ماهنامه علمى پژوهشى



محدود

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی سیکل ترکیبی بر گشتناپذیر براساس معیار توان بیشینه در ترمودینامیک زمان

حكىدە

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

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان 3- دكترى، مهندسى مكانيك، دانشگاه سيستان و بلوچستان، زاهدان * زاهدان، صندوق پستى 987-825، farahat@hamoon.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 12 شهریور 1396 پذیرش: 03 آبان 1396 ارائه در سایت: 27 آبان 1396	یکی از مهم ترین دستاوردهای کارنو ایجاد یک محدودیت برای موتورهای حرارتی بوده است، این محدودیت، معیاری برای سنجش و مقایسه عملکرد موتورهای حرارتی است. ترمودینامیک کلاسیک بهصورت جامع به فرایندهای برگشت پذیر و تعادلی می پردازد، اما اثرات پدیدههای انتقال را نادیده می گیرد، درحالی که فرایندهای واقعی برگشت ناپذیر و دارای محدودیت های زمان و اندازه هستند، نکته دیگر این است که همه ی
كليد واژمحان:	فرایندهای واقعی، برگشتناپذیر هستند. از سوی دیگر ارتباط بسیار نزدیک ترمودینامیک، مکانیک سیالات و انتقال حرارت باعث شده است،
سيكل تركيبي برگشتناپذير	ترمودینامیک از تحلیل تئوری به سمت تحلیل جامع و حقیقی حرکت کند. در این مطالعه به تحلیل سیکل ترکیبی برگشتناپذیر در ترمودینامیک
ترمودینامیک زمان محدود میار بیشینه توان	زمان محدود پرداخته شده است. سیکل ترکیبی مورد مطالعه از دو سیکل برگشتپذیر داخلی و سه منبع حرارتی تشکیلشده 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. درنهایت 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 بیبعد تعریفشده نسبت به توان کل بیبعد و بازده مورد بررسی قرارگرفته است. در این پژوهش از مطالعه پارامتری به عنوان معیاری برای بهبود سیکل ترکیبی برگشتناپذیر در ترمودینامیک زمان محدود استفادهشده 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 26000 و 17.8% 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	ABSTRACT
Original Research Paper Received 03 September 2017 Accepted 25 October 2017 Available Online 18 November 2017	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
Keywords: Combined cycle irreversible Finite time thermodynamics The criteria of maximum power	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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ahlborn model

1- مقدمه

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 میکروسکوپیک انرژی به مایکروسکوپیک انرژی بر پایه تعادل تعریف شده است. ترمودینامیک زمان محدود در 1975 توسط بری و سالامون ابداع شد [1]. ترمودینامیک زمان محدود ناشی از یک نگاه واگرایی به علم ترمودینامیک است. ترمودینامیک زمان محدود با توجه مباحث انتقال حرارت مانند هدایت حرارتی یک شکل توسعه یافته مایکروسکوپیک و از سوی دیگر ترکیبی از ایدههای کلاسیک مانند اگزرژی، دسترس پذیری 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 حقيقت شكل بهبود يافته ترموديناميك كلاسيك است و اثرات برگشتناپذیریها و محدودیتهای فیزیکی را در نظر می گیرد و در نهایت به کمینه کردن آنها می پردازد. از نگاه جامع تر ترمودینامیک زمان محدود همان كمينه كردن آنتروپى توليدى است [2]. كورزن و آلبورن' [3] با هدف به دست آوردن بیشینه توان به بررسی سیکل کارنو برگشتناپذیر یا به عبارت ديگر سيكل كارنو تعميم يافته با فرض مقاومت حرارتى محدود پرداختهاند. سیکل کورزن – آلبورن بین یک منبع حرارتی با دمای T_H و یک چاه حرارتی با دمای T_L کار می کند 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 تعميم يافته يک سيکل برگشتپذير داخلي^۲ است. تحليل مدل کورزن-آلبورن با استفاده از فرضيات حالتپايا، ثابت بودن سطح انتقال حرارت، منبع حرارتی با ظرفیت محدود انجام شده است. شکل 1 دیاگرام دما- آنتروپی سیکل کارنو برگشت پذیر 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)^T و هدایت حرارتی به دست آوردهاند، سپس با مشتق گیری 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.

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

سيكل كارنو برگشتناپذير يا سيكل كورزن- 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 آدیاباتیک و دو فرایند با شار ثابت



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

شكل 1 دياگرام دما آنتروپي سيكل كارنو مدل كورزن- آلبورن

تشكيل شده است. فرضيات آنها شامل اختلاف دماي ثابت بين سيال 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 سيكل كارنو براساس قانون انتقال حرارت نيوتن و حالت تعميم يافته است. چن و یان [5] به بررسی یک سیکل برگشت پذیر 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 علاوهبر 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 كارنو زمان محدود با يك نيروگاه واقعى پرداخته است. نتايج وو [6] نشان میدهد که سیکل موتور حرارتی کارنو زمان محدود نسبت به سیکل کارنو ايده آل به حالت واقعى نزديكتر است. چن و يان [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 واقعي از بازده كورزن- البورن بيشتر شود و بازده كورزن- البورن را نمي توان 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

¹ Curzon-Ahlborn

² Endoreversible ³ $x = T_{\rm H} - T_{\rm W}$ 3 $y = T_{\rm L} - T_{\rm C}$

تحلیل اگزرژی و اقتصاد اگزرژی 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 اگزرژی، تخریب شده و کاهش 60% هزینه F=0.3نسبت به حالت بیشینه توان از جمله مهم ترین نتایج آن ها بوده است. دیووس [11] به بررسی ترمواکونومیک یک نیروگاه برگشتپذیر داخلی پرداخته است. او یک نیروگاه برگشت پذیر داخلی را نسبت به هزینه سرمایه گذاری 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 مبدل های حرارتی در سیکل های ترکیبی باشد. وو [13] به بررسی سیکل ترکیبی برگشتناپذیری پرداخته که شکل تعميم يافته سيكل كورزن- آلبورن برگشت پذير داخلي است و همچنين 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 برگشت پذیر داخلی پرداخته است. این سیکل یک سیکل آبشاری است که از چند سیکل برگشتپذیر داخلی تشکیلشده 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 آن که 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 نمی تواند از سیکل برگشت پذیر در همان محدوده دمایی تجاوز کند. در نهایت اثبات کردند که بازده در بیشینه توان برای یک سیکل ترکیبی برگشت پذیر داخلی برابر با بازده كورزن - 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 برگشت پذیر داخلی که مورد مطالعه قرار گرفتهاند، فقط از یک منبع حرارتی و یک چاه حرارتی تشکیل شدهاند که در این شرايط محاسبه توان و بازده براساس متغيرهای بیبعد تعريفشده بسيار 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

بیبعد که نشان دهنده اهمیت توان مکانیکی است و علاوهبر 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 تحقيقات فقط محدوديت زمان و محدوديت اندازه را اعمال كردند. اين موضوع سبب شده است که در مدلسازی ریاضی دادههایی که ناقض 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. علاوهبر 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- توصيف سيستم

سیستم مورد مطالعه یک سیکل ترکیبی است که از دو موتور حرارتی برگشت پذیر داخلی تشکیل شده است. شکل 2 شماتیک سیکل ترکیبی مورد مطالعه را نشان میدهد. حرارت از منابع حرارتی با دماهای T_{h2} و T_{h2} به موتور حرارتی برگشت پذیر دما بالا منتقل می شود، حرارت اتلافی موتور برگشت پذیر دما بالا و گرمای انتقالی از منبع حرارتی با دمای T_{h3} ، گرمای موتور حرارتی دما پایین را تأمین می کند 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.

- فرضيات سيستم شامل موارد زير 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 ورودى براساس مراجع [14,6] فرض شدهاند.
 - 4- سيستم پايا 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- تحليل سيستم براساس ترموديناميك زمان محدود

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

$$Q_{h1} = C_{h1} \cdot (T_{h1} - T_{a1}) \tag{2}$$

جدول 1 اطلاعات ورودی در سیستم مورد مطالعه

Table 1 Input date s	system studied			
$T_{h1}(K)$	$T_{h2}(\mathbf{K})$	$T_{h3}(K)$	$T_{l1}(\mathbf{K})$	
1600	1000	600	300	
				_

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03]

335





Fig. 2 Schematic system studied

شكل 2 شماتيك سيستم موردمطالعه

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

$$\dot{Q}_m = C_m \cdot (T_{b1} - T_{a2})$$
 (4)
(5) توان توليدي در سيكل د گشت بذير داخلي دما بالا به صورت رابطه

نوشته می شود. $\dot{W}_1 = \dot{Q}_{h1} + \dot{Q}_{h2} - \dot{Q}_m$ (5)

نرخ گرمای منتقل شده از منبع حرارتی در دمای
$$T_{h3}$$
 به سیکل
برگشت پذیر داخلی دما پایین به صورت رابطه (6) نوشته می شود.
 $\dot{Q}_{h3} = C_{h3} \cdot (T_{h3} - T_{c2})$ (6)

$$\dot{Q}_{l1} = C_{l1} \cdot (T_{b2} - T_{l1})$$
(7)
توان تولیدی در سیکل برگشتپذیر داخلی دما پایین به صورت رابطه

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

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

$$\dot{Q}_m/T_{a1} + \dot{Q}_{h2}/T_{c2} = \dot{Q}_{11}/T_{h2}$$
(9)
$$\dot{Q}_m/T_{a1} + \dot{Q}_{h2}/T_{c2} = \dot{Q}_{11}/T_{h2}$$
(10)

 $\dot{W}_{cc} = \dot{W}_1 + \dot{W}_1$

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

(12) $C_{h1} + C_{h2} + C_{h3} + C_m + C_{l1} = C_T$ (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 سیستم به هدایت است. نسبت هدایت حرارتی هر یک از مبدل های حرارتی است. نسبتهای 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 (14,13) به دست آمده است.

$$\begin{aligned} r_1 &= C_{h1}/C_T \\ r_2 &= C_{h2}/C_T \\ r_3 &= C_{h3}/C_T \\ r_4 &= C_m/C_T \\ r_5 &= C_{l1}/C_T \\ r_1 &+ r_2 + r_3 + r_4 + r_5 = 1 \end{aligned} \tag{13}$$

نسبتهای حرارتی مبدلهای حرارتی کل سیستم برابر با 0.2 است. مجهولات سیکل ترکیبی برگشتناپذیر شامل متغیرهای مستقل ترمودینامیکی سیستم میکل ترکیبی برگشتناپذیر شامل متغیرهای مستقل ترمودینامیکی سیستم مبدلهای حرارتی در مبدلهای حرارتی r_{c1} r_{2} r_{1} r_{2} r_{3} r_{2} r_{2} r_{1} r_{2} r_{2} r_{2} r_{2} r_{2} r_{2} r_{3} r_{2} r_{2} r_{1} r_{2} $r_$

$$\begin{split} \tau_1 &= T_{b1}/T_{a1} & (15) \\ \tau_2 &= T_{b2}/T_{a2} & (16) \\ k &= T_{b2}/T_{b1} & (17) \\ \sigma_1 &= T_{c1}/T_{b1} & (18) \\ \sigma_2 &= T_{c2}/T_{b2} & (19) \end{split}$$

متغیرهای بیبعد σ_2^{-1} ، σ_1^{-1} ، τ_1 ، τ_2 فالم 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 (k)، نسبت دمایی فرعی $(\sigma_2 \circ \sigma_1)$ و نسبت دمایی مشترک (k) تقسیم شدهاند؛ بنابراین معکوس نسبت دمایی $(\sigma_1^{-1} \circ \sigma_1^{-1})$ 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.

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

$$(20)$$

(11)

¹ Five sources of heat transfer irreversibility

 $\dot{W}_{cc}/C_T T_{LI}$ 0.48 0.085 $\dot{W}_{cc}/C_T T_{LI}$ 80.0 0.46 4 0.44 0.075 0.42 0.07 1,05 1.15 1.1

Fig. 3 Variations dimensionless total power and efficiency versus σ_1 σ_1 شكل 3 تغييرات توان كل بىبعد و بازدە نسبت به



Fig. 4 Variations dimensionless total power and efficiency versus dimensionless variable σ_2

 σ_2 شکل 4 رفتار توان کل بیبعد و بازده با تغییر متغیر بیبعد σ_2

 $r_1 = 0.18$ را کاهش داده است؛ بنابراین توان بیبعد در $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ T_{a2}, T_{a1} بیشینه شده است. افزایش r_1 دمای متغیرهای سیستم شامل الما با T_{c1} و T_{c1} را افزایش داده است. نرخ افزایش T_{c1} در مقایسه با T_{c1} ، T_{b2} ، T_{b1} سایر دماهای سیال عامل بیشتر است. نسبت هدایت حرارتی بیشتر تحت تأثير سطح انتقال حرارت است، اما براى افزايش r_1 علاوهبر افزايش سطح انتقال حرارت، عوامل مرتبط به انتقال حرارت و طراحی مبدل های حرارتی مانند اتلافات حرارتی، عدد پرانتل'، عدد رینولدز'، 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 r_1 شکل 5 تغییرات توان کل بی بعد و بازده نسبت به بازده نيز مشابه توان كل بىبعد براساس متغيرهاى بىبعد محاسبه می شود؛ بنابراین بازده حرارتی سیستم به صورت رابطه (23) به دست آمده

$$\begin{split} \eta &= (r_1/T_{l1} \cdot (T_{h1} - r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \\ &+ r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) + r_2 \\ /T_{l1} \cdot (T_{h2} - \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \\ &\cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) \\ &+ r_3/T_{l1} \cdot (T_{h3} - k \cdot \sigma_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \\ &\cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \\ &\cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) - r_5/T_{l1} \cdot (k \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} \\ &+ r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 \\ &- r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2 - T_{l1}))) / \{(r_1/T_{l1} \cdot (T_{h1} - r_1 \\ &\cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \\ &\cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1/\tau_2)) + r_2/T_{l1} \cdot (T_{h2} - \tau_1 \\ &\cdot \sigma_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \\ &\cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot K \cdot \tau_1/\tau_2)) + r_3/T_{l1} \\ &\cdot (T_{h3} - k \cdot \sigma_2 \cdot \tau_1 \cdot r_1 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{h1} + r_2 \cdot T_{h2}/(r_1 \\ &\cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_2 \cdot \tau_1 \cdot \sigma_1 + r_4 \cdot \sigma_1 \cdot \tau_1 - r_4 \cdot \sigma_1 \cdot k \cdot \tau_1 \\ &/ \tau_2)) \end{split}$$

بازده حرارتی سیکل ترکیبی برگشتناپذیر برخلاف بازده کارنو به هدایت حرارتی وابسته است. تولید توان مکانیکی هدف اصلی علم مهندسی ترموديناميك است. افزايش معيارهاي تحليل مانند بازده انرژي، بازده اگزرژي، نرخ هزینه تولید، نرخ هزینه سرمایه گذاری، اگزرژی تخریب شده 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 يارامتريك

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 تحليل مىشوند مىتوان از ترسيم منحنى توان برحسب بازده به عنوان يک ابزار صحتسنجی محاسبات و نتایج استفاده کرد. براساس شکل 3 با افزایش توان کل بی بعد و بازده افزایشیافته است، اما در ابتدا شیب توان کل σ_1 بی بعد بیشتر از شیب بازده است، سپس شیب توان کل بی بعد 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.

شكل 4 نشاندهنده رفتار توان بىبعد و بازده با تغيير σ_2 است. با افزايش توان کل بی بعد و بازده افزایش یافته است. مشابه σ_1 ، افزایش σ_2 نشان σ_2 میدهد نرخ افزایش دمای T_{c2} نسبت به نرخ افزایش T_{b2} بیشتر است. همان طور که در شکل 3 و 4 مشاهده می شود، رفتار نسبتهای دمایی (1.163 فرعی $(\sigma_2 \ _2 \ _2)$ یکسان است؛ بنابراین فرض یکسان بودن مقدار $(\sigma_2 \ _2)$ معقول و منطقی به نظر میرسد.

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

¹ Prandtl number ² Reynolds number

سیال عامل، نوع جریان و نوع مبدل حرارتی است که با نگاه کلی و جامع این پژوهش در تناقض 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 یافتهاند. عامل اصلی کاهش توان کل بیبعد و بازده ناشی از کاهش عبارتهای بیبعد r_3 $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ است، همچنین با افزایش و جملههای $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T$ با شیب کمی ابتدا افزایش و سپس کاهشیافتهاند.

شکل 8 اثر r_4 را نسبت به توان کل بی بعد و بازده را نشان می دهد. با افزایش r_4 توان کل بی بعد افزایش و سپس کاهش یافته است و بازده با افزایش r_4 افزایش یافته است. با افزایش r_4 عبارتهای $q_1/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T$ با شیب به نسبت تندی در حال کاهش هستند، اما عبارتهای $\dot{Q}_{h3}/T_{l1} \cdot C_T$ و $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T$ در ابتدا افزایش و سپس کاهش



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



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



Fig.8 dimensionless total power and efficiency versus r_4 شکل 8 توان کل بی بعد و بازدہ نسبت به r_4

یافتهاند. توان کل بی بعد در $r_4 = 0.183$ به بیشینه ترین مقدار خود رسیده است. روشن است که افزایش r_4 سبب افزایش T_{c2} و T_{c1} 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 $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T \in \dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ 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 بی بعد و بازده نشان می دهد. هر دو متغیر وابسته ابتدا افزایش و سپس کاهشیافتهاند؛ بنابراین دارای یک بیشینه هستند. رفتار بازده و توان کلی بی بعد ناشی از افزایش عبارتهای بی بعد ناشی $\dot{Q}_{l1}/T_{l1} \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ و کاهش عبارتهای بی بعد خاصی است. نرخ افزایشی $\dot{Q}_{h2}/T_{l1} \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{h1}/T_{l1} \cdot C_T$ ابتدا مند و به تدریج کاهش یافته است. در نتیجه عامل اصلی افزایش بازده و توان کلی بی بعد افزایش ای م

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 دادهشده 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]. نقطه



Fig.9 Efficiency and dimensionless total power versus au_1 شکل 9 تغییرات توان کل بیبعد و بازده نسبت به au_1



Fig.10 Efficiency and dimensionless total power changes versus au_2 شکل 10 توان کل بی.بعد و بازده نسبت به au_2

جدول 2 نتایج بیشینه توان کل بی بعد براساس شکلهای 9 و 10 **Table 2** Results maximum dimensionless total power based on figures 0 and 10

9 and 10		
حالت بيشينه توان كل	حالت بيشينه توان كل	la :-
بىبعد شكل 9	بىبعد شكل 10	مىغيرھا
1286.95	1485.43	<i>T</i> _{<i>a</i>1} (K)
868.99	568.14	$T_{a2}(K)$
974.96	742.71	$T_{b1}(\mathbf{K})$
434.49	482.06	$T_{b2}(K)$
994.9	863.62	$T_{c1}(K)$
505.09	560.54	$T_{c2}(K)$
0.7576	0.5	$ au_1$
0.5	0.849	$ au_2$
0.0816	0.072	$\dot{W}_{CC}/T_{l1}\cdot C_T$
47.45	37.10	η(%)

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 پینچ^۱ 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 بی بعد شامل نسبتهای دمایی و نسبتهای هدایت حرارتی به طور مجزا نسبت به توان کل بی بعد و بازده در شکلهای 2-10 مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین به منظور ارزیابی دقیق تر با جایگزینی پارامترهای ثابت در رابطه (21) شکل 11 به دست آمده است. شکل 11 اثرات توان کل بی بعد، نسبت به تغییرات نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا دما پایین را نشان می دهد. شکل 11 نشان دهنده ارتباط و وابستگی نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا دما پایین را است، به منظور اطمینان این نتیجه براساس مرجع [2] قابل صحت گذاری است. به منظور می بعد است، نسبت به تغییرات نسبتهای دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا دما پایین را موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما بالا دما پایین ال موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما باین به یکدیگر موتور حرارتی دما بالا و نسبت دمای اصلی موتور حرارتی دما پایین به یکدیگر است. به منظور اطمینان این نتیجه براساس مرجع [2] قابل صحت گذاری موتور حرارتی دما بالا و دما پایین می به تغییرات نسبتهای دمایی اصلی موتور حرارتی دما بالا و دما پایین محاسبه شود.

1 pinch-point

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 ₁ ₇ ₂ ₇ 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.

$$\begin{split} &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) + 0.6) \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)))/((\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 - (0.326(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &+0.6)))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0) \\ &+0.6)))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\ &+0.6)))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\ &+0.6)))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\ &+0.6)))) - (0.000666667 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\ &+(0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &-(22221.0363 \cdot \tau_1)/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &-(22221.0363 \cdot \tau_1)/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &-(7407.012096 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(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))) \\ &+0.6)))^2 - (0.0017533 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &+(0.6))))^2 - (0.0017533 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) \\ &+(3.56/(\tau_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)))) \\ &-(43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6)) - (\tau_1 \\ &\cdot 0.566805333)/(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)) - (\tau_1 \\ &\cdot 0.566805333)/(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)) - (\tau_1 \\ &\cdot 0.978 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \\ &+(0.6))) \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) /((\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 + (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) /((\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) /(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) /(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))) /(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_$$

 $-0.978))/((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2$ $+130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2$ $(521.6 \cdot \tau_1 + 200) + 0.6))))^2 - (0.0017533 \cdot \tau_1)$ $(0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) \cdot (521.6 \cdot \tau_1)$ +200.0) · ((0.326 · (0.2 · τ_2 + 130.68/(521.6 · τ_1 $+200.0)))/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))))$ $+0.6)) - (22221.03629 \cdot \tau_1)/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (\tau_1$ $(521.6 + 200.0) + 0.6) \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)^2)$ +(7407.012096 $\cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2^2 \cdot ((43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1$ $(+200.0)) + 0.6))^{2} \cdot (521.6 \cdot \tau_{1} + 200.0)^{2}) - 0.978)$)/((($0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68)$ $/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1$ $(+200) + 0.6))))^{2} \cdot (43.56/\tau_{2} \cdot (521.6 \cdot \tau_{1} + 200.0))$ $+0.6)) - (39.83730432 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68))$ $/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2 \cdot (0.978 \cdot \tau_1 - (0.326)))/(\tau_2 \cdot \tau_1 - (0.326)))/(\tau_2 \cdot \tau_1 - \tau_1 - \tau_2 - \tau$ $(\tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 .130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2)$ $\cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))) \cdot ((43.56)$ $/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))^2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1)$ +200.0)) - (0.00066666666666667 · (521.6 · τ_1 + 200.0) $\cdot ((0.0652 \cdot \tau_1) / (\tau_2 \cdot (43.56 / (\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)))))$ $+0.6)) - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1)))$ $+200.0)))/(\tau_2^2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))))$ $+0.6)) + (14.2 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1))))$ $\cdot 0.326 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))$ $/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))))^2$ $-(0.00035066666667 \cdot \tau_1 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))/$ $((0.978 \cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68 / (\tau_1$ \cdot 521.6 + 200.0))) /($\tau_2 \cdot$ (43.56/($\tau_2 \cdot$ (521.6 $\cdot \tau_1$ $+200.0)) + 0.6))) \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))$ $+0.6))-(0.0010866666667\cdot\tau_{1}\cdot(521.6\cdot\tau_{1}+200)$ $\cdot ((0.0652 \cdot \tau_1)/(\tau_2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)))))$ $+0.6)) - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1)))$ $+200.0)))/(\tau_2^2 \cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0))))$ $+0.6)) + (14.20056 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_1 + 130.68/(521.6)))$ $+200) + 0.6))^{2} \cdot (521.6 \cdot \tau_{1} + 200.0)))) / ((0.978)$ $\cdot \tau_1 - (0.326 \cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1$ $+0.6))))^{2} - (0.0763752 \cdot \tau_{1} \cdot (0.2 \cdot \tau_{2} + 130.68)))(521.6 \cdot \tau_{1} + 200.0)))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326))))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326)))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326))))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326)))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326))))/(\tau_{2}^{2} \cdot (0.978 \cdot \tau_{1} - (0.326))))))))))$ $\cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2)$ $\cdot (43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6)))$ $\cdot ((43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6))^2) - (\tau_1)$ $\cdot 0.00175333 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200))$ \cdot (521.6 \cdot τ_1 + 200.0) \cdot ((0.0652 \cdot τ_1) /(τ_2 \cdot (43.56 $/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)) + 0.6)) - (0.326 \cdot \tau_1)$ $\cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200))) / (\tau_2^2 \cdot$ $(43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)) + 0.6)) + \tau_1$ ($\cdot 14.20056 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))$ $(\tau_2/(\tau_2^3 \cdot ((43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)) + 0.6))^2))$ $\cdot \tau_1 \cdot (0.2 \cdot \tau_2 + 130.68/(521.6 \cdot \tau_1 + 200.0)))/(\tau_2)$ $(43.56/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)) + 0.6))))^2 \cdot (43.56)$ $/(\tau_2 \cdot (521.6 \cdot \tau_1 + 200)) + 0.6)) = 0$ (24)رابطه (24) نشاندهنده رابطه بین au_2 و au_1 در حالت بیشینه توان است. این رابطه فقط براساس اطلاعات ورودی و فرضیات یادشده اعتبار دارد. رابطه (24) شكل 12 براساس رابطه (24) ترسيم شده است. به طورى كه با افزايش

(44) شکل 12 براساس رابطه (44) برسیم شده است. به طوری که با افزایش نسبت دمایی موتور حرارتی دما بالا نسبت دمایی موتور حرارتی دما پایین کاهش می ابد و بالعکس.

شكل 12 نشان دهنده نتايج تناسب معكوس نسبت دمايي موتور حرارتي



Fig.12 Variations thermal efficiency versus $au_1 heta_7$ شکل 12 رابطه بین au_2 و au_1

دما بالا و نسبت دمایی موتور حرارتی دما پایین است. علاوهبر این نتایج نسبتهای دمایی این پژوهش و مرجع [17] نشان داده که بیانگر صحت محاسبات است. همان طور 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 بی بعد، برهم منطبق نیستند؛ بنابراین افزایش بازده تضمین کننده افزایش توان کل بی بعد نیست، اما در این مسأله خاص بعضی از دادهها قید $T_{h2} > T_{c1}$

به منظور محاسبه بیشینه توان کل بی بعد دادههای ناقض قانون دوم ترمودینامیک حذف شدهاند. رفتار کل دادهها نشان می دهد که ابتدا با افزایش نسبت دمای τ_1 و کاهش نسبت دمای τ_2 بازده و توان کل بی بعد افزایش یافته و به نقطه بیشینه توان کل بی بعد رسیده است، سپس با افزایش نسبت دمای τ_1 و کاهش نسبت دمای τ_2 توان کل بی بعد کاهش یافته و بازده افزایش یافته است و در نهایت به نقطه بیشینه بازده رسیده، بازده و توان کل بی بعد، هردو کاهش پیدا کرده است. نتایج بیشینه توان کل بی بعد در جدول S 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 قیدهای 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_{D2} است.



Fig.13 Variations dimensionless total power versus Efficiency شکل 13 تغییرات توان نسبت به بازده

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.17.7

جدول 3 نتایج بیشینه توان کل بیبعد براساس شکل 13 **Table 3** Results maximum dimensionless total power based on figure 13

جواب اول، حالت بيشينه	پاسخ دوم، حالت بیشینه	۱۰۰۰
توان كل بيبعد	توان كل بيبعد	مىغىرھا
1419.5786	1422.1789	$T_{a1}(\mathbf{K})$
748.2694	744.1885	$T_{a2}(\mathbf{K})$
858.7031	855.5828	$T_{b1}(\mathbf{K})$
440.5062	441.0061	$T_{b2}(\mathbf{K})$
998.492	994.8638	$T_{c1}(\mathbf{K})$
512.2165	512.7978	$T_{c2}(\mathbf{K})$
0.6049	0.6016	$ au_1$
0.5887	0.5926	$ au_2$
0.086138	0.086102	$\dot{W}_{CC}/T_{l1} \cdot C_T$
47.91	47.81	$\eta(\%)$

6- اعتبارسنجي سيستم

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 (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 موتار تی مبدل حرارتی مناظر آنها برابر با صفر فرض شده است.

7- نتیجه گیری

در این پژوهش سیکل ترکیبی براساس مفاهیم ترمودینامیک زمان محدود با در نظر گرفتن برگشتناپذیری خارجی در مرز بین زیر سیستمها، منابع حرارتی و چاه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین این سیستم دارای پنج منبع انتقال حرارتی برگشتناپذیر است؛ بنابراین براساس محاسبات جبری توان کل بیبعد و بازده براساس متغیرهای بیبعد شامل نسبت دمای اصلی شامل (τ_1 و τ_1)، نسبت دمای فرعی شامل (τ_0 و σ_0)، نسبت دمای مشترک (k) و هدایتهای حرارتی محاسبه شده است. اثرات هر یک از است. نتایج مطالعه پارامتری نشان داده که راه کار افزایش توان کل بیبعد، افزایش متغیرهای بیبعد این *ب*ره برای متغیرهای بیبعد، این و مورد بررسی قرار گرفته افزایش متغیرهای بیبعد این به مان داده که راه کار افزایش توان کل بیبعد، راه کار افزایش بازده، افزایش متغیرهای بیبعد این د*ب* ۲۰ مان و مو و کاهش راه کار افزایش بازده، افزایش متغیرهای بیبعد را به عنوان معیار جدید و کاربردی برای راه کار افزایش توان کل بیبعد را به عنوان میبار جدید و کاربردی برای

جدول 4 مقايسه نتايج پژوهش حاضر و مرجع [13] Table 4 Comparison of the results of the present study and the

		reference [15]
متغيرها	پژوهش حاضر	نتايج 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
$\eta_{mp}(\%)$	54/71	55

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 علايم

(kW/K)	حرارتي	هدايت	C
` '			

- نسبت دمای مشترک k
 - P توان (kW)
- نرخ انتقال حرارت (kW)
 - دما (K)
- ضريب انتقال حرارت (kW/m² K)

علايم يوناني

Т

IJ

بازده	η
بارعاه	"

نسبت دمای فرعی σ نسبت دمای اصلی au

زيرنويسها

h	دمابالا
i	دماپايين
mp	بيشينه توان
Т	كل

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.

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.11.17.7

- [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 refigerator, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 436, No. Supplement C, pp. 311-320, 2015.
- [17] D. Winterbone, Advanced Thermodynamics for Engineers, First Eddition, pp.
- [17] D. whichold, Advances Intermodynamics for Engineers, First Eduliation, pp. 136–150, London: Amold, 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.