



The University of Tehran Press

Reducing data center energy consumption using thermoelectric coolers

Mohammad Ebadollahi^{1*} | Hadi Ghaebi² | Ali Nayebi³

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: m.ebadollahi@uma.ac.ir
2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: hghaebi@uma.ac.ir
3. MSc. Graduate, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: a.nayebi@mobinnet.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Paper Article History: Received 05 December 2024 Revised 04 January 2025 Accepted 03 February 2025 Published Online 18 March 2025 Keywords: Energy, exergy, data center, cooling demand.	Reducing energy consumption in data centers is one of the most important issues that should be considered. This article is written with the aim of reducing the energy consumption of these centers by using a thermoelectric cooler converter, and this reduction has been measured in comparison with the performance of the compression refrigeration cycle in real conditions. Also, the data of this research has been collected from the data center of Mobinnet Communications Company in different time intervals. In this research, a compression refrigeration cycle using a thermoelectric cooler converter was designed, and energy and exergy analysis was performed on the aforementioned cycle and each of the components using EES software. Based on the results, by using a thermoelectric cooler converter in the compression refrigeration cycle, the cycle efficiency coefficient has increased from 3.283 to 3.339. This replacement did not affect the rate of exergy destruction of the cycle components, and the exergy efficiency of the entire cycle remained constant, but it led to an increase in cycle efficiency, which significantly contributes to reducing the energy consumption of data centers operating with a compression refrigeration cycle.

Cite this article: Ebadollahi, M.; Ghaebi, H. & Nayebi, A. (2025). Reducing data center energy consumption using thermoelectric coolers. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (2), 175-196. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388860.1115>



© Mohammad Ebadollahi, Hadi Ghaebi, Ali Nayebi
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388860.1115>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

The Telecommunications Infrastructure Standard defines a data center as: A building or part of a building whose primary function is to house a computer room and its support areas. Google defines a data center as a building that houses multiple servers and communications equipment due to shared environmental requirements, physical security needs, and ease of maintenance. According to two definitions, a computer room is the primary physical environment of a data center that includes computing equipment for data processing and other areas that provide support services to the computer room [1]. Because IT operations are critical to business continuity, these centers generally include additional or backup components and infrastructure for power supply, data communication connections, environmental controls (e.g., air conditioning, fire suppression), and various security devices. A large data center is an industrial-scale operation that consumes a large amount of electricity [2]. A data center must be adequately cooled, as heat dissipation is a critical factor for the availability and reliability of IT equipment. High temperatures can cause high junction temperatures, which affect the reliability of IT components. In this research, the energy and exergy evaluation of a data center

equipped with thermoelectrics is addressed, and by performing parametric analysis, the effect of each parameter on system performance is evaluated.

Methodology

In compression refrigeration cycles, the refrigerant gas, after entering the compressor, is condensed by the operation of the compressor and exits it at high pressure and temperature. After leaving the compressor, it is sent to the condenser through a high-pressure pipe and in the condenser, it is converted into a refrigerant liquid by losing heat. After leaving the condenser, the refrigerant liquid enters the expansion valve or capillary tube and after leaving the expansion valve, its pressure is greatly reduced and is sent to the evaporator through a low-pressure pipe. The refrigerant liquid in the evaporator is converted back into a refrigerant gas by absorbing the heat of the environment. This gas enters the compressor again and the compression refrigeration cycle is repeated. As the refrigerant in the evaporator absorbs heat from the air or water or any other fluid, it causes the temperature of that fluid to decrease. In this research, by replacing the condenser with a heat exchanger and connecting the thermoelectric cooler exchanger to both ends of the heat exchanger, an attempt was made to use the cooling produced by the thermoelectric cooler exchanger to increase the cooling produced by the evaporator, which would lead to an increase in the cycle efficiency.

Results

Using a thermoelectric cooler exchanger increases the efficiency of the compression refrigeration cycle, which is due to the amount of refrigeration produced by the exchanger. Considering the 50 kW cooling capacity for the evaporator, about 1 kW of cooling production is also added to the cooling capacity of the cycle through the thermoelectric exchanger. The compression refrigeration cycle in real mode has a total efficiency of 3.283. Also, the compression refrigeration cycle using a thermoelectric cooler exchanger has a total efficiency of 3.339. From the results of the analysis of the compression refrigeration cycle using the thermoelectric cooler exchanger, it can be stated that the heat exchanger with 39.9% and then the thermoelectric cooler exchanger with 32.86% have the highest percentage of exergy destruction and are the main factor of the cycle exergy destruction. Also, the exergy efficiency of the entire cycle is 11.4%.

Conclusion

In this study, a compression refrigeration system with a thermoelectric cooler exchanger for cooling a data center was analyzed from an energy and exergy perspective. Using thermodynamic analysis, the energy and exergy efficiency of the system components was calculated, and a parametric analysis was performed on the effective parameters of the cycle.

The results obtained from the analysis of the cycles in two real cases and the next case using a thermoelectric cooler exchanger are as follows:

- The compression refrigeration cycle in the real case has a total efficiency of 3.283. Also, the results obtained from the exergy analysis show that the condenser with 809.9 kW and then the compressor with 352.2 kW have the highest energy destruction.
- The compression refrigeration cycle using a thermoelectric cooler exchanger has a total efficiency of 3.339. Also, the results of exergy analysis show that using a thermoelectric cooler exchanger, the heat exchanger with 389.5 kW.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیک: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

کاهش انرژی مصرفی مراکز داده با استفاده از مبدل‌های کولر ترموالکتریک

محمد عباداللهی^{۱*} | هادی غائبی^۲ | علی نایی^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی نوین، دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m.ebadodollahi@uma.ac.ir

۲. استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: hghaebi@uma.ac.ir

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a.nayebi@mobinnet.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کاهش مصرف انرژی مراکز داده یکی از موارد بسیار مهمی است که باید مورد توجه قرار بگیرد. این مقاله با هدف کاهش انرژی مصرفی این مراکز با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک به رشته تحریر درآمده و مقدار کاهش مصرف در مقایسه با عملکرد سیکل تبرید تراکمی در حالت واقعی سنجیده شده است. داده‌های این پژوهش از مرکز داده شرکت ارتباطات مبین نت در بازه‌های زمانی مختلف جمع‌آوری شده است. در این پژوهش چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار EES تحلیل انرژی و انرژی روی چرخه یادشده و هریک از اجزا صورت گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک در چرخه تبرید تراکمی، ضریب بازدهی سیکل از ۳/۲۸۳ به ۳/۳۳۹ افزایش یافته است. این جایگزینی تأثیری بر میزان تخریب انرژی اجزای سیکل نمی‌گذارد و بازده انرژی کل چرخه نیز ثابت می‌ماند، ولی به افزایش بازده سیکل منجر می‌شود که این مورد به کاهش انرژی مصرفی مرکز داده که با سیکل تبرید تراکمی کار می‌کنند، کمک شایانی می‌کند.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

کلیدواژه:

مرکز داده،

تأمین سرمایش،

انرژی،

انرژی.

استناد: عباداللهی، محمد؛ غائبی، هادی و نایی، علی (۱۴۰۴). کاهش انرژی مصرفی مراکز داده با استفاده از مبدل‌های کولر ترموالکتریک. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۲) ۱۷۵-۱۹۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388860.1115>

© محمد عباداللهی، هادی غائبی، علی نایی ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.388860.1115>



علائم اختصاری

علائم اصلی	Ex	اگرژی ویژه (kJ/kg)	0	زیرنویس‌ها	حالت مرجع
E		اگرژی (kJ/kg)	Cycle		چرخه
$\dot{E}_x$		آهنگ اگرژی (kW)	D		پخش شده
H		آنتالپی ویژه (kW)	d,i		تخریب جزء i
$\dot{m}$		آهنگ جریان جرمی (kg/s)	D,k		تخریب جزء سیستم
P		فشار (bar)	Dest		تخریب
Q		انتقال حرارت (kJ)	dest,total		تخریب کل سیستم
$\dot{Q}$		آهنگ انتقال حرارت (kW)	EV		شیر انبساط
s		آنتروپی (kg/K)	Ex		اگرژی
T		دما (K)	F		سوخت
TTD		اختلاف دمای پایانه (K)	HE		میدل حرارتی
$\dot{W}$		آهنگ تولید کار (kW)	Input		ورودی
X		کسر مولی	Mass		جرم
Y		درصد تخریب	Net		خالص
علائم یونانی			Out		خروجی
η		بازده (%)	P		محصول
			tot		کل
			Ch	بالانویس‌ها	شیمیایی
			$\dot{Q}$		آهنگ انتقال حرارت
			$\dot{W}$		آهنگ انتقال کار

۱. مقدمه

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و صنایع جزء ارکان بسیار مهم است و ممیزی انرژی در این بخش به کاهش مصرف انرژی واحد کمک شایانی می‌کند [۱-۳]. یکی از بخش‌های پرمصرف انرژی به‌خصوص در بخش تأمین سرمایش، مراکز داده است. استاندارد زیرساخت ارتباطات از راه دور مرکز داده را چنین تعریف می‌کند: ساختمان یا بخشی از یک ساختمان که وظیفه اصلی آن قرار دادن اتاق کامپیوتر و مناطق پشتیبانی آن است. بر اساس دو تعریف، اتاق کامپیوتر محیط فیزیکی اصلی یک مرکز داده است که شامل تجهیزات محاسباتی برای پردازش داده‌ها و سایر مناطق ارائه‌دهنده خدمات پشتیبانی به اتاق کامپیوتر است [4]. از آنجا که عملیات فناوری اطلاعات برای تداوم کسب‌وکار بسیار مهم است، به طور کلی این مراکز شامل اجزای اضافی یا پشتیبان و زیرساخت برای منبع تغذیه، اتصالات ارتباطی داده، کنترل‌های محیطی (مانند تهویه مطبوع، اطفای حریق) و دستگاه‌های امنیتی مختلف است. یک مرکز داده بزرگ یک عملیات در مقیاس صنعتی است که مصرف بالای برق دارد [۵].

در این مراکز اطلاعات در هر لحظه جهت پردازش به مرکز داده ارسال می‌شود. این حجم درخواست‌ها بین سرورها در مرکز داده توزیع می‌شود. بر اثر پردازش حجم درخواست‌ها، سرورها گرم می‌شوند. گرمای تولیدشده توسط سرورها، محیط اتاق کامپیوتر را گرم می‌کند. با افزایش دما، عملکرد سرورها دچار مشکل می‌شود؛ بنابراین برای خنک‌سازی هوای اتاق کامپیوتر از واحدهای خنک‌ساز استفاده می‌شود. هوای گرم تولیدشده توسط سرورها، از فضای بالایی خارج می‌شود و به واحد خنک‌ساز انتقال می‌یابد. هوای گرم، توسط CRAC ها و فن‌ها خنک می‌شود و به اتاق کامپیوتر انتقال می‌یابد که برای کاهش دمای هوای گرم، واحدهای CRAC و فن‌ها توان بالایی مصرف می‌کنند. هوای گرم و خنک بین اتاق کامپیوتر و واحدهای خنک‌ساز همواره جابجایی می‌شوند.

طی دو دهه گذشته، افزایش تقاضا برای پردازش داده‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی داده‌ها و مخابرات دیجیتال همراه با پیشرفت‌های هم‌زمان در کامپیوتر و فناوری الکترونیک به نرخ رشد چشمگیری در صنعت مراکز داده منجر شده است. در ایالات

متحد، طی سال‌های ۱۹۹۸ - ۲۰۱۰، تعداد مراکز داده از ۴۳۲ به ۲۰۹۴ افزایش یافت [۶]. رشد تعداد مرکز داده و توان مصرفی آن به افزایش تقاضای انرژی منجر می‌شود. رشد نه تنها در تعداد مراکز داده، بلکه در اندازه، سطح زمین و یا تراکم محاسباتی مراکز داده نیز بوده است [۷]. صنعت مرکز داده در مقیاس‌های مختلف عمل می‌کند، با ساخت مراکز داده عظیم با مساحت ۹ هزار متر مربع که شامل هزاران رک‌سرور و چندین مگاوات مصرف برق است، میزان برق مصرفی در مرکز داده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ دو برابر شده و بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ به میزان ۵۶ درصد افزایش یافته است [۸]. علاوه بر این، در سال ۲۰۱۰ بخش مرکز داده ۱/۳ درصد از مصرف برق در سراسر جهان و ۲ درصد از کل برق مصرفی ایالات متحده را به خود اختصاص داده است. بنابراین، تخمین زده می‌شود که مصرف انرژی در آینده ۱۵ تا ۲۰ درصد در سال افزایش یابد [۹].

یک سیستم خنک‌کننده مناسب برای حفظ کارکرد تجهیزات IT لازم و حیاتی است و می‌تواند تا ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی در مرکز داده را تشکیل دهد. از این‌رو، بهبود راندمان سیستم خنک‌کننده نشان‌دهنده یک فرصت عالی برای صرفه‌جویی در انرژی و هزینه در مرکز داده است [۱۰]. خنک کردن این مراکز و تجهیزات مربوط به آن، بیشترین مصرف انرژی را دارد و بیشترین هدررفت انرژی نیز از این بابت است. به علت اینکه سرورهای مراکز داده باید همواره در معرض هوای سرد قرار بگیرند و نیز از طرفی تجهیزات و سرورهای موجود در این مراکز نیز گرمای زیادی تولید می‌کنند، باید از هدررفت انرژی جلوگیری کرد و از طریق بازیابی انرژی، تا جای ممکن میزان این مصرف انرژی را کاهش داد [۱۰].

یک مرکز داده باید به اندازه کافی خنک شود، زیرا اتلاف گرما عامل مهمی برای در دسترس بودن و قابلیت اطمینان تجهیزات فناوری اطلاعات است. حرارت زیاد می‌تواند باعث ایجاد دمای اتصال بالا شود که بر قابلیت اطمینان اجزای IT تأثیر می‌گذارد. در واقع، علت اصلی خرابی قطعات دمای زیاد است [۱۱]. اکثر محققان برای جلوگیری از خرابی، دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد را حداکثر دمای مجاز اتصال می‌دانند [۱۲]، در حالی که برای دستگاه‌های ذخیره‌سازی محدودیت دما حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد است.

در اتاق سرور، علاوه بر سرمایش، سایر پارامترها همچون رطوبت و فیلتر کردن هوا نیز مطالعه می‌شود، به طوری که کاهش رطوبت اتاق سرور به کمتر از ۲۰ درصد، امکان صدمه و آسیب به تجهیزات به دلیل الکتریسیته ساکن را منجر می‌شود و در صورتی که میزان رطوبت به بالاتر از ۸۰ درصد برسد، به آسیب ناشی از رطوبت بالا می‌انجامد. به طور کلی، صرفه‌جویی در انرژی حاصل از استفاده از خنک‌کننده آزاد به ازای هر ۲ درجه سانتی‌گراد کاهش در دمای داخلی بسته به منطقه آب‌وهوایی بین ۲/۸ تا ۸/۵ درصد کاهش می‌یابد [۱۳].

سیستم‌های سرمایش هوای خنک به صورت گسترده‌ای در اتاق‌های سرور استاندارد به کار می‌روند. این روش از بهترین روش‌های تولید سرمایش برای اتاق‌های سرور کوچک و متوسط است. در این شیوه، خنک کردن مبرد توسط هوا انجام می‌پذیرد. سیستم‌های معمول مانند کولر گازی از این دسته خنک‌کننده‌ها محسوب می‌شوند. در بیشتر مراکز داده با هوای خنک، که اکثر مراکز داده موجود را تشکیل می‌دهند، رک‌های سرور در راهروهای سرد و گرم چیده می‌شوند. در راهروهای سرد، قسمت‌های جلوی رک‌های سرور روبه‌روی هم قرار می‌گیرند و این راهرو هوای خنک ورودی را برای هر سرور فراهم می‌کند. در راهروهای گرم، قسمت عقب قفسه‌ها راهروها را می‌پوشانند و هوای داغ خروجی از هر سرور در اینجا خارج می‌شود. هوای سرد تولیدشده توسط واحد CRAC یا از طریق کف و کاشی‌های سوراخ‌دار (در طراحی کف برجسته) یا از طریق پخش‌کننده‌ها در سقف (در طراحی کف غیر برجسته) به راهروهای سرد هدایت می‌شود. هوای گرم در راهروهای گرم گرفته شده و به ورودی CRAC باز می‌شود. گرمای موجود در CRAC به یک حلقه برج خنک‌کننده یا چیلر جذب می‌شود تا در نهایت به محیط منتقل شود [۱۴].

اشمیت و همکاران تعدادی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد خنک‌کننده در مراکز داده قدیمی را مورد مطالعه قرار دادند. پارامترها عبارت‌اند از: ارتفاع سقف ارتفاع کف، سقف و جهت جریان هوا. جریان هوای ایجادشده توسط اختلاط آشفته هوای سرد و گرم روی قفسه‌ها، به عنوان مشکل اصلی خنک‌کننده در طراحی‌های مرکز داده طبقه مرتفع شناخته شد. به دلیل این گردش مجدد و در نتیجه نفوذ هوای گرم به داخل راهروی سرد، دمای هوا در راهروی سرد در طول ارتفاع قفسه یکنواخت نیست. جداسازی کامل گردش هوای راهروهای سرد و گرم دشوار است، زیرا تنها کسری از میزان جریان هوای مورد نیاز قفسه توسط

هوای سرد و بخش باقی‌مانده توسط گردش هوای اتاق محیط تأمین می‌شود [۱۵]. علاوه بر اختلاط هوای گرم و هوای سرد، عبور هوای سرد از روی سرورها منبع مهمی از تلفات و ناکارآمدی انرژی در سیستم‌های خنک‌کننده با هوا است [۱۶].

در واحدهای CRAC، گرمای هوای گرم که از قفسه‌ها باز می‌گردد، معمولاً با استفاده از چیلر و حلقه برج خنک‌کننده به فضای بیرون دفع می‌شود. دمای چیلر برای مراکز داده مختلف متفاوت خواهد بود. با این حال، در گزارش منتشرشده توسط گروه سیلیکون محدوده دمایی ۱۰ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد و ۱۵/۵ تا ۱۸/۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به عنوان استاندارد برای دمای آب تأمین و برگشت گزارش شده است. دمای پایین آب برگشتی جذب گرمای اتلاف در برگشت آب چیلر را محدود می‌کند [۱۷].

از نمونه تحقیقاتی که در زمینه سرمایش مراکز داده انجام شده، می‌توان به پژوهش باغ‌شیخی مفرد و همکاران [۱۸] اشاره کرد که با توجه به مقدار گرمای زیاد تولیدشده در مراکز داده، برای بهینه کردن عملکرد تجهیزات و کاهش مصرف انرژی، به بررسی منابع بازگشت‌ناپذیری و دلایل آن پرداختند. طبق این بررسی، مشخص شد که با افزایش دمای اواپراتور و کاهش دمای کندانسور عمل بهینه کردن تجهیزات و کاهش مصرف انرژی محقق می‌شود. همچنین، با انجام تحلیل‌های انرژی، مشخص شد کندانسور و اواپراتور بیشترین میزان تخریب انرژی را در چرخه دارند که علت آن نیز به اصطکاک موجود در لوله‌های طولانی کویل‌های کندانسور و اواپراتور و نیز اختلاف دمای زیاد بین ماده مبرد و هوای عبوری از روی کویل‌های آن‌ها برمی‌گردد. درضمن، طی این بررسی به این مورد نیز توجه شد که با کاهش دمای محیط به میزان بازگشت‌ناپذیری افزوده شده است. لذا با تغییر دور کاری فن کندانسور در روزهای سرد سال، این مورد را می‌توان تحت کنترل قرار داد. دیاز و همکاران با تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تبرید مرکز داده با نرم‌افزار EES و تجزیه و تحلیل قانون اول و دوم نشان دادند حداکثر بازده، زمانی حاصل می‌شود که همه قفسه‌ها و راهروها فعال باشند، مشروط بر اجرای تکنیک مهار راهرو که از اختلاط هوای گرم و سرد در اتاق جلوگیری می‌کند یا آن را کاهش می‌دهد، استفاده شود. اگر چرخش هوای گرم وجود داشته باشد، راندمان انرژی سیستم همیشه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، COP سیستم ممکن است (به طور غیرمستقیم) در صورت انتخاب اجزای بزرگ‌تر افزایش یابد، زیرا گرمای بیشتری بدون افزایش قابل توجه مصرف برق تلف می‌شود [۱۹]. ژانگ و همکاران [۲۰] مقاله‌ای مروری بر سیستم خنک‌کننده مرکز داده ارائه کردند که بیشتر شامل راه‌حل‌های خنک‌کننده اصلی، روش‌های مدل‌سازی مصرف انرژی و استراتژی‌های کنترل بهینه‌سازی است. علاوه بر آن، چندین چالش فعلی و کارهای آینده در سیستم خنک‌کننده مرکز داده شرح داده شده است. جهانگیر و همکاران [۲۱] اثربخشی دو رویکرد در پیکربندی‌های مختلف از نظر صرفه‌جویی در انرژی و آب، هزینه خالص فعلی و نرخ انتشار از طریق تحلیل‌های مقایسه‌ای در سرمایش یک مرکز داده را بررسی کردند. علاوه بر این، برای کشف حداکثر پتانسیل صرفه‌جویی در انرژی سرمایش این مرکز داده، ترکیبی از هر دو رویکرد برای مطالعه موردی شهر تهران بررسی شده و تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی-محیط زیستی برای هر سناریوی انرژی اعمال شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند سیستم‌های خنک‌کننده رایگان می‌توانند تا ۴۷ درصد انرژی خنک‌کننده را با ۳۸ درصد هزینه خالص فعلی کاهش دهند. گین و همکاران [۲۲] نوعی سیستم خنک‌کننده دی‌اکسید کربن فرابحرانی برای مرکز داده با صفحه خنک‌کننده پیشنهاد دادند. در مقایسه با یک سیستم دی‌اکسید کربن فرابحرانی با مبدل حرارتی داخلی، سیستم خنک‌کننده دی‌اکسید کربن فرابحرانی مرکز داده به طور متوسط ۳۹/۹۰ درصد افزایش در ضریب خنک‌سازی عملکرد را به دست می‌آورد. اگرچه اتلاف انرژی در واحد مبرد به دلیل دماهای بالاتر در اجزای مکمل و طرف صفحه خنک‌کننده افزایش می‌یابد.

با توجه به وضعیت بگرنج انرژی در کشور و ناترازی برق، نیاز است با شناسایی صنایع پرمصرف و ممیزی انرژی صحیح در هر صنعت و بخش ساختمان از اتلاف انرژی کاسته شده و راه‌حل‌های بهتری برای مدیریت مصرف انرژی ارائه شود [۲۳]. با توجه به اینکه مراکز داده نیاز سرمایشی بالایی دارند و برای تأمین این نیاز، برق زیادی را مصرف می‌کنند، این پژوهش به منظور تحلیل دقیق‌تر و امکان کاهش برق مصرفی و نیاز سرمایشی این واحدها انجام می‌گیرد. در این پژوهش، ضمن بررسی کامل سیستم سرمایشی یک مرکز داده به ارزیابی انرژی و انرژی مرکزی که مجهز به ترموالکتریک است پرداخته می‌شود و با انجام تحلیل پارامتریک، روند اثرگذاری هر پارامتر بر عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. تشریح سیستم

تولید هوای سرد برای خنک‌سازی مراکز داده، مصرف انرژی زیادی دارد. قسمتی از هوای سرد تولیدشده صرف خنک‌سازی تجهیزات موجود در اتاق سرور شده و قسمتی نیز برای خنک‌سازی محیط استفاده می‌شود. لذا با کوچک‌سازی محیط، امکان خنک‌سازی مطلوب‌تر و مصرف انرژی کمتر امکان‌پذیر خواهد شد. یکی از این روش‌ها، اتاق سرد سرور است. اتاق سرد سرور یک سازهٔ عموماً شیشه‌ای است که در اطراف رک‌ها ساخته می‌شود و قسمت‌های بالایی و کناری را پوشش می‌دهد و هوای سرد در داخل آن محدود می‌شود. شکل ۱ تصویر مرکز دادهٔ شرکت مبین نت را نشان می‌دهد که مطالعه روی این سیستم انجام شده است.



شکل ۱. اتاق سرد مرکز دادهٔ شرکت مبین نت

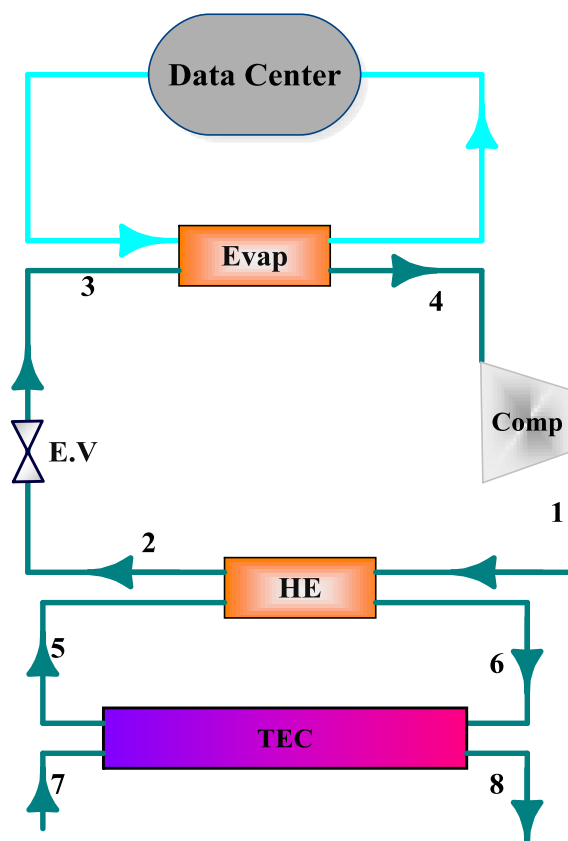
در چرخه‌های تبرید تراکمی گاز مبرد، پس از ورود به کمپرسور بر اثر کارکرد کمپرسور متراکم شده و با فشار و دمای بالا از آن خارج می‌شود. پس از خارج شدن از کمپرسور، از طریق لولهٔ فشار قوی به سمت کندانسور ارسال شده و در کندانسور با از دست دادن حرارت به مایع مبرد تبدیل می‌شود. مایع مبرد پس از خروج از کندانسور وارد شیر انبساط یا لولهٔ موئین می‌شود و پس از ترک شیر انبساط، به شدت فشار آن کاهش می‌یابد و از طریق لولهٔ فشار ضعیف به سمت اواپراتور ارسال می‌شود. مایع مبرد در اواپراتور با گرفتن حرارت محیط دوباره به گاز مبرد تبدیل می‌شود. این گاز دوباره وارد کمپرسور شده و چرخهٔ تبرید تراکمی تکرار می‌شود. هم‌زمان که مبرد در اواپراتور گرما را از هوا یا آب یا هر سیال دیگری می‌گیرد، باعث کاهش دمای آن سیال می‌شود.

در این تحقیق با جایگزینی مبدل حرارتی به جای کندانسور و اتصال مبدل کولر ترموالکتریک به دو سر مبدل حرارتی، تلاش بر این شد که از میزان بروود تولیدی مبدل کولر ترموالکتریک در جهت افزایش میزان بروود تولیدی که در گذشته توسط اواپراتور صورت می‌گرفت استفاده شود که به افزایش میزان بازده چرخه بینجامد.

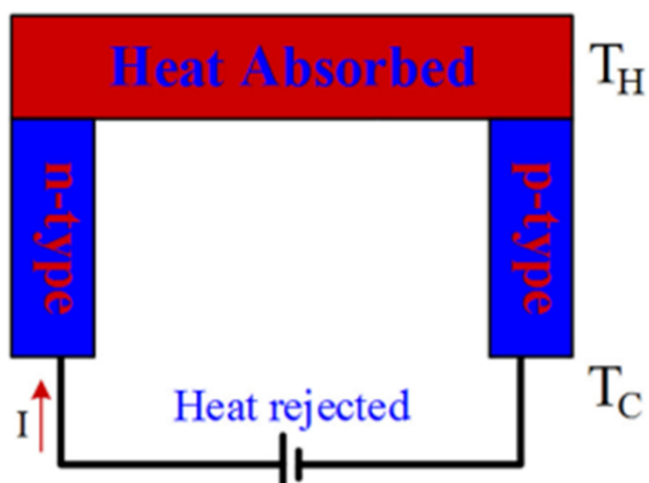
به طور کلی، سیستم‌های ترموالکتریک شامل تعداد زیادی از زوج نیمه‌رسانای ترموالکتریکی نوع p و n هستند که به صورت سری به یکدیگر متصل شده و بین دو صفحهٔ عایق الکتریکی که رسانای گرمایی است چیده شده‌اند. هرگاه این سیستم به منبع پتانسیل متصل شود یک سمت آن سرد و سمت دیگر آن گرم شده و با ایجاد گرادیان دمایی در دو صفحهٔ یادشده حامل‌های بار در ماده از قسمت گرم به سرد حرکت می‌کنند و به این ترتیب میدان الکتریکی در سیستم برپا می‌شود [۲۴]. یکی از مزایای سیستم‌های ترموالکتریک این است که هیچ نیازی به وسایل متحرک مانند پمپ محلول، کمپرسور و شیرها نیست، زیرا در این سیستم‌ها از سیال کاری استفاده نمی‌شود. علاوه بر این، دارای یک کنترل دما با دقت زیاد هستند [۲۵]. فناوری TE به طور کلی در TEG و TEC دسته‌بندی می‌شود.

خنک‌کنندهٔ ترموالکتریک از اثر peltier برای ایجاد شار حرارتی در محل اتصال دو نوع مختلف مواد استفاده می‌کند. کولر، بخاری یا پمپ حرارتی ترموالکتریک peltier یک پمپ حرارتی فعال حالت جامد است که با مصرف انرژی الکتریکی بسته به

جهت جریان، گرما را از یک طرف دستگاه به طرف دیگر منتقل می‌کند. به چنین ابزاری، دستگاه peltier، پمپ حرارتی peltier، یخچال حالت جامد یا خنک‌کننده ترموالکتریک (TEC) و گاهی اوقات باتری ترموالکتریک نیز گفته می‌شود که می‌توان از آن برای گرمایش یا سرمایش استفاده کرد (شکل ۳). همچنین، می‌توان از آن به عنوان یک کنترل‌کننده دما که گرم یا سرد می‌شود استفاده کرد [۲۶].



شکل ۲. چرخه تبرید تراکمی با مبدل کولر ترموالکتریک



شکل ۳. تصویر شماتیک یک خنک‌کننده ترموالکتریک [۲۷]

۳. فرضیات و روابط

فرضیات کلی در نظر گرفته شده در این تحقیق عبارتند از [۲۸-۳۰]:

- سیستم در شرایط پایا مدل سازی شده است.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- از نشتی سیالات داخل سیستم به بیرون صرف نظر شده است.
- دما و فشار مرجع به ترتیب: ۲۹۸ کلوین و ۱۰۰ کیلو پاسکال
- در حالت ایده آل هیچ افت فشاری در تجهیزات اتفاق نیفتاده است.
- مبرد مورد استفاده در چرخه R134a و کندانسور از نوع هوایی است.

۳-۱. روابط انرژی

برای تعیین گرمای ورودی، آهنگ اتلاف انرژی و بازده انرژی، نیاز به استفاده از موازنه جرم، انرژی و انرژی است [۳۱-۳۴]:
برای تحلیل انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک، به ذکر روابط مربوط به آن می پردازیم.
کمپرسور:

$$W_{comp} = \dot{m}_1(h_1 - h_4) \quad (۱)$$

اوپراتور:

مایع مبرد در اوپراتور با گرفتن حرارت محیط دوباره به گاز مبرد تبدیل می شود [۳۵].

$$Q_{eva} = \dot{m}_1(h_4 - h_3) \quad (۲)$$

مبدل کولر ترموالکتریک [۳۶]:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_c}{T_h} - 1 \quad (۳)$$

$$T_m = \frac{T_c + T_h}{2} \quad (۴)$$

$$ZT_m = 4 \quad (۵)$$

$$COP_{max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \times \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - \frac{T_C}{T_H}}{\sqrt{1 + ZT_m} + 1} \quad (۶)$$

$$Q_{TEC} = \dot{m}_8(h_7 - h_8) \quad (۷)$$

مبدل حرارتی:

پس از خارج شدن از کمپرسور، از طریق لوله فشار قوی به سمت مبدل حرارتی ارسال شده و در مبدل حرارتی با از دست دادن حرارت به مایع مبرد تبدیل می شود.

$$Q_{HE} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) \quad (۸)$$

$$Q_{HE} = \dot{m}_5(h_6 - h_5) \quad (۹)$$

اختلاف دمای پایانه در مبدل حرارتی به صورت رابطه ۱۰ تعریف می شود:

$$TTD_{TEC} = 10 \quad (۱۰)$$

شیر انبساط:

فرایند شیر انبساط یک فرایند آنتالپی ثابت بوده و کار انجام شده و انتقال حرارت در آن صفر در نظر گرفته می شود. پس از خروج از مبدل حرارتی وارد شیر انبساط یا لوله موئین شده و پس از خروج از شیر انبساط، به شدت فشار آن کاهش می یابد و از طریق لوله فشار ضعیف به سمت اوپراتور ارسال می شود.

$$h_2 = h_3 \quad (11)$$

کار خالص چرخه:

$$W_{net} = W_{comp} \quad (12)$$

ضریب عملکرد چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک:

$$COP = \frac{Q_{eva} + Q_{TEC}}{W_{comp}} \quad (13)$$

۲-۳. روابط انرژی

روابط انرژی زیر برای چرخه تبرید تراکمی با مبدل کولر ترموالکتریک نوشته می‌شود. در صورت کلی تخریب انرژی برای هر جزء از چرخه از حاصل تفریق سوخت هر جزء و محصول همان جزء (۱۴) حاصل می‌شود. در زیر روابط موجود برای تخریب انرژی هر جزء که از حاصل تفریق سوخت و محصول آن جزء حاصل شده است، مشاهده می‌شود [۳۷].

$$\dot{E}x_{d,i} = \dot{E}x_{F,i} - \dot{E}x_{P,i} \quad (14)$$

$\dot{E}x_{P,i}$ و $\dot{E}x_{F,i}$ به ترتیب تخریب انرژی و انرژی سوخت و محصول جزء i هستند.

کمپرسور:

$$\dot{E}x_{F,comp} = W_{comp} \quad (15)$$

$$\dot{E}x_{P,comp} = \dot{E}x_1 - \dot{E}x_4 \quad (16)$$

$$\dot{E}x_{d,comp} = \dot{E}x_{F,comp} - \dot{E}x_{P,comp} \quad (17)$$

اوپراتور:

$$\dot{E}x_{F,eva} = \dot{E}x_3 - \dot{E}x_4 \quad (18)$$

$$\dot{E}x_{P,eva} = Q_{eva} \left[\frac{T_{env}}{T_{room}} - 1 \right] \quad T_{room} = T_4 + 5 \quad (19)$$

$$\dot{E}x_{d,eva} = \dot{E}x_{F,eva} - \dot{E}x_{P,eva} \quad (20)$$

مبدل کولر ترموالکتریک:

$$\dot{E}x_{F,TEC} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 \quad (21)$$

$$\dot{E}x_{P,TEC} = \dot{E}x_8 - \dot{E}x_7 \quad (22)$$

$$\dot{E}x_{d,TEC} = \dot{E}x_{F,TEC} - \dot{E}x_{P,TEC} \quad (23)$$

مبدل حرارتی:

$$\dot{E}x_{F,HE} = \dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 \quad (24)$$

$$\dot{E}x_{P,HE} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 \quad (25)$$

$$\dot{E}x_{d,HE} = \dot{E}x_{F,HE} - \dot{E}x_{P,HE} \quad (26)$$

شیر انبساط:

$$\dot{E}x_{F,EV} = \dot{E}x_2 \quad (27)$$

$$\dot{E}x_{P,EV} = \dot{E}x_3 \quad (28)$$

$$\dot{E}x_{d,EV} = \dot{E}x_{F,EV} - \dot{E}x_{P,EV} \quad (29)$$

در چرخه پیشنهادی، هدف افزایش بازدهی چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترمو الکتریک است. بنابراین، محصول انرژی، انرژی تولیدی در اوپراتور است. سوخت موجود در سیستم برای تولید این محصول برابر با کار کمپرسور است.

انرژی سوخت کل:

$$\dot{E}x_{F,tot} = W_{comp} \quad (30)$$

اگرژی محصول کل:

$$\dot{E}X_{P,tot} = \dot{E}X_{P,eva} + \dot{E}X_{P,TEC} \quad (31)$$

اگرژی تخریب کل:

$$\dot{E}X_{d,tot} = \dot{E}X_{F,tot} - \dot{E}X_{P,tot} \quad (32)$$

بازده اگرژی کل:

از نسبت محصول کل به سوخت کل حاصل می شود که به دو صورت روابط ۳۳ و ۳۴ می توان این رابطه را نشان داد [۳۸]:

$$\eta_{ex,tot} = \frac{\dot{E}X_{P,tot}}{\dot{E}X_{F,tot}} \quad (33)$$

$$\eta_{ex,tot} = 1 - \frac{\dot{E}X_{d,tot}}{\dot{E}X_{F,tot}} \quad (34)$$

بازده اگرژی هر جزء [۳۸]:

برای جزء i بازده اگرژی از نسبت محصول آن جزء به سوخت آن جزء حاصل می شود.

$$\eta_{ex,i} = \frac{\dot{E}X_{P,i}}{\dot{E}X_{F,i}} \quad (35)$$

درصد تخریب اگرژی هر جزء [۳۸]:

برای جزء i درصد تخریب اگرژی از نسبت تخریب اگرژی هر جزء به تخریب اگرژی کل سیستم حاصل می شود.

$$y_{ex,i} = \frac{\dot{E}X_{d,i}}{\dot{E}X_{d,tot}} * 100 \quad (36)$$

۴. فرضیات و روابط

جدول های ۱ و ۲ وضعیت دما، فشار، آنتالپی، آنتروپی، دبی جرمی و نرخ اگرژی را در همه نقاط چرخه نشان می دهد. جدول ۱ نشان دهنده وضعیت نقاط در زمان کارکرد چرخه در حالت واقعی است.

جدول ۱. وضعیت نقاط در زمان کارکرد چرخه تبرید تراکمی در حالت واقعی

نقاط	T (K)	P (kPa)	$\dot{m}$ (kg.s ⁻¹)	$\dot{S}$ (kj.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	$\dot{h}$ (kj.kg ⁻¹)	$\dot{E}x$ (kW)
۱	۳۷۳/۱	۲۹۶۴	۰/۳۰۷۳	۰/۹۵۲۲	۳۰۵/۶	۲۳/۷۴
۲	۳۰۳	۲۹۶۴	۰/۳۰۷۳	۰/۳۴۷۲	۹۳/۳۶	۱۳/۹۱
۳	۲۸۳	۴۱۲/۸	۰/۳۰۷۳	۰/۳۵۱۵	۹۳/۳۶	۱۳/۵۱
۴	۲۸۳	۴۱۲/۸	۰/۳۰۷۳	۰/۹۲۶۵	۲۵۶/۱	۱۰/۸۶
۷	۲۹۸	۱۰۰	۰/۱۰۶۱	۵/۶۹۹	۲۹۸/۴	-۱۴۲/۹
۸	۳۱۰	۱۰۰	۰/۱۰۶۱	۵/۷۳۹	۳۱۰/۵	-۱۴۲/۹

جدول ۲ نشان دهنده وضعیت نقاط در زمان کارکرد چرخه با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک است.

جدول ۲. وضعیت نقاط در زمان کارکرد چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک

نقاط	T (K)	P (kPa)	$\dot{m}$ (kg.s ⁻¹)	$\dot{S}$ (kj.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	$\dot{h}$ (kj.kg ⁻¹)	$\dot{E}x$ (kW)
۱	۳۷۳/۱	۲۹۶۴	۰/۳۰۷۳	۰/۹۵۲۲	۳۰۵/۶	۲۳/۷۴
۲	۳۰۳	۲۹۶۴	۰/۳۰۷۳	۰/۳۴۷۲	۹۳/۳۶	۱۳/۹۱
۳	۲۸۳	۴۱۲/۸	۰/۳۰۷۳	۰/۳۵۱۵	۹۳/۳۶	۱۳/۵۱
۴	۲۸۳	۴۱۲/۸	۰/۳۰۷۳	۰/۹۲۶۵	۲۵۶/۱	۱۰/۸۶
۵	۲۷۸	۱۰۰	۳۲/۴۹	۵/۶۲۹	۲۷۸/۴	-۴۳۷۲۴
۶	۲۸۰	۱۰۰	۳۲/۴۹	۵/۶۳۶	۲۸۰/۴	-۴۳۷۲۸
۷	۲۹۸	۱۰۰	۰/۱۰۶۱	۵/۶۹۹	۲۹۸/۴	-۱۴۲/۹
۸	۲۹۰	۱۰۰	۰/۱۰۶۱	۵/۶۷۲	۲۹۰/۴	-۱۴۲/۹

۴-۱. نتایج حاصل تحلیل از انرژی

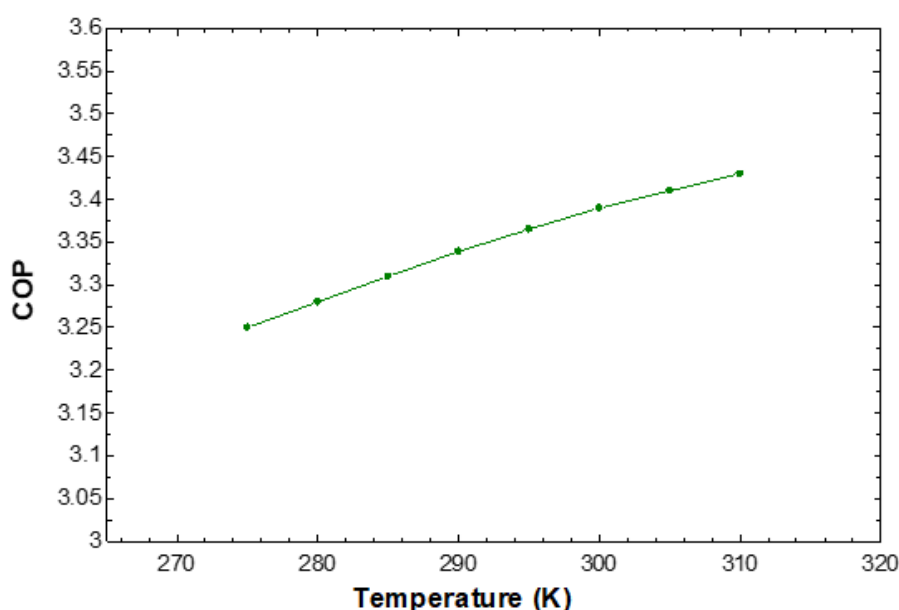
در فصل گذشته روابط انرژی برای تک‌تک اجزای چرخه و برای کل چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک بیان و مشخص شد که با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک بازده چرخه تبرید تراکمی افزایش می‌یابد که ناشی از میزان تبرید تولیدی توسط مبدل است. با توجه به ظرفیت سرمایش ۵۰ کیلوواتی برای اواپراتور حدود ۱ کیلووات تولید سرمایش نیز از طریق مبدل ترموالکتریک به ظرفیت سرمایشی سیکل افزوده می‌شود. چرخه تبرید تراکمی در حالت واقعی دارای راندمان کل ۳/۲۸۳ است. همچنین، چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک دارای راندمان کل ۳/۳۳۹ است.

۴-۲. اثر تغییر پارامترها

در این بخش تأثیر تغییر پارامترهای مختلف روی بازده چرخه و بازده انرژی کل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون بر بازده چرخه

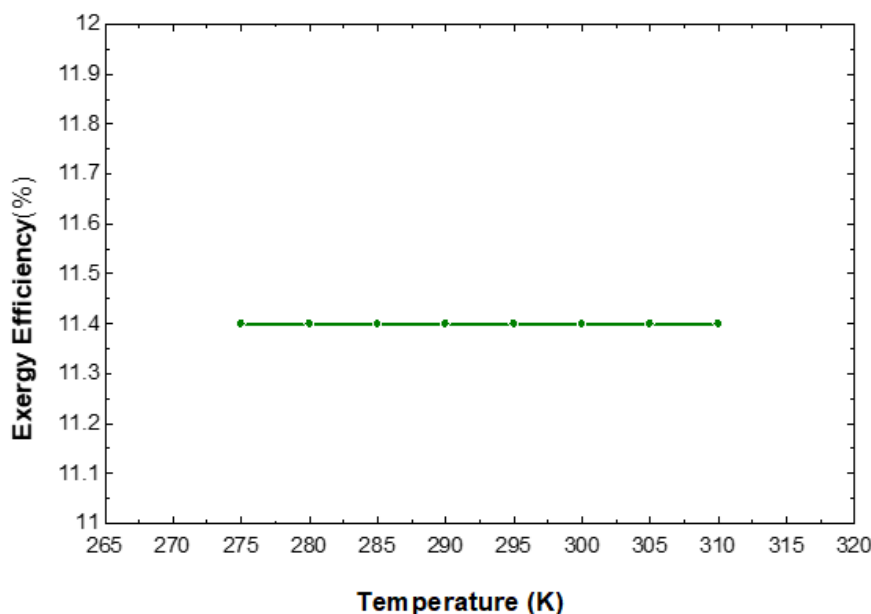
شکل ۴ با استفاده از نرم‌افزار EES رسم شده و به ازای دماهای خروجی مختلف از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون، بازده چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۴ می‌توان بیان کرد که به میزان افزایش دمای هوای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک، ضریب بازدهی چرخه افزایش می‌یابد که این افزایش بازدهی از این جهت است که با افزایش میزان دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون، گرمای بیشتری از سیالی که وظیفه خنک کردن مبرد مورد استفاده در چرخه را داشته، دفع شده و در نتیجه بازدهی چرخه افزایش یافته است.



شکل ۴. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به محیط بیرون بر بازده چرخه

۴-۲-۲. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون بر بازده انرژی

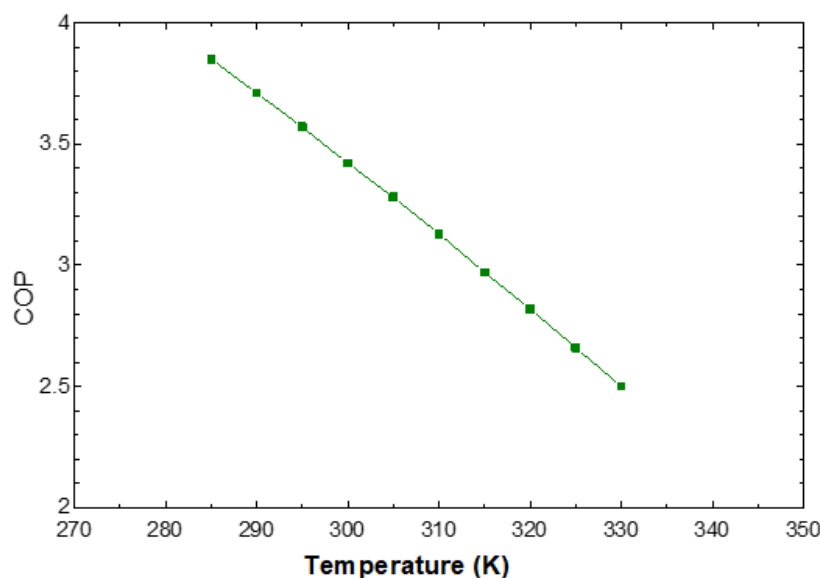
شکل ۵ تأثیر دماهای خروجی مختلف از مبدل کولر ترموالکتریک بر بازده انرژی را مورد بررسی قرار داده است. از شکل ۵ این نتیجه حاصل شد که به میزان افزایش دمای هوای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون، تغییری در نسبت میزان برودت تولیدی اواپراتور و کار کمپرسور ایجاد نمی‌شود و نسبت انرژی محصول به انرژی سوخت ثابت مانده و بازده انرژی بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۵. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به محیط بیرون بر بازده انرژی

۴-۲-۳. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل حرارتی بر بازده چرخه

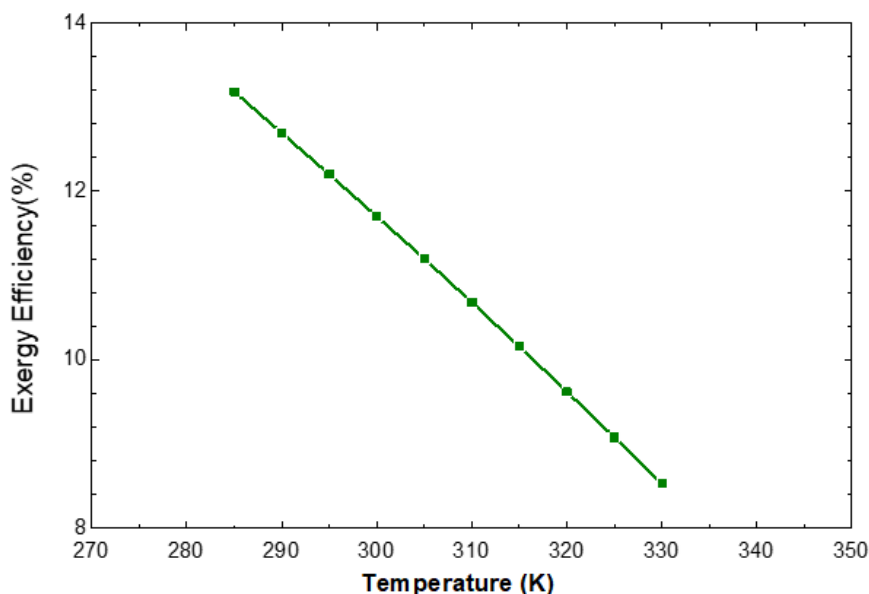
شکل ۶ به ازای دماهای خروجی مختلف از مبدل حرارتی، بازده چرخه را بررسی می کند. از شکل ۶ این نتیجه حاصل شد که به میزان افزایش دمای مبرد خروجی از مبدل حرارتی، ضریب بازدهی چرخه کاهش می یابد که این کاهش بازدهی به این دلیل است که با افزایش میزان دمای مبرد، کارکرد مبدل حرارتی کمتر بوده و بار حرارتی کمتری از سیستم دفع شده است.



شکل ۶. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل حرارتی بر بازده چرخه

۴-۲-۴. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل حرارتی بر بازده انرژی

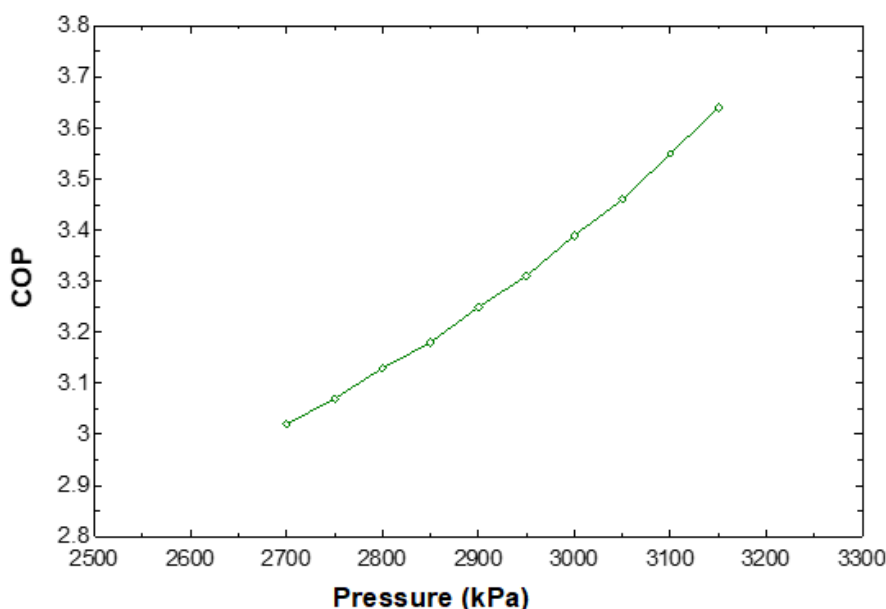
شکل ۷ به ازای دماهای خروجی مختلف از مبدل حرارتی، بازده انرژی را نشان می دهد. مطابق شکل ترسیم شده، با افزایش دمای مبرد خروجی از مبدل حرارتی، افزایش میزان انرژی محصول از افزایش انرژی سوخت کمتر است و در نتیجه، نسبت میزان برودت تولیدی از میزان کار کمپرسور کمتر می شود و بازده انرژی کاهش می یابد.



شکل ۷. اثر تغییرات دمای خروجی از مبدل حرارتی بر بازده انرژی

۴-۲-۵. اثر تغییرات فشار خروجی از کمپرسور بر بازده چرخه

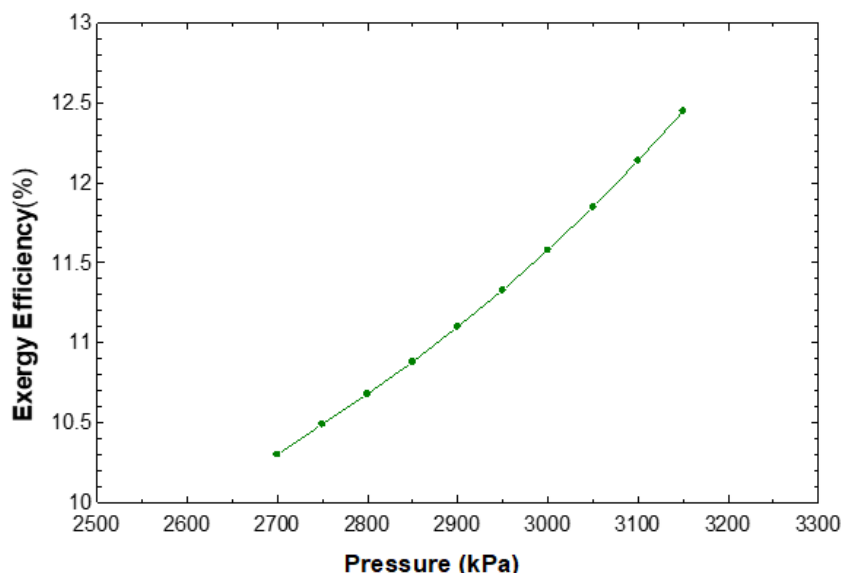
شکل ۸ به ازای فشارهای خروجی مختلف از کمپرسور، بازده چرخه را مورد بررسی قرار داده است. طبق شکل، به میزان افزایش فشار مبرد خروجی از کمپرسور، ضریب بازدهی چرخه افزایش یافته است که این افزایش بازدهی به این خاطر است که مبرد قبل از ورود به کمپرسور کاملاً تبخیر شده و بلندی خط اتصال بین اواپراتور و کمپرسور، منجر به اصطکاک سیال و کاهش فشار مبرد به میزان زیادی شده که این امر باعث کاهش ضریب بازدهی چرخه شده و به میزان افزایش فشار بعد از کمپرسور، این کاهش فشار جبران شده و باعث افزایش بازدهی چرخه شده است.



شکل ۸. اثر تغییرات فشار خروجی کمپرسور بر بازده چرخه

۴-۲-۶. اثر تغییرات فشار خروجی کمپرسور بر بازده انرژی

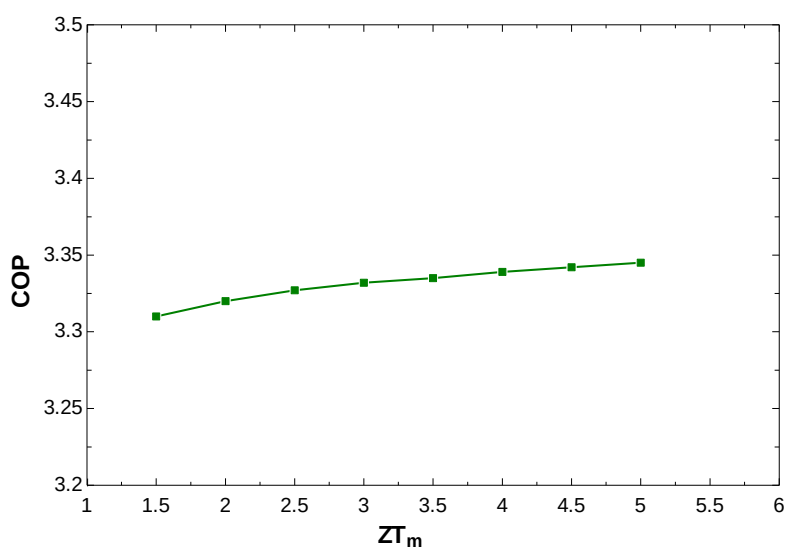
شکل ۹ به ازای فشارهای خروجی مختلف از کمپرسور، بازده چرخه را مورد بررسی قرار داده است. از شکل ۹ این نتیجه حاصل شده که با افزایش فشار خروجی کمپرسور، افزایش میزان انرژی محصول از افزایش انرژی سوخت بیشتر بوده و در نتیجه نسبت میزان برودت تولیدی از میزان کار کمپرسور بیشتر می‌شود و بازده انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۹. اثر تغییرات فشار خروجی کمپرسور بر بازده انرژی

۴-۲-۷. اثر تغییرات ضریب ZT_m بر بازده چرخه

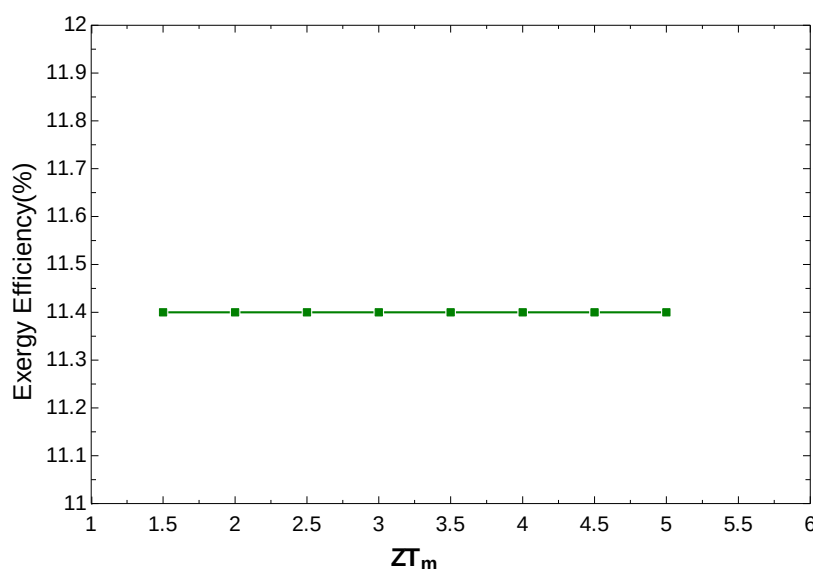
در شکل ۱۰ به ازای ضرایب شایستگی گوناگون بازده چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتیجه، در صورت استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالاتر، ضریب بازدهی چرخه به سبب عملکرد بهتر مبدل کولر ترموالکتریک، افزایش می‌یابد که این افزایش به این علت است که با افزایش ضریب شایستگی، میزان کاهش دمای سیال ورودی به مبدل کولر ترموالکتریک که برای کاهش دمای مبرد عبوری از مبدل حرارتی چرخه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد که این افزایش به رشد بازدهی چرخه منجر می‌شود.



شکل ۱۰. اثر تغییرات ضریب ZT_m بر بازده چرخه

۴-۲-۸. اثر تغییرات ضریب ZT_m بر بازده اگزرژی

شکل ۱۱ به ازای ضرایب شایستگی گوناگون، بازده اگزرژی را مورد تحلیل قرار می‌دهد که به ازای ضرایب شایستگی مختلف عدد ۱۱/۴ حاصل شده است. از این شکل این نتیجه حاصل می‌شود که در صورت استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک با ضریب شایستگی بالاتر، تغییری در نسبت میزان برودت تولیدی اواپراتور و کار کمپرسور ایجاد نشده و نسبت اگزرژی محصول به میزان اگزرژی سوخت ما ثابت مانده و بازده اگزرژی بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۱۱. اثر تغییرات ضریب ZT_m بر بازده اگزرژی

۴-۳. نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی

در جدول‌های ۳ و ۴ نتیجه تحلیل اگزرژی برای چرخه در دو حالت واقعی و با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک مشاهده می‌شود. جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی برای چرخه در حالت واقعی را نشان می‌دهد. ستون‌های جدول از راست به چپ به ترتیب مربوط به اجزای تشکیل‌دهنده چرخه، اگزرژی سوخت هر جزء، اگزرژی محصول هر جزء، اگزرژی تخریب هر جزء، درصد تخریب اگزرژی هر جزء و بازده اگزرژی هر جزء است.

جدول ۳. نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی برای چرخه تبرید تراکمی در حالت واقعی

اجزای چرخه	$\dot{E}_{x_{F,i}}$ (kW)	$\dot{E}_{x_{P,i}}$ (kW)	$\dot{E}_{x_{D,i}}$ (kW)	$y_{ex,i}$ (%)	$\eta_{ex,i}$ (%)
کمپرسور	۱۵/۲۳	۱۲/۸۸	۲/۳۵۲	۱۷/۴	۸۴/۵۵
کندانسور	۹/۸۳۲	۰/۰۲۳۳۲	۹/۸۰۹	۷۲/۹	۰/۲۳۷۲
شیر انبساط	۱۳/۹۱	۱۳/۵۱	۰/۳۹۹۶	۲/۹۵	۹۷/۱۳
اواپراتور	۲/۶۴۶	۱/۷۳۶	۰/۹۱۰۲	۶/۷۳	۶۵/۶
کل چرخه	۱۵/۲۳	۱/۷۳۶	۱۳/۴۷	-	۱۱/۴

نتایج حاصل از تحلیل چرخه در حالت واقعی بیانگر این است که کندانسور با ۷۲/۹ درصد و بعد از آن کمپرسور با ۱۷/۴ درصد بیشترین درصد تخریب اگزرژی را دارند و عامل اساسی تخریب اگزرژی چرخه هستند. از نظر بازده اگزرژی، شیر انبساط با ۹۷/۱۳ درصد و کمپرسور با ۸۴/۵۵ درصد دارای بازده اگزرژی بالایی بوده است. همچنین، بازده اگزرژی کلی چرخه برابر با ۱۱/۴ درصد است.

در جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی برای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک مشخص شده است.

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل انرژی برای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک

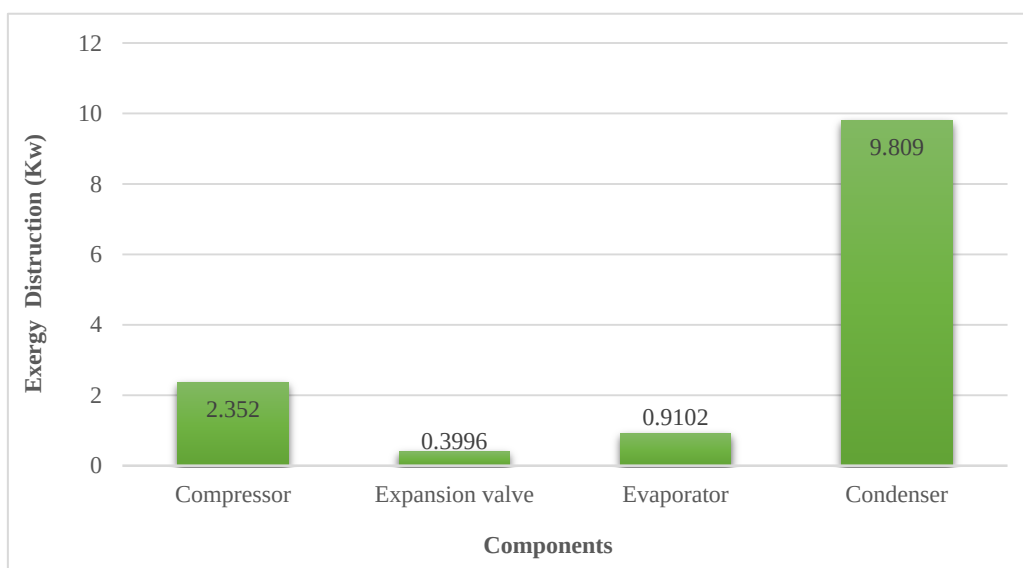
اجزای چرخه	$\dot{E}_{X_{D,i}}$ (kW)	$\dot{E}_{X_{P,i}}$ (kW)	$\dot{E}_{X_{F,i}}$ (kW)	$\eta_{ex,i}$ (%)	$y_{ex,i}$ (%)
کمپرسور	۲/۳۵۲	۱۲/۸۸	۱۵/۲۳	۸۴/۵۵	۱۷/۴
مبدل حرارتی	۵/۳۸۹	۴/۴۴۳	۹/۸۳۲	۴۵/۱۸	۳۹/۹
شیر انبساط	۰/۳۹۹۶	۱۳/۵۱	۱۳/۹۱	۹۷/۱۳	۲/۹۶
اواپراتور	۰/۹۱۰۲	۱/۷۳۶	۲/۶۴۶	۶۵/۶	۶/۷۵
مبدل کولر ترموالکتریک	۴/۴۳۱	۰/۱۱۶۶	۴/۴۴۳	۰/۲۶۲۴	۳۲/۸۶
کل چرخه	۱۳/۴۸۱	۱/۷۳۶	۱۵/۲۳	۱۱/۴	—

از نتایج حاصل از تحلیل چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک می توان بیان کرد که مبدل حرارتی با ۳۹/۹ درصد و بعد از آن مبدل کولر ترموالکتریک با ۳۲/۸۶ درصد بیشترین درصد تخریب انرژی را دارند و عامل اساسی تخریب انرژی چرخه هستند. از نظر بازده انرژی، شیر انبساط با ۹۷/۱۳ درصد و بعد از آن کمپرسور با ۸۴/۵۵ درصد دارای بالاترین بازده انرژی بوده و مبدل کولر ترموالکتریک با ۰/۲۶۲۴ درصد دارای کمترین بازده انرژی بین اجزای موجود در چرخه است. همچنین، بازده انرژی کل چرخه برابر با ۱۱/۴ درصد است.

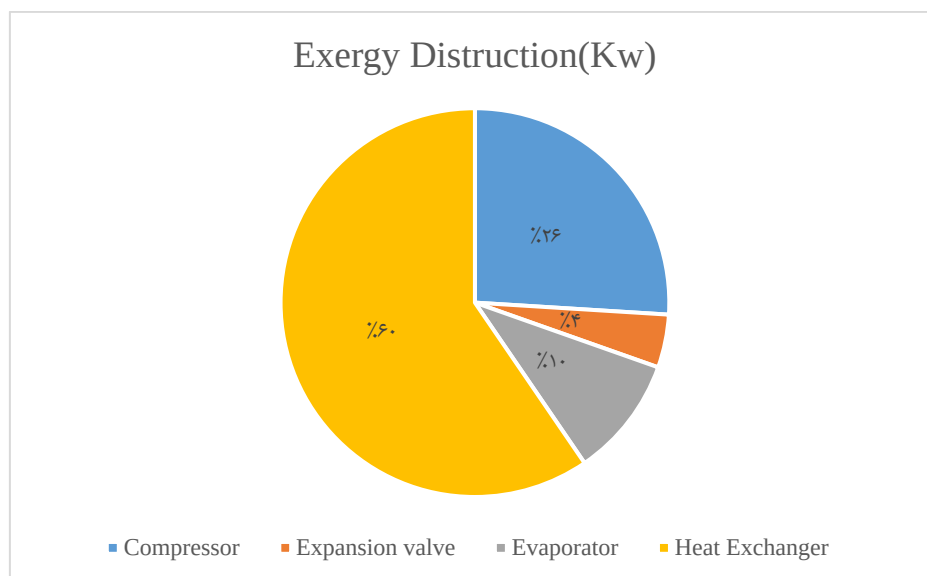
۴-۴. بررسی مقدار تخریب انرژی و درصد تخریب انرژی اجزا

شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمودار میله ای تخریب انرژی و نمودار دایره ای درصد تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی را در حالت واقعی نشان می دهند. از بررسی این شکل ها می توان اظهار داشت که کندانسور با ۹/۸۰۹ کیلووات و ۷۲/۹ درصد از تخریب انرژی کل، بیشترین و شیر انبساط با ۰/۳۹۹۶ کیلووات و ۲/۹۵ درصد از تخریب انرژی کل، کمترین تخریب انرژی را دارد.

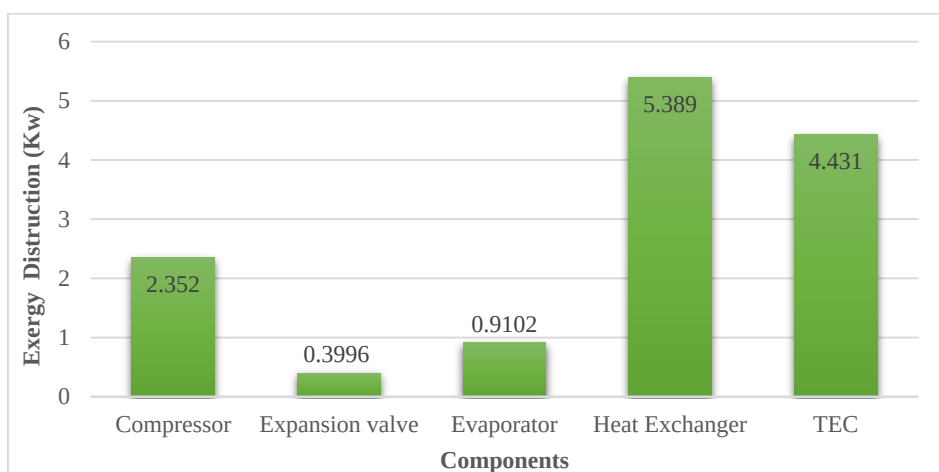
شکل های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمودار میله ای تخریب انرژی و نمودار دایره ای درصد تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک را نشان می دهند. از بررسی این شکل ها می توان اظهار داشت که مبدل حرارتی با ۵/۳۸۹ کیلووات و ۳۹/۹ درصد از تخریب انرژی کل، بیشترین و شیر انبساط با ۰/۳۹۹۶ کیلووات و ۲/۹۶ درصد از تخریب انرژی کل، کمترین تخریب انرژی را دارد.



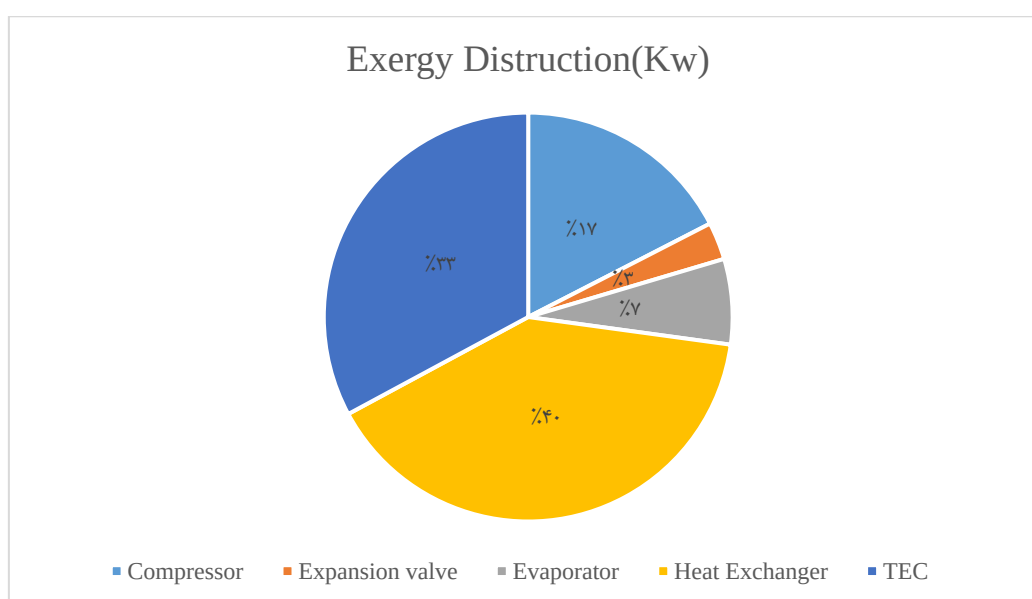
شکل ۱۲. نمودار میله ای تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی واقعی



شکل ۱۳. نمودار دایره‌ای تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی واقعی



شکل ۱۴. نمودار میله‌ای تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک



شکل ۱۵. نمودار دایره‌ای تخریب انرژی اجزای چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک

۵. نتیجه گیری

مراکز داده به دلیل نیاز به عملکرد مداوم و زیرساخت های گسترده، مصرف انرژی بالایی دارند که به افزایش هزینه ها و تأثیرات منفی زیست محیطی منجر می شود. صرفه جویی در مصرف انرژی در این مراکز نه تنها باعث کاهش هزینه های عملیاتی می شود، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و حفظ منابع طبیعی کمک می کند. استفاده از فناوری های کارآمد مانند خنک سازی بهینه، سرورهای کم مصرف و انرژی های تجدیدپذیر، راهکارهای مؤثری برای بهبود بهره وری انرژی هستند. این اقدامات علاوه بر پایداری محیط زیست، به افزایش رقابت پذیری و مسئولیت پذیری اجتماعی سازمان ها نیز کمک می کند. در این تحقیق یک سیستم تبرید تراکمی با مبدل کولر ترموالکتریک به منظور سرمایش یک مرکز داده از دیدگاه انرژی و انرژی مورد تحلیل قرار گرفت. با استفاده از تحلیل ترمودینامیکی بازده انرژی و انرژی برای اجزای سیستم محاسبه شده و تحلیل پارامتریکی روی پارامترهای تأثیرگذار سیکل انجام شد.

- نتایج به دست آمده از تحلیل چرخه ها در دو حالت واقعی و حالت بعدی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک به قرار زیر است:
- چرخه تبرید تراکمی در حالت واقعی دارای راندمان کل ۳/۲۸۳ است. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان می دهد کندانسور با ۹/۸۰۹ کیلووات و سپس کمپرسور با ۲/۳۵۲ کیلووات دارای بیشترین میزان تخریب انرژی هستند.
 - چرخه تبرید تراکمی با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک دارای راندمان کل ۳/۳۳۹ است. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان می دهد با استفاده از مبدل کولر ترموالکتریک، مبدل حرارتی با ۵/۳۸۹ کیلووات و سپس مبدل کولر ترموالکتریک با ۴/۴۳۱ کیلووات دارای بیشترین میزان تخریب انرژی هستند.
 - با افزایش دمای خروجی از مبدل کولر ترموالکتریک به هوای بیرون ضریب بازدهی چرخه افزایش یافت و بازده انرژی ثابت ماند.
 - با افزایش فشار خروجی از کمپرسور ضریب بازدهی چرخه افزایش یافته و بازده انرژی افزایش می یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت مبین نت بابت همکاری در جمع آوری داده های مربوط به سرمایش تشکر و قدردانی می کنند.

منابع

- [1] R. Zahedi, Z. Moradipour, and A. Ahmadi, "Optimization of building energy consumption using single and multi-objective particle swarm optimization and genetics algorithms," *Journal of Sustainable Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 111-129, 2022, doi: 10.22059/ses.2022.90568.
- [2] R. Zahedi, A. Gitifar, and A. Ahmadi, "Case study and modeling of energy consumption of buildings on an urban scale using MATLAB software," *Journal of Sustainable Energy Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 265-282, 2022, doi: 10.22059/ses.2023.340522.1003.
- [3] M. Ebadollahi, M. Amidpour, O. Pourali, and H. Ghaebi, "Development of a novel flexible multigeneration energy system for meeting the energy needs of remote areas," *Renewable Energy*, vol. 198, pp. 1224-1242, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.025>.
- [4] T. Chen, X. Gao, and G. Chen, "The features, hardware, and architectures of data center networks: A survey," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 96, pp. 45-74, 2016.
- [5] Y. Zhang, K. Shan, X. Li, H. Li, and S. Wang, "Research and Technologies for next-generation high-temperature data centers-State-of-the-arts and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 171, p. 112991, 2023.
- [6] J. Glanz, "Power, pollution and the internet," *The New York Times*, vol. 22, 2012.
- [7] J. Rambo and Y. Joshi, "Modeling of data center airflow and heat transfer: State of the art and future trends," *Distributed and Parallel Databases*, vol. 21, pp. 193-225, 2007.
- [8] J. Koomey, "Growth in data center electricity use 2005 to 2010," *A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times*, vol. 9, no. 2011, p. 161, 2011.
- [9] K. Ebrahimi, G. F. Jones, and A. S. Fleischer, "A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 31, pp. 622-638, 2014.
- [10] A. Capozzoli and G. Primiceri, "Cooling systems in data centers: state of art and emerging technologies," *Energy Procedia*, vol. 83, pp. 484-493, 2015.
- [11] S. S. Anandan and V. Ramalingam, "Thermal management of electronics: A review of literature," *Thermal science*, vol. 12, no. 2, pp. 5-26, 2008.
- [12] J. B. Marcinichen, J. A. Olivier, and J. R. Thome, "On-chip two-phase cooling of datacenters: Cooling system and energy recovery evaluation," *Applied thermal engineering*, vol. 41, pp. 36-51, 2012.
- [13] K.-P. Lee and H.-L. Chen, "Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones," *Energy and buildings*, vol. 64, pp. 103-112, 2013.
- [14] C. D. Patel, "A vision of energy aware computing from chips to data centers," in *The international symposium on micro-mechanical engineering*, 2003: Citeseer.
- [15] R. R. Schmidt, E. E. Cruz, and M. Iyengar, "Challenges of data center thermal management," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 49, no. 4.5, pp. 709-723, 2005.
- [16] M. Ohadi, S. Dessiatoun, K. Choo, M. Pecht, and J. V. Lawler, "A comparison analysis of air, liquid, and two-phase cooling of data centers," in *2012 28th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2012: IEEE, pp. 58-63.
- [17] A. J. Shah, V. P. Carey, C. E. Bash, and C. D. Patel, "Exergy analysis of data center thermal management systems," 2008.
- [18] M. Baghsheikhi and M. Mohammadi, "Experimental investigation of the vapor-compression cooling system in a data center: energy and exergy analysis," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, no. 17, pp. 9079-9097, 2023.
- [19] A. J. Díaz, R. Cáceres, J. M. Cardemil, and L. Silva-Llanca, "Energy and exergy assessment in a perimeter cooled data center: The value of second law efficiency," *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 820-830, 2017.
- [20] Q. Zhang *et al.*, "A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization," *Journal of Systems Architecture*, vol. 119, p. 102253, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102253>.
- [21] M. H. Jahangir, R. Mokhtari, and S. A. Mousavi, "Performance evaluation and financial analysis of applying hybrid renewable systems in cooling unit of data centers – A case study," *Sustainable*

- Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101220, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101220>.
- [22] X. Qin *et al.*, "Investigating 4E analyses and multi-objective optimization of a novel data center compression/ejection transcritical CO2 cooling system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 264, p. 125477, 2025/04/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125477>.
- [23] M. Mohsenipour, F. Ahmadi, A. Mohammadi, M. Ebadollahi, and M. Amidpour, "Investigation of a geothermal-based CCHP system from energetic, water usage and CO2 emission viewpoints," *Gas Processing Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 41-52, 2019.
- [24] S. Riffat and G. Qiu, "Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 14-15, pp. 1979-1993, 2004.
- [25] D. R. Brown, T. Stout, J. A. Dirks, and N. Fernandez, "The prospects of alternatives to vapor compression technology for space cooling and food refrigeration applications," *Energy Engineering*, vol. 109, no. 6, pp. 7-20, 2012.
- [26] R. A. Taylor and G. L. Solbrekken, "Comprehensive system-level optimization of thermoelectric devices for electronic cooling applications," *IEEE Transactions on components and packaging technologies*, vol. 31, no. 1, pp. 23-31, 2008.
- [27] W. He, G. Zhang, X. Zhang, J. Ji, G. Li, and X. Zhao, "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler," *Applied Energy*, vol. 143, pp. 1-25, 2015.
- [28] R. Zahedi, E. Mohseni, E. Sadeghitabar, A. Ahmadi, N. Ranjbar, A. Shaghaghi, M.T. Tahoonneh, "Optimum planning of hybrid microgrid system connected to the grid using Homer software for Ahvaz city " *Journal of Sustainable Energy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 183-197, 2023, doi: 10.22059/ses.2024.370277.1049.
- [29] H. Rostamzadeh, M. Ebadollahi, H. Ghaebi, and A. Shokri, "Comparative study of two novel micro-CCHP systems based on organic Rankine cycle and Kalina cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 210-229, 2019/03/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.003>.
- [30] P. Yousefi and A. Avami, "Optimal configuration of low-grade waste heat driven seawater desalination using data envelopment analysis: A case study of industrial application," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 43, no. 5, p. e14438, 2024.
- [31] M.-M. Pazuki, M.-R. Kolahi, M. Ebadollahi, and M. Amidpour, "Enhancing efficiency in an innovative geothermal poly-generation system for electricity, cooling, and freshwater production through integrated multi-objective optimization: A holistic approach to energy, exergy, and enviroeconomic effects," *Energy*, vol. 313, p. 133862, 2024/12/30/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133862>.
- [32] M. Ebadollahi, B. Shahbazi, and H. Ghaebi, "Efficiency and flexibility enhancement of nanofluid-based hybrid solar desalination system equipped with thermoelectric generator for eco-friendly freshwater and power cogeneration," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, pp. 108-122, 2024/10/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.077>.
- [33] M. Ebadollahi, M. Amidpour, O. Pourali, and H. Ghaebi, "Flexibility concept in design of advanced multi-energy carrier systems driven by biogas fuel for sustainable development," *Sustainable Cities and Society*, vol. 86, p. 104121, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104121>.
- [34] Y. Cao, S. Hamidvand, M. Bezaatpour, M. Ebadollahi, and H. Ghaebi, "Microporous foam, magnetic nanoparticles, and revolutionary tubes: Sophisticated combination of three solar energy materials in flat plate solar collectors," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 235, p. 111464, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111464>.
- [35] R. Zahedi, A. Alipour, Y. Salehi, S. Seyfi, M. Ahmadi, A. Ahmadi, A. Shaghaghi, and A. Zahedi, "Sustainable energy supply for medical plant growth using geothermal energy and heat pump," *Journal of Sustainable Energy Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 67-85, 2023, doi: 10.22059/ses.2023.367383.1043.
- [36] A. F. Sotoodeh, F. Ahmadi, Z. Ghaffarpour, M. Ebadollahi, H. Nasrollahi, and M. Amidpour, "Performance analyses of a waste-to-energy multigeneration system incorporated with

- thermoelectric generators," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, p. 101649, 2022/02/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101649>.
- [37] I. Dincer, "The role of exergy in energy policy making," *Energy policy*, vol. 30, no. 2, pp. 137-149, 2002.
- [38] S. F. Ahmadi, A. Minaei, M. Ebadollahi, H. Ghaebi, and M. H. Shahrivar, "Energy management and reducing the environmental impacts of industrial flare gases using a new trigeneration energy system," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 177, pp. 1129-1141, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.066>.