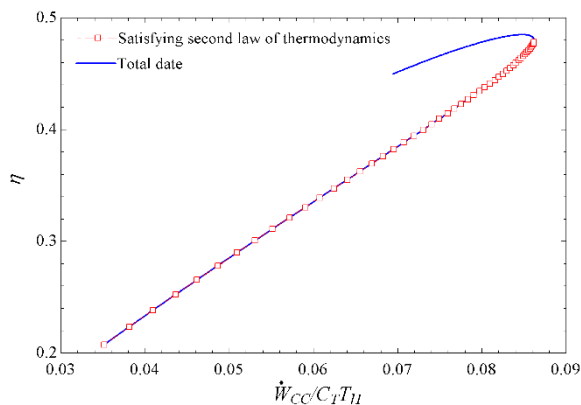


Fig.13 Variations dimensionless total power versus Efficiency

شکل 13 تغییرات توان نسبت به بازده

$$\begin{aligned}
 & -0.978) / ((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 \\
 & + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \\
 & \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)))^2 - (0.00175333 \cdot \tau_1 \\
 & \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) \cdot ((0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6))) - (22221.03629 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (\tau_1 \\
 & \cdot 521.6 + 200.0)) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2) \\
 & + (7407.012096 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \\
 & \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot ((43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2) - 0.978) \\
 &) / (((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 \\
 & / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) + 0.6)))^2 \cdot (43.56 / \tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6) - (39.83730432 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 \\
 & / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \\
 & \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \\
 & \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) \cdot ((43.56 \\
 & / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) - (0.000666666666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & \cdot ((0.0652 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6))) - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6) + (14.2 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0))) / (\tau_2^3 \cdot ((43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / ((0.978 \cdot \tau_1 - (\tau_1 \\
 & \cdot 0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\
 & / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))))^2 \\
 & - (0.000350666666667 \cdot \tau_1 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) / \\
 & ((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (\tau_1 \\
 & \cdot 521.6 + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) + 0.6))) \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6)) - (0.001086666666667 \cdot \tau_1 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & \cdot ((0.0652 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6))) - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6) + (14.20056 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_1 + 130.68 / (521.6 \\
 & \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2^3 \cdot ((43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / ((0.978 \\
 & \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 \\
 & + 200.0))) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\
 & + 0.6)))^2 - (0.0763752 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 \\
 & / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot (0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \\
 & \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \\
 & \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))) \\
 & \cdot ((43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))^2) - (\tau_1 \\
 & \cdot 0.00175333 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\
 & \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \cdot ((0.0652 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 \\
 & / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)) - (0.326 \cdot \tau_1 \\
 & \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2^2 \cdot \\
 & (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6) + \tau_1 \cdot (\\
 & \cdot 14.20056 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\
 & \cdot \tau_2 / (\tau_2^3 \cdot ((43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6))^2 \\
 & \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \\
 & \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) / (\tau_2 \\
 & \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)))^2 \cdot (43.56 \\
 & / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) + 0.6)) = 0 \quad (24)
 \end{aligned}$$

رابطه (24) نشان‌دهنده رابطه بین τ_1 و τ_2 در حالت بیشینه توان است. این رابطه فقط براساس اطلاعات ورودی و فرضیات یادشده اعتبار دارد. رابطه (24) شکل 12 براساس رابطه (24) ترسیم شده است. به طوری که با افزایش نسبت دمایی موتور حرارتی دما بالا نسبت دمایی موتور حرارتی دما پایین کاهش می‌یابد و بالعکس.

شکل 12 نشان‌دهنده نتایج تناسب معکوس نسبت دمایی موتور حرارتی

تحلیل سیستم‌های ترمودینامیکی معرفی کرده است؛ بنابراین بهترین شرایط برای عملیاتی کردن نیروگاه‌های ترکیبی براساس بیشینه توان کل بی‌بعد مهیا می‌شود. این پژوهش می‌تواند رویکرد نوینی برای بهبود عملکرد سیستم‌های ترمودینامیک براساس معیار بیشینه توان مطلوب باشد. در نهایت بیشینه توان کل بی‌بعد و بازده حرارتی مرتبط به آن به ترتیب برابر با 0.086102 و 47.81 درصد به دست آمده است.

8- فهرست علائم

C	هدایت حرارتی (kW/K)
k	نسبت دمای مشترک
P	توان (kW)
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kW)
T	دما (K)
U	ضریب انتقال حرارت (kW/m ² K)
η	بازده
σ	نسبت دمای فرعی
τ	نسبت دمای اصلی
زیر نویس‌ها	
h	دما بالا
l	دما پایین
mp	بیشینه توان
T	کل

9- مراجع

- [1] B. Andresen, *Finite-Time Thermodynamics*, PhD Thesis, University of Copenhagen, Sweden, 1983.
- [2] A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, pp. 69-101, New York: Wiley, 2016.
- [3] F. Curzon, B. Ahlborn, Efficiency of a Carnot engine at maximum power output, *American Journal of Physics*, Vol. 43, No. 1, pp. 22-24, 1975.
- [4] Z. Yan, J. Chen, Optimal performance of a generalized Carnot cycle for another linear heat transfer law, *Chemical Physics*, Vol. 92, No. 3, pp. 1994-1998, 1990.
- [5] L. Chen, Z. Yan, The effect of heat-transfer law on performance of a two-heat-source endoreversible cycle, *Chemical Physics*, Vol. 90, No. 7, pp. 3740-3743, 1989.
- [6] C. Wu, Power optimization of a finite-time Carnot heat engine, *Energy*, Vol. 13, No. 9, pp. 681-687, 1988.
- [7] J. Chen, Z. Yan, G. Lin, B. Andresen, On the Curzon -Ahlborn efficiency and its connection with the efficiencies of real heat engines, *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, No. 2, pp. 173-181, 2001.
- [8] M. M. Naserian, S. Farahat, F. Sarhaddi, New exergy analysis of a regenerative closed Brayton cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 134, No. Supplement C, pp. 116-124, 2017.
- [9] M. M. Naserian, S. Farahat, F. Sarhaddi, Exergoeconomic multi objective optimization and sensitivity analysis of a regenerative Brayton cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, No. Supplement C, pp. 95-105, 2016.
- [10] M. M. Naserian, S. Farahat, F. Sarhaddi, Finite time exergy analysis and multi-objective ecological optimization of a regenerative Brayton cycle considering the impact of flow rate variations, *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, No. Supplement C, pp. 790-800, 2015.
- [11] A. De Vos, Endoreversible thermoeconomics, *Energy Conversion and Management*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-5, 1995.
- [12] J. Chen, C. Wu, Maximum specific power output of a two-stage endoreversible combined cycle, *Energy*, Vol. 20, No. 4, pp. 305-309, 1995.
- [13] C. Wu, Maximum obtainable power of a carnot combined power plant, *Heat Recovery Systems and CHP*, Vol. 15, No. 4, pp. 351-355, 1995.
- [14] C. Wu, Power performance of a cascade endoreversible cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 30, No. 3, pp. 261-266, 1990.
- [15] B. Şahin, A. Kodal, Steady-state thermodynamic analysis of a combined Carnot cycle with internal irreversibility, *Energy*, Vol. 20, No. 12, pp. 1285-1289, 1995.
- [16] A. Bejan, Theory of heat transfer-irreversible power plants, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 6, pp. 1211-1219, 1988.

جدول 3 نتایج بیشینه توان کل بی‌بعد براساس شکل 13

Table 3 Results maximum dimensionless total power based on figure13

متغیرها	پاسخ دوم، حالت بیشینه توان کل بی‌بعد	جواب اول، حالت بیشینه توان کل بی‌بعد
T_{a1} (K)	1422.1789	1419.5786
T_{a2} (K)	744.1885	748.2694
T_{b1} (K)	855.5828	858.7031
T_{b2} (K)	441.0061	440.5062
T_{c1} (K)	994.8638	998.492
T_{c2} (K)	512.7978	512.2165
τ_1	0.6016	0.6049
τ_2	0.5926	0.5887
$\dot{W}_{CC}/T_{11} \cdot C_T$	0.086102	0.086138
η (%)	47.81	47.91

6- اعتبارسنجی سیستم

به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از محاسبات و معادلات به دست آمده، نتایج عددی با مقاله [13] مقایسه و در جدول 4 نشان داده شده است. به منظور اعتبارسنجی باید اطلاعات ورودی تغییر یابد، به طوری که دمای منبع دما بالا 1400 کلوین و دمای چاه حرارتی 285 کلوین است و همچنین هدایت حرارتی مبدل حرارتی بین منبع حرارتی T_{h1} و موتور حرارتی دما بالا (C_{h1}) ، هدایت حرارتی بین موتورهای حرارتی دما بالا و دما پایین (C_m) برابر با 1 مگاوات بر کلوین است. هدایت حرارتی موتور حرارتی دما پایین و چاه حرارتی (C_{l1}) برابر با 2 مگاوات بر کلوین است. با توجه به این که منبع حرارتی با دمای T_{h2} و T_{h3} در مقاله [13] وجود ندارد، هدایت حرارتی مبدل حرارتی متناظر آن‌ها برابر با صفر فرض شده است.

7- نتیجه گیری

در این پژوهش سیکل ترکیبی براساس مفاهیم ترمودینامیک زمان محدود با در نظر گرفتن برگشت ناپذیری خارجی در مرز بین زیر سیستم‌ها، منابع حرارتی و چاه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین این سیستم دارای پنج منبع انتقال حرارتی برگشت ناپذیر است؛ بنابراین براساس محاسبات جبری توان کل بی‌بعد و بازده براساس متغیرهای بی‌بعد شامل نسبت دمای اصلی شامل $(\tau_1$ و $\tau_2)$ ، نسبت دمای فرعی شامل $(\sigma_1$ و $\sigma_2)$ ، نسبت دمای مشترک (k) و هدایت‌های حرارتی محاسبه شده است. اثرات هر یک از متغیرهای بی‌بعد نسبت به توان کل بی‌بعد و بازده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه پارامتری نشان داده که راه کار افزایش توان کل بی‌بعد، افزایش متغیرهای بی‌بعد r_1 ، r_4 ، r_5 ، r_6 و کاهش r_2 ، r_3 است و همچنین راه کار افزایش بازده، افزایش متغیرهای بی‌بعد r_1 ، r_2 ، r_4 ، r_5 و کاهش r_3 است. این پژوهش توان کل بی‌بعد را به عنوان معیار جدید و کاربردی برای

جدول 4 مقایسه نتایج پژوهش حاضر و مرجع [13]

Table 4 Comparison of the results of the present study and the reference [13]

متغیرها	پژوهش حاضر	نتایج مرجع [13]
W_{CC} (MW)	168/72	169
W_1 (MW)	88/236	88
W_2 (MW)	80/37	81
Q_{h1} (MW)	308/256	307
Q_m (MW)	220/02	219
Q_{l1} (MW)	139/65	138
η_{mp} (%)	54/71	55

- [19] P. J. Dechamps, Advanced combined cycle alternatives with the latest gas turbines, *Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 120, No. 2, pp. 350-357, 1998.
- [20] E. Açikkalp, Exergetic sustainability evaluation of irreversible Carnot refrigerator, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 436, No. Supplement C, pp. 311-320, 2015.
- [17] D. Winterbone, *Advanced Thermodynamics for Engineers*, First Edition, pp. 136-150, London: Arnold, 1997.
- [18] B. Linnhoff, D. W. Townsend, D. Boland, G. F. Hewitt, B. E. A. Thomas, A. R. Guy, R. H. Marsland, *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use Of Energy*, pp. 36-50, England: Institution of Chemical Engineers, 1982.