

ارائه یک پیکربندی نوین برای تولید همزمان انرژی حرارتی، برودتی و الکتریکی با استفاده از تلفیق چرخه اجکتوری و پمپ حرارتی

سعید محمدی
دانشجوی دکتری

آرش میرعبداله
لواسانی

دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد تهران مرکزی،
دانشگاه آزاد اسلامی،
تهران

هادی غائبی*

استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه محقق اردبیلی،
اردبیل

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴

چکیده: در این پژوهش، یک پیکربندی نوین برای تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش ارائه شده است که در آن چرخه رانکین آلی، پمپ حرارتی و سامانه تبرید اجکتوری را به صورت یکپارچه و با بهره گیری از سیالات کاری ترکیبی مهندسی شده ادغام می کند. این ساختار برخلاف مطالعات پیشین که تنها به بهبود یک زیرچرخه محدود بوده اند، امکان استفاده همزمان از منابع حرارتی دما پایین برای سه خروجی انرژی را فراهم می کند. عملکرد سیستم با استفاده از تحلیل های انرژی و انرژی و شبیه سازی عددی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بازده انرژی کل سیستم ۴۲٪ است و بیشترین تخریب انرژی به ترتیب در هیتر و ژنراتور رخ می دهد، در حالیکه جدا کننده و مخلوط کن کمترین سهم را دارند. تحلیل پارامترهای مؤثر نشان داد نرخ دبی جرمی جریان ثانویه از متغیرهای کلیدی در اجکتور بوده و افزایش دمای سوپرهایت ضمن بهبود COP چرخه تبرید، اثر محدودی بر توان خالص خروجی دارد. برای تعیین شرایط عملیاتی بهینه، الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد و مشخص شد که تنظیم همزمان نسبت فشار توربین، اختلاف دمای پینچ و دمای ژنراتور می تواند بازده انرژی، بازده انرژی و هزینه واحد تولید را به طور قابل توجهی بهبود دهد. نتایج به دست آمده نشان دهنده برتری ساختار ترکیبی پیشنهادی نسبت به چرخه های منفرد رایج و پتانسیل بالای آن برای بهره برداری از انرژی های دما پایین است.

واژه های راهنما: سیکل تولید همزمان، تبرید اجکتوری، بازده انرژی، اتلاف انرژی، الگوریتم ژنتیک

Saeed Mohammadi
PhD Student

Arash Mirabdoah
Lavasani
Associate Professor,
Department of Mechanical
Engineering, CT. C.,
Islamic Azad University,
Tehran, Iran

Hadi Ghaebi*
Professor,
Department of
Mechanical
Engineering,
University of
Mohaghegh Ardabili,
Ardabil

Development of a novel configuration for trigeneration of thermal, cooling, and electrical energy using an integrated ejector cycle and heat pump

Abstract: In this study, a novel trigeneration configuration is proposed that integrates an Organic Rankine Cycle (ORC), a heat pump, and an ejector refrigeration cycle into a unified system. Unlike previous works that focused on improving only one subsystem, the present configuration simultaneously utilizes low-grade thermal energy for power generation, heating, and cooling, while employing engineered working-fluid blends instead of pure refrigerants to enhance multi-purpose performance. The energy and exergy analyses, supported by numerical simulation, show that the overall exergy efficiency of the system reaches 42%, with the highest exergy destruction occurring in the heater and generator, and the lowest in the separator and mixer. Sensitivity analysis reveals that the secondary-flow mass ratio is a key parameter governing ejector behavior. Increasing the superheat degree improves the COP of the refrigeration cycle but has a limited effect on net power output. A genetic algorithm was applied to optimize the operating conditions, demonstrating that coordinated adjustment of turbine pressure ratio, generator pinch temperature difference, and generator temperature can significantly enhance energy efficiency, exergy efficiency, and the specific unit cost of product. The findings confirm the superior performance of the proposed integrated configuration compared with conventional single-cycle systems and highlight its strong potential for efficient utilization of low-temperature heat sources

Keywords: Combined production cycle, Ejector refrigeration cycle, Exergy efficiency, Exergy destruction, Genetic algorithm

۱- مقدمه

در دنیای امروز، انرژی به عنوان یکی از حیاتی ترین عوامل توسعه اقتصادی، صنعتی و اجتماعی شناخته می شود. افزایش تقاضا و کاهش منابع فسیلی همراه با پیامدهای زیست محیطی استفاده بی رویه از سوخت های فسیلی نیاز به راهکارهای پایدار و بهینه سازی تولید انرژی را ضروری کرده است. بهره گیری از فناوری های نوین و توسعه انرژی های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی و زیست توده از مهم ترین راهبردهای گذار به آینده ای کم کربن و پایدار است [۱]. رشد مصرف سوخت های فسیلی و افزایش قیمت های جهانی انرژی، چالش هایی را در تأمین پایدار انرژی ایجاد کرده است. علاوه بر این، انتشار گازهای گلخانه ای لزوم مدیریت بهینه مصرف و استفاده کارآمد از منابع انرژی را برجسته ساخته است. فناوری های نوین در طراحی تجهیزات و بازیابی انرژی دورریز مانند گرمای تلف شده در فرآیندهای صنعتی و نیروگاه ها نقش مهمی در افزایش راندمان کلی سیستم ها دارند [۲-۴]. از دهه ۱۳۵۰ شمسی کشورهای توسعه یافته با سیاست گذاری هوشمندانه و سرمایه گذاری در فناوری های بهینه سازی انرژی توانسته اند مصرف انرژی را کاهش و استانداردهای زیست محیطی را بهبود دهند. بهینه سازی انرژی نه تنها به صرفه جویی، بلکه به منبع قابل اعتمادی در سبد انرژی ملی بدل شده است. مدیریت صحیح انرژی، مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی به همراه دارد و امروزه از ارکان سیاست گذاری کلان انرژی در جهان است. در ایران، وابستگی زیاد به منابع فسیلی و کم توجهی به انرژی های پاک کشور را در برابر نوسانات بازار جهانی آسیب پذیر کرده است. با توجه به محدودیت ذخایر نفت و گاز و چالش های انتقال به انرژی های تجدیدپذیر، تدوین سیاست انرژی متوازن و مبتنی بر تحلیل های علمی ضروری است تا امنیت انرژی، حفاظت از محیط زیست و توسعه پایدار همزمان تضمین شود. افزایش هزینه انرژی و پیامدهای تغییرات اقلیمی، اهمیت فناوری های نوین را در افزایش بهره وری و کاهش آلاینده ها بیش از پیش کرده است. با هدف کاهش انتشار کربن و خنثی سازی کربن که در هفتاد و پنجمین اجلاس مجمع عمومی سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۰ پیشنهاد شد، کربن زدایی توجه گسترده ای را در داخل و خارج از کشور به خود جلب کرده است. به عنوان یک خدمت اجتماعی ضروری که باید بیشتر کربن زدایی شود، انتخاب های گرمایشی چین تأثیر قابل توجهی بر ر

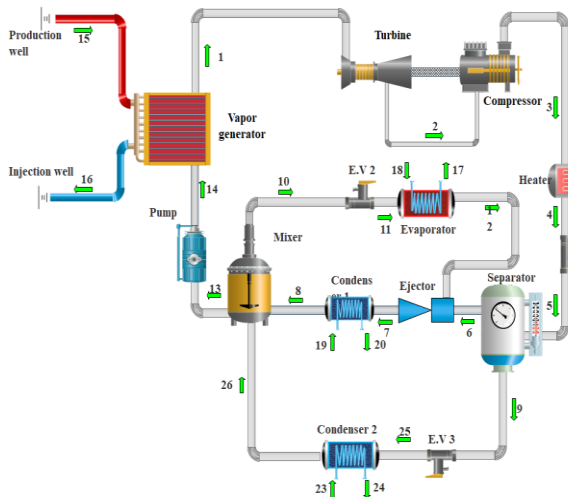
وند گرمایش جهانی دارد [۵]. بازیابی حرارت اتلافی و سیستم های تولید همزمان توان، راهکارهای مؤثری برای

بهینه سازی مصرف انرژی در بخش های مختلف اقتصادی اند. نیروگاه های گازی به دلیل انعطاف پذیری بالا جایگاه ویژه ای دارند؛ اما راندمان محدود آن ها، ضرورت بهره گیری از سیکل های ترکیبی مانند نیروگاه سیکل ترکیبی (CCPP) را ایجاد کرده است. در این ساختار، گرمای خروجی توربین گازی برای تولید بخار و افزایش راندمان کل سیستم به کار می رود که به صرفه جویی در سوخت و کاهش آلاینده ها کمک می کند [۶-۸]. تولید پراکنده انرژی نیز به ویژه در مقیاس های کوچک و متوسط با استفاده از فناوری هایی مانند میکروتوربین ها، پیل های سوختی و پنل های خورشیدی اهمیت یافته است. سیکل های ترکیبی به دلیل راندمان بالا و کاهش مصرف سوخت، گزینه ای مناسب برای تولید انرژی محلی هستند. بحران انرژی از چالش های اساسی جهانی است و بهینه سازی مصرف و کاهش تلفات در تولید برق از ارکان توسعه پایدار محسوب می شوند. حتی در نیروگاه های پیشرفته سیکل ترکیبی بیش از ۵۰ درصد انرژی ورودی به صورت حرارت تلف می شود [۹، ۱۰]. سیستم های تولید همزمان توان، سرمایش و گرمایش (CCHP) از نوآورانه ترین راهکارها برای مقابله با این مشکل به شمار می روند. سیستم های CCHP از فناوری های پیشرفته حوزه انرژی هستند که به طور همزمان قادر به تأمین نیازهای گرمایشی، سرمایشی و برقی از یک منبع حرارتی واحد می باشند. هدف این سیستم ها افزایش بهره وری انرژی و کاهش اتلاف آن است؛ به گونه ای که حرارت تولید شده در توربین های گازی یا موتورهای احتراق داخلی، علاوه بر تولید برق، برای برآوردن بارهای حرارتی و سرمایشی به صورت بهینه به کار می رود. با پیشرفت فناوری های توربین گازی و موتورهای احتراق، کاربرد این سیستم ها با بهره گیری از این محرک ها افزایش چشمگیری یافته است. در این سامانه ها حرارت اتلافی معمولاً به محیط دفع می شود؛ اما از طریق تجهیزات بازیافت حرارت مانند مولد بخار بازیافتی (HRSG) و چیلرهای جذبی، این حرارت دوباره وارد چرخه انرژی شده و برای تولید بخار، آب داغ یا سرمایش مورد استفاده قرار می گیرد، بدون نیاز به مصرف مجدد سوخت. این شیوه مصرف، علاوه بر صرفه جویی در سوخت های فسیلی به کاهش قابل توجه انتشار گازهای آلاینده کمک می کند. نتایج پژوهش احمدی و همکاران [۱۱] نشان می دهد که ترکیب فناوری بازیافت حرارت با سیستم های تولید همزمان، باعث افزایش راندمان کل و کاهش هزینه های انرژی می شود و راه حلی پایدار برای مراکز صنعتی و خدماتی فراهم می آورد. راندمان بالای سیستم های CCHP آنها را به گزینه ای کارآمد در تبدیل انرژی تبدیل کرده است که به بهره وری بهتر سوخت و کاهش چشمگیر آلاینده ها مانند CO₂، ترکیبات

گوگردی و اکسیدهای نیتروژن منجر می‌شود. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند سیستم‌های CCHP به ابزاری کلیدی در تحقق اهداف زیست‌محیطی و توسعه پایدار بدل شوند، به‌ویژه در کشورهایی که مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری دارند. مطالعه محمودی و همکاران [۱۲] نیز بر کاهش اثرات زیست‌محیطی این سیستم‌ها تأکید دارد. از سوی دیگر، تحلیل انرژی به عنوان ابزاری پیشرفته در ترمودینامیک برای شناسایی و کاهش منابع اتلاف انرژی در سیستم‌های گرمایشی به کار می‌رود. پژوهش دینسر و روسن [۱۳] بیان می‌کند که این روش با به‌کارگیری قوانین بقای جرم و انرژی به همراه قانون دوم ترمودینامیک امکان ارزیابی دقیق بازگشت‌ناپذیری سیستم و بهینه‌سازی عملکرد آن را فراهم می‌آورد که منجر به افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی انرژی می‌شود. با توجه به رشد مصرف انرژی و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، دولت‌ها به توسعه فناوری‌های نوین و استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و زمین‌گرمایی و همچنین بازیابی حرارت‌های اتلاfi در نیروگاه‌ها روی آورده‌اند. در نیروگاه‌ها و سیستم‌های تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی بخش قابل توجهی از انرژی به‌صورت گرمایی تلف می‌شود که معمولاً در محدوده دمای پایین قرار دارد. فناوری چرخه رانکین آلی (ORC) با بهره‌گیری از سیالات آلی با نقطه جوش پایین امکان استخراج انرژی از این منابع حرارتی دما پایین و تبدیل آن به برق را فراهم می‌کند و به همین دلیل در بازیابی حرارت نیروگاهی کاربرد گسترده دارد. در سال‌های اخیر ترکیب چرخه ORC با سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی مانند پمپ حرارتی و سیستم‌های تبرید جذبی یا اجکتوری منجر به شکل‌گیری سیستم‌های CCHP پیشرفته‌ای شده است که می‌توانند به‌صورت همزمان برق، گرما و سرما را تأمین کنند. لیو و همکاران [۱۴] در پژوهش خود به مقایسه چرخه تراکم دو مرحله‌ای همراه با اجکتور با چرخه تراکم دو مرحله‌ای متداول پرداختند. آن‌ها چهار چرخه مختلف (سه چرخه اجکتوردار E_1 ، E_2 و E_3 و یک چرخه مرجع را با استفاده از مبردهای گوناگون R1234yf، R152a، R32 و R290) در شرایط سخت سرمایش و گرمایش بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن اجکتور باعث بهبود چشمگیر عملکرد سیستم می‌شود، به‌ویژه در حالت سرمایش، چرخه E_3 با مبرد R32 بالاترین راندمان را داشت و ضریب عملکرد آن تا ۱۶/۱٪ نسبت به چرخه مرجع بهبود یافت. در حالت گرمایش نیز چرخه‌های E_1 و E_2 با مبرد R152a بهترین گزینه بودند و بهبود قابل توجهی در ضریب عملکرد گرمایی نشان دادند. این مطالعه مزایای بالقوه چرخه‌های تراکم دو مرحله‌ای همراه با اجکتور را در

کاربردهای سرمایشی و گرمایشی روشن می‌سازد. گائو و همکاران [۱۵] سامانه نم‌زدایی HDH مبتنی بر پمپ حرارتی-اجکتور را معرفی کردند. نتایج تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی نشان داد این سامانه با مبرد R1234ZE(Z) تولید آب شیرین و راندمان بالایی دارد و اختلاف دمای بیشتر تبخیر میعان عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. لین و همکاران [۱۶] به منظور رفع مشکل کاهش راندمان در شرایط غیرطراحی، سامانه پمپ حرارتی اجکتوری با افت دمای زیاد (LEHP) را پیشنهاد کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد ظرفیت گرمایشی LEHP حدود ۱/۶۳ برابر پمپ حرارتی اجکتوری معمولی است و ضریب عملکرد آن نیز ۳/۶۶٪ بهبود یافته است. همچنین، مدل نیمه‌تجربی توسعه‌یافته توانست نسبت مکش را با خطای کمتر از ۰/۶۸٪ پیش‌بینی کند. این فناوری‌ها به بهره‌برداری بهینه از منابع حرارتی دمای پایین کمک کرده و گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار و بهینه‌سازی مصرف انرژی به شمار می‌روند. هدف پژوهش همان‌طور که بیان شد، استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر و حرارت‌های دمای پایین اهمیت فراوانی دارد. سیستم‌های CCHP که نسل پیشرفته سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) هستند، امکان تأمین همزمان انرژی حرارتی، برودتی و الکتریکی را فراهم می‌آورند. در روش سنتی، انرژی برق از شبکه و گرما از سوخت مستقیم تأمین می‌شود که منجر به اتلاف زیاد انرژی می‌گردد؛ اما در CHP، گرمای جانبی تولید برق بازیابی شده و بهره‌وری سیستم افزایش می‌یابد. تفاوت اصلی سیستم‌های CCHP با CHP استفاده از انرژی گرمایی برای تولید سرمایش به کمک تجهیزات مختلفی مانند چیلرهای جذبی یا اجکتوری است؛ به همین دلیل در برخی منابع با عنوان سیستم‌های تولید سه‌گانه سرمایش، گرمایش و برق (BCHP) نیز شناخته می‌شوند. با توجه به نیاز به بهره‌وری بالاتر و استفاده از منابع حرارتی دمای پایین، پژوهش حاضر به جای سیستم‌های سنتی سرمایش تراکمی یا جذبی از سیستم تبرید اجکتوری که فناوری نوین و کم‌هزینه‌ای است بهره می‌برد. این سیستم با منابع حرارتی پایین‌دما سازگاری دارد، قطعات متحرک ندارد و هزینه‌های نگهداری پایین‌تری دارد که منجر به بهبود راندمان و توان خالص خروجی می‌شود.

نوآوری اصلی این تحقیق، ارائه یک پیکربندی ترکیبی جدید شامل سیستم تبرید اجکتوری، چرخه ORC و پمپ حرارتی است. در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر بهبود عملکرد یک بخش منفرد مانند سرمایش (لیو و همکاران) یا گرمایش (لین و همکاران) تمرکز داشته‌اند، طرح پیشنهادی حاضر امکان تأمین همزمان سرمایش و گرمایش را فراهم کرده و گامی مؤثر



شکل ۱ سیستم نوین تولید همزمان سه گانه تبرید، گرمایش و توان ارائه شده

در کنار تولید توان الکتریکی برای تأمین گرمایش فضا و آب گرم مصرفی، یک پمپ حرارتی در سامانه گنجانده شده است که از باقی مانده انرژی حرارتی بهره‌برداری می‌کند. از سوی دیگر، به منظور تولید سرمایش، یک چرخه اجکتوری در ساختار سیستم تعبیه شده که با افزایش فشار و دمای سیال توسط یک کمپرسور، شرایط عملیاتی مناسب برای عملکرد اجکتور و تأمین بار برودتی را فراهم می‌نماید (شکل (۲)). اجکتور شامل چهار ناحیه اصلی است: محفظه مکش، نازل اولیه، محفظه اختلاط با سطح مقطع ثابت و دیفیوزر. در ابتدای فرآیند، سیال اولیه (Primary flow) پس از عبور از نازل همگرا-واگرا با سرعت بسیار زیاد و فشار پایین وارد ناحیه ۱ می‌شود. کاهش فشار در این ناحیه موجب ایجاد نیروی مکش شده و سیال ثانویه (Secondary flow) از سمت محفظه مکش وارد اجکتور می‌شود. دو جریان در ناحیه ۲ با هم ترکیب شده و به علت اختلاف شدید سرعت و فشار، یک ناحیه اختلاط آشفته تشکیل می‌دهند. در این بخش، قطر مشخصه با D_{PA} نمایش داده شده و سرعت مخلوط معمولاً بالا و فشار پایین است. پس از اختلاط کامل، جریان وارد ناحیه با سطح مقطع ثابت می‌شود؛ این بخش مسئول یکنواخت‌سازی سرعت و فشار و آماده‌سازی جریان برای ورود به دیفیوزر است. در ناحیه ۳ جریان وارد دیفیوزر شده و با افزایش تدریجی سطح مقطع، بخش عمده انرژی جنبشی به انرژی فشاری تبدیل می‌شود؛ در نتیجه، فشار جریان در خروجی (exit) افزایش می‌یابد و شرایط مناسب برای میعان در کندانسور فراهم می‌شود. مسیر جریان‌ها در شکل به وضوح نشان می‌دهد که سیال اولیه از سمت چپ وارد نازل شده سرعت می‌گیرد و مکش لازم برای ورود سیال ثانویه را ایجاد می‌کند، سپس هر دو جریان در محفظه اختلاط وارد شده، ترکیب می‌شوند و نهایتاً در دیفیوزر با افزایش فشار از سیستم

در توسعه سیستم‌های پیشرفته CCHP به شمار می‌رود. علاوه بر این، مسئله انتخاب سیال عامل که یکی از چالش‌های اساسی این چرخه‌هاست، با رویکردی نوین بررسی شده است. برخلاف مطالعات گذشته که اغلب از سیالات خالص استفاده کرده‌اند، در این پژوهش از ترکیبات مهندسی شده سیالات عامل بهره گرفته شده تا در سه بخش توان، سرمایش و گرمایش بازده بالاتری حاصل شود. این ویژگی مزیتی متمایز نسبت به تحقیقات قبلی ایجاد می‌کند و زمینه ارتقای راندمان و قابلیت اطمینان سیستم‌های CCHP را فراهم می‌سازد.

۲- توصیف سیستم

در این پژوهش، یک سامانه نوین ترکیبی با عملکرد چندگانه طراحی شده است که هدف آن تولید هم‌زمان برق، گرما و سرمایش از منابع حرارتی با دمای پایین است. این سامانه بر پایه ادغام دو چرخه ترمودینامیکی شکل گرفته: چرخه رانکین آلی (ORC) و چرخه تبرید اجکتوری که با یکدیگر در تعامل هستند تا پاسخگوی نیازهای مختلف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، صنایع یا تأسیسات تجاری باشند. همان گونه که در نمودار (طرح) شماتیک (شکل (۱)) نمایش داده شده، منبع اولیه انرژی این سیستم از یک چرخه حرارتی نظیر سیستم خورشیدی یا زمین‌گرمایی تأمین می‌شود. انرژی زمین‌گرمایی نسبتاً پایدار بوده و دمای ورودی به تبخیرکننده ORC و اواپراتور پمپ حرارتی ثابت است، در حالی که انرژی خورشیدی دارای نوسانات روزانه قابل توجه است. برای جبران این اختلاف، سیستم از مخزن حرارتی (Thermal storage) و کنترل تطبیقی جریان سیال عامل بهره می‌برد تا دمای ورودی به چرخه‌ها در طول شب یا ساعات کم‌نور خورشیدی به حدی حفظ شود که عملکرد چرخه مشابه حالت بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی باشد. بدین ترتیب، پارامترهای عملکردی چرخه، شامل فشار و دمای نقاط کلیدی، در هر دو حالت بررسی شده و سیستم توانایی ارائه عملکرد پایدار و قابل اعتماد را در شرایط متغیر منابع انرژی اولیه داراست. با توجه به راندمان پایین ذاتی چنین منابعی و اتلاف بخش زیادی از انرژی ورودی به صورت حرارت، یک راهبرد بازیافت انرژی در ساختار سیستم لحاظ شده است. برای این منظور از چرخه بهره گرفته شده تا انرژی حرارتی باقیمانده از مرحله نخست را به کار گیرد. در این فرآیند، حرارت بازیافتی با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال وارد تبخیرکننده ORC شده و از طریق تبخیر سیال عامل، انرژی لازم برای تولید برق فراهم می‌شود.

این مکانیسم نه تنها به افزایش توان خروجی منجر می‌گردد؛ بلکه راندمان کلی سیستم را نیز به طور قابل توجهی ارتقاء می‌دهد.

در مصرف انرژی با ارزش و هزینه‌زایی سیستم فراهم می‌آورد و مبنایی برای بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌های حرارتی از دیدگاه ترموآکونومیک به شمار می‌آید.

$$\dot{C}_{Q,k} + \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{W,k} + \sum \dot{C}_{out,k} \quad (4)$$

هزینه‌های متوسط با $\dot{C}$ و نرخ هزینه کلی مربوط به جزء k سیستم با نماد $\dot{Z}_k$ مشخص می‌گردد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای بررسی اقتصادی سیستم در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اقتصادی سیستم

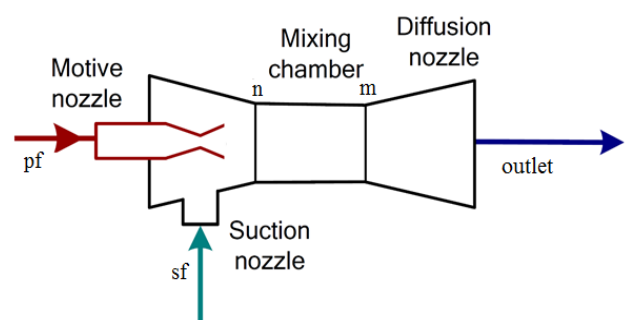
واحد	مقدار	اجزای سیکل
H (ساعت)	۷۴۴۶	کارکرد سالیانه (N)
%	۱۰	نرخ سود سالیانه (i)
سال	۲۰	زمان کارکرد (n)
-	۱/۰۶	ضریب تغییر نگهداری (φ)
-	۰/۱۱۷۵	CRF

۳-۳- روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک (GA) روش جستجوی تصادفی و فراابتکاری مبتنی بر تکامل طبیعی است که برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده کاربرد دارد. این الگوریتم با ایجاد یک جمعیت اولیه از پاسخ‌های ممکن و اعمال متوالی عملگرهایی مانند انتخاب، ترکیب (Crossover) و جهش (Mutation) به تدریج به سمت یافتن بهترین پاسخ حرکت می‌کند.

برخلاف روش‌های سنتی که نیازمند مشتق‌پذیری یا پیوستگی تابع هدف هستند GA تنها به مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و از این رو در طیف وسیعی از مسائل پیوسته، گسسته و غیرخطی قابل استفاده است. ویژگی مهم GA بهره‌گیری از توازی ضمنی است که در آن چندین بخش از فضای پاسخ به‌طور هم‌زمان کاوش می‌شود. این ویژگی موجب کاهش احتمال گیرافتادن در نقاط بهینه محلی می‌شود، امری که در روش‌های جستجوی تک‌مسیره رایج است. در هر نسل پس از رمزگشایی رشته‌ها و محاسبه مقدار تابع هدف آن‌ها بر اساس میزان برازندگی، احتمال انتخاب هر رشته برای تولید نسل بعد تعیین می‌شود. رشته‌های با عملکرد بهتر شانس بالاتری برای مشارکت در تولید نسل جدید دارند که باعث بهبود تدریجی کیفیت پاسخ‌ها در طول تکرارها می‌شود [۱۸] عملگرهای کلیدی در اجرای GA عبارتند از:

خارج می‌گردند. این توالی عملکرد اساس کار اجکتور بوده و تعیین‌کننده نسبت مکش، فشار خروجی و راندمان چرخه تبرید اجکتوری است. این بخش به‌ویژه برای کاربردهایی مانند تهویه مطبوع یا خنک‌کاری فرآیندهای صنعتی مناسب است. ترکیب این سه بخش ORC، پمپ حرارتی و سامانه اجکتوری یک سیستم یکپارچه چندوظیفه‌ای و با راندمان بالا را به وجود آورده است که قابلیت بهره‌برداری از منابع حرارتی دما پایین را به شکل مؤثر دارد. این سامانه می‌تواند در توسعه راه‌حل‌های انرژی پایدار به‌ویژه در نواحی دارای پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان گزینه‌ای عملی و کارآمد مطرح شود.



شکل ۲ نحوه عملکرد اجکتور

۳-۲ روش تحقیق

۳-۱- تحلیل انرژی و انرژی و اگزرژی

با فرض شرایط پایا برای هر حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۱) موازنه جرم، انرژی و اگزرژی برای هر یک از اجزای سیستم به ترتیب به صورت روابط (۳-۱) می‌باشند [۱۷]:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum (\dot{m}h)_{in} - \sum (\dot{m}h)_{out} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{E}_Q - \dot{W} + \sum (\dot{m}ex)_{in} - \sum (\dot{m}ex)_{out} = \dot{E}_D \quad (3)$$

که $\dot{m}_{in}$ به ترتیب بیانگر مقدار انرژی ورودی و $\dot{m}_{out}$ مقدار انرژی خروجی به حجم کنترل است.

۳-۲- تحلیل اقتصادی

با لحاظ کردن هزینه‌های انتقال گرما و انجام کار در تحلیل اگزژیکی، معادله جامع موازنه هزینه برای عضو k به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که تمامی جوانب ترمودینامیکی و اقتصادی را پوشش دهد. این معادله ابزار قدرتمندی برای درک نقش هر جزء

جدول ۳ متغیرهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عملکرد سیستم CCHP

پارامتر	مقدار
نسبت فشار توربین	۱۰
فشار محیط (kPa)	۱۲۰۰
دبی جرمی سیال محرک ورودی (kg/s)	۱/۵
دمای ورودی به جنراتور بخار (°C)	۵۰۰
فشار ورودی جنراتور بخار (kPa)	۷۰۰۰
فشار کندانسور سیکل رانکین ^۲ (kPa)	۵
فشار اواپراتور سیکل تبرید اجکتوری ^۲ (kPa)	۱۰۰
فشار هیتر سیکل پمپ حرارتی ^۲ (kPa)	۲۰۰
فشار خروجی توربین سیکل ارگانیک رانکین ^۲ (kPa)	۱۰۰
بازده آیزنتروپیک کمپرسور ^۲	۰/۸۴
بازده آیزنتروپیک توربین ^۲	۰/۸۷
بازده آیزنتروپیک پمپ ^۲	۰/۸۸
بازده دیفیوزر	۰/۸۸
بازده نازل	۰/۸۸
بازده اختلاط	۰/۸۸
راندمان حرارتی مبدل‌های حرارتی ^۱ (%)	۹۰
دمای آب سرد ورودی ^۲ (°C)	۱۰
دمای آبگرم مصرفی ^۲ (°C)	۶۰

۴-۲- فرضیات اجکتور و عملکرد آن

اجکتورها تجهیزاتی ساده و بدون قطعات متحرک هستند که برای انتقال انرژی یا ایجاد خلأ مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها می‌توانند با سیالات مختلف مانند بخار، آب یا سیالات دوفازی کار کنند و به دلیل هزینه پایین، دوام بالا و عدم نیاز به نگهداری در صنایع گوناگون از جمله پتروشیمی، تهویه مطبوع و فرآیندهای خلأ کاربرد وسیعی دارند. مکانیسم عملکرد اجکتور بر اساس قانون برنولی است: سیال محرک پرسرعت فشار پائینی ایجاد می‌کند که باعث مکش سیال دوم می‌شود. این دو سیال در محفظه اختلاط ترکیب شده و پس از عبور از دیفیوزر فشار جریان نهایی افزایش می‌یابد. این سیستم بدون نیاز به برق یا قطعات مکانیکی برای شرایط خطرناک یا خورنده نیز مناسب است. برای ساده‌سازی مدل و تمرکز بر پارامترهای کلیدی عملکرد فرضیات زیر در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند: * جریان در اجکتور به صورت پایا یک‌بعدی و در راستای محور جریان تحلیل می‌شود.

انتخاب: گزینش رشته‌هایی با برازندگی بالاتر برای نسل بعد؛ ترکیب: ادغام اطلاعات ژنتیکی برای تولید پاسخ‌های جدید؛ جهش: اعمال تغییرات تصادفی به منظور حفظ تنوع جمعیت. در نرم‌افزار EES روش‌های گوناگونی برای بهینه‌سازی وجود دارد که بسته به ویژگی‌های مسئله به کار گرفته می‌شوند؛ مانند روش مستقیم، روش کمکی متغیر و مسیرهای توأمان. با این حال در این پژوهش به دلیل مزایای روش GA از جمله کارایی در حل مسائل غیرخطی، چندهدفه و دارای محدودیت‌های متعدد، این الگوریتم به عنوان روش اصلی بهینه‌سازی انتخاب شده است. پارامترهای مورد استفاده در اجرای الگوریتم ژنتیک شامل تعداد افراد جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ‌های جهش اولیه، حداکثر و حداقل جهش و احتمال تقاطع است. پارامترهایی که برای اجرای الگوریتم ژنتیک در فرایند بهینه‌سازی مورد نیاز هستند در جدول (۲) آمده‌اند.

جدول ۲ پارامترهای الگوریتم ژنتیک [۱۸]

پارامتر	مقدار
تعداد افراد در جمعیت	۳۲
تعداد نسل‌ها	۶۴
حداکثر نرخ جهش	۰/۲۵
حداقل نرخ جهش	۰/۰۰۰۵
نرخ جهش ابتدایی	۰/۲۵
احتمال تقاطع	۰/۸۵

۴-۲- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- فرضیات و داده‌های ورودی

به منظور شبیه‌سازی دقیق عملکرد سیستم ترکیبی پیشنهادی در محیط نرم‌افزار EES تعیین مجموعه‌ای از فرضیات اولیه بر پایه مطالعات پیشین و داده‌های معتبر ضروری است. این پارامترها شامل دما، فشار، نرخ جریان، خواص ترمودینامیکی سیالات و شرایط مرزی اجزای مختلف هستند که در جدول (۳) نشان داده شده است و به عنوان داده‌های ورودی اولیه نقش کلیدی در اعتبار نتایج ایفا می‌کنند.

انتخاب مقادیر مناسب با استناد به پژوهش‌های پیشین علاوه بر افزایش دقت مدل‌سازی تطابق نتایج با شرایط واقعی را تضمین کرده و زمینه‌ساز تحلیل حساسیت و ارزیابی عملکرد سیستم در سناریوهای مختلف می‌شود.

معادله سرعت مخلوط ساده برابر با:

$$u_{mf,m,s} = \frac{u_{pf,n2} + \mu \cdot u_{sf,n2}}{1 + \mu} \quad (11)$$

که با صرف نظر کردن از $u_{sf,n2}$ داریم:

$$u_{mf,m,s} = \frac{u_{pf,n2}}{1 + \mu} \quad (12)$$

بازده اختلاط از رابطه انرژی جنبشی جریان مخلوط محاسبه می شود:

$$\eta_m = \frac{u_{mf,m}^2}{u_{mf,m,s}^2} \quad (13)$$

سرعت واقعی جریان مخلوط:

$$u_{mf,m} = u_{pf,n2} \sqrt{\eta_m / (1 + \mu)} \quad (14)$$

آنتالپی جریان مخلوط از معادله انرژی:

$$h_{mf,m} = \frac{h_{pf,n1} + \mu \cdot h_{sf}}{1 + \mu} - \frac{u_{mf,m}^2}{2} \quad (15)$$

دیفیوزر:

در دیفیوزر، انرژی جنبشی جریان به فشار تبدیل می شود. معادله انرژی برای حالت آیزنتروپیک:

$$\frac{u_{mf,m}^2 - u_{mf,d,s}^2}{2} = h_{mf,d,s} - h_{mf,m} \quad (16)$$

و برای حالت واقعی:

$$\frac{u_{mf,m}^2 - u_{mf,d}^2}{2} = h_{mf,d} - h_{mf,m} \quad (17)$$

بازده دیفیوزر:

$$\eta_d = \frac{h_{mf,d,s} - h_{mf,m}}{h_{mf,d} - h_{mf,m}} \quad (18)$$

با فرض $u_{mf,m}^2 \ll u_{mf,d}^2$ آنتالپی واقعی در خروجی دیفیوزر:

$$h_{mf,d} = h_{mf,m} + \frac{u_{mf,m}^2}{2} \quad (19)$$

یا از طریق بازده:

$$h_{mf,d} = h_{mf,m} + \frac{h_{mf,d,s} - h_{mf,m}}{\eta_d} \quad (20)$$

* اثر انرژی جنبشی در ورودی و خروجی اجکتور نادیده گرفته می شود.

* افت های ناشی از اصطکاک و سایر بازگشت ناپذیری ها از طریق بازده اجزای مختلف شامل نازل، محفظه اختلاط و دیفیوزر لحاظ می گردند.

* در صورت فراصوت شدن جریان مخلوط فرض می شود که موج ضربه ای باعث کاهش سرعت جریان و فروصوت شدن آن در ورودی دیفیوزر می شود.

* فرآیند اختلاط تحت شرایط فشار ثابت و با استفاده از معادلات بقای جرم و انرژی صورت می گیرد.

* کل فرآیند در اجکتور آدیاباتیک فرض شده، لذا تبادل حرارت با محیط صورت نمی گیرد.

نازل محرک:

معادله انرژی پایا و آدیاباتیک نازل برای سیال اولیه به صورت زیر تعریف می شود:

$$h_{pf,n1} + \frac{u_{pf,n1}^2}{2} = h_{pf,n2} + \frac{u_{pf,n2}^2}{2} \quad (5)$$

با صرف نظر از سرعت ورودی نازل، سرعت خروجی نازل به شکل زیر در می آید:

$$u_{pf,n2} = \sqrt{2(h_{pf,n1} - h_{pf,n2})} \quad (6)$$

در حالتی که فرآیند به صورت آیزنتروپیک فرض شود، بازده نازل از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\eta_n = \frac{h_{pf,n1} - h_{pf,n2}}{h_{pf,n1} - h_{pf,n2,s}} \quad (7)$$

با جایگذاری در رابطه انرژی:

$$u_{pf,n2} = \sqrt{2\eta_n(h_{pf,n1} - h_{pf,n2,s})} \quad (8)$$

نسبت ورودی اجکتور:

یکی از مهم ترین شاخص های عملکرد اجکتور نسبت دبی سیال ثانویه به سیال اولیه است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{sf}}{\dot{m}_{pf}} \quad (9)$$

محفظة اختلاط:

معادله بقای مومنتوم برای اختلاط سیالات اولیه و ثانویه به صورت زیر بیان می شود:

$$m_{pf} u_{pf,n2} + m_{sf} u_{sf,n2} = (m_{pf} + m_{sf}) u_{mf,m,s} \quad (10)$$

جدول ۴ مقایسه نتایج چرخه تبرید اجکتوری و مدل سازی اجکتور با
مراجع [۲۰] و [۲۱]

$$\mu = \sqrt{\frac{\eta_n \eta_m \eta_d (h_{pf,n1} - h_{pf,n2,s})}{(h_{mf,d,s} - h_{mf,m})}} - 1 \quad (21)$$

۴-۳- بیان مسئلہ

۴-۴- اعتبارسنجی، نتایج

64

چرخه تبرید اجکتوری با مرجع [۲۰]									
اجزاء سیکل		کار حاضر		مرجع		اندازه انحراف		نسبی %	
بار ژنراتور $\dot{Q}_{gen} \text{ (kw)}$		۸/۷۱۳		۸/۸۱		۱/۱			
بار کندانسور $\dot{Q}_c \text{ (kw)}$		۹/۸۲۶		۱۰/۲۵		۴/۱۳			
ظرفیت تبرید $\dot{Q}_{eva} \text{ (kw)}$		۱/۷۰۶		۱/۷۱		۰/۲۳			
نسبت کسر جرمی (w)		۰/۲۴۲۲		۰/۰/۲۵۲۳		۰/۰۰۳۴			
ضریب عملکرد (COP)		۰/۱۹۵۴		۰/۱۹۲۴		۱/۵۳۵			

مدل سازی اجکتور با مرجع [۲۱]									
P_p	T_p	P_s	T_s	T_c	$\omega = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_p}$	کار		$\phi = A_2/A_1$	
					مرجع	کار حاضر	مرجع	کار حاضر	
۰/۶۰۴	۹۵	۰/۰۴	۸	۴۲/۱	۰/۱۸۵۹	۰/۱۸۳۹	۶/۴۴	۶/۴۱۲	
۰/۵۳۸	۹۰	۰/۰۴	۸	۳۸/۹	۰/۲۴۴۶	۰/۲۲۷۸	۶/۴۴	۶/۳۶۶	
۰/۴۶۵	۸۴	۰/۰۴	۸	۳۵/۵	۰/۲۸۸۰	۰/۲۷۹۲	۶/۴۴	۶/۱۸۶	
۰/۴	۷۸	۰/۰۴	۸	۳۲/۵	۰/۳۲۵۷	۰/۳۳۰۲	۶/۴۴	۶/۹۱۷	
۰/۶۰۴	۹۵	۰/۰۴۷۳	۱۲	۴۲/۵	۰/۳۳۵۰	۰/۳۵۰۲	۶/۴۴	۶/۳۴۰	
۰/۵۳۸	۹۰	۰/۰۴۷۳	۱۲	۳۹/۵	۰/۲۹۴۶	۰/۲۹۷۱	۶/۴۴	۶/۲۸۰	
۰/۴۶۵	۸۴	۰/۰۴۷۳	۱۲	۳۶	۰/۳۳۹۸	۰/۳۶۰۲	۶/۴۴	۶/۱۵۲	

۴-۵- تحلیل تخریب‌آگزازی در سیستم ترکیبی

تحلیل توزیع تخریب اگزرژی در اجزای سیستم ترکیبی نشان می‌دهد که هیتر به‌عنوان اصلی‌ترین منبع اتلاف اگزرژی شناخته می‌شود. علت این موضوع، اختلاف دمای بالا بین جریان‌های گرم و سرد و برگشت‌ناپذیری فرآیند انتقال حرارت در مبدل است. چنین شرایطی منجر به افت قابل‌توجه بازده اگزرژی می‌گردد. بنابراین، کاهش این اختلاف دما از طریق بهینه‌سازی طراحی

دو سیستم می‌گردد. این کاهش عمدتاً ناشی از افزایش اختلاف دمای میان سیالات در مبدل حرارتی است که باعث تولید بیشتر آنتروپی و تخریب انرژی می‌شود. تحلیل دقیق‌تر نشان می‌دهد که افزایش پینچ نیاز به گرمای اضافی برای عملکرد ژنراتور ایجاد می‌کند، در حالی که توان خروجی توربین تقریباً ثابت می‌ماند. علاوه بر این، اثر افزایش پینچ بر شاخص‌های اقتصادی چرخه نیز بررسی شد که نشان می‌دهد هزینه‌های عملیاتی با افزایش پینچ افزایش می‌یابند، بدون آنکه مزیت قابل توجهی در توان خروجی حاصل شود. بنابراین، اگرچه افزایش پینچ ممکن است از نظر سازه‌ای مزایایی داشته باشد از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی چنین اقدامی بهینه محسوب نمی‌شود و توصیه نمی‌گردد.

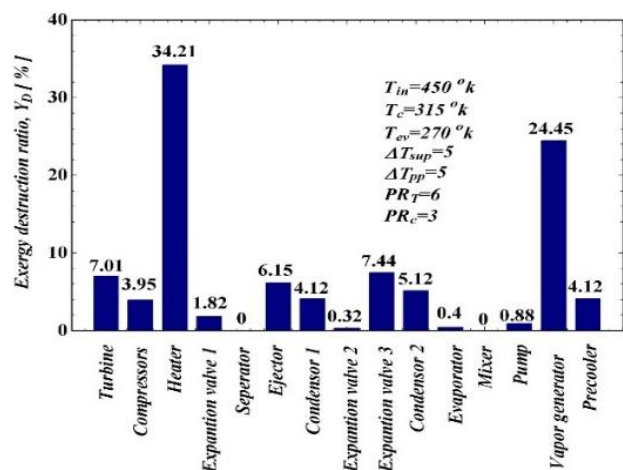
۴-۵-۲- تأثیر دمای سوپر هیت بر عملکرد انرژی سیستم ترکیبی و سیستم تبرید اچکتوری ساده

بر اساس شکل (۵) افزایش دمای سوپر هیت ورودی توربین در چرخه ترکیبی، موجب افزایش بازده انرژی به دلیل بالا رفتن دمای متوسط سیکل می‌گردد. در سیال‌هایی با فشار نزدیک به بحرانی، این افزایش دما به رشد اختلاف آنتالپی و توان تولیدی منجر می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد سوپر هیت تأثیر محدودی بر توان خالص دارد و ممکن است از نظر اقتصادی به صرفه نباشد. در نتیجه، بهره‌برداری بهینه از سوپر هیت باید با توجه به شرایط فنی و منابع حرارتی انجام شود. همچنین افزایش دمای ورودی به اچکتور در چرخه تبرید اچکتوری نیز تأثیر ملایمی بر بازده انرژی دارد. با افزایش دمای سوپر هیت، دمای نازل اولیه اندکی بالاتر رفته و این موضوع موجب کاهش جزئی تلفات غیرقابل بازیافت در نازل و فرآیند اختلاط می‌شود. در نتیجه، بازده کل انرژی سیستم با شیبی کم افزایش می‌یابد. با این حال، به دلیل ثابت ماندن فشارهای کاری و حساسیت اچکتور به نسبت اختلاط، اثر سوپر هیت بر عملکرد چرخه تبرید ساده محدود بوده و تنها افزایش‌های کوچک در بازده مشاهده می‌شود.

۴-۵-۳- اثر دمای سوپر هیت بر ضریب عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اچکتوری ساده

مطابق شکل (۶) تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزایش دمای سوپر هیت سیال کاری، توان تولیدی بخش ORC افزایش می‌یابد که به واسطه افزایش اختلاف آنتالپی توربین، بازده توان و در نتیجه مؤلفه «W» در معیار COP رشد می‌کند. این اثر در سیستم‌های ترکیبی موجب افزایش محسوس‌تری در COP کل

مبدل می‌تواند نقش مؤثری در افزایش راندمان ایفا کند. پس از هیت، اجزایی نظیر توربین و کمپرسور نیز در زمره اجزای با تخریب انرژی بالا قرار دارند که این پدیده عمدتاً ناشی از فشارهای بالا و تبادل حرارتی ناخواسته با محیط است. به منظور بهبود عملکرد این اجزاء، استفاده از طراحی‌های پیشرفته، ارتقاء بازده ایزنتروپیک و انتخاب مناسب سیال کاری پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر، اچکتور نیز سهم قابل توجهی در اتلاف انرژی دارد. این مسئله به فرآیندهای غیرایده‌آل انبساط، اختلاط و تراکم در ساختار آن بازمی‌گردد. پیچیدگی دینامیکی این نواحی، سبب از بین رفتن بخش زیادی از انرژی ورودی می‌شود. مطابق تحلیل‌ها بین ۳۰ تا ۴۰ درصد از انرژی ورودی در این فرآیندها تلف می‌گردد که تأثیر مستقیمی بر کاهش بازده سیکل دارد. در مجموع، تمرکز بر کاهش تخریب انرژی در اجزای بحرانی از طریق طراحی بهینه، ارتقاء شرایط عملکردی و انتخاب مناسب سیالات، گامی مؤثر در بهبود راندمان کلی سیستم محسوب می‌شود. این رویکرد، پایه‌ای علمی برای اصلاح ساختار سیکل و افزایش بهره‌وری در طراحی‌های آینده فراهم می‌آورد (شکل (۳)).



شکل ۳ درصد تخریب انرژی اجزای سیستم تحلیل حساسیت

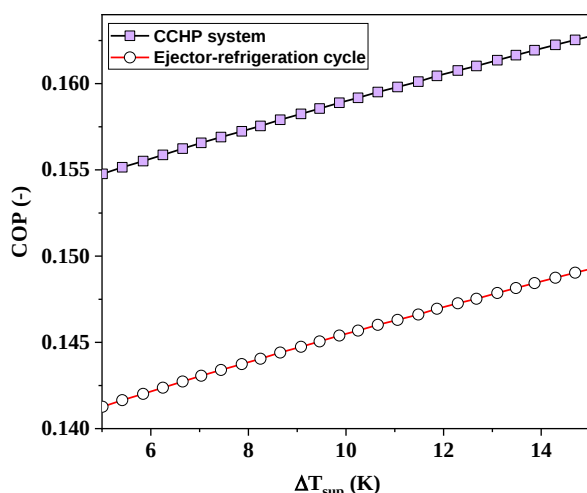
در این تحقیق به منظور دستیابی به درکی عمیق‌تر از نحوه عملکرد سیکل ترکیبی مورد بررسی، تحلیل پارامتریک جامعی انجام گرفته است. در این راستا تأثیر تغییرات پارامترهای کلیدی و مؤثر بر بازدهی و رفتار ترمودینامیکی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۵-۱- اثر اختلاف دمای پینچ بر بازده انرژی سیستم ترکیبی و سیستم تبرید اچکتوری ساده

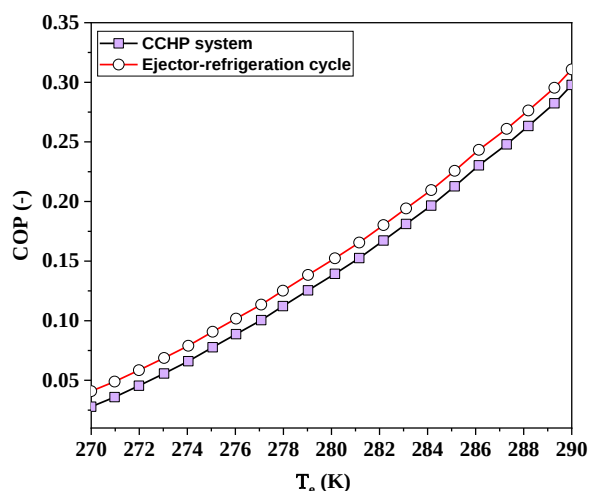
بر اساس شکل (۴) و تحلیل چرخه پیشنهادی، افزایش اختلاف دمای پینچ در ژنراتور موجب کاهش بازده انرژی کل در هر

نیاز به انرژی حرارتی اضافی، راندمان کل را کاهش دهد؛ بنابراین برای چرخه تبرید اجکتوری مقدار بهینه‌ای از سوپرهیت وجود دارد که در آن تعادل بین افزایش توان جریان محرک و رشد تلفات داخلی برقرار می‌شود و راندمان سیکل به حداکثر می‌رسد.

۴-۵-۴- تأثیر دمای اواپراتور بر عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری ساده



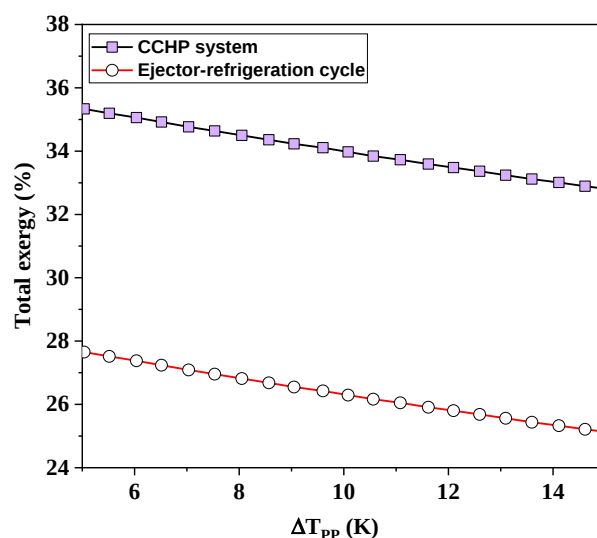
شکل ۶ تحلیل حساسیت اختلاف دمای فوق گرم ژنراتور بخار بر روی ضریب عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری



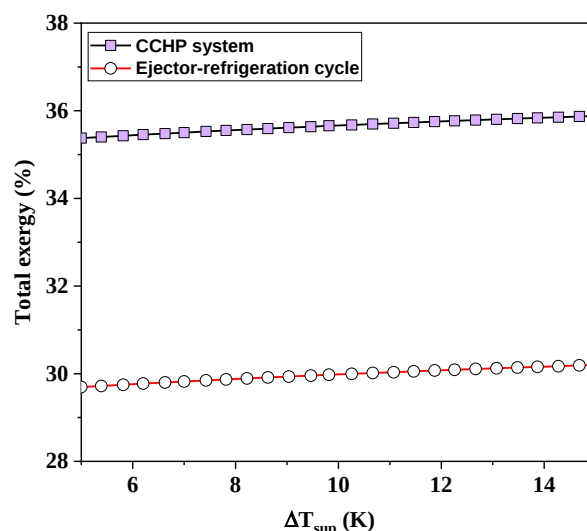
شکل ۷ تحلیل حساسیت دمای کاری اواپراتور برای ضریب عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری

طبق شکل (۷) در سیستم ترکیبی افزایش دمای اواپراتور اثر متفاوت‌تری نسبت به چرخه تبرید اجکتوری ساده دارد، زیرا تغییر دمای تبخیر تنها روی اجکتور اثر نمی‌گذارد؛ بلکه رفتار کل سامانه تولید توان، سرمایش و گرمایش را دگرگون می‌کند. اگرچه هر دو سامانه با افزایش دمای اواپراتور افزایش COP را

نسبت به چرخه تبرید اجکتوری ساده می‌گردد. در مقابل، افزایش دمای سوپرهیت در جریان محرک اجکتور معمولاً باعث بالا رفتن آنتالپی و سرعت بخار ورودی به نازل اولیه می‌شود و این موضوع می‌تواند نسبت تراکم، توان رانشی و ظرفیت مکش اجکتور را اندکی افزایش دهد؛ اما این اثر محدود و غیر خطی است.

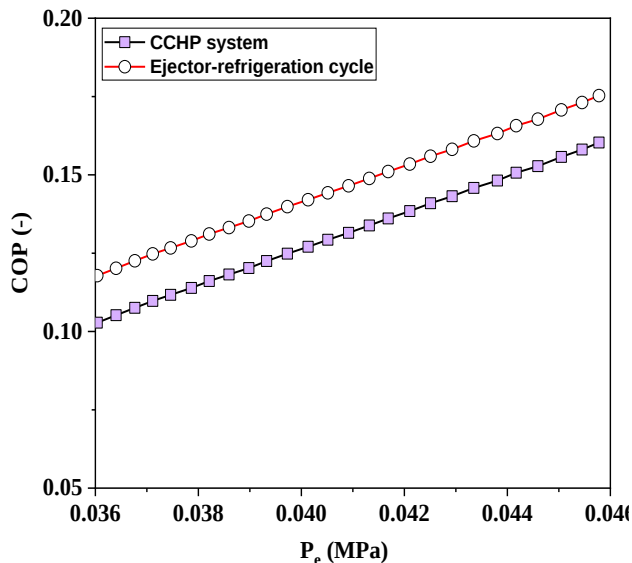


شکل ۴ تحلیل حساسیت اختلاف دمای پینچ بر روی بازده انرژی سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری



شکل ۵ تحلیل حساسیت اختلاف دمای فوق گرم ژنراتور بخار بر روی بازده انرژی سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری

در دماهای بالاتر، اگرچه انرژی ویژه بخار محرک بیشتر می‌شود، ولی افت کیفیت جریان، افزایش تلفات اندرکنشی در نازل‌ها و کاهش اختلاف فشار مؤثر می‌تواند نرخ بهبود عملکرد را کند کند. به همین دلیل، بازده انرژی و سرمایش چرخه تنها کمی بهبود نشان می‌دهند و پس از مقدار مشخصی سوپرهیت، افزایش بیشتر دما بهبود قابل توجهی ایجاد نمی‌کند و حتی ممکن است به دلیل



شکل ۸ تحلیل حساسیت فشار کاری اواپراتور بر روی ضریب عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری

۴-۶- نتایج تحلیل اقتصادی

در این بخش، نتایج تحلیل ترمواکونومیکی چرخه پیشنهادی با هدف ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و هزینه بررسی می‌شود. این تحلیل با فرض عمر مفید ۲۰ سال، نرخ تورم ۱۵٪، ضریب تعمیر و نگهداری ۱/۰۶ و ۷۰۰۰ ساعت کارکرد سالیانه انجام شده است. در تحلیل اقتصادی مقاله، نرخ بازده سالیانه ۱۰ درصد به عنوان معیار پایه در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه با سایر مطالعات فراهم شود. با توجه به تورم، بازده واقعی سرمایه‌گذاری ممکن است کاهش یابد؛ با این حال، سیستم پیشنهادی با بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، علاوه بر تولید انرژی چندانگانه (برق، گرمایش و سرمایش)، هزینه‌های عملیاتی پایینی دارد. بنابراین، حتی با در نظر گرفتن تورم، زمان بازگشت سرمایه و صرفه اقتصادی کلی سیستم همچنان توجیه‌پذیر است و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی پایدار محسوب شود. جدول (۵) شاخص‌های کلیدی مانند هزینه تخریب انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری، اختلاف نسبی هزینه و فاکتور ترمواکونومیکی را ارائه می‌دهد.

این شاخص‌ها به شناسایی اجزای پرهزینه و کم‌بازده کمک کرده و مبنایی برای بهینه‌سازی اقتصادی و عملکردی سیستم فراهم می‌سازند. تحلیل اقتصادی مشخص کرد که بیشترین هزینه‌های عملیاتی مربوط به کمپرسور با ۱۹۱۵۴ دلار در ساعت و توربین با ۱۶۷۵۳ دلار در ساعت است. در سوی دیگر، جداکننده و مخلوط‌کننده کمترین بار اقتصادی را دارند و تأثیر

تجربه می‌کنند؛ اما شدت رشد COP در چرخه تبرید اجکتوری ساده معمولاً بیشتر از چرخه ترکیبی است. دلیل اصلی این است که در چرخه ساده، بالا رفتن دمای تبخیر مستقیماً فشار مکش را افزایش داده، نسبت تراکم اجکتور را کاهش می‌دهد و تقریباً تمام این بهبود بدون محدودیت‌های جانبی به COP منتقل می‌شود؛ اما در سیستم ترکیبی، اجکتور تنها بخشی از یک مجموعه شامل رانکین عالی، مبدل‌های حرارتی و مسیرهای بازیافت گرماسر؛ بنابراین افزایش دمای اواپراتور با محدودیت‌های دمایی-فشاری ORC، تغییر در بار حرارتی بازیافتی، و افزایش دمای کندانسور مواجه می‌شود. این قیود باعث می‌شوند بخشی از سود ناشی از افزایش فشار تبخیر در زیرسامانه رانکین یا در مبدل‌های بین‌چرخه‌ای مستهلک شود. به بیان دیگر، چرخه ساده به‌طور مستقیم از افزایش دمای تبخیر منتفع می‌شود؛ اما چرخه ترکیبی مجبور است این تغییر را با نیازهای حرارتی-انرژی کل سیستم هماهنگ کند؛ به همین دلیل نرخ افزایش COP در آن کمتر و ملایم‌تر است.

۴-۵-۵- اثر فشار اواپراتور بر عملکرد سیستم ترکیبی و چرخه تبرید اجکتوری ساده

شکل (۸) نشان می‌دهد که افزایش فشار کاری اواپراتور، عملکرد اجکتور و در نتیجه COP سیستم را بهبود می‌دهد؛ زیرا با بالا رفتن فشار تبخیر، دمای تبخیر نیز افزایش یافته و فرآیند تولید بخار با کیفیت بالاتر و ناحیه سوپرهیت گسترده‌تری انجام می‌شود. این شرایط مکش مؤثرتر، کاهش نسبت تراکم و بهبود راندمان اجکتور را به همراه دارد و در نهایت میعان در کندانسور نیز در وضعیت پایدارتر و کارآمدتری صورت می‌گیرد. از آنجا که در فشارهای بالاتر دبی جرمی بخار مصرفی افزایش می‌یابد، انرژی جذب‌شده در اواپراتور نسبت به انرژی ورودی هیتر بیشتر شده و COP رشد می‌کند.

با این حال، شدت این افزایش در چرخه تبرید اجکتوری ساده چشمگیرتر از چرخه ترکیبی است. دلیل آن است که در چرخه ساده، بهبود فشار تبخیر مستقیماً ظرفیت مکش و راندمان اجکتور را افزایش می‌دهد و تقریباً تمامی این اثر به COP منتقل می‌شود؛ اما در چرخه ترکیبی، تغییرات فشار اواپراتور باید با محدودیت‌های حرارتی و فشاری بخش رانکین و مسیرهای بازیافت گرما هماهنگ شود؛ بنابراین بخشی از مزیت ناشی از افزایش فشار در زیرسامانه رانکین مستهلک شده و رشد COP ملایم‌تر می‌شود. به بیان دیگر، افزایش فشار اواپراتور در چرخه ساده تأثیر برجسته‌تری بر COP دارد، در حالی که در چرخه ترکیبی این اثر تعدیل می‌شود.

بزرگ و غیرخطی متغیرهای طراحی را فراهم می‌آورد. در این فرآیند، ابتدا تابع هدف بر اساس سه معیار اصلی شامل ضریب عملکرد (COP)، بازده انرژی و هزینه واحد محصول (SUCP) تعریف شد؛ به گونه‌ای که در حالت تک‌هدفه هر معیار به‌طور مستقل و در حالت چندهدفه یک تابع ترکیبی (MOF) برای بهینه‌سازی هم‌زمان کارایی انرژی، کارایی انرژی و کارایی اقتصادی به کار گرفته شد. متغیرهای تصمیم‌گیرنده شامل نسبت فشار توربین و کمپرسور، میزان سوپر هیت، اختلاف دمای پینچ ژنراتور و دماهای کندانسور و اواپراتور بودند که در محدوده‌های مشخص و مطابق محدودیت‌های عملیاتی تجهیزات تغییر داده شدند. جمعیت اولیه شامل ۳۲ فرد بود که به صورت تصادفی تولید شدند و هر فرد پس از کدگذاری به رشته دودویی وارد مدل عددی EES شده و مقدار تابع هدف آن محاسبه گردید. عملکرد انتخاب با روش رتبه‌بندی انجام شد تا رشته‌های با عملکرد بهتر احتمال بیشتری برای انتخاب داشته باشند؛ اما تنوع جمعیت نیز حفظ شود. برای تولید نسل جدید، تقاطع تک‌نقطه‌ای با احتمال ۰/۸۵ و جهش با نرخ پویا بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۲۵ به کار گرفته شد تا از همگرایی زود هنگام و گیر افتادن در بهینه محلی جلوگیری شود. GA در ۶۴ نسل اجرا شد و فرآیند زمانی متوقف گردید که مقدار تابع هدف طی نسل‌های متوالی تغییر محسوسی نداشت. به منظور اطمینان از پایداری و وابسته نبودن نتایج به مقارنادهی اولیه، الگوریتم چندین بار با جمعیت اولیه متفاوت تکرار شد و پاسخ‌های به دست آمده از نظر همگرایی، پایداری و سازگاری با تحلیل حساسیت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم با حفظ تنوع جمعیت و جلوگیری از همگرایی کاذب، قادر به شناسایی ناحیه بهینه پایدار برای سیستم بوده و تنظیمات بهینه نسبت فشار توربین، دمای ژنراتور و اختلاف دمای پینچ بیشترین تأثیر را بر بهبود عملکرد انرژی-انرژی و اقتصادی سیستم داشته‌اند.

فرایند بهینه‌سازی با در نظر گرفتن متغیرهای تصمیم‌گیرنده مانند پارامترهای کلیدی عملیاتی و فنی سیستم انجام شده است. این متغیرها در محدوده مشخصی تغییر داده شده‌اند تا بهترین ترکیب عملکردی حاصل شود. جزئیات کامل نتایج در جدول (۶) و (۷) ارائه شده‌اند.

جدول (۷) نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم در شرایط دماهای مختلف ژنراتور را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش T_{gen} ، شاخص‌های کلیدی عملکرد سیستم دچار تغییرات قابل توجهی می‌شوند. افزایش دمای ژنراتور از 135°C تا 150°C باعث افزایش راندمان حرارتی و انرژی شده و در نتیجه کارایی کلی سیستم بهبود می‌یابد. همچنین توان خالص خروجی

محدودی بر هزینه کلی سیستم دارند. این نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر بهینه‌سازی کمپرسور و توربین می‌تواند بیشترین صرفه‌جویی اقتصادی را به همراه داشته باشد.

جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سیستم پیشنهادی

اجزاء سیکل	$\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k} (\frac{\$}{h})$	$\dot{Z}_k (\frac{\$}{h})$	$\dot{C}_{D,k} (\frac{\$}{h})$	r (%)	f (%)
توربین	۱۶۷۵۳	۱۶۳۳۰	۴۲۳/۶	۸۲/۲۹	۹۷/۴۷
کولر میانی	۱۵۶۲	۶/۲۱	۲۴۵۹	۸۰/۵۱	۰/۲۱۹۵
کمپرسور	۱۹۱۵۴	۲۵۲۶	۱۶۶۲۸	۸۹/۹۳	۱۳/۱۹
هیتر	۸۸۷۹	۸/۷۱۵	۸۸۷۰	۶۲/۲۵	۰/۰۹۸
شیر انبساط ۱	۵۴۵/۳	۵۱/۳۵	۴۹۴	۴/۴۲۳	۹/۴۱۶
جداکننده	.	.	.	.	.
اجکتور	۲۱۶۳	۹/۰۳۶	۲۱۵۴	۵۳/۹۷	۰/۴۱۷۸
کندانسور ۱	۲۷۶۶	۲/۰۵۴	۲۷۶۴	۸۹/۷۷	۰/۰۷۴۲۴
شیر انبساط ۲	۶۰/۲۳	۰/۷۸۵	۵۹/۴۵	۶۴/۸۰	۱/۳۰۳
شیر انبساط ۳	۲۶۳۷	۳۹/۷۱	۲۷۹۷	۶۶/۰۹	۱/۴
کندانسور ۲	۲۴۶۶	۷/۰۲۴	۲۴۵۹	۹۸/۲۴	۰/۲۸۴۸
اواپراتور	۹۲۷/۳	۲/۳۲۹	۹۲۵	۷۱/۷۹	۰/۲۵۱۲
پمپ	۴۶۴/۱	۱۶۳/۶	۳۰۰/۵	۲۰/۶۸	۳۵/۲۶
ژنراتور	۳۶۷/۴	۱۳/۹۸	۳۶۴/۴	۷۴/۸۰	۳/۷۱۳

۴-۷- نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک و چند هدفه سیستم

بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی در این مطالعه، بهینه‌سازی عملکرد سیستم از دو دیدگاه تک‌هدفه و چندهدفه انجام شده است. سه معیار اصلی برای این بهینه‌سازی عبارتند از: ضریب عملکرد (COP)، بازده انرژی و هزینه تولید (SUCP) در حالت تک‌هدفه، هر معیار به‌طور مستقل بررسی شده، در حالی که در حالت چندهدفه تلاش شده است تا تعادلی میان بازده انرژی، کارایی انرژی و صرفه‌جویی اقتصادی ایجاد شود. در این پژوهش به منظور تعیین شرایط عملکردی بهینه سیستم ترکیبی پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک روش فراابتکاری مبتنی بر تکامل طبیعی استفاده شده است که با باز-تولید رفتار انتخاب طبیعی، امکان جستجوی مؤثر در فضای

موجب شده است که بازیافت این گرما به موضوعی پراهمیت در حوزه مهندسی انرژی تبدیل شود. در این تحقیق، یک سامانه ترکیبی CCHP متشکل از چرخه رانکین آلی، سیستم تبرید اجکتوری و پمپ حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌ها با تکیه بر قوانین اول و دوم ترمودینامیک و به صورت جزء به جزء انجام شده تا ارزیابی دقیقی از عملکرد انرژی و اگزرژی سیستم حاصل شود. طراحی به گونه‌ای صورت گرفته که بهره‌وری حرارتی افزایش و تلفات انرژی کاهش یابد. کلید این بهینه‌سازی، کنترل دمای جذب و دفع گرما در اجزای کلیدی مانند ژنراتور و کندانسور است. همچنین، انتخاب سیال کاری مناسب، طراحی مبدل‌ها و هماهنگی بین اجزاء نقش مهمی در افزایش کارایی دارند. افزون بر تحلیل ترمودینامیکی، امکان‌سنجی اقتصادی نیز برای ارزیابی عملی بودن طرح در مقیاس صنعتی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی ژنراتور باعث ارتقاء بازده حرارتی کل سیستم می‌شود. همچنین، دماهای کاری بالاتر در کندانسور و اواپراتور موجب بهبود عملکرد سیستم، در صورت ثابت بودن سایر پارامترها، می‌گردد. بررسی اگزرژی نشان می‌دهد بیشترین تلفات در بخش‌های گرمایی مانند ژنراتور رخ می‌دهد، در حالی که اجزایی مانند جداکننده و مخلوط‌کننده نقش کمتری در این تخریب دارند. افزایش دمای سوپر هیت در سیال ورودی به توربین یا اجکتور تأثیر زیادی بر بازده ترمودینامیکی ندارد؛ اما بر شرایط کاری اجکتور و ظرفیت سرمایشی اثر مثبت می‌گذارد. به ویژه، نسبت دبی جرمی سیال اولیه به ثانویه افزایش یافته و COP سیستم تبرید اجکتوری ارتقاء می‌یابد. نرخ جریان جرمی سیال ثانویه نیز یکی از متغیرهای کلیدی است که نقش مهمی در کارایی کل سیستم ایفا می‌کند. علاوه بر این، اثر متغیرهایی مانند فشار و دمای ورودی و خروجی توربین، بازده اجزاء مکانیکی و ویژگی‌های مبدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن است که این پارامترها به طور مستقیم بر بازده کلی تأثیرگذارند و تنظیم دقیق آن‌ها می‌تواند عملکرد سیستم را بهینه سازد.

بیشترین درصد تخریب اگزرژی مربوط به هیتز با مقدار ۳۴/۲۱٪ است که نشان‌دهنده نقش مهم آن در کاهش کارایی اگزرژیکی سیستم می‌باشد. پس از آن، مولد بخار با ۲۴/۴۵٪ سهم قابل توجهی از تخریب اگزرژی دارد. در مقابل، جداکننده و مخلوط‌کننده کمترین میزان تخریب اگزرژی را به خود اختصاص داده‌اند، که بیانگر تأثیر محدود آن‌ها در کاهش کارایی کلی سیستم است. این نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر بهینه‌سازی هیتز و مولد بخار می‌تواند بیشترین اثر را بر بهبود عملکرد اگزرژیکی سیستم داشته باشد.

و شاخص MOF در دماهای بالاتر مقادیر مطلوب‌تری دارند. از سوی دیگر COP با افزایش دمای ژنراتور روند کاهشی نشان می‌دهد که ناشی از افزایش اتلاف‌های ترمودینامیکی در این شرایط است. بنابراین، انتخاب دمای بهینه ژنراتور نیازمند موازنه میان بهینه‌سازی توان و راندمان و در عین حال کنترل افت COP است.

جدول ۶ متغیرهای تصمیم و محدوده متغیرها

متغیر تصمیم‌گیرنده	دامنه تغییرات
نسبت فشار در توربین (PR_t)	۳ الی ۷
نسبت فشار در کمپرسور (PR_c)	۳ الی ۷
میزان فوق گرمایش در ژنراتور (ΔT_{sup})	۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس
اختلاف دمای پینچ در ژنراتور (ΔT_{pp})	۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس
دمای کندانسور (T_{cond})	۳۰۰ تا ۳۱۰ کلوین
دمای اواپراتور (T_{evap})	۲۶۰ تا ۲۸۰ کلوین

جدول ۷ نتایج بهینه سازی سیستم پیشنهادی

پارامترهای طراحی	$T_{gen} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{gen} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{gen} = 145 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{gen} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$
PR_c	۲	۲/۰۰۵	۲/۰۳۷	۲/۰۳۶
ΔT_{pp}	۲	۲	۲	۲
ΔT_{sup}	۰	۰	۰	۰
ω	۰/۲۸۱۳	۰/۳۹۶۶	۰/۳۸۹۵	۰/۳۴۹
W_{net}	۳۸/۶۸	۳۶/۴۴	۳۲/۹۳	۳۰/۳۶
η_{th}	۵۵/۲۱	۵۳/۶۸	۵۱/۷۴	۴۹/۹۴
η_{ex}	۵۶/۵۶	۵۰/۱	۴۷/۳۷	۴۵/۶۳
COP	۰/۲۰۶۴	۰/۲۹۹۵	۰/۲۹۳۷	۰/۲۶۱
$\dot{C}_{total}$	۱۱۶۸۲	۱۱۲۲۴	۱۰۳۴۲	۹۷۱۷
f_{total}	۰/۴۹۰۵	۰/۴۷۰۹	۰/۴۴۶۷	۰/۴۲۸
r_{total}	۳/۰۸۸	۳/۰۸۸	۳/۱۶۶	۳/۲۰۸
MOF	۳۸/۷۸	۳۷/۶۲	۳۶/۲۴	۳۵/۰۴

۵- نتیجه گیری

در صنایع مختلف، گرما نقشی کلیدی در عملکرد فرآیندها ایفا می‌کند. با این حال، بخش زیادی از انرژی حرارتی به صورت تلفات از بین می‌رود. افزایش هزینه‌های انرژی در سال‌های اخیر

2005,
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.063>.

[3] A.S. Siddiqui, et al., *Distributed Energy Resources Customer Adoption Modeling with Combined Heat and Power Applications*. 2003,
<https://escholarship.org/uc/item/874851f9>

[4] A. Bedi, et al., *Empowering Net Zero Energy Grids: A Comprehensive Review of Virtual Power Plants, Challenges, Applications, and Blockchain Integration*, Discover Applied Sciences, vol. 7(4), pp. 1-22, 2025,
<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-025-06691-1>

[5] J., Li, et al., *Energy and Environment Analysis of R1234yf/R245fa Cascade Air Source Heat Pump System with Double Ejectors*, Energy Conversion and Management, vol. 325, pp. 119404, 2025,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119404>

[6] M. Yari, S.M.S. Mahmoudi, "Utilization of Waste Heat from Gt-Mhr for Power Generation in Organic Rankine Cycles", *Applied Thermal Engineering* 30, no. 4, pp. 366-75, (2010/03/01/ 2010),
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.017>.

[7] B. Hedman, and T. Kaarsberg, *Combined heat and power (CHP)*, Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium; Borbely, AM, Kreider, JF, Eds: p. 271-294. 2001,
<https://doi.org/10.1201/9781420042399>

[8] D.W. Wu, R.Z. Wang, "Combined Cooling, Heating and Power: A Review." *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, no. 5, 459-95, (2006/09/01/ 2006),
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001>.

[9] H. Ghaebi, M.H. Saidi, and P. Ahmadi, "Exergoeconomic Optimization of a Trigeration System for Heating, Cooling and Power Production Purpose Based on Tr Method and using Evolutionary Algorithm." *Applied Thermal Engineering*, vol. 36 pp. 113-25, (2012/04/01/ 2012):
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.069>.

[10] I. Dincer, and C. Zamfirescu, *Renewable - energy - based Multigeneration Systems*, International Journal of Energy Research, vol. 36, no. 15, pp. 1403-1415, 2012, <https://doi.org/10.1002/er.2882>.

[11] P. Ahmadi, I. Dincer, and M.A. Rosen, *Development and Assessment of an Integrated Biomass-based Multi-generation Energy System*, Energy, vol. 56, pp. 155-16, 2013,

تحلیل اقتصادی نشان داد که بیشترین هزینه‌ها به کمپرسور (۱۹۱۵۴ دلار بر ساعت) و توربین (۱۶۷۵۳ دلار بر ساعت) تعلق دارد. در مقابل، کمترین اثر اقتصادی مربوط به جداکننده و مخلوط‌کننده است.

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش دمای ژنراتور از ۱۳۵ درجه سلسیوس به ۱۵۰ درجه سلسیوس، راندمان حرارتی و اگزرژی به ترتیب حدود ۶ درصد و ۵ درصد کاهش یافته‌اند. در همین حال، توان خالص خروجی نیز حدود ۸ کیلووات افت نشان می‌دهد. شاخص چندهدفه (MOF) در دماهای میانی ۱۴۰ درجه سلسیوس تا ۱۴۵ درجه سلسیوس بیشترین مقدار را دارد، که بیانگر شرایط بهینه عملکرد سیستم است.

❖ نکات کلیدی حاصل از بررسی پارامتریک

- افزایش دمای پینچ در ژنراتور بخار منجر به کاهش انتقال حرارت مؤثر، کاهش توان خالص، بار سرمایشی و افت بازده اگزرژی می‌شود.
- افزایش سوپرهیت سیال ورودی توربین با افزایش اختلاف آنتالپی، توان خروجی و COP ارتقاء می‌یابد.
- استفاده از خنک‌کن میانی منجر به کاهش توان مصرفی کمپرسور و افزایش توان خالص سیستم و بازده کلی می‌شود.
- افزایش دمای ورودی توربین با وجود افزایش راندمان انرژی منجر به افزایش تخریب اگزرژی در اجزای کلیدی می‌شود.
- افزایش فشار ورودی توربین موجب افزایش توان خروجی ولی کاهش بازده اگزرژی می‌گردد، همچنین، عملکرد اجکتور اندکی بهبود می‌یابد.
- افزایش فشار در اواپراتور به‌طور مستقیم ضریب عملکرد سامانه تبرید اجکتوری را ارتقاء می‌دهد.

۶- منابع

- [1] A. Soroureddin, A.S. Mehr, S.M.S. Mahmoudi, and M. Yari, "Thermodynamic Analysis of Employing Ejector and Organic Rankine Cycles for Gt-Mhr Waste Heat Utilization: A Comparative Study", *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 125-37, (2013/03/01/ 2013),
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.015>.
- [2] S. M. Sapuan, M. A. Maleque, M. Hameedullah, M. N. Suddin, and N. Ismail, "A Note on the Conceptual Design of Polymeric Composite Automotive Bumper System," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 2, pp. 145-151, 2005/01/30/

- [17] A.M. Al-Ibrahim, and A. Varnham "A Review of Inlet Air-cooling Technologies for Enhancing the Performance of Combustion Turbines in Saudi Arabia", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 14, pp. 1879-88, (2010/10/01/ 2010), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.04.025>.
- [18] M. Feili, H. Ghaebi, T. Parikhani, and H Rostamzadeh, "Exergoeconomic Analysis and Optimization of a New Combined Power and Freshwater System Driven by Waste Heat of a Marine Diesel Engine", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 18, pp. 100513, (2020/08/01/ 2020), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100513>.
- [19] B.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, V.A. Petrenko, "A 1-D Analysis of Ejector Performance", *International Journal of Refrigeration*, vol. 22, no. 5 pp. 354-64, (1999/08/01/ 1999), [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00004-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00004-3).
- [20] W. Pridasawas, P. Lundqvist, "A Year-round Dynamic Simulation of a Solar-driven Ejector Refrigeration System with Iso-Butane as a Refrigerant", *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, no. 5, pp. 840-50, (2007/08/01/ 2007), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.11.012>.
- [21] B.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, and V.A. Petrenko, "A 1-D Analysis of Ejector Performance", *International Journal of Refrigeration*, vol. 22, no. 5, pp. 354-64, (1999/08/01/ 1999), [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00004-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00004-3).
- https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q
- [12] Mohammadkhani, F., N. Shokati, S. M. S. Mahmoudi, M. Yari, and M. A. Rosen", Exergoeconomic Assessment and Parametric Study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor Combined with Two Organic Rankine Cycles." *Energy*, vol. 65 pp. 533-43, (2014/02/01/ 2014), <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.002>.
- [13] I. Dincer, and M.A. Rosen, *Exergy as a Driver for Achieving Sustainability*, International Journal of Green Energy, vol. 1. pp. 1-19. 2004, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/GE-120027881>
- [14] J. Liu, et al., *Energy and Exergy Analysis of Various Ejector-assisted Two-stage Compression Heat Pumps Applied in Various Conditions*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 149, no. 8, pp. 3331-3345, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10973-024-12908-z>.
- [15] Y. Gao, and W. Yang, *Performance Analysis of a Heat Pump Coupled Humidification-Dehumidification Ddesalination System with a large Temperature Difference using an Ejector*, Applied Thermal Engineering, vol. 271, pp. 126302, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126302>
- [16] J. Lin, et al., *Research on the Operation and Failure Characteristics of Ejectors in Large Temperature Drop Ejector Heat Pump Heating Systems*, Applied Thermal Engineering, vol. 273, pp. 126592, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126592>