



تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی

زمین گرمایی برای تولید آب گرم، سرمایش، توان و هیدروژن مایع

علی عیوضی^{۱*}، مهران عامری^۲، محمد شفيعی دهج^۳، هادی غائبی^۴

- ۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.
 ۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
 ۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.
 ۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

کلمات کلیدی

انرژی زمین گرمایی، چرخه مایع سازی هیدروژن کلود، سیستم تولید چند گانه، بهینه سازی، چرخه رانکین آلی اصلاح شده.

چکیده

در این مطالعه یک سیستم تولید چندانگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین گرمایی مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم شامل یک چرخه رانکین آلی اصلاح شده، یک چیلر جذبی تک اثره و یک چرخه مایع سازی هیدروژن است که توان، حرارت، سرما و هیدروژن مایع را تولید می کند. در سیستم پیشنهادی با به کارگیری انرژی زمین گرمایی به عنوان منبع تأمین انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید هیدروژن مایع باعث می شود که آلاینده‌گی زیست محیطی به کمترین مقدار خود برسد. گاز هیدروژن تولید شده با الکترولایزر در سیستم پیشنهادی توسط ترنسفورمر گرمای جذبی بیش سرمایش شده و توان مصرفی چرخه مایع سازی هیدروژن کاهش . در مطالعه حاضر تأثیر تغییرات پارامترهای عملکردی مهم روی کارکرد سیستم ارزیابی شده است. به علاوه عملکرد بهینه سیستم با استفاده از الگوریتم دو هدفه ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از معیار تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه بهینه سیستم به دست می آید. تحلیل ترمودینامیکی کاملی در مطالعه حاضر صورت می گیرد و نتایج حاصل نشان می دهد که بازده انرژی ۴۲ درصد و بازده انرژی ۵۱ درصد برای سیستم پیشنهادی به دست می آید. ارزیابی اقتصادی صورت گرفته در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به روز نشان می دهد که هزینه کل سیستم تولید چندانگانه ۳۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول بدست می آید که توجیه اقتصادی بالای سیستم پیشنهادی را بیان می کند.

مقدمه

گسترش بسیاری از آلودگی‌های زیست محیطی می شود [۲]. با استفاده از فناوری سوخت‌های پاک از منابع تجدیدپذیر می توان این مشکلات را حل کرد. هیدروژن به عنوان جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی در بلند مدت قادر به تأمین پایدار منابع انرژی بوده و سازگاری بالایی با معیارهای زیست محیطی دارد [۳]. هیدروژن فراوان‌ترین عنصر جهان و دهمین عنصر فراوان در پوسته زمین می باشد. هیدروژن به عنوان سبک‌ترین عنصر شناخته شده در مقایسه با سایر سوخت‌ها بیشترین میزان انرژی را در واحد وزن دارد. هیدروژن یکی از عناصر اصلی تشکیل دهنده زمین بوده و نقش مهمی در زندگی دارد. امروزه از هیدروژن به عنوان خوراک در صنایع گوناگون استفاده می شود [۴].

انرژی نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، تدارک و تأمین وسایل رفاه و آسایش زندگی بشری است. بنابر اعتقاد برخی از صاحب‌نظران بحران انرژی دیگری در شرف گسترش است. این بحران نه تنها مربوط به تأمین انرژی بلکه شامل ترکیب پیچیده‌ای از مشکلات زیست محیطی خواهد بود که علاوه بر اثرگذاری بر کیفیت زندگی اجتماعی مدرن امروز، توسعه اقتصادی جهان را دچار مخاطره خواهد کرد. افزایش بهره‌وری انرژی مزایای زیادی برای انسان به همراه داشته است. سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی و انعطاف‌پذیری سوخت منجر به توجه بیشتر به دستیابی به انرژی پایدار شده است [۱]. منابع انرژی فسیلی اثرات منفی زیادی از جمله افزایش دمای زمین، اثرات گلخانه‌ای و وارونگی دما بر محیط زیست داشته‌اند و باعث تخریب لایه اوزون و

به ۱۱/۱۹ درصد و ۹۹/۱۳ درصد می‌رسد. تیمز و همکاران [۱۰] به ارزیابی سیستم انرژی با استفاده از پانل‌های فتوولتائیک با ترکیب ذخیره انرژی زیرزمینی پرداختند. سیستم پیشنهادی آن‌ها دارای یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۲۱ مگاوات بر ثانیه و جایگزین‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی بوده و ظرفیت تولید انرژی الکتریکی به میزان ۵۱ گیگاوات ساعت در سال، گرمایش با ۲۳/۸ گیگاوات ساعت در سال و سرمایه‌اش با ۱/۱ گیگاوات ساعت در سال را دارد.

کیخاه و همکاران [۱۱] بهینه‌سازی و ارزیابی کارایی یک سیستم تولید چندگانه بر اساس زمین گرمایی به همراه چرخه‌های رانکین آلی و تبخیر فشار مضاعف با مخلوط‌های زئوتروپیک را انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که توربین بخار بیشترین تخریب انرژی را با ۹۹۱ کیلووات نشان داد، در حالی که شیر انبساط با تخریب انرژی ۱۱۴ کیلووات دنبال می‌شود. علاوه بر این، کندانسورها نقش قابل توجهی در تخریب انرژی داشته‌اند به صورتی که تقریباً ۲۱/۹۸ درصد از کل تخریب انرژی به آن‌ها نسبت داده شده است. علیرحمی و همکاران [۱۲] سیستمی را معرفی کردند که از منابع زمین گرمایی برای تولید هیدروژن و الکتریسیته استفاده می‌کند. آن‌ها دریافتند که تبخیر کننده و اجزای الکترولیز غشای تبادل پروتون بیشترین میزان تخریب انرژی را دارا هستند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها ۴۶۹۶ مگاوات در ساعت برق تولید می‌کند که انرژی مورد نیاز سالانه ۱۶۰ خانواده را فراهم می‌کند. بامیسیل و همکاران [۱۳] با تحلیلی از اهداف چندگانه یک سیستم ترکیبی زمین گرمایی-خورشیدی-بادی را بهینه کردند. آن‌ها مقادیر راندمان انرژی ۴۸/۶۱ درصد و بازده انرژی ۸۸/۳۱ درصد را برای سیستم مورد مطالعه دست یافتند که پس از بهینه‌سازی بازده انرژی و انرژی آن به ترتیب به ۵۱/۷۶ درصد و ۹۵/۰۸ درصد حاصل شد.

کاویان و همکاران [۱۴] یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی/زمین گرمایی را از جنبه انرژی و اقتصادی برای فراهم کردن ظرفیت گرمایشی و سرمایشی سازه‌های مسکونی ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش دادند که یک پنل خورشیدی با مساحت ۳۵ متر مربع، با کسر خورشیدی ۳۱ درصد، می‌تواند با نرخ تورم بالای ۲۴ درصد، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. کائو و همکاران [۱۵] برای برآورد نیازهای برق جامعه یک سیستم خورشیدی-زمین گرمایی را پیشنهاد کردند. سیستم طراحی شده امکان فروش برق اضافی را به شبکه فراهم می‌کند و هزینه‌های جاری سیستم با این امر جبران می‌شود. گولر و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین

احتمال وقوع یک بحران انرژی دیگر و نگرانی‌های ناشی از پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، ضرورت‌های زیست محیطی، افزایش روز افزون مصرف انرژی و رشد جمعیت، مشکلات ناشی از مهاجرت و رشد بی‌رویه شهر نشینی نیروهای محرکه‌ای هستند که توجه به منابع تجدیدپذیر و سیستم انرژی هیدروژنی را شدت می‌بخشد [۵]. برای استفاده از هیدروژن در حالت گازی چالش‌هایی وجود دارد که نیاز به مایع‌سازی آن برای کاربردهای عملی دارد. روش‌های مختلفی برای مایع‌سازی هیدروژن پیشنهاد شده و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مهمترین مزایای استفاده از سوخت هیدروژن عدم آلاینده‌گی محصول حاصل از واکنش سوختن هیدروژن، میزان حرارت تولید شده بالاتر در اثر احتراق در واحد وزن، اقتصادی بودن به دلیل میزان اختلاط آن با هوا جهت احتراق در گستره قابل تغییر، امکان خارج کردن هیدروژن نشت یافته در محیط بسته، غیر سمی بودن و ارزان بودن نسبت به سایر سوخت‌ها می‌باشد. هیدروژن مایع یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست می‌باشد. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع در مخازن یک فرآیند ساده است. لازم به یادآوری است که به مقداری انرژی برای تبدیل هیدروژن به حالت مایع نیاز است. موشک‌ها در برنامه فضایی عمدتاً از هیدروژن مایع به عنوان منبع سوخت استفاده می‌کنند. باید در نظر داشت که هیدروژن در درجه اول در حالت گازی خود یافت می‌شود، اما برای سهولت در به کارگیری به صورت مایع ذخیره و حمل می‌شود. در نتیجه، ضرورت بالایی برای سرمایه‌گذاری و پیشرفت فناوری برای تولید هیدروژن پاک مبتنی بر منابع تجدیدپذیر زمین گرمایی وجود دارد و مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۷و۶].

چن و همکاران [۸] سیستم جدیدی را معرفی کردند که انرژی باد را با ترکیبی از توربین‌های بادی و یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی دی اکسید کربن فشرده ادغام می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر ماهیت متناوبی دارند و با جفت شدن آن‌ها با سیستم‌های ذخیره انرژی به کارایی و توجیه اقتصادی مطلوبی می‌توان دست یافت. در طی بهینه‌سازی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی، بازده انرژی و هزینه واحد محصولات به ترتیب ۳۱/۱۲۱ درصد و ۳۱/۴۱ دلار به ازای هر گیگاژول به دست می‌آید. زو و همکاران [۹] یک سیستم انرژی با به کارگیری انرژی باد ترکیبی با ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن را بررسی کردند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها شامل ۱۰ توربین بادی است و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقیاس توربین‌های بادی شاهد بهبودهایی در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی اکسید کربن هستند. آن‌ها گزارش دادند که میزان مصرف انرژی و مصرف انرژی باد به ترتیب

نیروگاه‌های توانی بسیار کاربرد دارد. آن‌ها گزارش دادند که ظرفیت خالص تولید برق سیستم ارزیابی شده حدود ۲۹۸ کیلووات می‌باشد. علاوه بر این، در این نیروگاه ظرفیت سرمایش و گرمایش به ترتیب ۱۱۶۹ کیلوژول و ۱۷۸۳ کیلوژول است. سیستم‌های چندگانه تولید انرژی در سال‌های اخیر به عنوان راه حلی قوی برای جلوگیری از اتلاف انرژی معرفی شده‌اند. هدف از این تحقیق کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و در عین حال افزایش عملکرد سیستم می‌باشد. این تحقیق یک سیستم نوآورانه را معرفی می‌کند که واحدهای چرخه رانکین آلی اصلاح شده، یک منبع انرژی زمین گرمایی، یک الکترولیز PEM، یک سیستم پیش خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن را ترکیب می‌کند. ترکیب جدیدی در چرخه رانکین آلی اصلاح شده با استفاده از مبدل داخلی و ژنراتور مبدل حرارتی بخار معرفی شده است و سیال عامل ژئوتروپیک در این چرخه استفاده شده است که عملکرد ترمودینامیکی مطلوبی را نشان می‌دهد. ژئوتروپیک مخلوطی از سه نوع مبرد با درصد‌های مختلف است که ساختار آن شبیه نیست چرا که بعد از اختلاط در صد تشکیل دهنده عناصر آن در حالت مایع با درصد عناصر در حالت گاز متفاوت است. این مبردها در زمان تغییر فاز دادن فشار و دمای ثابتی ندارند.

نوآوری این تحقیق بر این اساس است که با بازیابی حرارت اتلافی در چرخه رانکین آلی توان مورد نیاز برای تولید هیدروژن در الکترولایزر فراهم شده و به منظور کاهش مصرف انرژی در سیکل مایع‌سازی، از سیکل پیش خنک‌کننده جذبی استفاده شده است و دو پیش خنک‌کننده حمام نیتروژن مایع با سیکل مایع‌سازی ادغام شده‌اند تا بازدهی سیستم را افزایش دهد. این مطالعه شامل بهینه‌سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین و بهینه‌ترین شرایط عملکرد برای سیستم است. این تحقیق شامل یک تحلیل اقتصادی برای ارزیابی بهای تمام شده واحدها و اجزای سیستم برای ارائه سیستمی با توجیه اقتصادی بالا می‌باشد. این مطالعه به دنبال ایجاد یک راه حل انرژی پایدار از طریق توسعه و بهینه‌سازی یک سیستم جدید زمین گرمایی است.

۲- توصیف سیستم

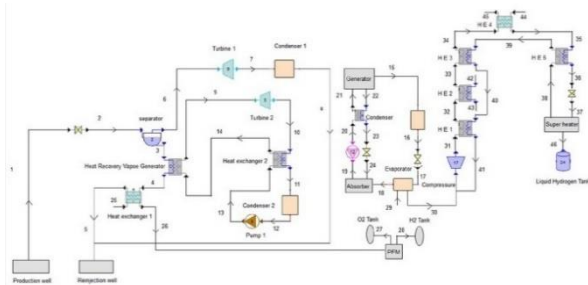
شکل ۱ شماتیک سیستم زمین گرمایی بررسی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این سیستم پیشنهادی دارای یک الکترولیز، یک واحد زمین گرمایی، یک چرخه رانکین جدید، یک چرخه پیش خنک‌کننده جذبی و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن است. برای بهبود کارایی چرخه رانکین، با استفاده از مبدل حرارتی داخلی و ژنراتور مبدل

گرمایی و خورشیدی با مدل‌های مختلفی از کلکتورهای سهموی و صفحه تخت را مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از انرژی زمین گرمایی در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد به همراه تابش خورشیدی، ظرفیت گرمایی مورد نیاز برای ساختمان‌ها را فراهم کردند. ژانگ و همکاران [۱۷] با ترکیب زغال سنگ و انرژی زمین گرمایی یک سیستم تولید برق ارائه کردند. تجزیه و تحلیل سیستم پیشنهادی آن‌ها پتانسیل افزایش بازده ترمودینامیکی نیروگاه زمین گرمایی توسط مهار بخار دمای متوسط از توربین بخار و پیش گرم کردن چرخه رانکین آلی با استفاده از بخار خروجی را نشان داد.

تکانات و همکاران [۱۸] یک سیستم چند نسلی را معرفی کردند که با استفاده از انرژی زمین گرمایی به عنوان منبع انرژی اولیه امکان تولید برق و هیدروژن را فراهم می‌کند. این سیستم عملکرد موثری را نشان داد و بازده انرژی و اگزرژی را به ترتیب ۵۱/۵۳ و ۵۹/۱۷ درصد به دست آورد. خوش‌منش و همکاران [۱۹] یک سیستم خورشیدی-زمین گرمایی را با هدف تولید برق، هیدروژن و آب شیرین پیشنهاد دادند. یافته‌های آن‌ها معیارهای عملکرد قابل توجهی از جمله بازده انرژی ۲۳/۸۷ درصد، بازده اگزرژی ۲۸/۲۱ درصد، هزینه سالانه ۰/۱۴۴ دلار در ساعت، و تأثیر زیست‌محیطی ۰/۰۲۴ دلار در هر کیلووات ساعت برای سیستم خورشیدی-ژئوترمال را نشان داد. آساره و همکاران [۲۰] تولید هیدروژن و تولید برق از طریق پیل سوختی را با ادغام یک چرخه رانکین آلی دوگانه با یک چیلر جذبی با انرژی زمین گرمایی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کل نرخ تخریب اگزرژی سیستم زمین گرمایی پیشنهادی ۱۸۴۰/۷ کیلووات ساعت بود و هزینه کل سیستم بالغ بر ۵۱/۷۳ دلار در ساعت به دست می‌آید.

یلماز و همکاران [۲۱] مدلی برای یک نیروگاه زمین گرمایی ادغام شده با تولید هیدروژن معرفی کردند. مطالعه آن‌ها یک چرخه تولید چندگانه با استفاده از انرژی زمین گرمایی را تجزیه و تحلیل کرد که شامل یک چرخه کالینا، یک چرخه رانکین آلی، یک ژنراتور ترموالکتریک، یک سیستم تبرید جذبی دو اثره، یک خشک‌کن، یک آبگرمکن خانگی و نمک‌زدایی چند اثره است. چرخه کالینا از محلولی با دو سیال با دماهای جوش متفاوت برای سیال کاری استفاده می‌کند. از آنجایی که این محلول در محدوده بزرگ‌تری از دما می‌جوشد، در مقایسه با چرخه رانکین، گرمای بیشتری از منبع نسبت به سیال کاری خالص، استخراج می‌شود. به دلیل توانایی استفاده کامل از اختلاف دمای بین منبع و چاه حرارتی، این سیکل در پردازش حرارتی صنعتی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی و استفاده از گرمای آب

می‌شود. استفاده از سیال زئوتروپیک به دلیل کارایی بالا، دوام اقتصادی و حداقل تأثیرات زیست‌محیطی در چرخه رانکین اصلاح شده، باعث بهبود کارایی سیستم و پایداری زیست محیطی می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

۳- روش شناسی

در این مطالعه یک مدل‌سازی کامل ترمودینامیکی و اقتصادی از سیستم تولید چندگانه معرفی شده است. برای مدل‌سازی از نرم افزار EES که شامل توابع مربوط به خواص ترمودینامیکی بوده استفاده می‌شود. معادلات ترمودینامیکی در حالت ثابت و به طور همزمان حل می‌شوند. در قسمت تحلیل اقتصادی تمامی قیمت‌ها و نرخ‌های هزینه را به روز اعمال نموده تا توجیه سیستم پیشنهادی به خوبی انجام شود. سپس یک تحلیل پارامتری برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای کارکردی در عملکرد اصلی سیستم انجام می‌شود. همچنین، الگوریتم دو هدفه ژنتیک برای دستیابی به عملکرد بهینه روی سیستم مورد بررسی انجام شده است به صورتی که بازده انرژی و نرخ هزینه توابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی هستند.

معیار تصمیم‌گیری تاپسیس برای تعیین نقطه بهینه سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که به رتبه بندی گزینه‌ها می‌پردازد. تاپسیس تکنیکی برای اولویت سفارش از طریق شباهت به راه‌حل ایده‌آل است و ارزش نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت را نشان می‌دهد. این مطالعه ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند را با استفاده از کوتاه‌ترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل نشان می‌دهد.

مفروضات زیر برای مدل‌سازی سیستم ارزیابی شده در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]:

- شرایط حالت پایدار برای تمام اجزای سیستم در نظر گرفته شده است.
- دمای سکون ۲۰ درجه سلسیوس و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

حرارتی بخار ترکیب جدیدی ارایه شده است. آب گرم با عبور از شیر انبساط به عنوان سیال زمین گرمایی وارد جداکننده می‌شود. قسمت بخار به سمت توربین ۱ هدایت می‌شود، در حالی که بخش مایع وارد مبدل حرارتی می‌شود. در این چرخه، یک سیال کاری با نقطه جوش کم، بخار مورد نیاز برای توربین ۲ را در اواپراتور تولید می‌کند. مخلوط داغ بخار و آب که از توربین ۱ خارج می‌شود در چگالنده ۱ خنک می‌شود و سپس همراه با آب آزاد شده از مبدل حرارتی به چاه زمین گرمایی بازگردانده می‌شود. سیال کاری پس از خنک شدن در چگالنده ۲، وارد توربین ۲ شده سپس توسط پمپ به گردش در می‌آید و با سیال زمین گرمایی تبادل حرارتی می‌کند. یک مبدل داخلی در چرخه رانکین آلی گنجانده شده است که با انتقال بخشی از گرمای خروجی از توربین ۲ به سیال خروجی از پمپ، اتلاف حرارت را در کندانسور ۲ به حداقل می‌رساند. گاز هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز با استفاده از یک چیلر جذبی تک اثره از پیش خنک می‌شود که منجر به کاهش مصرف انرژی برای مایع‌سازی هیدروژن می‌شود. پس از آن، گاز هیدروژن وارد کمپرسور چرخه کلود می‌شود که در مطالعه حاضر جهت مایع‌سازی هیدروژن این چرخه به کار رفته است.

چرخه کلود به‌عنوان پایه همه نیروگاه‌های بزرگ مایع‌سازی هیدروژن در سراسر جهان شناخته می‌شود. در این روش، هیدروژن گازی از طریق چندین مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس گاز پرفشار به دو جریان جداگانه تقسیم می‌شود. در مبدل حرارتی ۱، گاز هیدروژن با استفاده از بخار سردی که از جداکننده باز می‌گردد، از قبل خنک می‌شود، در حالی که هیدروژن باقی مانده توسط بخار نیتروژن در مبدل حرارتی ۲ خنک می‌شود. هیدروژن در حمام نیتروژن مایع غوطه ور می‌شود. هیدروژن هنگام عبور از مبدل حرارتی خنک می‌شود. سپس جداکننده مایع را از بخار جدا می‌کند و امکان ذخیره هیدروژن مایع در منبع فراهم می‌شود. واحد زمین گرمایی به عنوان منبع انرژی اولیه برای سیستم عمل می‌کند و انرژی حرارتی را از زیر سطح زمین استخراج می‌کند. علاوه بر این، ژنراتور مبدل حرارتی با بازیابی انرژی، بازده کلی چرخه رانکین اصلاح شده را افزایش می‌دهد. در این فرآیند، الکترولیز غشای تبادل پروتون با الکترولیز آب، گاز هیدروژن و اکسیژن تولید می‌کند. الکترولیت مورد نیاز برای الکترولیز آب از چرخه رانکین آلی تأمین می‌شود. چرخه کلود گاز هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز را به هیدروژن مایع تبدیل می‌کند. در این سیستم زمین گرمایی پیشرفته، با استفاده از چرخه رانکین آلی الکترولیت تولید می‌شود و به وسیله الکترولیز غشای تبادل پروتون گاز هیدروژن تولید

$$M_{H2out} = a_{H2} \times W_{PEM}^{bH2} + c_{H2} \quad (6)$$

$$N_{H2out} = 3600 \times M_{H2out} \quad (7)$$

ضرایب a, b و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ می باشد. بازده انرژی و انرژی و انرژی سیستم را می توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\eta_{energy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiller} + W_{claude} - W_{PEM}}{m_1 h_1} \quad (6)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiller} + W_{claude} - W_{PEM} + Ex_{35} + E_{cooling}}{m_1 e_1} \quad (7)$$

جدول ۲ معادلات تخریب انرژی را در اجزای مختلف سیستم تولید همزمان ارائه می دهد.

جدول ۲: روابط نابودی انرژی اجزای مختلف سیستم

معادله نابودی انرژی	اجزای سیستم
$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{24} - \dot{E}_{19} - Q_{abs, LiBr}$	جاذب سیکل خنک کننده جذبی
$\dot{E}_{21} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{22} + Q_{Gen, LiBr}$	ژنراتور سیکل جذبی
$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} - Q_{Cond, LiBr}$	کندانسور سیکل جذبی
$\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18} + Q_{Evap, LiBr}$	اوپراتور سیکل جذبی
$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{23} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{20}$	مبدل حرارتی بخار جذبی
$\dot{E}_7 - \dot{E}_8 + Q_{Cond, ORC1}$	کندانسور سیکل رانکین ۱
$\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12} + W_{Pump, ORC}$	پمپ سیکل رانکین
$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 - W_{Turb, ORC1}$	توربین سیکل رانکین ۱
$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} + Q_{Cond, ORC2}$	کندانسور سیکل رانکین ۲
$\dot{E}_{10} - \dot{E}_9 - W_{turb, ORC2}$	توربین سیکل رانکین ۲
$\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28} - \dot{E}_{26} + W_{Electroliz, PEM}$	الکترولایزر
$\dot{E}_5 + \dot{E}_{26} - \dot{E}_4 - \dot{E}_{25}$	مبدل حرارتی ۱
$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{11}$	مبدل حرارتی ۲
$\dot{E}_6 + \dot{E}_{38} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{39}$	گرمکن الکترولایزر
$\dot{E}_4 + \dot{E}_9 - \dot{E}_3 - \dot{E}_{14}$	ژنراتور مبدل حرارتی بخار
$W_{Comp rev} - W_{Comp act}$	کمپرسور چرخه کلود
$\dot{E}_{31} + \dot{E}_{40} - \dot{E}_{41} - \dot{E}_{32}$	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود
$\dot{E}_{33} + \dot{E}_{43} - \dot{E}_{42} - \dot{E}_{32}$	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود
$\dot{E}_{40} + \dot{E}_{34} - \dot{E}_{33} - \dot{E}_{39}$	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود
$\dot{E}_{45} + \dot{E}_{35} - \dot{E}_{34} - \dot{E}_{44}$	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود
$\dot{E}_{35} + \dot{E}_{38} - \dot{E}_{36} - \dot{E}_{39}$	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود

۵- تحلیل اقتصادی

• اثرات افت فشار و انتقال حرارت در اجزا نادیده گرفته شده است.
• تأثیر انرژی های جنبشی و پتانسیل بر عملکرد سیستم نادیده گرفته می شود.
• بازده ایزونتروپیک ثابت برای پمپ ها، توربین ها و کمپرسورها در نظر گرفته شده است.

۴- تحلیل ترمودینامیکی سیستم

در ارزیابی ترمودینامیکی سیستم، اجزا به عنوان حجم کنترل مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس مفروضات ترمودینامیکی که قبلاً بیان شد، توازن جرم و انرژی برای سیستم پیشنهادی با استفاده از معادلات ارائه شده در زیر انجام می شود [۲۳]:

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

جدول ۱ داده های ورودی تحلیل ترمودینامیکی را ارائه می دهد.

جدول ۱: داده های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدل سازی

مقدار	پارامتر
۱/۲	دبی جرمی سیال زمین گرمایی (kg/s)
۱۰۰	فشار چاه تولید زمین گرمایی (kPa)
۱۶۲	دمای چاه تولید زمین گرمایی (c)
۶۹	دمای چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (c)
۳۰	فشار چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (kPa)
۰/۸	راندمان ایزونتروپیک توربین (/)
۰/۸۵	راندمان ایزونتروپیک پمپ (/)
۰/۸	نرخ جریان جرمی توربین ۱ (kg/s)
۸۰	دمای ورودی الکترولایزر (c)
۱۰۰	فشار ورودی الکترولایزر (kPa)

ضریب عملکرد ترانسفورمر حرارتی جذبی به صورت زیر ارائه می شود:

$$COP = \frac{Q_{absorber}}{Q_{generator} + Q_{evaporator}} \quad (3)$$

توان تولید شده توسط چرخه رانکین اصلاح شده با استفاده از معادله زیر تعیین می شود:

$$W_{ORC} = W_{turb} - W_{pump} \quad (4)$$

مدل سازی الکترولایزر PEM با استفاده از معادله های ارائه شده در زیر تعیین می شود [۲۴ و ۲۵]:

$$W_{PEM} = 0.25 \times W_{Total} \quad (5)$$

مقدار هیدروژن تولید شده با استفاده از فرمول زیر تعیین می شود:

جدول ۳ آمده است استفاده شده است [۳۱]. ایجاد تعادل بین این روابط برای دستیابی به اهداف تولید انرژی مورد نظر و در عین حال کنترل هزینه ها ضروری است. به کارگیری این روابط عملکرد کلی سیستم را افزایش می دهد. علاوه بر این، آن ها نقش مهمی در حصول اطمینان از اینکه مدیریت هزینه به طور موثر مورد توجه قرار می گیرد، ایفا می کنند.

۶- بهینه سازی سیستم با الگوریتم ژنتیک

این مطالعه بر روی یک رویکرد بهینه سازی دو هدفه برای شناسایی بهترین شرایط برای عملکرد بهینه سیستم تمرکز دارد. هدف از فرآیند بهینه سازی در مطالعه حاضر یافتن کارآمدترین و مقرون به صرفه ترین پیکربندی برای اجزای سیستم در شرایط ایده آل است. با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک دو هدفه، همه اجزای سیستم برای ایجاد بهینه ترین شرایط برای سیستم ارزیابی می شود. در این تحقیق، بهینه سازی دو هدفه جهت به حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداقل رساندن نرخ هزینه کل هدف گذاری شده است تا بهینه ترین عملکرد برای سیستم حاصل شود. بعد از فرآیند بهینه سازی تعیین نقطه بهینه سیستم با نمودار پارتو نشان داده می شود. متغیرهای بهینه سازی برای سیستم شامل نسبت فشار کمپرسور و بازده ایزنتروپیک توربین و کمپرسور است.

۷- اعتبارسنجی

سیستم پیشنهادی در این تحقیق آرایش جدیدی از سیستم تولید همزمان را معرفی می کند. برای اعتبارسنجی این تحقیق، مطالعه صورت گرفته توسط ارورا و همکاران [۳۲] انجام شد و با نتایج مطالعه انجام شده با مطالعه مرجع معرفی شده در جدول ۴ مقایسه شد. روش تحلیل این تحقیق به این صورت است که فرآیندهای ذکر شده با استفاده از شرایط و مفروضات اولیه مانند دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال و مقایسه نتایج با کار مرجع معرفی شده می باشد. نتایج مقایسه تفاوت جزئی را نشان می دهد که نشان دهنده دقت بالای اعتبارسنجی است.

ترموکونومیک رشته ای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی را از طریق تحلیل انرژی با اصول اقتصادی ادغام می کند و بینش های ارزشمندی را برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم به طراحان ارائه می دهد. هدف تحلیل ترموکونومیک در سیستم های ترمودینامیکی تعیین هزینه واحد خروجی انرژی با ارزیابی تلفات انرژی در هر جزء از سیستم است. در تحلیل اقتصادی، معادله تعادل هزینه حالت پایدار سیستم با رابطه زیر نشان داده می شود:

$$\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{F,total} + \dot{Z}_{CI,total} + \dot{Z}_{OM,total} \quad (10)$$

توابع مختلفی برای ارزیابی ترمواقصدی سیستم های ترمودینامیکی وجود دارد [۲۶]. در این مطالعه، روابط برای هزینه تولید انرژی (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) برای سیستم به صورت زیر بیان می شود [۲۷]:

$$LCOE = \frac{AOC}{(W_{total} + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (11)$$

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2} \dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau} \quad (12)$$

در این سناریو ها، τ نشان دهنده ساعات عملیاتی سالانه سیستم است که ۸۰۰۰ ساعت در سال تخمین زده می شود. محاسبه هزینه عملیاتی سالانه (AOC) به شرح زیر است:

$$AOC = (TOC \times \phi \times CRF) \quad (13)$$

در این زمینه، کل هزینه های عملیاتی (TOC) تمام هزینه های عملیاتی را در بر می گیرد، در حالی که ϕ نشان دهنده ضریب تعمیر و نگهداری است که به مقدار ۱/۰۶ است [۲۸]. متغیرهای i و n به ترتیب نشان دهنده نرخ بهره و مدت زمان بهره برداری هستند. ضریب بازگشت سرمایه با پارامتر CRF نشان داده می شود و به صورت زیر تعریف می شود [۲۹]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (14)$$

نرخ هزینه از طریق عوامل اقتصادی مانند ضریب بازگشت سرمایه و نرخ بهره تعیین می شود که امکان ارزیابی دقیق تری از هزینه سیستم را فراهم می کند. در نهایت، هزینه کلی سیستم با تقسیم هزینه سالانه بر تعداد کل ساعات کار در یک سال محاسبه می شود که معمولاً ۷۴۴۶ ساعت در نظر گرفته می شود [۳۰].

$$Z_{Total} = (TOC \times \phi \times CRF) / i \quad (15)$$

در این زمینه، 'i' نشان دهنده نرخ بهره است، در حالی که 'n' نشان دهنده دوره عملیاتی سیستم است. برای ایجاد تعادل بین کارایی انرژی و هزینه ها در سیستم پیشنهادی، از یک سری روابط که در

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار ارورا و همکاران [۳۲]

پارامتر	نتایج	به	دست	نتایج مرجع
گرمای جاذب چرخه جذبی (kw)	۲۹۴۳	۲۹۴۵/۲۶		
گرمای کندانسور چرخه جذبی (kw)	۲۵۰۶	۲۵۰۵/۹۱		
گرمای اواپراتور چرخه جذبی (kw)	۲۳۵۵	۲۳۵۵/۴		
ضریب عملکرد چرخه جذبی (%)	۰/۷۹	۰/۷۶۰۹		
ناپودی اگزرژی جاذب چرخه جذبی (kw)	۷۰/۱۶	۷۰/۴۷۸		
ناپودی اگزرژی کندانسور (kw)	۶/۶۰۶	۶/۰۶۶		
ناپودی اگزرژی اواپراتور (kw)	۸۶/۲۸	۸۶/۲۷۵		

۸- نتایج و بحث

سیستم پیشنهادی از انرژی زمین گرمایی برای تأمین انرژی اولیه از طریق یک رویکرد نوآورانه استفاده می‌کند و با اصلاح چرخه رانکین آلی توسعه می‌یابد که منجر به یک سیستم جدید می‌شود. این سیستم با استفاده از نرم افزار EES بر اساس معیارهای طراحی خاص شبیه سازی شده است. یافته های حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی

پارامتر	مقدار
بازده انرژی سیستم (%)	۴۲
بازده اگزرژی سیستم (%)	۵۱
نرخ تولید هیدروژن (kg/hr)	۴/۸۸
توان خروجی چرخه الکترولایزر (kw)	۴۷۵/۱
توان خروجی چرخه مایع سازی (kw)	۱۳/۷۷
توان خروجی کل (kw)	۱۴۲۵

جدول ۳: توابع هزینه اجزای مختلف سیستم

اجزای سیستم	تابع هزینه
ژنراتور سیکل خنک کننده جذبی	$z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100}\right)^{0.6}$
کندانسور سیکل خنک کننده جذبی	$z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$
جاذب سیکل خنک کننده جذبی	$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100}\right)^{0.6}$
اواپراتور سیکل خنک کننده جذبی	$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$
مبدل حرارتی بخار سیکل خنک کننده جذبی	$z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100}\right)^{0.6}$
کندانسور چرخه رانکین آلی	$z = 516.62 \times (A_{Cond})^{0.6}$
توربین چرخه رانکین آلی	$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$
پمپ سیکل رانکین آلی	$z = 200 \times (W_{Pump})^{0.65}$
مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۱	$z = 130 \times \left(\frac{A_{heat\ exchanger}}{0.093}\right)^{0.78}$
مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۲	$z = 4122 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.6}$
کمپرسور سیکل رانکین ارگانیک	$z = 7900 \times (W_{Comp})^{0.62}$
مبدل حرارتی سیکل کلود	$z = 8500 + 409 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.8}$
چرخه الکترولیز PEM	$Z = 1000 \times (W_{elec})$

سیستم پیشنهادی تحت یک تحلیل اقتصادی قرار گرفت تا کارایی اقتصادی بالای خود را از طریق توابع هزینه به روز نشان دهد. جدول ۷ نتایج نرخ های هزینه برای اجزای مختلف سیستم را نشان می دهد.

جدول ۷: نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
۳۱۹۹۲	جاذب چرخه سرمایش جذبی (\$/GJ)
۱۱۷۸	پمپ چرخه رانکین اصلاح شده (\$/GJ)
۴۰۳۲۷۵	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح شده (\$/GJ)
۱۱۲۹۱	کندانسور چرخه سرمایش جذبی (\$/GJ)
۱۷۴۸۴	ژنراتور چرخه سرمایش جذبی (\$/GJ)
۹۳۲۲	مبدل حرارتی بخار چرخه سرمایش جذبی (\$/GJ)
۱۱۸۵۷۵۵	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح شده (\$/GJ)
۲۱۲۱۳	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح شده (\$/GJ)
۵۰۳۸۶۵۴	الکترولایزر (\$/GJ)
۸۶۹۸	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح شده (\$/GJ)
۳۶۱۳۴	اوپراتور چرخه سرمایش جذبی (\$/GJ)
۴۰۱۵۲	کمپرسور چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۴۴	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۴۹	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۲۰	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۵۱۶	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (\$/GJ)
۸۶۰۹	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (\$/GJ)

جدول ۸ برخی از نتایج اساسی را برای تحلیل اقتصادی نشان می دهد. نرخ کل هزینه سیستم ۳۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول است که نشان دهنده کارایی اقتصادی قابل توجه سیستم پیشنهادی است. هزینه تولید برق (LCOE) و هزینه تولید هیدروژن (LCOH) با مقادیر ۱۹/۸ سنت در هر کیلووات ساعت و ۲۴/۳۹ دلار به ازای هر کیلوگرم، فاکتورهای حیاتی در ارزیابی اقتصادی سیستم هستند.

جدول ۸: نتایج ارزیابی اقتصادی

مقدار	پارامتر
۱۹/۸	هزینه تولید برق (cent/kwh)
۲۴/۳۹	هزینه تولید هیدروژن (\$/kg)
۱۸	دوره بازگشت سرمایه
۳۷/۱۶	هزینه کل سیستم (\$/GJ)

در تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی منبع زمین گرمایی، آب به عنوان سیال عامل عمل می کند. یافته های حاصل از ارزیابی ترمودینامیکی نشان می دهد که توان خروجی سیستم مورد مطالعه ۱۴۲۵ کیلو وات است. بازده انرژی و بازده انرژی سیستم به ترتیب ۴۲٪ و ۵۱٪ اندازه گیری شده است. یافته ها حاکی از این است که اتلاف انرژی قابل توجهی در واحد رانکین اصلاح شده و در واحد الکترولایزر رخ می دهد. قابل ذکر است که میان اجزای سیستم بیشترین تخریب انرژی را توربین چرخه رانکین اصلاح شده و الکترولیز و در مقابل، پمپ ها کمترین میزان تخریب انرژی را در بین اجزای سیستم دارند. محاسبات نشان می دهد تخریب انرژی کل برای سیستم ۵۶۱۴۰ کیلو وات حاصل شده است. مقادیر تخریب انرژی برای اجزای مختلف سیستم به تفصیل در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: نتایج نابودی انرژی اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
۴۷۲۹۵	الکترولایزر (kw)
۸۶/۲۹	اوپراتور چرخه جذبی (kw)
۲/۱۹۶	پمپ چرخه رانکین اصلاح شده (kw)
۱۲۵۵	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح شده (kw)
۱۸۴۹	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح شده (kw)
۶/۶۲	کندانسور چرخه جذبی (kw)
۲۸۳۱	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح شده (kw)
۲۵۲	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح شده (kw)
۴۹/۹۶	ژنراتور چرخه جذبی (kw)
۶/۹۳۴	شیر انبساط چرخه جذبی (kw)
۶/۳۳	مبدل حرارتی بخار چرخه جذبی (kw)
۵/۰۹۴	مبدل حرارتی ۱ (kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی ۲ (kw)
۸۴۰/۵	ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)
۷/۲۷۷	کمپرسور چرخه کلود (kw)
۸۱/۱۶	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود (kw)
۱۴/۰۷	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود (kw)
۷۹/۶۷	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود (kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود (kw)
۱۱۷/۴	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود (kw)
۵۶۱۴۰	کل سیستم (kw)

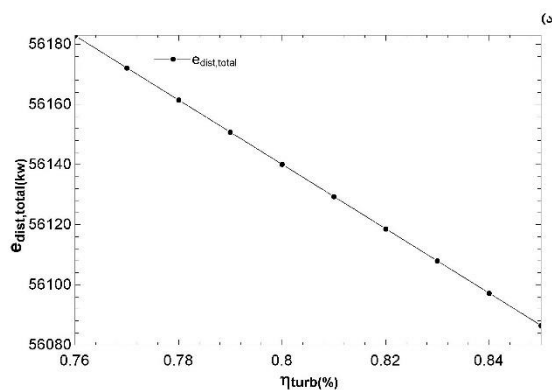
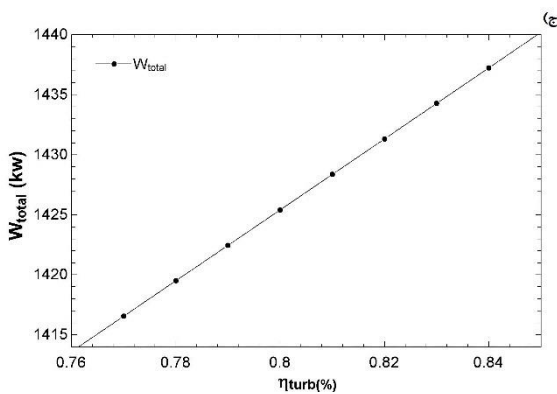
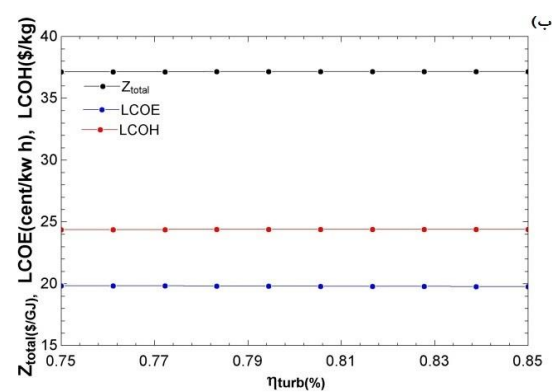
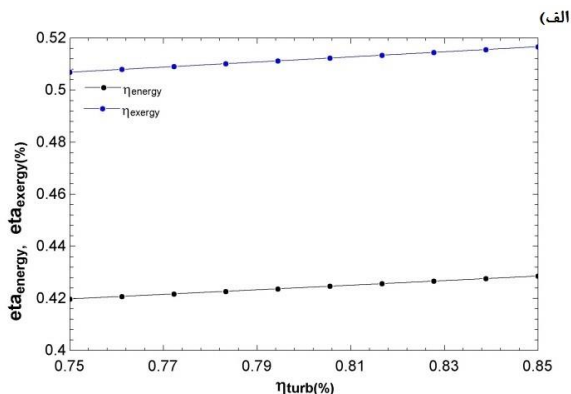
۸-۱- تحلیل پارامتریک

اگرزری آن را نیز بهبود می بخشد. علاوه بر این، منجر به کاهش تخریب اگرزری در سیستم می شود و در نتیجه توان خروجی افزایش می یابد.

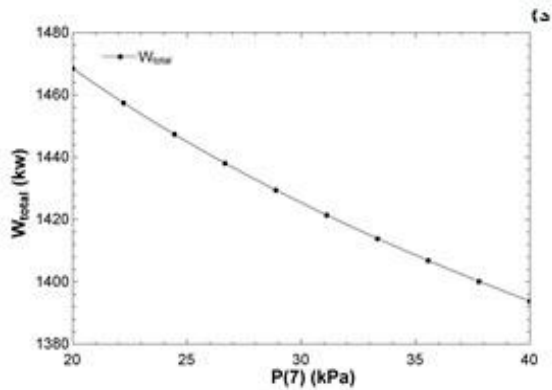
تجزیه و تحلیل پارامتریک یک تکنیک موثر برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف است که درک کاملی از سیستم مورد نظر ارائه می دهد. سیستم پیشنهادی بررسی می کند که چگونه پارامترهای طراحی کلیدی، از جمله بازده ایزنتروپیک توربین، دما و فشار خروجی توربین اول، و دمای ورودی توربین دوم، بر محصولات خروجی سیستم تأثیر می گذارند.

۸-۱-۱- اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

شکل ۲ چگونگی تأثیر تغییرات راندمان توربین بر توان تولیدی سیستم، تخریب کل اگرزری، نرخ هزینه و همچنین راندمان انرژی و اگرزری را تحلیل می کند. یافته ها نشان می دهد که افزایش بازده توربین از ۰/۷۵ به ۰/۸۵ منجر به افزایش توان خالص کلی سیستم می شود. افزایش توان را می توان به تأثیر مطلوب بازده توربین بر بازده کار نسبت داد. در این سیستم ها، توربین نقش بسزایی در تولید انرژی الکتریکی دارد. از آنجایی که الکترولایزر با استفاده از الکتریسیته تولید شده توسط توربین کار می کند، افزایش تولید توان باعث افزایش عملکرد الکترولایزر می شود و در نتیجه تولید هیدروژن در سیستم را افزایش می دهد. افزایش راندمان توربین منجر به بهبود راندمان انرژی و اگرزری سیستم، در کنار کاهش هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کل سیستم شده است. افزایش اگرزری نشان داده شده در این نمودار را می توان به همبستگی مستقیم بین بازده اگرزری و توان خروجی سیستم نسبت داد. با افزایش کار سیستم، اگرزری آن نیز افزایش می یابد. افزایش نرخ هزینه را می توان به این واقعیت نسبت داد که هزینه های سیستم در کنار قدرت کلی سیستم رشد می کنند و تجهیزات بزرگ تر و جامع تری را ضروری می کنند. علاوه بر این، سایر عوامل مؤثر در افزایش نرخ هزینه عبارتند از: افزایش کلی در هزینه های تولید، هزینه های انرژی و تلفات متحمل شده در طول زمان از کار افتادن سیستم. مهم است که تأکید شود هزینه های انجام شده برای هر زیر سیستم ادغام شده در سیستم اصلی، کارایی تولید را کم هزینه تر کرده است و منجر به افزایش کلی هزینه های سیستم می شود. اگرزری به حداکثر کار قابل استخراج از سیستم اشاره دارد. به عبارت دیگر، کار مفید تولید شده توسط توربین در این سیستم را نشان می دهد. افزایش راندمان توربین به طور مثبت بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تأثیر می گذارد و در عین حال راندمان انرژی و



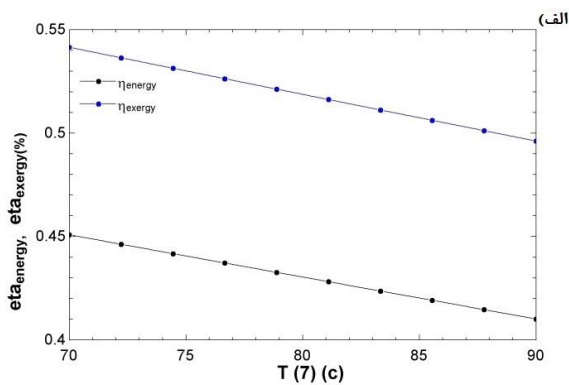
شکل ۲: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و اگرزری (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی اگرزری



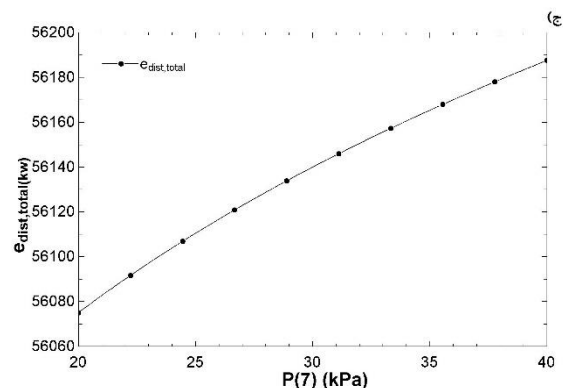
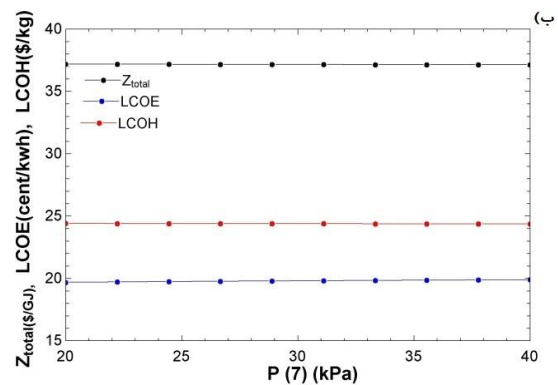
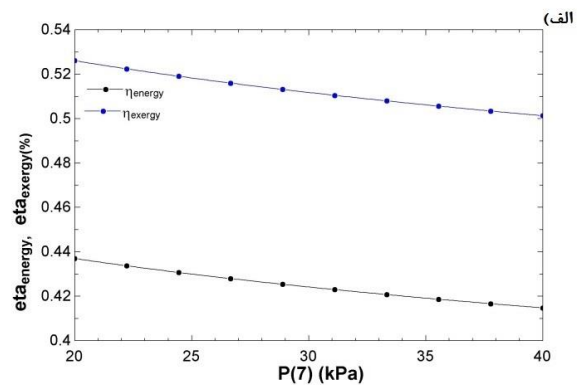
شکل ۳: تأثیر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و (ب) نرخ هزینه ج) نابودی انرژی د) توان

۸-۱-۳- اثر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم

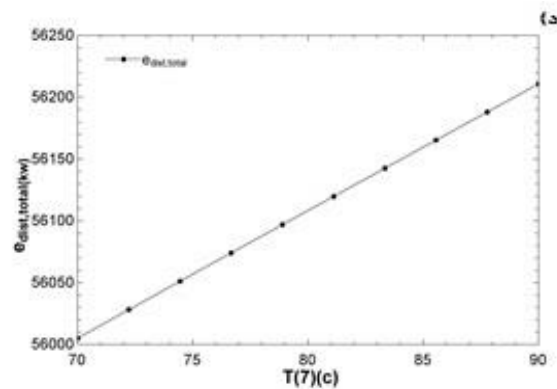
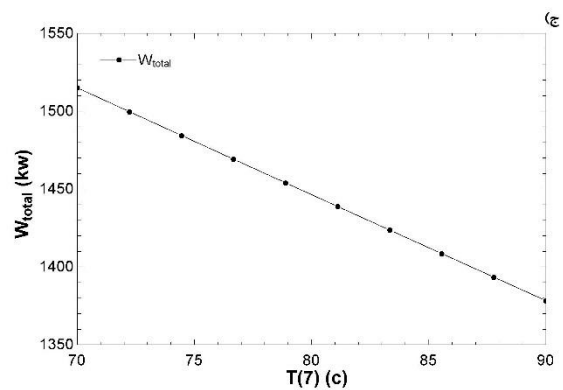
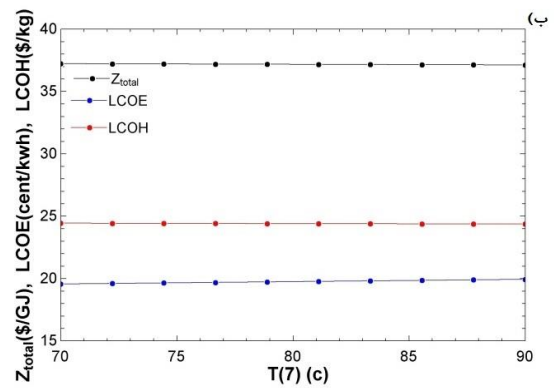
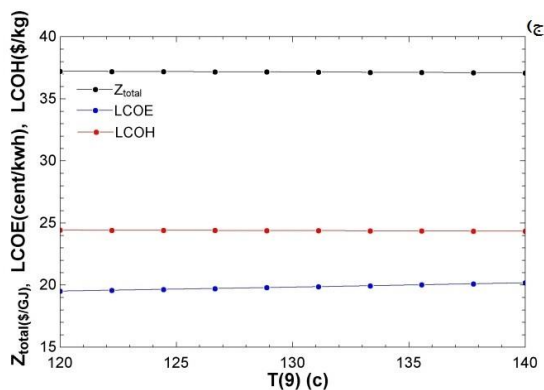
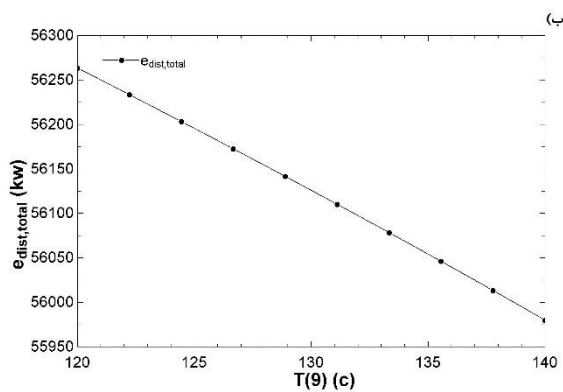
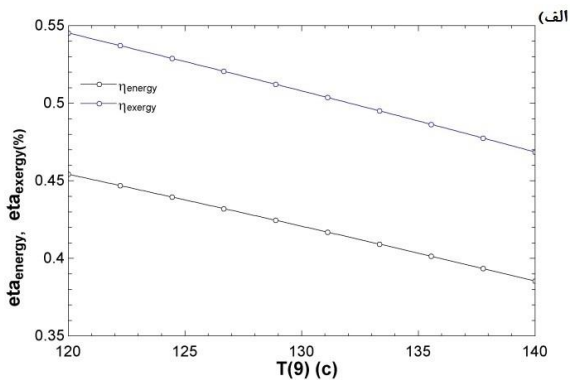
شکل ۴ چگونگی تأثیر دمای خروجی توربین ۱ را بر توان خروجی سیستم، میزان تخریب انرژی، نرخ هزینه و راندمان انرژی و انرژی بررسی می‌کند. با افزایش دمای خروجی توربین ۱ از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰ درجه سانتی‌گراد، تلفات سیستم و تخریب انرژی افزایش می‌یابد. در نتیجه، ظرفیت انجام کار کاهش می‌یابد و منجر به کاهش توان خروجی می‌شود. راندمان انرژی مستقیماً با توان خروجی مرتبط است. بنابراین، کاهش توان تولیدی سیستم بر عملکرد ترمودینامیکی آن تأثیر منفی می‌گذارد و منجر به کاهش راندمان انرژی و انرژی می‌شود. کاهش ظرفیت تولید منجر به کاهش هزینه تولید برق، کاهش هزینه تولید هیدروژن و نرخ کلی سرمایه‌گذاری در تجهیزات بزرگتر می‌شود و در نتیجه قابلیت اقتصادی سیستم را افزایش می‌دهد.



۸-۱-۲- اثر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم
 شکل ۳ تجزیه و تحلیل می‌کند که چگونه تغییرات در فشار خروجی توربین ۱ بر توان تولید سیستم، تخریب انرژی، نرخ هزینه و کارایی انرژی و انرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. با افزایش فشار خروجی توربین ۱، تخریب انرژی در سیستم نیز افزایش می‌یابد که منجر به تلفات بیشتر در توان خروجی می‌شود و بر عملکرد سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. از آنجایی که توان خروجی مستقیماً با بازده انرژی مرتبط است، افزایش تخریب انرژی منجر به کاهش راندمان انرژی و انرژی کلی سیستم می‌شود. کاهش توان خروجی سیستم، نیاز به تجهیزات بزرگ و پرهزینه ترمودینامیکی با راندمان بالا را از بین می‌برد و در نتیجه هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کلی سیستم کاهش می‌یابد.



که متعاقباً تخریب انرژی را در سیستم کاهش می‌دهد. کاهش انتقال حرارت از مولد بخار بازیابی حرارتی به چرخه رانکین آلی منجر به کاهش توان خروجی توربین سیکل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش دمای ورودی به سیکل باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که ارتباط مستقیمی با توان کل سیستم دارد. از آنجایی که الکترولیز برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، تولید هیدروژن مایع با کاهش قدرت توربین کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هر دو راندمان انرژی و نرخ هزینه مستقیماً با توان تولید مرتبط هستند. بنابراین، هنگامی که توان تولید کاهش می‌یابد، بازده انرژی و هزینه های یکسان شده تولید برق، تولید هیدروژن و هزینه های کل نیز کاهش می‌یابد.

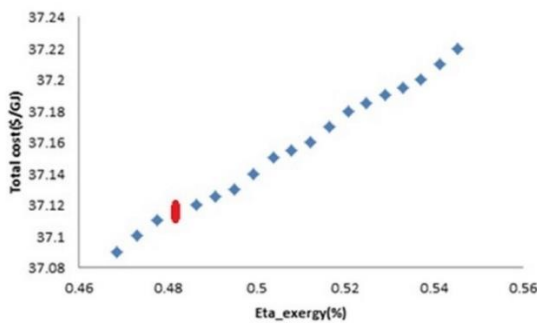


شکل ۴: تأثیر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و انرژی و (ب) نرخ هزینه (ج) توان (د) نابودی انرژی

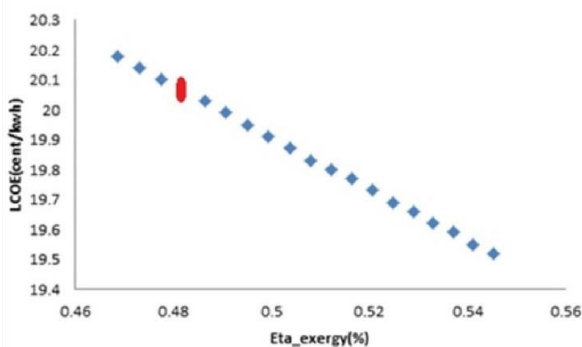
۸-۱-۴ اثر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازیافت حرارتی روی عملکرد سیستم

شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه دمای خروجی مولد بخار بازیابی گرما در چرخه اصلاح شده رانکین بر تولید توان سیستم، تخریب انرژی، نرخ هزینه و بازده انرژی و انرژی تأثیر می‌گذارد. هنگامی که دمای خروجی مبدل حرارتی افزایش می‌یابد، دمای ورودی آن کاهش می‌یابد. کاهش دمای ورودی به مولد بخار بازیابی گرما، انتقال حرارت و انرژی حرارتی ورودی به چرخه رانکین آلی را کاهش می‌دهد،

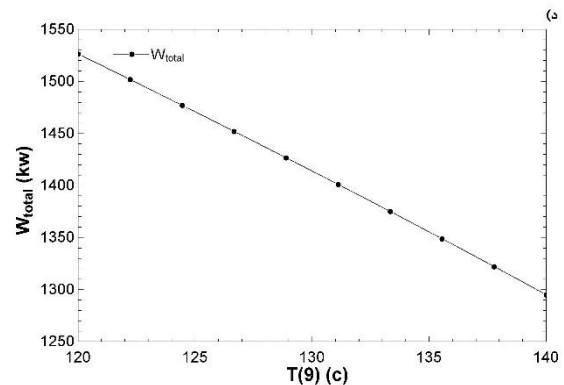
برای شناسایی مطلوب ترین وضعیت برای دستیابی به شرایط عملیاتی بهینه سیستم به کار گرفته شد. تاپسیس یک روش تصمیم گیری کاربردی است که با تجزیه و تحلیل، مقایسه و رتبه بندی گزینه ها برای انتخاب بهترین و مناسب ترین گزینه با توجه به معیارهای مسئله، به مشکلات تصمیم گیری واقعی می پردازد. یافتن یک راه حل ایده آل و یک راه حل ضد ایده آل، که سپس برای تعیین فاصله بین گزینه ها و راه حل ایده آل استفاده می شود، پایه و اساس رویکرد تاپسیس است. سپس این روش گزینه ها را با توجه به نزدیکی آن ها به راه حل ایده آل رتبه بندی می کند. نتایج بهینه سازی برای سیستم پیشنهادی، با در نظر گرفتن سه سناریو مجزا، در شکل های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بازده انرژی و نرخ کل هزینه در نظر گرفته شده است. نقطه قرمز به عنوان راه حل بهینه برای سیستم با استفاده از روش تصمیم گیری تاپسیس شناسایی می شود. فرآیند بهینه سازی نشان داده شده در شکل ۷، بازده انرژی و هزینه تولید برق را نشان می دهد، در حالی که شکل ۸ بر بازده انرژی و هزینه تولید هیدروژن متمرکز است.



شکل ۶: نمودار پارتو بازده انرژی و هزینه کل



شکل ۷: نمودار پارتو بازده انرژی و هزینه تولید الکتریسیته



شکل ۸: تأثیر تغییرات دما در خروجی مولد بخار باز یافت حرارتی روی عملکرد سیستم (الف) بازده انرژی و (ب) بازده انرژی (ج) هزینه (د) توان

۸-۲- بهینه سازی دو هدفه

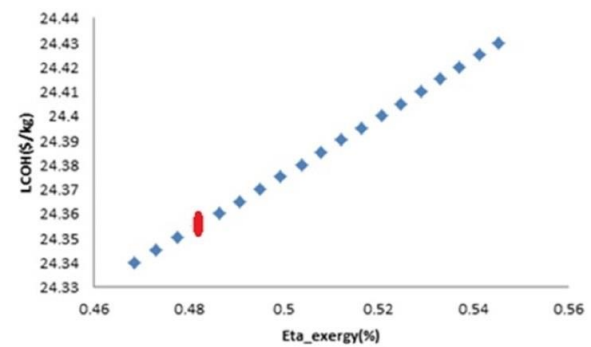
این مطالعه از بهینه سازی الگوریتم ژنتیک دو هدفه برای تعیین بهترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه سازی استفاده می کند. هدف یافتن بهینه ترین مقادیر برای دو تابع هدف راندمان انرژی و هزینه سیستم است. بهینه سازی بر بهبود پارامترهای عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی، به ویژه با افزایش کارایی انرژی و کاهش همزمان هزینه های سیستم متمرکز است. جدول ۹ نتایج بدست آمده از طریق بهینه سازی الگوریتم ژنتیک دو هدفه را بیان می کند. نتایج بهینه سازی نشان می دهد که با عملکرد بهینه، سیستم می تواند به بازده انرژی ۴۴٪، بازده انرژی ۵۳٪ و نرخ هزینه ۳۷/۰۷ دلار بر گیگا ژول برسد.

جدول ۹: مقادیر بهینه

پارامتر	مقدار بهینه
هزینه کل سیستم (\$/GJ)	۳۷/۰۷
بازده انرژی سیستم (%)	۵۳
بازده انرژی سیستم (%)	۴۴
بازده ایزونتروپیک توربین (%)	۷۰
بازده ایزونتروپیک کمپرسور (%)	۸۷
بازده ایزونتروپیک پمپ (%)	۸۲
فشار خروجی توربین ۱ (kPa)	۴۹/۹۵
دمای ورودی توربین ۲ (C)	۱۳۳/۳
هزینه تولید برق (cent/kwh)	۱۹۶۲
هزینه (\$/kg)	۲۴/۴۱

هدف اصلی این سیستم زمین گرمایی تولید انرژی پاک و در عین حال کاهش آلودگی محیطی است. علاوه بر این، سه سناریو برای فرآیند بهینه سازی در نظر گرفته می شوند که از نمودار پارتو در چارچوب بهینه سازی استفاده می کنند. روش تصمیم گیری تاپسیس

سیستمی انجام شده است که با کارایی اقتصادی بالا مشخص می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که دستیابی به کارایی اقتصادی مطلوب برای کل سیستم هزینه‌ای معادل ۳۷/۱۶ دلار به ازای هر گیگا ژول را به همراه دارد. تأثیر شش متغیر تصمیم‌گیری را بر عملکرد سیستم، از جمله بازده ایزنتروپیک توربین، فشار خروجی توربین ۱، دمای خروجی ژنراتور مبدل حرارتی بخار و دمای خروجی توربین ۱ بررسی شد. بهینه‌سازی دو هدفه به طور قابل توجهی بازده اگزرژی سیستم را افزایش می‌دهد، با استفاده از معیار تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه عملکرد بهینه شناسایی شده و سیستمی با نرخ هزینه بهینه جهت بهبود توجیه اقتصادی به کارگیری سیستم تولید همزمان پیشنهادی ارائه می‌کند.



شکل ۸: نمودار پارتو بازده اگزرژی و هزینه تولید هیدروژن

۹- نتیجه گیری

این مطالعه یک سیستم تولید چند گانه جدید را ارزیابی می‌کند که از انرژی زمین گرمایی برای تولید الکتریسته، گرما، سرما و هیدروژن مایع استفاده می‌کند. سیستم پیشنهادی شامل یک واحد زمین گرمایی، یک چرخه رانکین آلی اصلاح‌شده ابتکاری است که یک مبدل حرارتی داخلی و یک ژنراتور مبدل حرارتی بخار، یک چیلر جذبی تک اثره، یک الکترولیز غشای تبادل پروتون و یک چرخه مایع‌سازی هیدروژن را ادغام می‌کند. سیستم مورد بررسی تحت تجزیه و تحلیل متمرکز بر انرژی، اگزرژی و عوامل اقتصادی قرار گرفته است. گاز هیدروژن تولید شده توسط الکترولیز در طول چرخه مایع‌سازی کلود به شکل مایع تبدیل می‌شود و کارایی ذخیره‌سازی و حمل و نقل آن را افزایش می‌دهد. با پیش‌سرد کردن گاز هیدروژن در چیلر جذبی انرژی مصرفی در چرخه مایع‌سازی کاهش می‌یابد و غوطه‌ور کردن آن در دو مبدل حرارتی با حمام نیتروژن مایع باعث کاهش اختلاف دما در مبدل حرارتی شده به صورتی که نابودی اگزرژی کاهش یافته و منجر به بهبود راندمان سیستم پیشنهادی می‌شود. الکترولیز و توربین چرخه رانکین اصلاح شده بالاترین تخریب اگزرژی را در مقایسه با سایر اجزای سیستم نشان می‌دهند به صورتی که می‌توان با افزایش دمای ورودی به آن منجر به کاهش قابل توجه در تخریب اگزرژی برای سیستم پیشنهادی شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف انجام شد. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی پیکربندی اجزای سیستم برای حداکثر بازده در شرایط ایده‌آل و همچنین افزایش عملکرد ترمودینامیکی سیستم تمرکز دارد. سیستم تجزیه و تحلیل شده عملکرد رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد و با دستیابی به راندمان انرژی ۴۲٪ و راندمان اگزرژی ۵۱٪ نشان دهنده پیکربندی مطلوب سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی است. در این مطالعه، یک ارزیابی اقتصادی برای توسعه

۱۰- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
Ex	اگزرژی، kJ/kg
h	انتالپی مخصوص، kJ/kg
m	شدت جریان جرمی، kg/s
P	فشار، kPa
Q̇	آهنگ انتقال گرما، kW
s	انتروپی مخصوص، kJ/kg.K
T	دما، C°
Ẇ	آهنگ کار مبادله شده، kW
LCOE	هزینه تولید برق، cent/kwh
LCOH	هزینه تولید هیدروژن، \$/kg
AOC	هزینه عملیاتی سالانه
CRF	ضریب بازگشت سرمایه
TOC	کل هزینه‌های عملیاتی
علائم یونانی	
η	بازده، %
zیرنویس	
e	خروجی
Ex	اگزرژی
i	ورودی
Total	کل
Turb	توربین
PEM	الکترولیزر

۱۱- منابع

- [9] Zhao, X., et al. (2023). "Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station." *International Journal of Hydrogen Energy* 48(57): 21531-21543.
- [10] Temiz, M. and I. Dincer (2022). "Design and analysis of a floating photovoltaic based energy system with underground energy storage options for remote communities." *Journal of Energy Storage* 55: 105733.
- [11] keykhah, A., et al. (2023). "Optimization and performance analysis of a geothermal-based power generation system based on flash-binary and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures." *Advances in Engineering and Intelligence Systems* 002(03).
- [12] S.M. Alirahmi, et al., Green hydrogen & electricity production via geothermal-driven multi-generation system: thermodynamic modeling and optimization, *Fuel* 308 (2022) 122049.
- [13] O. Bamisile, et al., Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 157–175.
- [14] S. Kavian, C. Aghanajafi, H.J. Mosleh, A. Nazari, Exergy, economic and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic-geothermal heat pump system, *Appl. Energy* 276 (2020). Volume.
- [15] Y. Cao, et al., Development and transient performance analysis of a decentralized grid-connected smart energy system based on hybrid solar-geothermal resources; Techno-economic evaluation, *Sustain. Cities Soc.* 76 (2022) 103425
- [16] O.F. Guler, et al., Performance evaluation of a geothermal and solar-based multigeneration system and comparison with alternative case studies: energy, exergy, and exergoeconomic aspects, *Renew. Energy* 200 (2022) 1517–1532.
- [17] H. Zhang, et al., Thermodynamic performance analysis of an improved coal-fired power generation system coupled with geothermal energy based on organic Rankine cycle, *Renew. Energy* 201 (2022) 273–290.
- [1] Mahdavi N, Ghaebi H, Minaei A. Proposal and multi-aspect assessment of a novel solar-based trigeneration system; investigation of zeotropic mixture's utilization. *Appl Therm Eng* 2022;206:118110.
- [2] Azizi S, Shakibi H, Shokri A, Chitsaz A, Yari M. Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Appl Energy* 2023;332.
- [3] Saberi, Mohammad Reza, Kandaharion, Amir Mohammad, Naqashzadeh, Ehsan. Investigating the reliability of diesel, biodiesel and hydrogen fuels in diesel engines with the approach of sustainable development analysis. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, 1402; 2(1): 101-113.
- [4] Maliki, Farhad, Akbari, Zahra, Farzaneh, Ali. An overview of modern methods of hydrogen production and storage and its use as a sustainable energy source. *New and Renewable Energy Journal*, 1400; 8(2): 101-109.
- [5] Karayel GK, Javani N, Dincer I. Effective use of geothermal energy for hydrogen production: a comprehensive application. *Energy* 2022;249:123597.
- [6] Arslan O, Arslan AE. Multi-criteria optimization of a new geothermal driven integrated power and hydrogen production system via a new Index: economic sustainability (EcoSI). *Fuel* 2024;358:130160.
- [7] Awad M, Said A, Saad MH, Farouk A, Mahmoud MM, Alshammari MS, et al. A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. *Alex Eng J* 2024;87:213–39.
- [8] Chen, Y., et al. (2023). "Exergy-economic analysis and multi-objective optimization of a multigeneration system based on efficient waste heat recovery of combined wind turbine and compressed CO₂ energy storage system." *Sustainable Cities and Society* 96: 104714.

- optimizations,” *Energy*, vol. 145, pp. 38–51, 2018.
- [25] Kianfard, H., Khalilarya, S., Jafarmadar S., 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 339–349.
- [26] G. Tsatsaronis, —Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 249–253, 2007.
- [27] O.L. Gulder, "Flame temperature estimation of conventional and future jet fuels", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1986; 108(2), 376-380.
- [28] H. Sayyadi, "Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a benchmark cogeneration system", *Applied Energy*, 2009; 86(6), 867-879.
- [29] Lingbao Wang, Xianbiao Bu, Hanzhi Wang, Zhitong Ma, Weibin Ma, Huashan Li, (2018). Thermo-economic evaluation and optimization of LiBr-H₂O double absorption heat transformer driven by flat plate collector, *Energy Conversion and Management* 162. 66–76.
- [30] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Convers Manag* 2019:112320.
- [31] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran; "Thermal Design and Optimization."; New York: Wiley: 1996.
- [32] H. Kianfard, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.* 177 (2018) 339–349, vol.
- [18] B. Tekkanat, et al., The evaluation of hydrogen production via a geothermal-based multigeneration system with 3E analysis and multi-objective optimization, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (22) (2023) 8002–8021.
- [19] M.H. Khoshgoftar Manesh, et al., Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system for combined power, hydrogen, hot water, and freshwater production, *Sustain. Energy Technol. Assess.* 51 (2022) 101861.
- [20] A. Bedakhanian, E. Assareh, Exploring an innovative approach to hydrogen generation for fuel cell energy production by integrating a dual organic Rankine system with an absorption chiller powered by geothermal energy, *Energy Nexus* (2023) 100267.
- [21] F. Yilmaz, et al., Proposed and assessment of a sustainable multigeneration plant combined with a transcritical CO₂ cycle operated by flash-binary geothermal energy, *Int. J. Hydrog. Energy* 48 (60) (2023) 22818–22833.
- [22] Liu X, Hu G, Zeng Z. Performance characterization and multi-objective optimization of integrating a biomass-fueled brayton cycle, a kalina cycle, and an organic rankine cycle with a claude hydrogen liquefaction cycle. *Energy* 2023;263.
- [23] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(40):14021e30.
- [24] Boyaghchi F. A., M. Chavoshi, and V. Sabeti, “Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact