

سیستم تولید همزمان توان و تبرید بر مبنای چرخه دو حلقه ای

چکیده: در مقاله حاضر، یک سیستم نوآورانه برای تولید همزمان توان، سرمایش، گرمایش و هیدروژن با استفاده از ترکیب چرخه توان جذبی، چرخه تبرید تراکمی و الکترولایزر غشای پروتونی ارائه شده است. معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار EES تدوین شده و مدلسازی کامل انرژی و انرژی و اگزرژی سیستم انجام شده است. همچنین عملکرد ترمودینامیکی سیستم بررسی گردیده و تأثیر تعدادی از پارامترهای مختلف بر کارایی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور دستیابی به شرایط بهینه، بهینه سازی تک هدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نیز انجام شده است. تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه نشان می دهد که در شرایط پایه و طراحی اولیه، این سیستم قادر به تولید توان الکتریکی خالص حدود ۱۷/۱۲ کیلووات، توان سرمایش حدود ۲۰۱/۵ کیلووات، توان گرمایش حدود ۶۹۷/۱ کیلووات و هیدروژن خالص با نرخ ۰/۱۵۳ مترمکعب بر ساعت می باشد. نسبت بهره وری انرژی سیستم برابر با ۱/۳۴۶ و بازده اگزرژی آن ۳۶/۵۸ درصد است. علاوه بر این، در بهینه سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت بهره وری انرژی از ۱/۳۴۶ به ۳/۳۳ افزایش یافته و در بهینه سازی مبتنی بر بازده اگزرژی، این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا یافته است. نتایج حاصل از بهینه سازی نشان دهنده بهبود عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و اگزرژی می باشد.

واژه‌های راهنما: تولید همزمان، تبرید تراکمی، تولید توان، تحلیل انرژی و اگزرژی

محمد معصومی فرد

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد مشکین شهر،
دانشگاه آزاد اسلامی،
مشکین شهر

هادی غائبی*

استاد،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه محقق اردبیلی،
اردبیل

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

Combined power and cooling generation system based on a two-loop cycle

Mohammad Masoumifard
Assistant Professor,
Department of
Mechanical Engineering,
Meshkinshahr Branch,
Islamic Azad University,
Meshkinshahr

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

Abstract: In the present study, an innovative system is proposed for the simultaneous generation of power, cooling, heating, and hydrogen, by integrating an absorption power cycle, a compression refrigeration cycle, and a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. The governing equations were formulated using EES software, and a comprehensive energy and exergy modeling of the proposed system was performed. The thermodynamic performance of the system was then analyzed, and the effects of several key parameters on system performance were investigated. To achieve optimal performance, a single-objective optimization based on a genetic algorithm was also carried out. Thermodynamic analysis of the multi-generation system indicates that, under the base design conditions, the system is capable of producing a net electrical power of approximately 12/17 kW, cooling power of 5/201 kW, heating power of 1/697 kW, and pure hydrogen at a rate of 153/0 m³/h. The system exhibits an energy efficiency ratio of 346/1 and an exergy efficiency of 58/36%. Furthermore, in the energy-based optimization, the energy efficiency ratio increased from 346/1 to 33/3, while in the exergy-based optimization, the exergy efficiency improved from 58/36% in the base case to 94/63% in the optimized case. The optimization results clearly demonstrate a significant enhancement in system performance from both energy and exergy perspectives.

Keywords: Cogeneration, Compression refrigeration, Power generation, Energy and exergy analysis

۱- مقدمه

یک راه حل مؤثر برای بازیابی گرما و تبدیل آن به انرژی الکتریکی در منابع حرارتی با دماهای پایین و متوسط مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش‌های دیگر توسط تچانچه و همکارانش [۹]، عملکرد ترمودینامیکی و اثرات زیست‌محیطی سیالات ارگانیک مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. این تحقیقات به مقایسه بازده و اثرات زیست‌محیطی سیالات ارگانیک در چرخه‌های رانکین ارگانیک کمک کرده و اطلاعات مفیدی برای بهبود بهره‌برداری از این چرخه‌ها در تولید انرژی فراهم کرده‌اند.

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که انتخاب سیال مناسب عامل و استفاده از مخلوط‌های دوتایی در چرخه‌های توان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بازده انرژی داشته باشد. چرخه‌هایی مانند کالینا با استفاده از آب و آمونیاک به‌عنوان سیال عامل، قابلیت تبدیل بیشتری از گرما به توان را دارند و و این امر می‌تواند در بهبود بازده تولید انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی مؤثر باشد. این نتایج به توسعه پایدارتر و کارآمدتر فناوری‌های تبدیل انرژی کمک کرده و وابستگی به منابع انرژی فسیلی را کاهش می‌دهد، که در حفاظت از محیط زیست و تأمین انرژی پایدار اهمیت زیادی دارد [۷]. مطالعات سورین نشان می‌دهد که در صنایع نیازمند بهره‌گیری از گرمای اتلافی، چرخه‌های کالینا نسبت به چرخه‌های رانکین قادر به تبدیل بیشتری از این گرما به توان هستند و می‌توانند تا ۳۲ درصد توان بیشتری تولید کنند. این افزایش توان در کاربردهای صنعتی می‌تواند منجر به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها شود [۱۰].

الساپید در تحقیقات خود نشان داد که در شرایطی که هر دو چرخه رانکین و کالینا به‌عنوان چرخه‌های پایین در دماهای مشابه برای منابع حرارتی با دمای زیر ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرند، چرخه کالینا از نظر بازده، بهبود ۲۰-۱۰ درصدی نسبت به چرخه رانکین ساده دارد. این امر نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر چرخه کالینا در شرایط خاص مربوط به دمای منابع حرارتی است [۱۱]. بنابراین، این تحقیقات نشان می‌دهند که چرخه کالینا، به ویژه در کاربردهایی با دمای منبع حرارتی زیر ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد، به‌عنوان یک گزینه مؤثر و کارآمد در تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی از طریق چرخه ترمودینامیکی مطرح می‌شود.

ویژگی برجسته چرخه کالینا در مقایسه با دیگر چرخه‌های توان، وجود سیال عامل منحصربه‌فردی مانند آب و آمونیاک است. در چرخه کالینا، در طول فرآیندهای تبخیر در اواپراتور، فشار ثابت است، اما دما تغییر می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود

تأمین انرژی یکی از نگرانی‌های مستمر کشورها و از مهم‌ترین نیازهای بشر محسوب می‌شود. بازیابی انرژی از منابع گرمایی با دمای پایین، مانند حرارت زباله‌های صنعتی، یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی فسیلی است. با توجه به محدودیت منابع سوخت فسیلی و آثار مخرب زیست‌محیطی آن، بهینه‌سازی روش‌های بهره‌برداری از این سوخت‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. یکی از راهکارهای پیشنهادی، افزایش بازده سیستم‌های انرژی با منابع حرارتی دمای پایین است [۱]. مصرف بالای سوخت‌های فسیلی، کمبود منابع انرژی، افزایش قیمت انرژی و آلودگی محیط زیست ناشی از گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن، ضرورت بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی را دوچندان می‌کند [۲]. تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی معمولاً با ضایعات قابل توجهی همراه است؛ حتی در بهترین شرایط تولید مرتبط با چرخه ترکیبی، بیش از ۵۰ درصد انرژی حرارتی وارد شده به سیستم به انرژی الکتریکی تبدیل نمی‌شود و به صورت گرما از طریق دودکش، کندانسور و سایر تجهیزات دفع می‌شود. بنابراین، استفاده از سیستم‌های تولید همزمان با بازده کاری بالا به عنوان راهکاری مؤثر مطرح است [۳].

چرخه‌های ارگانیک رانکین^۱ [۴] و کالینا^۲ [۵] از جمله سیستم‌هایی هستند که می‌توانند با استفاده از منابع حرارتی دمای پایین، توانایی تولید توان با بازده قابل قبول داشته باشند. این سیستم‌ها گرمای با دمای پایین را به توان مکانیکی یا الکتریسیته تبدیل می‌کنند و به‌طور سنتی از سیال عامل آلی استفاده می‌کنند [۶]. در سال‌های اخیر، چرخه رانکین ارگانیک توسط پژوهشگران توسعه و بهبود یافته است و در مواردی که منابع حرارتی دمای پایین مانند منابع زمین‌گرمایی و خورشیدی در دسترس هستند، از این چرخه برای تولید توان و سرمایه‌گذاری استفاده می‌شود [۷]. این چرخه به‌منظور بهبود بازده و بهره‌وری در تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی از طریق چرخه ترمودینامیکی در منابع گرمایی با دماهای متوسط یا کم توسعه یافته و در سال‌های اخیر به‌عنوان راهکارهای مؤثر در تولید انرژی مطرح شده است. چرخه رانکین ارگانیک به‌عنوان یک فناوری مهم در بازیابی گرما از منابع گرمایی با دماهای پایین و متوسط مانند منابع زمین‌گرمایی، منابع خورشیدی و همچنین گازهای خروجی از موتورهای دیزلی، توسط بسیاری از محققان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات تچانچه و همکارانش [۸] نشان داده است که این چرخه می‌تواند به‌عنوان

² Kalina cycle¹ Organic Rankine cycle

سیستم‌ها، مشاهده شد که با افزایش تابش عادی مستقیم^۱ (DNI) این شاخص از ۱/۶۵۰۴ به ۰/۶۸۰۱ کاهش یافت. علاوه بر این، ضریب پایداری اگزرتیک، که نشان‌دهنده پایداری تخریب اگزرتی در سیستم‌ها است، با سطوح DNI بالاتر از ۰/۳۷۷۳ به ۰/۵۹۵۲ افزایش یافت. این یافته‌ها یک همبستگی را نشان می‌دهد که در آن DNI بالاتر منجر به کاهش تأثیر اگزرتو-محیطی و بهبود پایداری در تخریب اگزرتی در سیستم‌ها می‌شود.

در مطالعه انجام شده توسط شوکتی و همکاران [۱۶]، چرخه‌های توان جذبی لیتیوم برماید-آب و آب-آمونیاک به همراه چرخه رانکین از نظر اگزرتوآکونومیکی مقایسه شدند. این تحلیل‌ها با بهره‌گیری از روش هزینه اگزرتی ویژه انجام شد. نتایج نشان داد که چرخه لیتیوم برماید-آب از نظر بازده قانون اول، عملکرد بهتری نسبت به سایر چرخه‌ها دارد؛ با این حال، هزینه واحد تولید برق توسط توربین در این چرخه بیش از چرخه رانکین است. به بیان دیگر، چرخه لیتیوم برماید-آب اگرچه بازده بالاتری دارد، اما مستلزم صرف هزینه بیشتری است. غایبی و همکاران [۱۷] در تحقیقی از ترکیب دو چرخه تبرید اجکتوری (ERC) و ORC برای تولید سرمایه و توان انرژی استفاده کردند. در این ترکیب، کندانسور چرخه تبرید اجکتوری به‌عنوان اواپراتور چرخه ORC عمل می‌کند. ایزوبوتان به‌عنوان سیال عامل در چرخه تبرید اجکتوری مورد استفاده قرار گرفته و برای چرخه ORC از سیالات عامل مختلفی از جمله R113، R141B، R11، R23، R245fa، R114 و ایزوبوتان استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین کارایی مربوط به ترکیب ایزوبوتان و R113 برای چرخه تبرید و چرخه ORC به ترتیب حاصل می‌شود. مقاله یو و همکاران [۱۸] یک سیستم تولید سه‌گانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد^۲ (SOFC) را برای تولید برق، سرمایه و گرمایش به‌طور همزمان پیشنهاد می‌کند. این سیستم از یک SOFC، یک توربین گاز (GT)، یک چرخه رانکین آلی، یک یخچال اجکتور بخار^۳ (SER) و یک مبدل حرارتی تشکیل شده است. مدل‌های ترمودینامیکی، اگزرتوآکونومیک و اگزرتو-محیطی برای سیستم پیشنهادی توسعه داده شده‌اند و اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی SOFC، فشار w، اختلاف دمای نقطه پینچ و فشار تبخیر ژنراتور، میانگین هزینه محصول سیستم و اثرات زیست‌محیطی بر واحد اگزرتی افزایش می‌یابد؛ در مقابل، این مقادیر با افزایش

که تطابق دمایی بین پروفیل دمای جریان‌های منبع گرما و پروفیل دمای آب و آمونیاک در اواپراتور و کندانسور بهبود یابد. به دلیل بهبود تطابق دمایی، تخریب اگزرتی در اواپراتور و کندانسور کاهش یافته و فرآیندهای انتقال حرارت در این بخش‌ها بهینه انجام می‌شوند. با توجه به امکان تنظیم غلظت آمونیاک در مخلوط آب و آمونیاک، این چرخه انعطاف‌پذیری بیشتری برای بهینه‌سازی بازیابی گرما فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، محققین بسیاری از جمله دمیرکایا و همکارانش [۱۲] چرخه‌های تولید همزمان توان و سرمایه را پیشنهاد داده‌اند که از ادغام چرخه‌های تولید توان مانند کالینا و رانکین و چرخه‌های خنک‌کننده جذبی ساخته شده‌اند و در این چرخه‌ها از سیال عامل آب و آمونیاک استفاده شده است. این چرخه‌های تولید همزمان توان و تبرید، تاکنون به‌عنوان راهکاری مؤثر در بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش و تبرید مطرح شده‌اند. از طریق استفاده از این چرخه‌ها، می‌توان گرمای تولید شده در سیستم‌های تولید توان را به تولید برودت مفید تبدیل کرد و بدین ترتیب انرژی را به‌صورت کامل بهره‌برداری کرد.

احمدی و همکارانش [۱۳] در تحقیقات خود، تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی را بر روی چرخه‌های تولید سه‌گانه انجام دادند. این چرخه‌ها شامل چرخه توربین گاز، چرخه ORC و چرخه جذبی تک‌اثره بودند. در این تحلیل‌ها، از مفهوم اگزرتوآکونومیک برای ارزیابی بهره‌وری و هزینه‌های این چرخه‌ها استفاده شد. این تحقیقات اطلاعات ارزشمندی درباره عملکرد و بهره‌وری این چرخه‌های تولید انرژی ارائه کردند و به مهندسان امکان تصمیم‌گیری بهتر در زمینه طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها را می‌دهد. تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی که باقرنژاد و همکارانش [۱۴] انجام دادند، مثال دیگری از کاربرد قدرتمند این روش در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی است. در نتیجه این تحلیل‌ها مشخص شد که در شرایط بهینه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این سیستم‌ها به میزان ۱۳/۳ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که با بهره‌گیری از تحلیل‌های اگزرتوآکونومیکی، می‌توان به بهبود عملکرد و هزینه‌های سیستم‌های خورشیدی دست یافت و در عین حال به محیط زیست نیز کمک کرد. در یک تحلیل اگزرتو-محیطی که از طرف خان و همکاران [۱۵] در مقایسه عملکرد چرخه‌های رانکین آلی ادغام شده با سیکل ترکیبی مبتنی بر خورشید صورت گرفت، با استفاده از شاخص تأثیر بر محیط زیست برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

³ Steam Ejector Refrigerator¹ Direct normal irradiation² Solid Oxide Fuel Cell

پیل سوختی اکسید جامد-توربین گازی، که به‌عنوان چرخه تولید توان عمل می‌کند و یک سیستم تبرید جذبی، که به‌عنوان چرخه تولید برودت عمل می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چرخه ترکیبی پیشنهادی دارای یک بازده انرژی بسیار بالاتر از چرخه پیل سوختی-توربین گازی در شرایط مشابه است، که این بهبود در بازده انرژی می‌تواند منجر به افزایش توان الکتریکی تولیدی و تولید برودت باشد. در پژوهش فراهانی و همکارانش [۲۳] با توجه به وضعیت زیست‌محیطی جهان امروزی و تلاش جامعه جهانی برای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و جلب منابع انرژی پاک‌تر، به معرفی یک چرخه تولید همزمان توان حرارتی و برودت با استفاده از انرژی زمین‌گرما پرداختند. این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از انرژی زمین‌گرما در یک سیستم تولید همزمان توان حرارتی و برودت، می‌توان بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی داشت. در پژوهشی توسط غایبی و همکارانش [۲۴]، از سیستم جذبی محلول لیتیم بروماید-آب به‌عنوان یک روش جدید برای تولید توان استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از چرخه توان جذبی باعث بهبود راندمان این چرخه می‌شود. افزایش راندمان در این چرخه به‌عنوان یک نتیجه اصلی با کاهش اختلاف دمای سیال‌های خارجی گرم و سرد در این چرخه مرتبط است. همچنین مشاهده شده است که استفاده از این چرخه جذبی به افزایش کار ویژه منجر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم جذبی محلول لیتیم بروماید-آب می‌تواند یک گزینه مؤثر برای تولید توان و بهبود راندمان در چرخه‌های حرارتی باشد.

تمرکز اصلی این مقاله بر درک بهتر فناوری‌های موجود برای منابع انرژی دما پایین و استفاده همزمان از آن‌ها در زمینه‌های مختلف است، به منظور جلوگیری از هدر رفتن انرژی مفید و کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌ها. نوآوری اصلی مطالعه در طراحی یک سیستم یکپارچه تولید چندگانه است که توان الکتریکی، سرمایش، گرمایش و هیدروژن را به‌صورت همزمان تولید می‌کند. سیستم پیشنهادی شامل ترکیب چرخه توان جذبی و چرخه تبرید تراکمی همراه با واحد تولید هیدروژن از طریق الکترولایزر غشاء پروتونی^۳ (PEM) است. واقعیت‌پذیری این سیستم با استفاده از تحلیل‌های ترمودینامیکی انرژی و انرژی بررسی شده و نشان داده می‌شود که عملکرد آن در شرایط عملی قابل اعتماد و عملیاتی است. مقایسه با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی قادر است عملکرد

چگالی جریان سلول سوختی کاهش پیدا می‌کنند. همچنین، بهینه‌سازی مبتنی بر انرژی برای دستیابی به عملکرد مطلوب انجام شده است که اگرچه به کاهش راندمان انرژی سیستم منجر می‌شود، اما میانگین هزینه محصول و اثرات زیست‌محیطی سیستم را در واحد انرژی کاهش می‌دهد. در تحقیقی که توسط رشیدی و همکارش [۱۹] انجام شد، عملکرد هفت سیال عامل مختلف در چرخه ترکیبی تولید توان و تبرید اجکتوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که R124 به‌عنوان یکی از سیالات عامل، عملکرد بهتری نسبت به سایر سیالات دارد. این به‌دلیل افزایش دما و نسبت انبساط توربین و دمای تبخیرکننده بوده و باعث افزایش بازده انرژی در این چرخه می‌شود. به‌عبارت دیگر، R124 بهترین سیال عامل برای بهینه‌سازی عملکرد چرخه ترکیبی توان و تبرید اجکتوری به شمار می‌رود.

در مقاله خیمی و همکاران [۲۰] یک سیستم خنک‌کننده و تولید توان ترکیبی (CCPP) را بررسی می‌کند، که از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی خود استفاده می‌کند. این سیستم از یک چرخه رانکین آلی (ORC) برای تولید نیرو و یک سیکل تبرید اجکتوری (ERC) برای ظرفیت خنک‌کننده استفاده می‌کند. این تحقیق بر روی تأثیر استفاده از دو سیال عامل R-11 و R-2545fa و همچنین مخلوط‌های زئوتروپیک به‌دست آمده از ترکیب این دو سیال متمرکز است. یک فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه برای انتخاب سیال کاری مناسب با هدف به حداقل رساندن نرخ کل هزینه^۱ (TCR) و به حداکثر رساندن بازده انرژی سیستم استفاده می‌شود. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که استفاده از مخلوط‌های زئوتروپیک R-11 و R-2545fa منجر به عملکرد بهتر، با بهبود ۸/۵ درصدی در بازده انرژی و تنها افزایش ۱/۵ درصدی در TCR می‌شود. در تحقیقات زندی و همکارانش [۲۱] که به مطالعه عملکرد سیالات مختلف در چرخه ترکیبی توان و تبرید پرداختند، از رویکرد تحلیل انرژی نیز استفاده شد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در تحلیل انرژی و انرژی برای چرخه ترکیبی توان و تبرید با استفاده از نرم‌افزار EES^۲ و با بررسی مبردهای مختلف، مبرد R290 بالاترین راندمان انرژی را داشته و در چرخه مربوط به R12، ضریب عملکرد سیکل بیشترین مقدار را با عدد ۱/۴۳۸ نشان داده است. در پژوهشی انجام شده توسط خانی و همکاران [۲۲] امکان استفاده از یک چرخه ترکیبی جدید برای تولید همزمان توان و تولید برودت مورد بررسی قرار گرفته است. این چرخه پیشنهادی شامل ترکیبی از دو سیستم است: یک سیستم

³ Proton Exchange Membrane¹ Total Cost Rate² Engineering Equation Solver

۲-۳- چرخه تبرید تراکمی

در ابتدا، سیال عامل آمونیاک در اواپراتور گرما را از محیط تبرید جذب کرده و به طور کامل تبخیر می‌شود. این فرآیند تبرید مورد نیاز برای کاربردهای خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. سپس سیال عامل (بخار آمونیاک) به صورت بخار اشباع (حالت ۸) وارد کمپرسور شده و متراکم می‌گردد. جریان خروجی کمپرسور (حالت ۳) پس از اختلاط با بخار خروجی از توربین (حالت ۴)، وارد چگالنده می‌شود. در این بخش، گرمای ناشی از تراکم بخار آمونیاک دفع می‌شود که می‌تواند برای تأمین گرمایش مورد نیاز در مصارف خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. بخشی از جریان خروجی چگالنده (حالت ۵) وارد شیر خفانش ۱ (حالت ۶) شده و در یک فرآیند آنتالپی ثابت با کاهش فشار، به اواپراتور (حالت ۷) می‌رسد.

۲-۴- الکترولایزر غشاء پروتونی

در ابتدا، آب مایع در دما و فشار محیط وارد گرم‌کن می‌شود (حالت ۲۴). در این جا، آب گرم تبادل حرارت با منبع حرارتی را تجربه می‌کند و دمای آن به دمای کاری الکترولایزر افزایش می‌یابد (حالت ۲۵). سپس، آب گرم تولیدی به الکترولایزر وارد می‌شود و در طی فرآیند شیمیایی، مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن از آب جدا می‌شوند. هیدروژن تولیدی پس از ترک کاتد خود، گرمای خود را به محیط منتقل می‌کند و به دمای محیط می‌رسد (حالت ۲۷). سپس مخلوطی از اکسیژن و آب از آند الکترولایزر خارج می‌شود (حالت ۲۸) و وارد واحد جداکننده اکسیژن می‌شود. در اینجا اکسیژن از آب جدا می‌شود و به محیط دفع می‌شود (حالت ۲۹). در نهایت، آب باقی‌مانده به منظور ادامه فرآیند تولید هیدروژن وارد چرخه می‌شود. در کل، الکترولایزر غشاء پروتونی وظیفه تبدیل آب به هیدروژن و اکسیژن را دارد و از دمای منبع حرارتی و توان توربین برای این فرآیند استفاده می‌کند.

۲-۵- فرضیات

چرخه تولیدچندگانه در این پژوهش با در نظر گرفتن تعدادی فرضیه ترمودینامیکی مدل‌سازی شده است:

- همه فرآیندها در حالت پایا انجام می‌شوند.
- تمام حجم کنترل‌ها بر اساس فرض شرایط آدیاباتیک مدل‌سازی شده‌اند، به‌این‌معنا که تغییرات دما و فشار در سیستم

در طول فرآیندها بدون تبادل حرارت با محیط اطراف در نظر گرفته شده‌اند.

- افت فشار در تمام اعضاء نادیده گرفته شده است، به‌این‌معنا که فشار در ورود و خروج از اعضاء ثابت در نظر گرفته شده و تغییرات آن در نظر گرفته نشده است.
- در فرآیند انبساط آنتالپی ثابت، اختناق در شیر در نظر گرفته شده است.
- توربین و پمپ با بازده آیزنتروپیک مشخصی کار می‌کنند.
- مقدار انرژی جنبشی در ورود و خروج اجزاء نادیده گرفته می‌شود و به‌عنوان اثر ناچیز در نظر گرفته نمی‌شود.
- سیال کاری سیکل توان جذبی، آب-آمونیاک است.
- سیال کاری سیکل تبرید تراکمی، آمونیاک خالص است.
- حالت خروجی از چگالنده به‌صورت مایع اشباع و حالت خروجی از تبخیرکننده و ژنراتور به‌صورت بخار اشباع مدل‌سازی شده‌اند.
- برخی دیگر از فرضیات ترمودینامیکی جهت شبیه‌سازی سیستم در جدول (۱) آورده شده است.

۲-۶- تحلیل انرژی و اگزرژی

برای تعیین گرمای ورودی، آهنگ اتلاف اگزرژی و بازده انرژی، نیاز به به‌کارگیری موازنه جرم، موازنه انرژی و موازنه اگزرژی می‌باشد. موازنه کلی جرم را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

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

موازنه کلی انرژی را با صرف‌نظر کردن از انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$

\dot{Q} نشان‌دهنده آهنگ انتقال گرما و \dot{W} نشان‌دهنده آهنگ انجام کار می‌باشد.

موازنه کلی اگزرژی را نیز می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest} \quad (3)$$

$\dot{E}x_{in}$ و $\dot{E}x_{out}$ به‌ترتیب، نشان‌دهنده آهنگ اگزرژی ورودی و خروجی انتقال‌یافته به‌وسیله گرما، کار و جرم می‌باشد و $\dot{E}x_{dest}$ نشان‌دهنده آهنگ تخریب اگزرژی می‌باشد. شکل دیگر معادله (۳) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

بالانویس \dot{Q} و \dot{W} به ترتیب، آهنگ انتقال حرارت و کار را نشان می‌دهند. انتقال انرژی توسط گرما به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}x^{\dot{Q}} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (5)$$

\dot{Q} نشان‌دهنده آهنگ انتقال حرارت و T_0 نشان‌دهنده دمای مرجع می‌باشد [۲۸]. انرژی قابلیت تبدیل به کار مفید است و انتقال انرژی توسط کار را به صورت ساده زیر می‌توان بیان کرد.

$$\dot{E}x^{\dot{W}} = \dot{W} \quad (6)$$

جرم دارای انرژی، انرژی و آنتروپی است و محتوی انرژی، انرژی و آنتروپی یک سیستم متناسب با جرم آن است. همچنین، آهنگ‌های انتقال انرژی، آنتروپی و انرژی به داخل (یا خارج) یک سیستم با آهنگ جریان جرم متناسب‌اند [۲۹].

$$\dot{E}x_{mass} = \dot{m} ex \quad (7)$$

انرژی ویژه (جریان) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

h و s آنتالپی و آنتروپی میرد، T_0 دمای مرجع و h_0 و s_0 آنتالپی و آنتروپی میرد در دما و فشار مرجع می‌باشند که خواهیم داشت:

$$\dot{E}x_D = \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \dot{W} + \sum (\dot{m}ex)_{in} - \sum (\dot{m}ex)_{out} \quad (9)$$

$\dot{E}x$ نشان‌دهنده آهنگ انرژی و زیرنویس $dest$ نشان‌دهنده انرژی تخریب می‌باشد.

۲-۷- روابط ریاضی حاکم بر واحد الکترولایزر غشاء پروتونی

در گام اول محاسبه میزان انرژی تئوری برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیت ضروری به نظر می‌رسد که کل انرژی مورد نیاز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (10)$$

ΔG انرژی الکتریکی مورد نیاز (انرژی آزاد گیبس) و $T\Delta S$ انرژی گرمایی مورد نیاز در واحد ژول بر مول هیدروژن می‌باشد. مقادیر گیبس، آنتالپی و آنتروپی برای آب، هیدروژن و اکسیژن در جداول ترمودینامیکی موجود می‌باشند. انرژی تئوری لازم برای الکترولیز آب بدون اتلافات در نظر گرفته شده است.

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x^{\dot{Q}} - \dot{E}x^{\dot{W}} + \dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} \quad (4)$$

جدول ۱ برخی از پارامترهای ورودی استفاده شده در شبیه‌سازی سیستم [۲۵، ۲۶ و ۲۷]

پارامتر	مقدار
دمای حالت مرجع (K)	۲۹۸/۱۵
فشار حالت مرجع (bar)	۱/۰۱۳
دمای بخار آب منبع حرارتی (k)	۴۲۳/۱۵
دبی جرمی بخار آب منبع حرارتی	۰/۲۸۵
دمای بخار ورودی توربین (K)	۴۱۳/۱۵
فشار بخار ورودی توربین (bar)	۲۰
دمای خروجی جاذب (K)	۳۲۳/۱۵
غلظت آمونیاک خروجی جاذب (/)	۶۰
بازده آیزنتروپیک پمپ (/)	۸۵
بازده آیزنتروپیک کمپرسور (/)	۸۵
بازده آیزنتروپیک توربین (/)	۸۵
اثر بخشی مبدل حرارتی (/)	۸۲
دمای خروجی اواپراتور (K)	۲۸۶
دمای ورودی کندانسور (K)	۳۷۵
اختلاف دمای گرم ژنراتور	۱۰
اختلاف دمای سرد ژنراتور	۳
دمای آب سردکن ورودی اواپراتور (K)	۲۹۸/۱۵
دمای آب سرد ورودی جاذب (K)	۲۹۸/۱۵
دمای آب سرد ورودی کندانسور (K)	۲۹۵/۱۵
دمای الکترولایزر، T _{PEM} (K)	۳۵۳
انرژی فعال‌سازی در سمت آند، E _{act,a} (kJ.mol ⁻¹)	۷۶
انرژی فعال‌سازی در سمت کاتد، E _{act,c} (kJ.mol ⁻¹)	۱۸
محتوی آب سطح غشاء در سمت آند، λ _a (1.Ω ⁻¹)	۱۴
محتوی آب سطح غشاء در سمت کاتد، λ _c (1.Ω ⁻¹)	۱۰
ضخامت غشاء، D (μm)	۱۰۰
فاکتور پتانسیل اولیه در سمت آند، j _a ^{ref} (A.m ⁻²)	۱/۷ × ۱۰ ^۷
فاکتور پتانسیل اولیه در سمت کاتد، j _c ^{ref} (A.m ⁻²)	۴/۶ × ۱۰ ^۳
ثابت فارادی، F (C.mol ⁻¹)	۹۶۴۸۶

$\lambda(x)$ محتوی آب در موقعیت x (عمق غشاء اندازه‌گیری شده از سطح کاتد) که می‌تواند به صورت زیر بیان گردد [۲۷]:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D}x + \lambda_c \quad (18)$$

در رابطه فوق، λ_a و λ_c به ترتیب محتوی آب در سطح غشاء در سمت آند و کاتد می‌باشند و D نیز نشانگر ضخامت غشاء میباشد. با استفاده از روابط فوق می‌توان مقاومت اهمی کل را به صورت زیر محاسبه کرد [۲۷]:

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (19)$$

در نهایت می‌توان پتانسیل اهمیک را بر اساس تعریف قانون اهم این چنین محاسبه کرد [۲۷]:

$$V_{ohm,PEM} = JR_{PEM} \quad (20)$$

همچنین پتانسیل فعال سازی الکترودها $V_{act,a}$ و $V_{act,c}$ که انرژی لازم برای واکنش‌های الکتروشیمیایی را فراهم می‌کنند، می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد [۳]:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right), i = a, c \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) $J_{0,i}$ تبادل چگالی جریان بوده و به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۷]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left(-\frac{E_{act,i}}{RT} \right), i = a, c \quad (22)$$

که در رابطه (۲۲)، $E_{act,i}$ و J_i^{ref} به ترتیب، انرژی فعال سازی و فاکتور پتانسیل الکترودها می‌باشد که در جدول (۱) ارائه شده‌اند. با به کار بردن معادلات فوق، معادلات موازنه جرم، انرژی و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی به دست می‌آید که در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

۳- ارزیابی کلی عملکرد سیستم تولید چندگانه پیشنهادی

برای درک بهتر سیستم تولید چندگانه پیشنهادی، ارزیابی عملکرد کل سیستم پیشنهادی ضروری می‌باشد.

آهنگ جریان مولی هیدروژن تولیدی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۳۰]:

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (11)$$

در معادله فوق، F بیانگر ثابت فارادی و J بیانگر چگالی جریان می‌باشد. به طور مشابه آهنگ جریان مولی اکسیژن تولیدی و آب باقیمانده می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (12)$$

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F} \quad (13)$$

آهنگ جریان مولی آب ورودی $\dot{N}_{H_2O,in}$ پارامتری مشخص می‌باشد و برابر ۱ مول بر ثانیه فرض شده است.

انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند الکتروشیمیایی از طریق توان الکتریکی تولیدی در توربین چرخه توان جذب به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۷]:

$$E_{electric} = \dot{W}_{turbine} \times 10^3 = JV \quad (14)$$

$E_{electric}$ انرژی ورودی به الکترولایزر و پارامتر V نیز به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۷]:

$$V = V_0 + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohm} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، V_0 پتانسیل برگشت پذیر می‌باشد که توسط معادله نرنست^۱ به دست می‌آید و V_{ohm} ، $V_{act,c}$ و $V_{act,a}$ به ترتیب، بیانگر پتانسیل اهمیک^۲، پتانسیل فعال کننده کاتد و آند می‌باشند [۲۷]:

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{PEM} - 298) \quad (16)$$

به منظور محاسبه V_{ohm} نیاز به معرفی چند پارامتر می‌باشد. از جمله این پارامترها رسانایی یونی محلی الکترولایزر غشاء پروتونی می‌باشد (σ_{PEM}) که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۷]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (17)$$

² Ohmic over potential

¹ Nernst equation

جدول ۲ معادلات بقای جرم، انرژی و اگزرژی برای هر یک از اعضای سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی

معادله بالانس انرژی	معادله بالانس اگزرژی	
$\dot{E}_{D,SG} = (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}) - (\dot{E}_{13} + \dot{E}_1 - \dot{E}_{12})$	$\dot{m}_1 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{12}, \dot{m}_1 + \dot{m}_{13}X_{13}$ $= \dot{m}_{12}X_{12}$ $= \dot{Q}_{SG} = \dot{m}_{16}(h_{16} - h_{17})$ $= \dot{Q}_{SG} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_1h_1 - \dot{m}_{12}h_{12}$	ژنراتور بخار
$\dot{E}_{D,Tur} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) - \dot{W}_{Tur}$	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_1(h_1 - h_2),$ $\eta_{P,Tur} = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_{2s})$	توربین
$\dot{E}_{D,Cond} = (\dot{E}_4 - \dot{E}_5) - (\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20})$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21}),$ $\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_4(h_5 - h_4)$	کندانسور
$\dot{E}_{D,Abs} =$ $(\dot{E}_9 + \dot{E}_{15} - \dot{E}_{10}) - (\dot{E}_{19} - \dot{E}_{18})$	$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{18}(h_{19} - h_{18})$ $\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{15}h_{15} - \dot{m}_{10}h_{10}$	جاذب
$\dot{E}_{DEV2} = \dot{E}_{14} - \dot{E}_{15}$	$h_{14} = h_{15}$	شیر انبساط ۲
$\dot{E}_{D,Pum} = \dot{W}_{Pum} - (\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10})$	$\dot{W}_{Pum} = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10}),$ $\eta_{is,Pum} = (h_{11s} - h_{10})/(h_{11} - h_{10})$	پمپ
$\dot{E}_{D,S.H.E} = (\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}) - (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11})$	$\dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14}) = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$ $\varepsilon_{S.H.E} = \frac{T_{13} - T_{14}}{T_{13} - T_{11}}$	مبدل حرارتی محلول
$\dot{E}_{D,Com} = \dot{W}_{Com} - (\dot{E}_3 - \dot{E}_8)$	$\dot{W}_{Com} = \dot{m}_3(h_3 - h_8)$ $\eta_{P,Com} = (h_{3s} - h_8)/(h_3 - h_8)$	کمپرسور
$\dot{E}_{D,Eva} = (\dot{E}_7 - \dot{E}_8) - (\dot{E}_{23} - \dot{E}_{22})$	$\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$ $\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_{22}(h_{22} - h_{23})$	اوپراتور
$\dot{E}_{D,EV2} = \dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$h_6 = h_7$	شیر انبساط ۱
$\dot{E}_{D,Hea} = (\dot{E}_{17} - \dot{E}_{31}) - (\dot{E}_{25} - \dot{E}_{24})$	$\dot{Q}_{Hea} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{31})$ $\dot{Q}_{Hea} = \dot{m}_{24}(h_{25} - h_{24})$	گرم کن
$\dot{E}_{D,PEM} = (\dot{E}_{26} + \dot{W}_{PEM}) - (\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28})$	از روابط ریاضی حاکم بر واحد الکترولایزر غشاء پروتونی	الکترولایزر

در رابطه (۲۵)، \dot{W}_{net} بیانگر کار خالص تولیدی می‌باشد و برابر است با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Tur} - \dot{W}_{Com} - \dot{W}_{Pu} - \dot{W}_{PEM} \quad (25)$$

۴- بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی

در نرم‌افزار EES چندین روش کار بردی و مفید برای بهینه‌سازی وجود دارد که از جمله می‌توان به روش‌های الگوریتم مستقیم^۲،

با توجه به این موضوع، تعریف معیار عملکرد بر اساس قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک یعنی نسبت عملکرد انرژی^۱ (EPR) و بازده اگزرژی ($\eta_{exergy,total}$) به صورت زیر تعریف شده است.

$$EPR = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{cooling} + \dot{Q}_{Heating} + \dot{m}_{27}LHV_{H_2}}{\dot{Q}_{SG} + \dot{Q}_{Hea}} \quad (23)$$

² Direct algorithm

¹ Energy Performance Ratio

جدول ۴ محدوده در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصمیم‌گیری

مقدار	پارامتر
$400 \leq T_{in,HS} (K) \leq 450$	دمای ورودی منبع حرارتی
$0.1 \leq \dot{m}_{HS} \leq 0.5$	دبی جرمی ورودی منبع حرارتی
$10 \leq \Delta T_{hot,SG} \div (K) \leq 20$	اختلاف دمای گرم ژنراتور بخار
$0.55 \leq X_{ammonia} \leq 0.67$	غلظت آمونیاک خروجی جاذب
$315 \leq T_{absorber} (K) \leq 335$	دمای خروجی
$15 \leq P_{in,Tur} (bar) \leq 25$	فشار ورودی به توربین
$275 \leq T_{Eva} (K) \leq 290$	دمای اواپراتور

۵- یافته‌ها

۵-۱-۱- اعتبارسنجی

۵-۱-۱-۱- اعتبارسنجی چرخه تولید توان جذبی

به منظور نشان دادن دقت روابط ارائه شده و صحت مدل‌سازی کد نوشته شده در نرم‌افزار EES، چرخه توان جذبی با سیال کاری آب-آمونیاک با مطالعه تئوری شوکاتی و همکاران [۱۶] تحت شرایط یکسان مقایسه و درصد خطای نسبی بین دو مطالعه در جدول (۵) بیان شده است. با توجه به این که تمامی درصد خطای ارائه شده برای پارامترهای عملکردی چرخه توان جذبی بین دو مطالعه در جدول (۵) زیر ۵ درصد می‌باشد، بنابراین مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

۵-۱-۲- اعتبارسنجی واحد الکترولایزر غشاء پروتونی

در ادامه به منظور نشان دادن درستی مدل واحد تولید هیدروژن، شکل (۲)، تغییرات پتانسیل سلول^۳ (V) را با افزایش چگالی جریان^۴ (J) نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۲)، روابط به کار برده شده و کد نوشته شده بر اساس روابط ریاضی ارائه شده به اندازه کافی دقیق بوده و می‌توان با اعمال فرضیات در نظر گرفته شده در واقعیت نیز به نتایج حاصل از شبیه‌سازی استناد کرد.

روش کمکی متغیر^۱، روش مسیره‌های توأمان^۲ و غیره اشاره نمود. در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. پارامترهای موردنیاز در فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) ارائه شده‌اند. این پارامترها شامل تعداد افراد در جمعیت، تعداد نسل‌ها، حداکثر نرخ جهش، حداقل نرخ جهش، نرخ جهش اولیه و احتمال تقاطع هستند. پارامترهای ورودی بهینه‌سازی در این پژوهش بر اساس اثر قابل توجه آن‌ها بر عملکرد سیستم و اهمیت ترمودینامیکی‌شان انتخاب شده‌اند، زیرا تغییرات هر یک از این پارامترها تأثیر مستقیمی بر بازده انرژی، بازده انرژی و نرخ تولید محصولات دارد. سه پارامتر نخست به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار، بر اساس مرجع [۳۱] انتخاب شده‌اند، در حالی که سه پارامتر دیگر به‌صورت پیش‌فرض توسط نرم‌افزار تعیین می‌شوند و قابلیت تغییر ندارند.

در این پژوهش دو پارامتر خروجی، یعنی EPR و $\eta_{exergy,total}$ سیستم به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند و دمای کاری منبع حرارتی، آهنگ جرمی جریان منبع حرارتی، فشار بالای توربین، دمای خروجی جاذب، غلظت آمونیاک در خروجی جاذب، اختلاف دمای گرم ژنراتور و دمای خروجی اواپراتور به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در محدوده موردنظر مطابق با جدول (۴) انتخاب شده‌اند. مشخصاً هدف اصلی از بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی، حداکثر کردن بازده انرژی و سیستم است. در بهینه‌سازی تک‌هدف سیستم تولید همزمان ارائه شده، توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری به این صورت در نظر گرفته شده‌اند:

$$\text{Maximize , } EPR \text{ or } \eta_{exergy,total} \quad (26)$$

$$(T_{in,HS}, \dot{m}_{HS}, \Delta T_{hot,SG}, X_{ammonia}, T_{absorber}, P_{in,Tur}, T_{Eva})$$

جدول ۳ پارامترهای الگوریتم ژنتیک [۳۱]

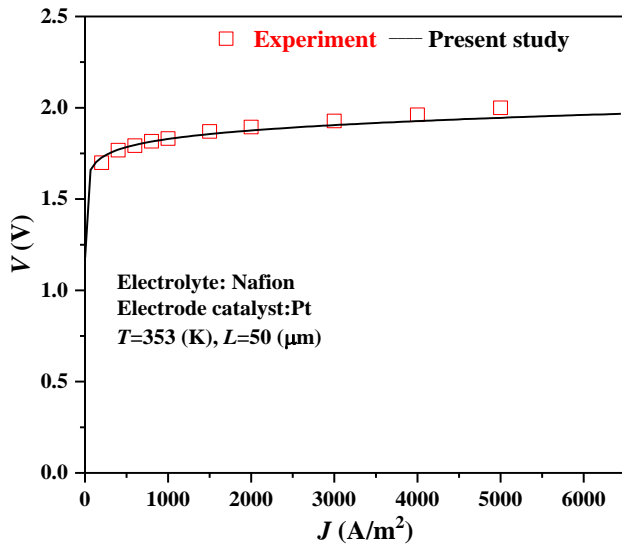
پارامتر	مقدار
تعداد افراد در جمعیت	۳۲
تعداد نسل‌ها	۶۴
حداکثر نرخ جهش	۰/۲۵
حداقل نرخ جهش	۰/۰۰۰۵
نرخ جهش ابتدایی	۰/۲۵
احتمال تقاطع	۰/۸۵

³ Cell potential

⁴ Current density

¹ Variable metric method

² Conjugate directions method



شکل ۲ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی چرخه الکترولایزر غشاء پروتونی بین مرجع [۲۴] و مطالعه حاضر تحت شرایط یکسان

جدول ۵ اعتبارسنجی چرخه توان جذبی با مرجع [۱۷]

پارامتر خروجی	مطالعه حاضر	مرجع [۱۳]	خطای نسبی %
بازده قانون اول	۱۰/۷۲	۱۰/۷۱	۰/۱۸۶
دبی جرمی بخار آمونیاک عبوری از توربین (kg/s)	۴/۴۲۳	۴/۳۵۶	۱/۵۳
ظرفیت ژنراتور بخار (MW)	۹/۳۵۲	۹/۳۳۵	۰/۱۸۲
فشار کاری جاذب (bar)	۴/۰۵۸	۴/۰۵۸	۰
کار مصرفی پمپ (kW)	۴۷/۵۶	۴۸/۲۷	۱/۴۷
کار تولیدی توربین (kW)	۱۰۴۸	۱۰۴۸	۰

۵-۲- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

در این بخش از مطالعه با استفاده از فرضیات ترمودینامیکی ذکر شده در بخش قبلی و روابط موازنه جرم، انرژی، آگزرژی ارائه شده برای تک‌تک اجزای سیستم تولید چندگانه پیشنهادی نتایج به‌دست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اولین قدم برای تحلیل عملکرد سیستم ارائه شده، محاسبه خواص ترمودینامیکی مهم نظیر: دما، فشار، آنتالپی، آنتروپی، آهنگ جریان جرم، آهنگ آگزرژی جریان برای هر یک از نقاط سیستم پیشنهادی است که مطابق با جدول (۶) گردآوری شده است. با در دست داشتن این خواص، می‌توان به پارامترهای مهم ارزیابی کلی سیستم دست یافت.

جدول ۶ خواص ترمودینامیکی نقاط سیستم پیشنهادی

آهنگ آگزرژی	آگزرژی ویژه	دبی	آنتروپی	آنتالپی	فشار	دما	مرحله	
							سیال کاری	
$\dot{E}x$ (kW)	ex (kJkg ⁻¹)	\dot{m} (kg/s)	s (kJkg ⁻¹ K ⁻¹)	h (kJkg ⁻¹)	P (bar)	T (K)		
164.2	453	0.3625	5.79	1758	20	413.2	آمونیاک	۱
122.1	336.8	0.3625	5.84	1656	10.16	362.4	آمونیاک	۲
56.3	322.6	0.1745	5.49	1538	10.16	316.9	آمونیاک	۳
177.6	330.7	0.537	5.731	1618	10.16	347.1	آمونیاک	۴
171.5	319.4	0.537	1.415	319.7	10.16	298.6	آمونیاک	۵
55.72	319.4	0.1745	1.415	319.7	10.16	298.6	آمونیاک	۶
55.39	317.5	0.1745	1.422	319.7	6.782	286	آمونیاک	۷
46.84	268.4	0.1745	5.46	1475	6.782	286	آمونیاک	۸
115.8	319.4	0.3625	1.415	319.7	10.16	298.6	آمونیاک	۹
49.44	60.22	0.821	0.5916	0.2112	10.16	323.2	آب-آمونیاک	۱۰
50.52	61.53	0.821	0.5923	1.734	20	323.3	آب-آمونیاک	۱۱
70.04	85.31	0.821	1.136	187.6	20	352.9	آب-آمونیاک	۱۲

۳۷.۶۶	۸۲.۱۵	۰.۴۵۸۴	۱.۷۵	۴۳۷.۷	۲۰	۴۱۳.۲	آب-آمونیاک	۱۳
۶.۱۴۷	۱۳.۴۱	۰.۴۵۸۴	۰.۸۶۳۹	۱۰۴.۹	۲۰	۳۳۹.۵	آب-آمونیاک	۱۴
۵.۶۹۲	۱۲.۴۲	۰.۴۵۸۴	۰.۸۶۷۲	۱۰۴.۹	۱۰.۱۶	۳۳۹.۷	آب-آمونیاک	۱۵
۲۰۳	۷۱۲.۲	۰.۲۸۵	۶.۸۳۸	۲۷۴۶	۴.۷۵۷	۴۲۳.۲	بخار	۱۶
۶.۰۳۴	۲۱.۱۷	۰.۲۸۵	۱.۱۰۸	۳۴۷	۴.۷۵۷	۳۵۵.۹	بخار	۱۷
۰	۰	۷.۸۳۲	۰.۳۶۶۹	۱۰۴.۸	۱.۰۱۳	۲۹۸.۲	آب	۱۸
۱.۳۵۸	۰.۱۷۳۴	۷.۸۳۲	۰.۴۳۶۵	۱۲۵.۸	۱.۰۱۳	۳۰۳.۲	آب	۱۹
۰	۰	۳.۷۹۳	۰.۳۶۶۹	۱۰۴.۸	۱.۰۱۳	۲۹۸.۲	آب	۲۰
۴۶.۸۲	۱۲.۳۴	۳.۷۹۳	۰.۹۴۱۹	۲۸۸.۶	۱.۰۱۳	۳۴۲.۱	آب	۲۱
۰	۰	۵.۲۶۵	۰.۳۶۶۹	۱۰۴.۸	۱.۰۱۳	۲۹۸.۲	آب	۲۲
۳.۱۵۷	۰.۵۹۹۶	۵.۲۶۵	۰.۲۳۶۵	۶۶.۵۷	۱.۰۱۳	۲۸۹	آب	۲۳
۰	۰	۰.۰۰۰۳۷۹	۰.۳۶۶۹	۱۰۴.۸	۱.۰۱۳	۲۹۸.۲	آب	۲۴
۰.۰۰۷۱۷۳	۱۸.۹۴	۰.۰۰۰۳۷۹	۱.۰۷۵	۳۳۵	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	آب	۲۵
۳.۳۴۱	۱۸.۹۴	۰.۰۱۸۰۲	۱.۰۷۵	۳۳۵	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	آب	۲۶
۴.۹۴۹	۶۵.۱۵	۰.۰۰۰۴۲۴	۵۵.۸۱	۴۷۲۳	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	هیدروژن	۲۷
۴.۵۴۵	۲۵۰.۶	۰.۰۱۷۹۷	۱.۰۵۸	۵۰.۵	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	آب-اکسیژن	۲۸
۰.۰۴۲۹۴	۴.۱۷۶	۰.۰۰۰۳۳۶	۰.۱۵۵۶	۵۰.۵	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	اکسیژن	۲۹
۰.۱۵۲۸	۸.۶۶۲	۰.۰۱۷۶۴	۰.۱۵۵۶	۵۰.۵	۱.۰۱۳	۳۵۳.۲	آب	۳۰
۶.۰۱۹	۲۱.۱۲	۰.۲۸۵	۱.۱۰۷	۳۴۶.۷	۴.۷۵۷	۳۵۵.۹	بخار	۳۱

جدول ۷ پارامترهای عملکردی سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی

مقادیر	پارامترها/نمادها
۱۱/۰۲	توان الکتریکی مصرفی کمپرسور، $\dot{W}_{Com}(kW)$
۱/۲۵	توان الکتریکی مصرفی پمپ، $\dot{W}_{Pu}(kW)$
۷/۳۵	توان الکتریکی مصرفی الکترولایزر، $\dot{W}_{PEM}(kW)$
۳۶/۷۴	توان الکتریکی تولیدی توربین، $\dot{W}_{Tur}(kW)$
۱۷/۱۲	توان الکتریکی خالص تولیدی سیستم، $\dot{W}_{net}(kW)$
۲۰۱/۵	میزان بار سرمایشی تبخیرکننده، $\dot{Q}_{Cooling}(kW)$
۶۹۷/۱	میزان بار گرمایشی چگالنده کننده، $\dot{Q}_{Heating}(kW)$
۰/۱۵۳	دبی هیدروژن تولیدی، $\dot{m}_{H_2}(m^3/h)$
۶۸۳/۹	آهنگ انرژی دریافتی از منبع انرژی دما پایین، $\dot{Q}_{Total}(kW)$
۱/۳۴۶	نسبت عملکرد انرژی سیستم تولید چندگانه، EPR
۳۶/۵۸	بازده انرژی کلی سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی، $\eta_{exergy,tot}(\%)$

در ادامه برخی از پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی تحت شرایط کاری پایه در جدول (۷) ارائه شده است. مطابق جدول (۶) چرخه توان جذبی سیستم تولید چندگانه به ازای دریافت $683/9 \text{ kW}$ انرژی از منبع حرارتی دما پایین توانایی تولید $36/74 \text{ kW}$ توان الکتریکی را دارد که از این مقدار توان الکتریکی در دسترس حدود $11/02 \text{ kW}$ توسط کمپرسور چرخه تبرید تراکمی، $1/25 \text{ kW}$ توسط سیستم پمپاژ و $7/35 \text{ kW}$ توسط الکترولایزر واحد تولید هیدروژن مصرف شده است، بنابراین، توان خالص تولیدی سیستم حدود $17/12 \text{ kW}$ می‌باشد. همچنین سیستم پیشنهادی به ترتیب، قابلیت تولید $201/5 \text{ kW}$ ، $697/1 \text{ kW}$ و $0/153 \text{ m}^3/h$ ظرفیت سرمایش، گرمایش و هیدروژن خالص را دارد. در نهایت، با توجه به مقادیر تولیدی سیستم پیشنهادی، نسبت بهره‌وری انرژی و بازده انرژی به ترتیب، $1/346$ و $36/58$ درصد به دست آمده است.

۵-۳- نتایج حاصل از تحلیل انرژی

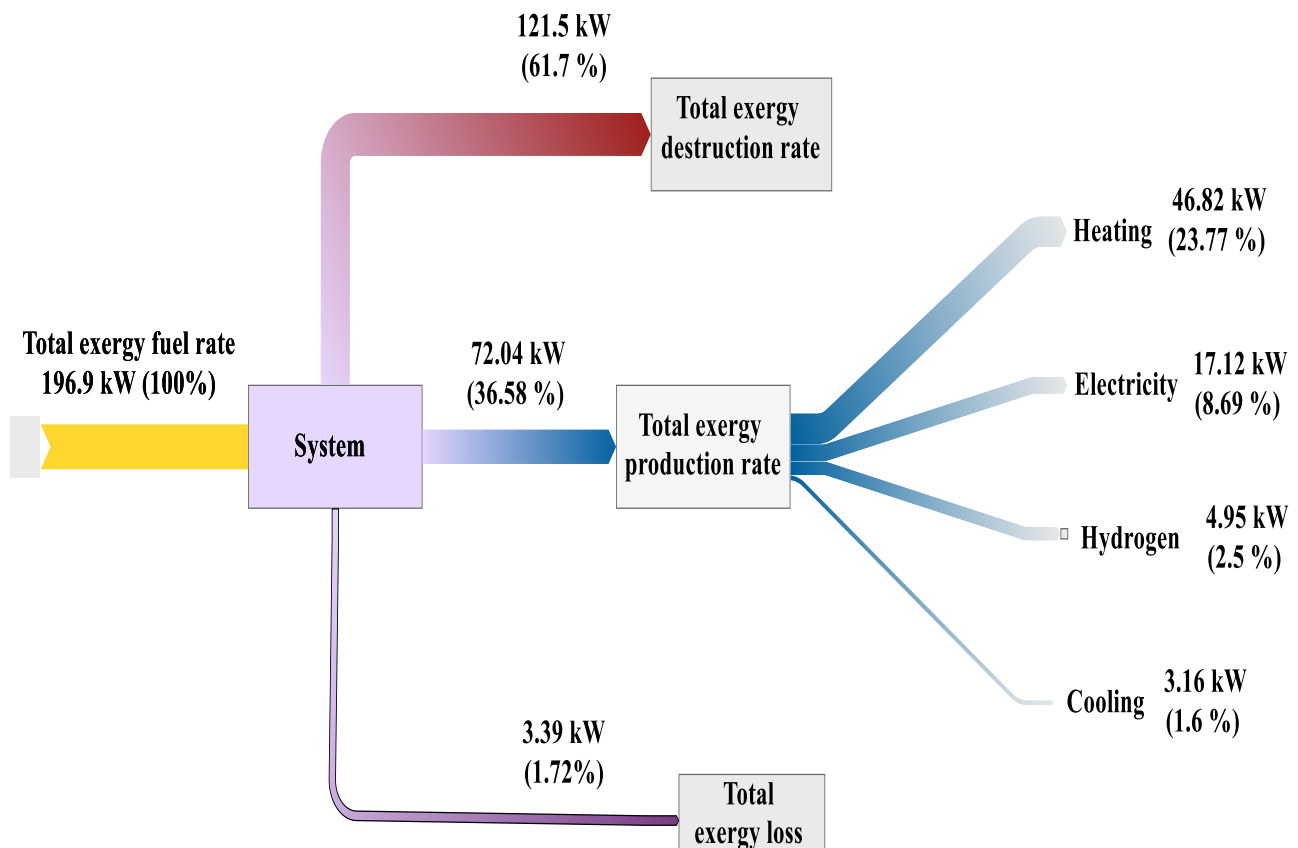
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جاذب به دلیل انجام فرآیند تبادل حرارت و جذب آمونیاک بیشترین مقدار تخریب انرژی را به خود اختصاص داده است. پس از جاذب، ژنراتور بخار بیشترین میزان تخریب انرژی را داراست که دلیل اصلی آن، وقوع فرآیند تبادل حرارت در دماهای بالا است.

۵-۴- نتایج حاصل از مطالعه پارامتری سیستم پیشنهادی

۵-۴-۱- تأثیر آهنگ جرمی منبع حرارتی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

شکل (۴) تأثیر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی را بر توان خالص تولیدی، ظرفیت سرمایه‌گذاری تولیدی، ظرفیت گرمایش تولیدی، آهنگ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و آهنگ کل تخریب انرژی نشان می‌دهد. در شکل (۴-الف)، اثر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی بر آهنگ محصولات تولیدی شامل ظرفیت سرمایه‌گذاری، ظرفیت گرمایش، توان خالص خروجی و آهنگ تولید هیدروژن در بازه ۰/۱ تا ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه بررسی شده است.

به‌منظور نشان دادن موازنه جریان‌های انرژی، نمودار گراسمان (۱) برای سیستم ارائه شده مطابق شکل (۳) رسم شده است. مطابق شکل، کل آهنگ انرژی سوخت ورودی برابر با 196.9 kW می‌باشد، که از این مقدار انرژی سوخت ورودی به سیستم، حدود 121.5 kW (۶۱٪) مربوط به آهنگ انرژی تخریب شده توسط اجزای سیستم می‌باشد. همچنین حدود 72.04 kW (۳۶٪) تبدیل به بار گرمایشی، توان الکتریکی، هیدروژن و بار سرمایه‌گذاری تولیدی شده است که به ترتیب، سهم هر یک برابر با 46.82 kW (۲۳٪)، 17.12 kW (۸٪)، 4.95 kW (۲٪) و 3.16 kW (۱٪) است. از کل سوخت ورودی می‌باشد و در نهایت، 3.39 kW (۱٪) از طریق جریان خروجی جاذب و پسماند واحد تولید هیدروژن به هدر رفته است. ارزیابی جامع عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در جدول (۸) گردآوری شده است. در این جدول مقادیر آهنگ انرژی سوخت، آهنگ انرژی تخریب و آهنگ انرژی محصولات هر یک از اجزای سیستم، به همراه سهم هر کدام از اجزای سیستم از سوخت ورودی ارائه شده است.



شکل ۳ نمودار موازنه جریان‌های انرژی سیستم پیشنهادی

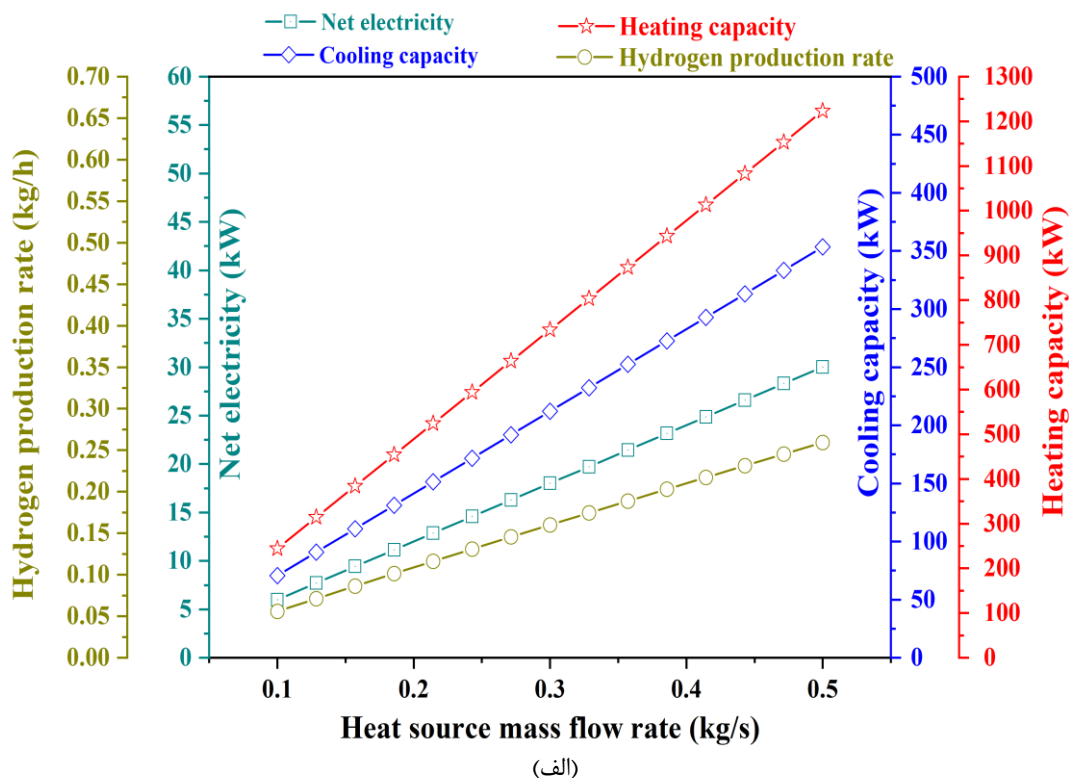
جدول ۸ مقادیر آهنگ انرژی ورودی، تولیدی و تخریب اجزای سیستم ترکیبی

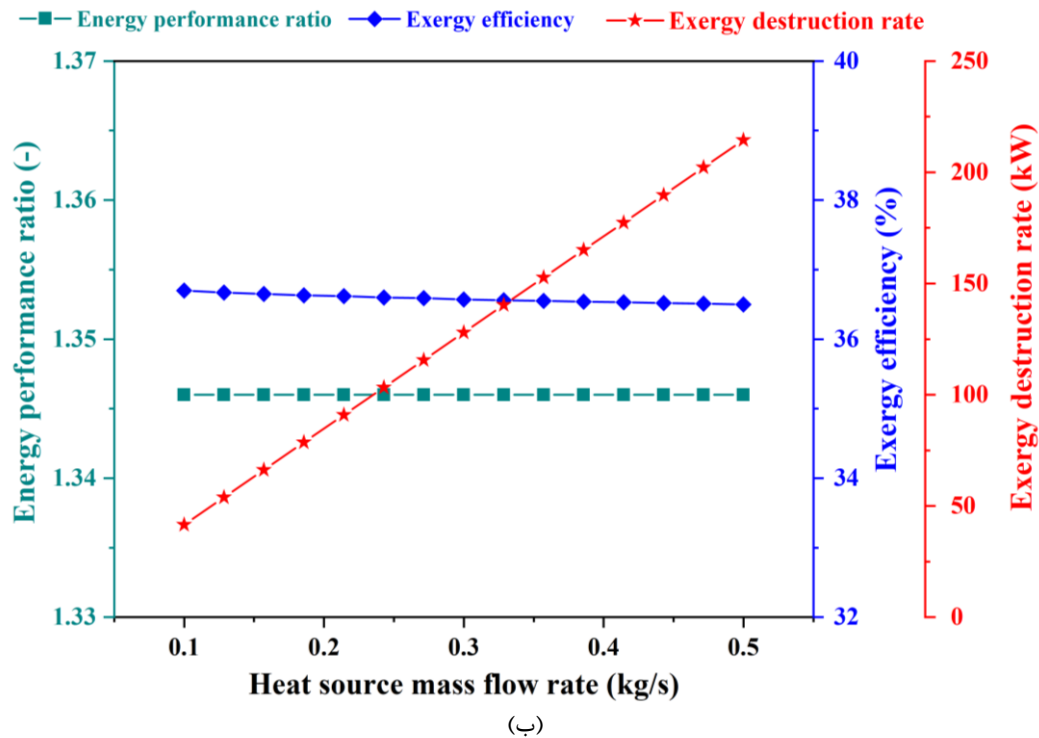
اجزای سیکل	$\dot{E}x_D$ (kw)	$\dot{E}x_P$ (kw)	$\dot{E}x_F$ (kw)	η_{ex} (%)	y_D (%)
ژنراتور بخار	۱۳۱/۹۰	۶۵/۰۷	۱۹۶/۹۰	۶۶/۹۹	۳۳/۰۵
توربین	۳۶/۷۴	۵/۳۹	۴۲/۱۲	۸۷/۲۳	۲/۷۴
مبذل	۱۹/۵۲	۱۱/۹۹	۳۱/۵۱	۶۱/۹۵	۶/۰۹
حرارتی محلول	۱/۰۸	۰/۱۷	۱/۲۵	۸۶/۱۶	۰/۰۹
پمپ	۵/۶۹	۰/۴۵	۶/۱۵	۹۲/۶۰	۰/۲۳
شیر فشارشکن (۲)	۱/۳۶	۷۰/۶۷	۷۲/۰۳	۱/۸۹	۳۵/۸۹
جاذب	۴۶/۸۲	۱/۲۷	۴۸/۰۹	۹۷/۳۵	۰/۶۵
چگالنده	۳/۱۶	۵/۴۰	۸/۵۵	۳۶/۹۲	۲/۷۴
تبخیرکننده	۹/۴۶	۱/۵۶	۱۱/۰۲	۸۵/۸۲	۰/۷۹
کمپرسور	۵۵/۳۹	۰/۳۳	۵۵/۷۲	۹۹/۴۱	۰/۱۷
شیر فشارشکن (۱)	۹/۴۹	۱/۱۹	۱۰/۶۹	۸۸/۸۱	۰/۶۱
الکترولایزر	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۵۰/۶۹	۰/۰۰
گرم کن	۰/۲	۴/۳۵	۴/۵۵	۴/۳۱	۲/۲۱
جداکننده اکسیژن	۷۲/۰۴	۱۲۱/۵	۱۹۶/۹	۳۶/۵۸	۶۱/۷
کل					

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی، ظرفیت تولید سرما، ظرفیت تولید گرما و همچنین توان خالص تولیدی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع، افزایش دبی جرمی در چرخه تبرید تراکمی و نیز افزایش دبی جرمی در چرخه توان جذبی است.

ظرفیت هیدروژن تولیدی نیز رابطه مستقیم با توان تولیدی دارد و با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی از ۰/۰۵۶ kg/h به ۰/۲۵۹ kg/h افزایش یافته است.

شکل (۴-ب)، تأثیر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولیدچندگانه، بازده انرژی کل و آهنگ تخریب انرژی نشان می‌دهد. نسبت عملکرد انرژی سیستم، مطابق رابطه، به میزان محصولات تولیدی و انرژی ورودی به سیستم وابسته است که با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی هر دو پارامتر به‌طور هم‌زمان افزایش یافته و بنابراین، نسبت عملکرد انرژی سیستم تقریباً ثابت باقی مانده است. بازده انرژی نیز به آهنگ انرژی محصولات و میزان آهنگ انرژی سوخت ورودی بستگی دارد که با افزایش دبی جرمی منبع حرارتی هر دو به یک میزان افزایش داشته و بنابراین، بازده انرژی تقریباً ثابت باقی مانده است. در نهایت، آهنگ تخریب انرژی کل به دلیل افزایش تخریب انرژی اجزای سیستم به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است.





شکل ۴ تأثیر افزایش دبی جرمی منبع حرارتی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

تأمین می‌شود که با کاهش توان تولیدی آن میزان هیدروژن نیز کاهش می‌یابد. با افزایش فشار خروجی توربین، دمای خروجی آن نیز افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث افزایش دمای کاری چگالنده می‌شود و همچنین به دلیل کاهش دبی چرخه تبرید تراکمی، دبی عبوری از چگالنده کاهش می‌یابد و در نتیجه، ظرفیت گرمایش تولیدی سیستم نیز کاهش می‌یابد.

شکل (۵-ب)، تأثیر افزایش دمای خروجی جاذب را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولیدچگالنده، بازده انرژی کل و آهنگ تخریب انرژی نشان می‌دهد. نسبت عملکرد انرژی سیستم، مطابق رابطه، به میزان محصولات تولیدی و انرژی ورودی به سیستم وابسته است که با افزایش دمای جاذب میزان محصولات تولیدی سیستم کاهش می‌یابد، در حالی که انرژی ورودی ثابت است، که باعث کاهش قابل توجه نسبت عملکرد انرژی می‌شود.

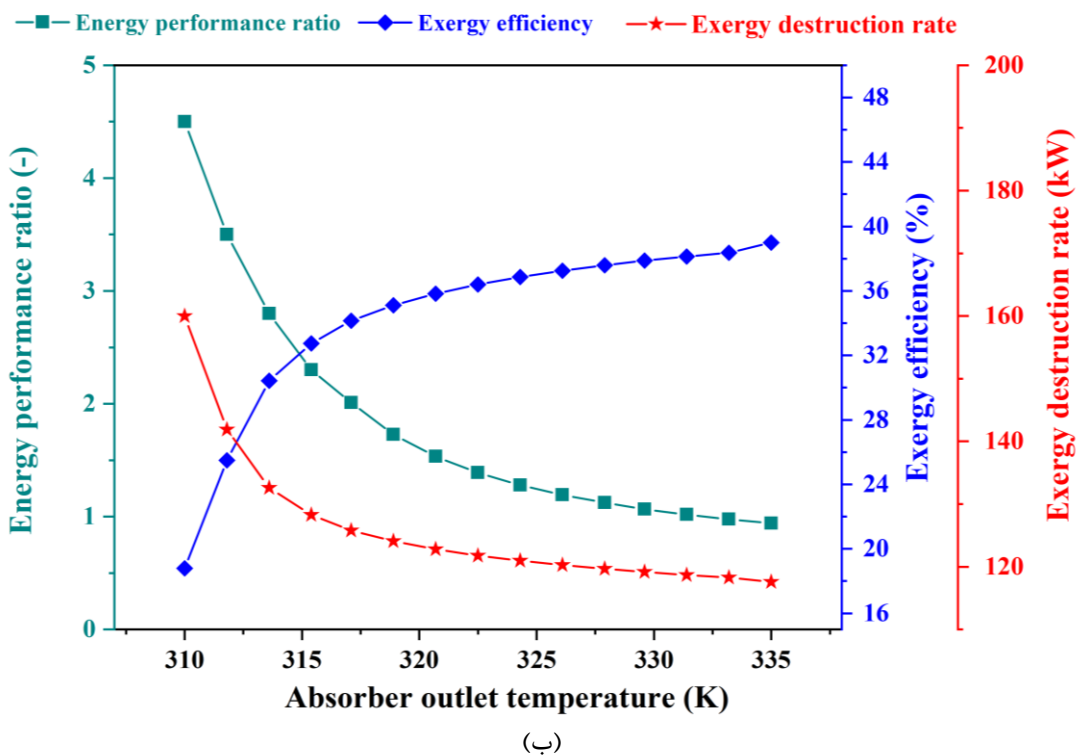
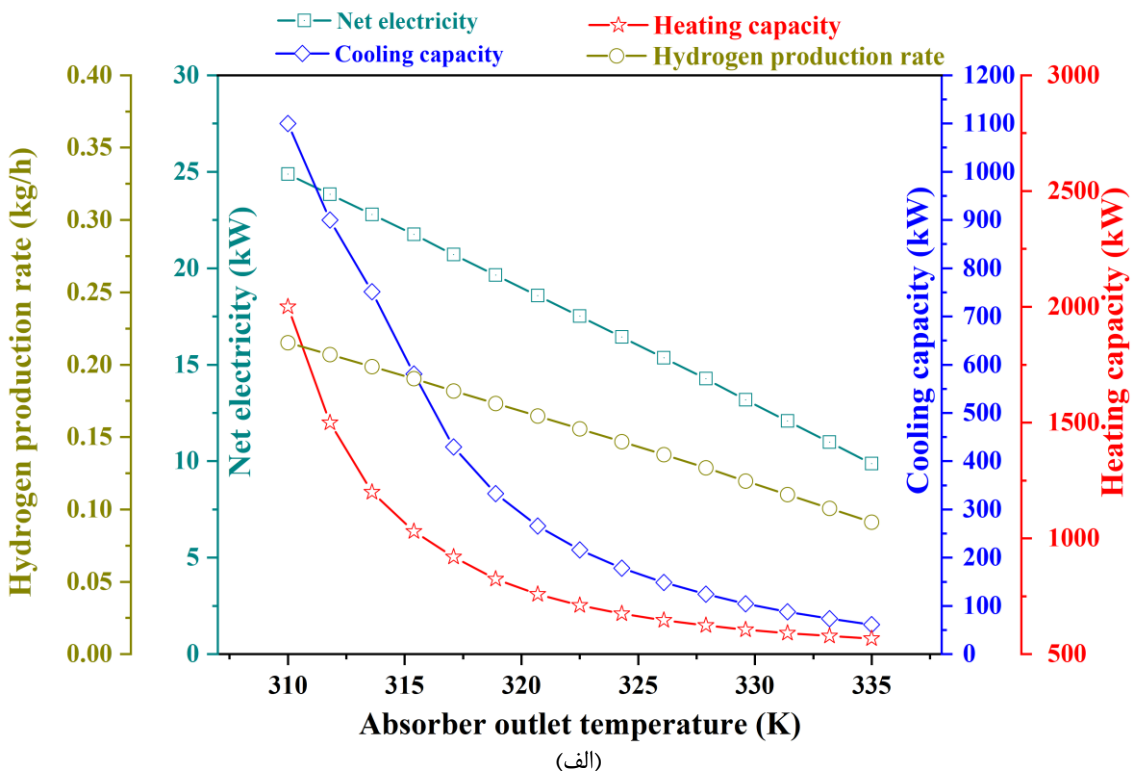
همان‌طور که اشاره شد، افزایش فشار خروجی توربین باعث افزایش دمای کاری چگالنده و در نتیجه، افزایش کیفیت و انرژی جریان عبوری آن شده، بنابراین افزایش آهنگ انرژی تولیدی چگالنده بر کاهش انرژی خروجی سایر محصولات غالب بوده و با افزایش کاری جاذب، بازده انرژی افزایش می‌یابد. در نهایت، آهنگ تخریب انرژی کل به دلیل کاهش تخریب انرژی اجزای سیستم نیز کاهش می‌یابد.

۵-۴-۲- تأثیر افزایش دمای کاری جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

شکل (۵) تأثیر افزایش دمای کاری جاذب را بر توان خالص تولیدی، ظرفیت سرمایش تولیدی، ظرفیت گرمایش تولیدی، آهنگ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و آهنگ کل تخریب انرژی نشان می‌دهد.

در شکل (۵-الف)، اثر دمای خروجی جاذب بر آهنگ محصولات تولیدی شامل ظرفیت سرمایش، ظرفیت گرمایش، ظرفیت تولید هیدروژن و توان خالص خروجی در بازه دمایی ۳۰۵ تا ۳۳۵ کلوین بررسی شده است.

افزایش دمای کاری جاذب موجب افزایش فشار پایینی سیستم می‌شود، که در نتیجه فشار و آنتالپی خروجی توربین افزایش یافته و اختلاف آنتالپی در دو سر توربین کاهش می‌یابد. بنابراین، توان الکتریکی تولیدی توربین کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه توان مصرفی کمپرسور با نسبت مشخصی از توان توربین تعریف شده است، کاهش توان تولیدی توربین باعث کاهش توان مصرفی کمپرسور و کاهش دبی جرمی عبوری از تبخیرکننده می‌شود، که نهایتاً منجر به کاهش ظرفیت سرمایش تولیدی می‌گردد. از طرفی، توان مورد نیاز برای واحد تولید هیدروژن به‌طور مستقیم از توربین چرخه توان جذبی



شکل ۵ تأثیر افزایش دمای کاری جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

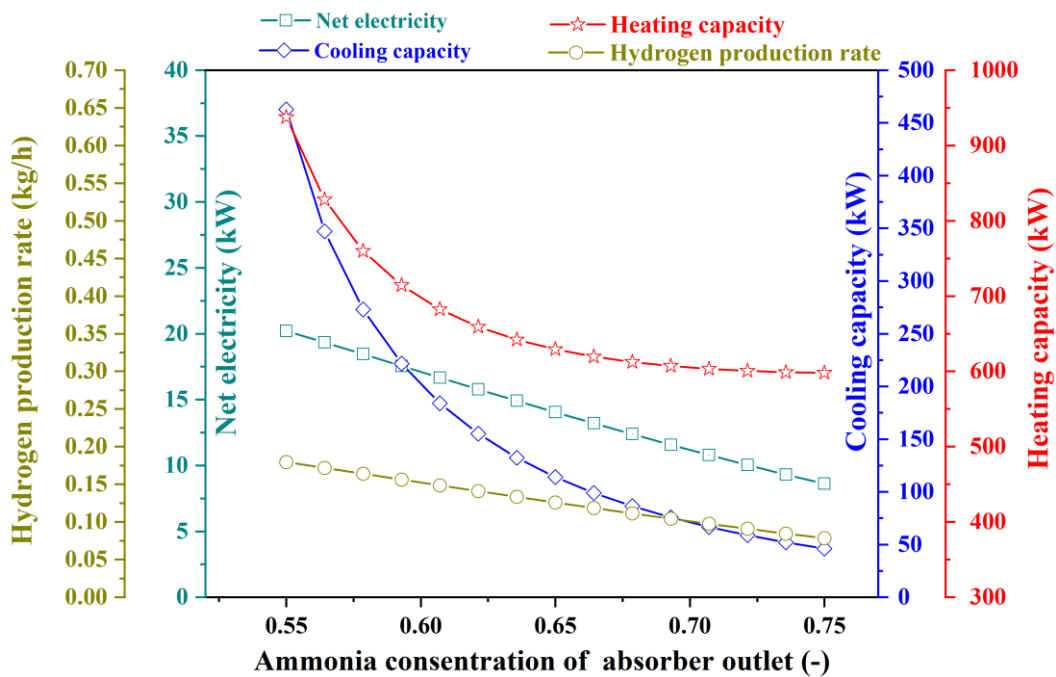
تولیدی، ظرفیت سرمایش و گرمایش، نرخ تولید هیدروژن، نسبت عملکرد انرژی، بازده انرژی و میزان کل تخریب انرژی. همانطور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب در بازه ۰/۷۵ تا ۰/۸۵، فشار پایینی سیستم افزایش می‌یابد. این افزایش فشار، فشار و آنتالپی

۵-۴-۳- تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

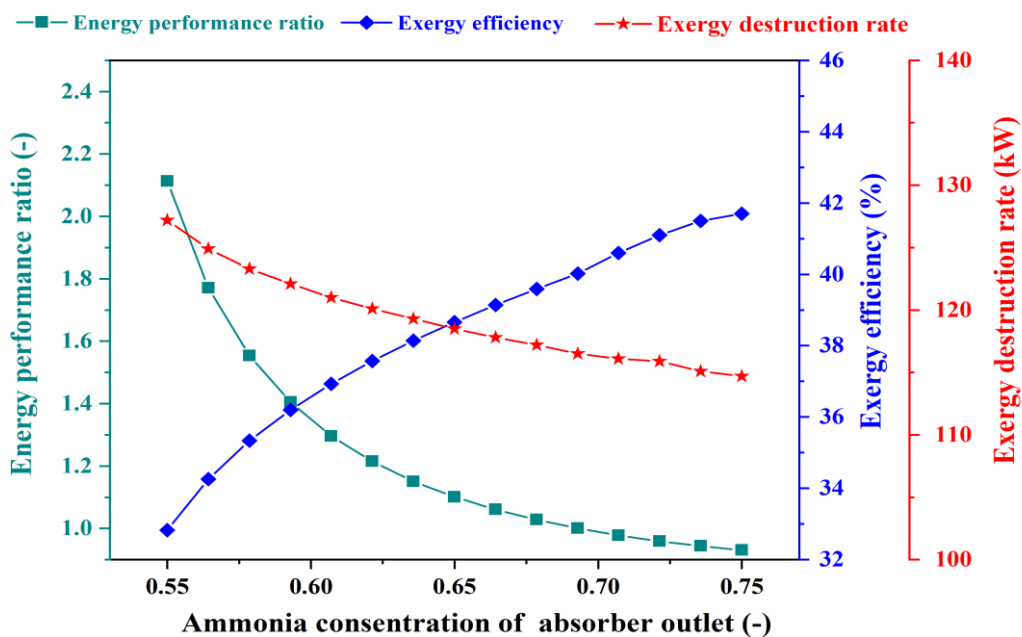
شکل (۶) تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب بر عملکرد سیستم را از جنبه‌های مختلف نشان می‌دهد؛ شامل توان خالص

افزون بر این، افزایش فشار خروجی توربوصصین باعث افزایش دمای خروجی آن شده و در پی آن، دمای کاری چگالنده نیز افزایش می‌یابد. همزمان، کاهش دبی چرخه تبرید تراکمی موجب کاهش دبی عبوری از چگالنده می‌شود و در نتیجه ظرفیت گرمایش تولیدی سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین، تغییر غلظت آمونیاک خروجی جاذب اثرات متعددی بر عملکرد کل سیستم دارد که هم شامل توان و سرمایش و گرمایش و هم شامل تولید هیدروژن و بازده انرژی می‌شود.

خروجی توربین را بالا می‌برد و اختلاف آنتالپی در دو سر توربین کاهش می‌یابد، که در نهایت منجر به کاهش توان الکتریکی تولیدی توربین می‌شود. با توجه به اینکه توان مصرفی کمپرسور بر اساس نسبت مشخصی از توان توربین تعیین می‌شود، کاهش توان توربین باعث کاهش توان مصرفی کمپرسور و کاهش دبی جرمی عبوری از تبخیرکننده می‌شود؛ نتیجه آن کاهش ظرفیت سرمایش تولیدی سیستم است. همچنین، واحد تولید هیدروژن که مستقیماً به توان توربین وابسته است، با کاهش توان توربین، کاهش تولید هیدروژن را تجربه می‌کند.



(الف)



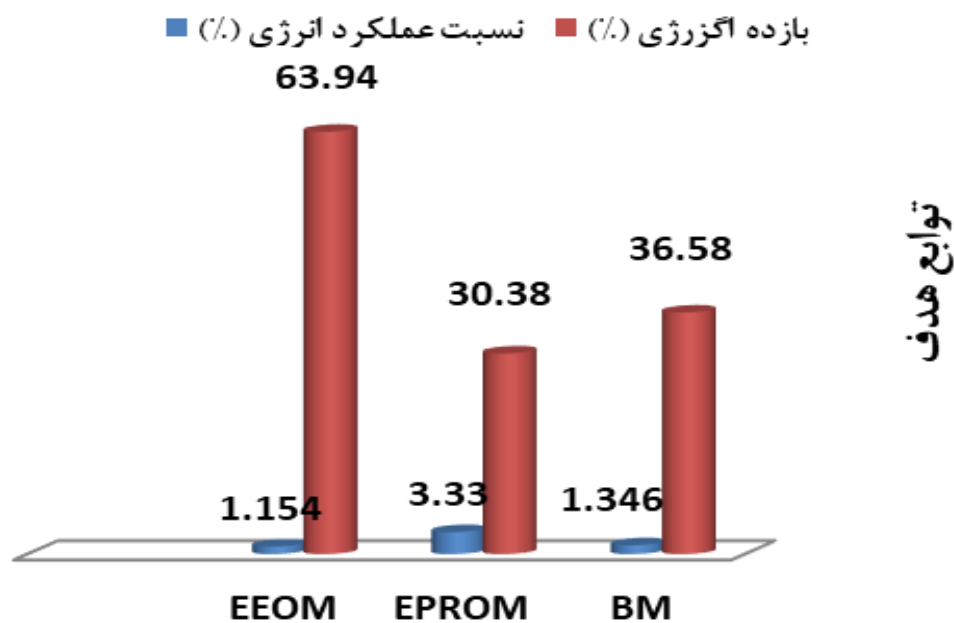
(ب)

شکل ۶ تأثیر افزایش غلظت آمونیاک جاذب بر پارامترهای عملکردی سیستم پیشنهادی

۵-۵- نتایج بهینه‌سازی سیستم

در این بخش از پژوهش، به‌منظور بهبود عملکرد سیستم تولیدچندگانه پیشنهادی از دیدگاه انرژی و انرژی، بهینه‌سازی تک‌هدفه بر اساس متغیرهای تصمیم و توابع هدف، انجام شده است. به‌این‌منظور، دو حالت مطالعاتی تک‌هدفه شامل بهینه‌سازی نسبت عملکرد انرژی (EPROM)^۱ و بهینه‌سازی بازده انرژی (EEOM)^۲ انجام و با حالت پایه (BM) مقایسه شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشانگر عملکرد مطلوب بهینه‌سازی بوده، به‌گونه‌ای که در بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت عملکرد انرژی از ۱/۳۴۶ در حالت پایه به ۳/۳۳ در حالت بهینه افزایش یافته و در بهینه‌سازی مبتنی بر بازده انرژی این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا می‌یابد (شکل (۷) و جدول (۹)).

شکل (۶) ب)، تأثیر افزایش غلظت آمونیاک خروجی جاذب را بر روی نسبت عملکرد انرژی سیستم تولیدچندگانه، بازده انرژی کل و آهنگ تخریب انرژی نشان می‌دهد. با افزایش غلظت آمونیاک، میزان محصولات تولیدی سیستم کاهش می‌یابد در حالی که انرژی ورودی ثابت باقی می‌ماند؛ این موضوع منجر به کاهش قابل‌توجه نسبت عملکرد انرژی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، افزایش فشار خروجی توربین باعث افزایش دمای کاری چگالنده و در نتیجه بهبود کیفیت و انرژی جریان عبوری از آن می‌شود. بنابراین، افزایش آهنگ انرژی تولیدی چگالنده اثر غالبی بر کاهش آهنگ انرژی سایر محصولات دارد و در نتیجه با افزایش غلظت آمونیاک، بازده انرژی سیستم افزایش می‌یابد. در نهایت، آهنگ کل تخریب انرژی نیز به دلیل کاهش تخریب انرژی اجزای سیستم کاهش می‌یابد.



شکل ۷ نتایج حاصل از بهینه‌سازی و مقایسه آن با حالت پایه

جدول ۹ نتایج حاصل از بهینه‌سازی

EEOM	EPROM	BM	متغیرهای تصمیم و پارامترهای عملکردی سیستم
۰	۱	۰	ضریب وزنی، W_1
۱	۰	۰	ضریب وزنی، W_2
۴۴۱/۴	۴۳۵/۲	۴۲۳/۱۵	$T_{in,HS}$ (K)
۰/۱۰۲	۰/۱	۰/۲۸۵	\dot{m}_{HS} (kg/s)
۱۰/۲۸	۱۱/۲	۱۰	$\Delta T_{hot,SH}$ (K)

² Exergy Efficiency Optimal Mode

¹ Energy Performance Ratio | Optimal Mode

۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۶	$X_{ammonia}$ (-)
۳۲۵/۷	۳۲۵	۳۲۳/۱۵	$T_{absorber}$ (K)
۱۵/۹۶	۲۵	۲۰	$P_{in,Tur}$ (bar)
۲۸۹/۳	۲۹۰	۲۸۶	T_{Eva} (-)
۲/۴۴	۵/۴۰	۱۱/۰۲	\dot{W}_{Com} (kW)
۰/۱۹۷	۰/۷۷	۱/۲۵	\dot{W}_{Pu} (kW)
۱/۶۳	۳/۶	۷/۳۵	\dot{W}_{PEM} (kW)
۸/۱۴	۱۷/۹۹	۳۶/۷۴	\dot{W}_{Tur} (kW)
۳/۸۷	۸/۲۵	۱۷/۱۲	\dot{W}_{net} (kW)
۵۰/۲۲	۳۰۳/۴	۲۰۱/۵	$\dot{Q}_{Cooling}$ (kW)
۲۳۳/۱	۴۶۵/۴	۶۹۷/۱	$Q_{Heating}$ (kW)
۰/۰۳۶	۰/۰۷۷	۰/۱۵۳	\dot{m}_{H_2} (m^3/h)
۲۵۰	۲۳۴/۰۴	۶۸۳/۹	\dot{Q}_{Total} (kW)
۷۷/۸	۱۴۵/۱	۱۹۶/۹	$\dot{E}x_{F,total}$ (kW)
۲۵/۴۸	۹۶/۸۱	۱۲۱/۵	$\dot{E}x_{D,total}$ (kW)
۴۹/۷۴	۴۴/۴	۷۲/۰۴	$\dot{E}x_{P,total}$ (kW)
۲/۵۷	۳/۵۸	۳/۳۸	$\dot{E}x_{L,total}$ (kW)

۶- بحث و نتیجه گیری

در حالت پایه، مقدار کل آهنگ انرژی سوخت ورودی از طریق منابع دما پایین برابر با ۱۹۶/۹ kW می باشد، که از این مقدار انرژی ۱۲۱/۵ kW (۶۱٪/۷) از طریق اجزای سیستم تخریب شده و از بین می رود، همچنین ظرفیت ۳/۳۹ kW (۱٪/۷۲) از طریق آب خنک کن جاذب و پسماند واحد تولید هیدروژن بدون استفاده باقی مانده هدر می رود و حدود ۷۲/۰۴ (۳۶٪/۵۸) مربوط به آهنگ انرژی محصولات تولیدی می باشد.

- سهم کل بار گرمایشی، توان الکتریکی، هیدروژن و بار سرمایشی تولیدی از کل آهنگ انرژی ورودی به ترتیب، برابر با ۴۶/۸۲ kW (۲۳٪/۷۷)، ۱۷/۱۲ kW (۸٪/۶۹)، ۴/۹۵ kW (۲٪/۵) و ۳/۱۶ kW (۱٪/۶) می باشد.

- با افزایش مقدار دبی جرمی ورودی منبع حرارتی، نرخ تولیدات و آهنگ تخریب انرژی افزایش یافته است، در حالی که، عملکرد انرژی و بازده انرژی به دلیل افزایش مصرف انرژی به میزان اندکی کاهش یافته اند.

- در مقادیر پایین غلظت آمونیاک خروجی جاذب، سیستم دارای نرخ تولیدات بالا همراه با نسبت عملکرد انرژی بالا می باشد

در این پژوهش، یک سیستم ترمودینامیکی جدید با قابلیت تولید محصولات متنوع از منابع حرارتی با دمای پایین ارائه شده است. برای این سیستم، تحلیل های دقیق انرژی و انرژی انجام گرفته و نمودار گراسمان، که نتایج کلی حاصل از تحلیل انرژی را نشان می دهد، ترسیم شده است. همچنین، به منظور دستیابی به حالت بهینه عملکرد سیستم پیشنهادی، بهینه سازی تک هدفه بر اساس الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در ادامه، برای بررسی رفتار پارامترهای عملکردی سیستم در اثر تغییر شرایط طراحی، مطالعه پارامتری انجام شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده از تحلیل سیستم پیشنهادی عبارتند از:

- در حالت پایه، وقتی که سیستم تحت شرایط طراحی اولیه کار می کند، توانایی تولید ۱۷/۱۲ kW توان خالص الکتریکی و ۲۰۱/۵ kW، ۶۹۷/۱ kW و ۰/۱۵۳ m^3/h به ترتیب، ظرفیت سرمایش، گرمایش و هیدروژن خالص از ۶۸۳/۹ kW انرژی ورودی را دارد. به طوری که نسبت بهره وری انرژی و بازده انرژی به ترتیب، ۱/۳۴۶ و ۳۶/۵۸٪ به دست آمده است.

- and desalination." *International Journal of Thermofluids* 25 (2025): 101046.
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101046>
- [5] Shahad, Haroun AK, Abdulkhodor Kathum Nassir, and Ali M. Tukkee. "Experimental and theoretical analysis for the enhancement of Kalina cycle by the addition of heat exchangers." *Applied Thermal Engineering* (2025): 127701.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127701>
- [6] Dubey, Rakesh, et al. "Thermodynamic performance evaluation of low-GWP working fluids combined with polymeric material in advanced organic rankine cycle configurations." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 3045. No. 1. IOP Publishing, 2025.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/3045/1/012011>
- [7] R. K. Jurgen, "The promise of the Kalina cycle: Using an ammonia-water mixture, the Kalina steam cycle may permit thermal-mechanical-electrical energy conversion efficiencies of 45 percent," *IEEE Spectrum*, vol. 23, pp. 68–70, 1986,
<https://doi.org/10.1109/MSPEC.1986.6370873>.
- [8] B. F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, and G. Papadakis, "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3963–3979, 2011,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>.
- [9] B. F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, and A. Frangoudakis, "Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 2468–2476, 2009,
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>.
- [10] E. Thorin, "Power cycles with ammonia-water mixtures as working fluid," *Kemiteknik*, 2000.
- [11] A. Elsayed, M. Embaye, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, and A. Rezk, "Thermodynamic performance of Kalina cycle system 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 8, pp. i69–i78, 2013,
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt020>.
- [12] G. Demirkaya, R. Vasquez Padilla, A. Fontalvo, M. Lake, and Y. Y. Lim, "Thermal and exergetic analysis of the Goswami cycle integrated with mid-grade heat sources," *Entropy*, vol. 19, p. 416, 2017,
<https://doi.org/10.3390/e19080416>.
- [13] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Exergo-environmental analysis of an integrated organic Rankine cycle for trigeneration," *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 447–453, 2012,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.001>.
- که با افزایش غلظت میزان مقادیر فوق کاهش، اما عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم بهبود می‌یابد به‌طوری‌که بازده انرژی افزایش و آهنگ تخریب انرژی کاهش می‌یابد.
- در بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد انرژی، نسبت عملکرد انرژی از ۱/۳۴۶ در حالت پایه به ۳/۳۳ در حالت بهینه افزایش یافته و در بهینه‌سازی مبتنی بر بازده انرژی این مقدار از ۳۶/۵۸ درصد در حالت پایه به ۶۳/۹۴ درصد در حالت بهینه ارتقا می‌یابد که نشانگر عملکرد مطلوب بهینه‌سازی می‌باشد.
- به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که انرژی ورودی به شکل بهینه میان محصولات مختلف توزیع می‌شود؛ با این حال، بخشی از انرژی در اجزای سیستم تخریب شده و بخشی دیگر بدون استفاده باقی می‌ماند و تنها قسمتی به صورت انرژی مفید استخراج می‌گردد. تغییر پارامترهای عملیاتی مانند دبی جرمی و غلظت آمونیاک بر تعادل میان نرخ تولیدات و کارایی سیستم اثرگذار است؛ به طوری‌که افزایش دبی ورودی موجب افزایش تولید انرژی می‌شود، اما اندکی از بازده نسبی کاسته می‌شود. در مقابل، تنظیم غلظت آمونیاک می‌تواند بازده انرژی را بهبود بخشد. همچنین، بهینه‌سازی سیستم منجر به افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب انرژی شده و عملکرد کلی سیستم را به شرایط ایده‌آل ترمودینامیکی نزدیک‌تر می‌سازد.

۷- مراجع

- [1] A. Soroureddin, A. Mehr, 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. 125–137, Jan. 2013,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.015>.
- [2] V. Zare, S. Mahmoudi, and M. Yari, "On the exergoeconomic assessment of employing Kalina cycle for GT-MHR waste heat utilization," *Energy Conversion and Management*, vol. 90, pp. 364–374, Jan. 2015,
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.039>.
- [3] M. Feili, H. Rostamzadeh, and H. Ghaebi, "A new high-efficient cooling/power cogeneration system based on a double-flash geothermal power plant and a novel zeotropic bi-evaporator ejector refrigeration cycle," *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 2126–2152, Jan. 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.011>.
- [4] Chandio, Mohammad Waqas, et al. "Thermodynamic, economic, and environmental evaluation of internal combustion engine exhaust gas-driven Organic Rankine cycles for power generation

- [22] L. Khani, A. S. Mehr, M. Yari, and S. S. Mahmoudi, "Multi-objective optimization of an indirectly integrated solid oxide fuel cell-gas turbine cogeneration system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 21470–21488, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.023>.
- [23] R. Z. Farahani, N. Asgari, and H. Davarzani, *Supply Chain and Logistics in National, International and Governmental Environment: Concepts and Models*, Springer Science & Business Media, 2009, <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2156-7>.
- [24] H. Ghaebi, B. Farhang, H. Rostamzadeh, and T. Parikhani, "Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of using city gate station (CGS) heater waste for power and hydrogen production: A comparative study," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 1855–1874, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.093>.
- [25] N. Garcia-Hernando, M. De Vega, A. Soria-Verdugo, and S. Sanchez-Delgado, "Energy and exergy analysis of an absorption power cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 55, pp. 69–77, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.044>.
- [26] H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, "A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis," *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 513–527, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.082>.
- [27] M. Feili, H. Rostamzadeh, T. Parikhani, and H. Ghaebi, "Hydrogen extraction from a new integrated trigeneration system working with zeotropic mixture, using waste heat of a marine diesel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 21969–21994, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.208>.
- [28] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2010.
- [29] 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://doi.org/10.1081/GE-120027881>.
- [30] S. H. Mannaerts, "Extensive quantities in thermodynamics," *European Journal of Physics*, vol. 35, no. 3, p. 035017, 2014, <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/3/035017>.
- [31] M. Feili, H. Ghaebi, T. Parikhani, and H. Rostamzadeh, "Exergoeconomic analysis and optimization of a new combined power and
- [14] A. Baghernejad and M. Yaghoubi, "Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2193–2203, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>.
- [15] Y. Khan, R. S. Mishra, and A. P. Singh, "Performance comparison of organic Rankine cycles integrated with solar based combined cycle: A thermodynamic and exergoenvironmental analysis," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 1, pp. 233–248, 2024, <https://doi.org/10.1177/09544062231167069>.
- [16] N. Shokati, F. Ranjbar, and M. Yari, "A comparative analysis of rankine and absorption power cycles from exergoeconomic viewpoint," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 657–668, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.015>.
- [17] H. Ghaebi, M. Saidi, and P. Ahmadi, "Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm," *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, pp. 113–125, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.069>.
- [18] H. You, Y. Xiao, J. Han, A. Lysyakof, and D. Chen, "Thermodynamic, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses and optimization of a solid oxide fuel cell-based trigeneration system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 66, pp. 25918–25938, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.183>.
- [19] M. Rashidi, A. Aghagoli, and R. Raoofi, "Thermodynamic analysis of the ejector refrigeration cycle using the artificial neural network," *Energy*, vol. 129, pp. 201–215, 2017, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.089>.
- [20] M. Kheimi, S. K. Salamah, and H. A. Maddah, "Thermal design and zeotropic working fluids mixture selection optimization for a solar waste heat driven combined cooling and power system," *Chemosphere*, vol. 335, p. 139036, 2023, <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.139036>.
- [21] S. Zandi, K. G. Mofrad, A. Moradifaraj, and G. R. Salehi, "Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of a CPC driven solar combined cooling and power cycle with different working fluids," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 24, pp. 151–170, 2021, <https://doi.org/10.5541/ijot.873456>.

Progress, vol. 18, p. 100513, 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100513>

freshwater system driven by waste heat of a marine diesel engine," Thermal Science and Engineering