نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک



سال ۱۴۰۳ / دوره بهار و تابستان / شماره ۱ / صفحه ۱۹۷ – ۲۱۱

DOI: 10.22034/STME.2025.490141.1089



# تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی سیستم تولید چندگانه جدید مبتنی بر انرژی زمین گرمایی برای تولید آب گرم، سرمایش، توان و هیدروژن مایع علی عیوضی<sup>۱</sup>\* ، مهران عامری<sup>۲</sup> ، محمد شفیعی دهج<sup>۳</sup> ، هادی غائبی <sup>۴</sup>

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، ایران.
۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

چکیدہ

#### كلمات كليدى

انرژی زمین گرمایی، چرخه مایع سازی هیدروژن کلود، سیستم تولید چند گانه، بهینه سازی، چرخه رانکین آلی اصلاح شده. در این مطالعه یک سیستم تولید چندگانه 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 میکند. در سیستم پیشنهادی با به کارگیری انرژی زمین گرمایی به عنوان منبع تأمین انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید هیدروژن مایع باعث میشود که آلایندگی زیست محیطی به کمترین مقدار خود برسد. گاز هیدروژن تولید شده با الکترولایزر در سیستم پیشنهادی توسط ترنسفورمر گرمای جذبی پیش سرمایش شده و توان مصرفی چرخه مایع سازی هیدروژن پیشنهادی توسط ترنسفورمر گرمای جذبی پیش سرمایش شده و توان مصرفی چرخه مایع سازی هیدروژن ماهش . در مطالعه حاضر تأثیر تغییرات پارامترهای عملکردی مهم روی کارکرد سیستم ارزیابی شده است. به از معیار تصمیم گیری تاپسیس نقطه بهینه سیستم به دست میآید. تحلیل ترمودینامیکی کاملی در مطالعه حاضر مورت می گیرد و نتایج حاصل نشان میدهد که بازده انرژی ۴۲ درصد و بازده اگزرژی ۵۱ درصد برای سیستم پیشنهادی به دست میآید. ارزیابی اقتصادی صورت گرفته در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به روز پیشنهادی به دست میآید کر سیستم تولید چندگانه ۲۷/ درصد و بازده اگزرژی ۵۱ درصد برای سیستم بالای سیستم پیشنهادی را بیان می کند.

#### مقدمه

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 انعطاف پذیری سوخت منجر به توجه بیشتر به دستیابی به انرژی پایدار شده است [1]. 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

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 فراوان ترین عنصر جهان و دهمین عنصر فراوان در پوسته زمین می باشد. هیدروژن به عنوان سبک ترین 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].

#### نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

۱۹۸

احتمال وقوع یک بحران انرژی دیگر و نگرانیهای ناشی از پایان پذیری 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 میبخشند [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 آلایندگی محصول حاصل از واكنش سوختن هيدروژن، ميزان حرارت توليد 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 كردن هيدروژن نشت يافته در محيط بسته، غير سمى 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 هيدروژن مايع به عنوان منبع سوخت استفاده مي كنند. بايد در نظر داشت که هیدروژن در درجه اول در حالت گازی خود یافت می شود، اما برای سهولت در به کارگیری به صورت مایع ذخیره و حمل می شود. در نتیجه، ضرورت بالایی برای سرمایه گذاری و پیشرفت فناوری برای تولید هیدروژن پاک مبتنی بر منابع تجدیدپذیر زمین گرمایی وجود دارد و مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۶و۷].

چن و همکاران [۸] سیستم جدیدی را معرفی کردند که انرژی باد را با ترکیبی از توربینهای بادی و یک سیستم ذخیرمسازی 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 اگزرژی و هزینه واحد محصولات به ترتیب ۲۱/۱۲۱ درصد و ۲۱/۴۱ دلار به ازای هر گیگاژول به دست میآید. زو و همکاران [۹] یک سیستم انرژی با بهکارگیری انرژی باد ترکیبی با ایستگاه سوختگیری هیدروژن را بررسی کردند. سیستم مورد مطالعه آنها شامل ۱۰ توربین بادی است بهبودهایی در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی اکسید کربن هستند. آنها گزارش دادند که میزان مصرف انرژی و مصرف انرژی باد به ترتیب

به ۱۱/۱۹ درصد و ۹۹/۱۳ درصد می رسد. 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 سرمایش با ۱/۱ گیگاوات ساعت در سال را دارد.

سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

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 اگزرژی را با ۹۹۱ کیلووات نشان داد، در حالی که شیر انبساط با تخریب اگزرژی ۱۱۴ كيلووات دنبال مىشود. علاوه بر اين، كندانسورها نقش قابل توجهى در تخریب اگزرژی داشتهاند به صورتی که تقریباً ۲۱/۹۸ درصد از کل تخریب اگزرژی به آنها نسبت داده شده است. علیرحمی و همکاران [۱۲] سیستمی را معرفی کردند که از منابع زمین گرمایی برای تولید هيدروژن و الكتريسيته استفاده مىكند. آنها دريافتند كه تبخير کننده و اجزای الکترولیز غشای تبادل پروتون بیشترین میزان تخریب اگزرژی را دارا هستند. سیستم مورد مطالعه آنها ۴۶۹۶ مگاوات در ساعت برق تولید می کند که انرژی مورد نیاز سالانه ۱۶۰ خانواده را فراهم می کند. 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 اگزرژی ۸۸/۳۱ درصد را برای سیستم مورد مطالعه دست یافتند که پس از بهینه سازی بازده انرژی و اگزرژی 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 اگزرژی 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 برآوردن نیازهای برق جامعه یک سیستم خورشیدی-زمین گرمایی را پیشنهاد کردند. سیستم طراحی شده امکان فروش برق اضافی را به شبکه فراهم میکند و هزینه های جاری سیستم با این امر جبران میشود. گولر و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین

۱۹۹ تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی ...

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 قابلتوجهی از جمله بازده انرژی ۲۳/۸۷ درصد، بازده اگزرژی ۲۸/۸۱ درصد، هزینه سالانه ۱۹۴۰ دلار در ساعت، و تأثیر زیستمحیطی ۲۶/۰۲ درصد، هزینه سالانه ۱۹۴۰ ساعت برای سیستم خورشیدی-ژئوترمال را نشان داد. آساره و همکاران پرخه 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 ۱۸۴۰/۲ کیلووات ساعت بود و هزینه کل

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 خشک کن، یک آبگرمکن خانگی و نمکزدایی چند اثره است. چرخه کالینا از محلولی با دو سیال با دماهای جوش متفاوت برای سیال کاری استفاده می کند. از آنجایی که این محلول در محدوده بزرگتری از دما می جوشد، در مقایسه با چرخه رانکین، گرمای بیشتری از منبع نسبت به سیال کاری خالص، استخراج می شود. به دلیل توانایی استفاده کامل از اختلاف دمای بین منبع و چاه حرارتی، این سیکل در پردازش حرارتی صنعتی، انرژی زمین گرمایی، انرژی خورشیدی و استفاده از گرمای آب

### على عيوضي و همكاران

نیروگاههای توانی بسیار کاربرد دارد. آنها گزارش دادند که ظرفیت خالص توليد برق سيستم ارزيابى شده حدود ۲۹۸ كيلووات مىباشد. 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 رانكين آلى اصلاح شده، يك منبع انرژي زمين گرمايي، يك الكتروليز 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 زئوتروپیک در این چرخه استفاده شده است که عملکرد ترمودینامیکی مطلوبی را نشان میدهد. زئوتروپیک 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 مايع با درصد عناصر در حالت گاز متفاوت است. اين 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

### ۲-توصيف سيستم

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

۲. .

سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

حرارتی بخار ترکیب جدیدی ارایه شده است. آب گرم با عبور از شیر انبساط به عنوان سيال زمين گرمايي وارد جداكننده مي شود. قسمت بخار به سمت توربین ۱ هدایت می شود، در حالی که بخش مایع وارد مبدل حرارتی می شود. 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 می شود در چگالنده ۱ خنک می شود 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 می شود که منجر به کاهش مصرف انرژی برای مایعسازی هیدروژن میشود. پس از آن، گاز هیدروژن وارد کمپرسور چرخه کلود می شود 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 می شود. در این روش، هیدروژن گازی از طریق چندین مبدل حرارتی خنک می شود. سپس گاز پرفشار به دو جریان جداگانه تقسیم می شود. در مبدل حرارتی ۱، گاز هیدروژن با استفاده از بخار سردی که از جداکننده باز میگردد، از قبل خنک می شود، در حالی که هیدروژن باقی مانده توسط بخار نیتروژن در مبدل حرارتی ۲ خنک می شود. هیدروژن در حمام نیتروژن مایع غوطه ور می شود. هیدروژن هنگام عبور از مبدل حرارتی خنک می شود. سپس جداکننده مایع را از بخار جدا میکند و امکان ذخیره هیدروژن مايع در منبع فراهم مي شود. واحد زمين گرمايي به عنوان منبع انرژي اولیه برای سیستم عمل میکند و انرژی حرارتی را از زیر سطح زمین استخراج می کند. علاوه بر این، ژنراتور مبدل حرارتی با بازیابی انرژی، بازده کلی چرخه رانکین اصلاح شده را افزایش میدهد. در این فرآیند، الكتروليز غشاى تبادل پروتون با الكتروليز آب، گاز هيدروژن و اكسيژن توليد مي كند. الكتريسيته مورد نياز براي الكتروليز آب از چرخه رانكين آلی تأمین میشود. چرخه کلود گاز هیدروژن تولید شده از طریق الكتروليز را به هيدروژن مايع تبديل ميكند. در اين سيستم زمين گرمایی پیشرفته، با استفاده از چرخه رانکین آلی الکتریسیته تولید می شود و به وسیله الکترولیز غشای تبادل پروتون گاز هیدروژن تولید

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



### 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 اگزرژی و نرخ هزینه توابع هدف در الگوریتم بهینهسازی هستند.

معیار تصمیم گیری تاپسیس برای تعیین نقطه بهینه سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاپسیس یکی از روشهای تصمیم گیری 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 می شوند [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.

له سازی	اقتصادی و بهین	ترموديناميكي،	۲۰ تحلیل	۱
---------	----------------	---------------	----------	---

(۶)	نادیده گرفته شده است.	ل حرارت در اجزا	• اثرات افت فشار و انتقال

• تأثیر انرژیهای جنبشی و پتانسیل بر عملکرد سیستم نادیده گرفته میشود.

 بازده ایزونتروپیک ثابت برای پمپها، توربینها 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]:

$$\sum m_i = \sum m_e \tag{1}$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \tag{(1)}$$

جدول ۱ دادههای ورودی تحلیل ترمودینامیکی را ارائه میدهد.

جدول۱: داده های اولیه ترمودینامیکی مورد استفاده برای مدلسازی

مقدار	پارامتر
١/٢	دبی جرمی سیال زمین گرمایی(kg/s)
۱۰۰	فشار چاہ تولید زمین گرمایی (kPa)
185	دمای چاہ تولید زمین گرمایی (c)
۶٩	دمای چاه تزریق مجدد زمین گرمایی (c)
٣٠	فشار چاہ تزریق مجدد زمین گرمایی (kPa)
• /٨	راندمان ايزنتروپيک توربين (٪)
•/٨۵	راندمان ايزنتروپيک پمپ (٪)
• /٨	نرخ جریان جرمی توربین ۱ (kg/s)
٨٠	دماي ورودي الكترولايزر (c)
١٠٠	فشار ورودي الكتروليز(kPa)
صورت زير ارائه	ضریب عملکرد ترانسفورمر حرارتی جذبی به «
	مىشود:
COP=	<u>Qabsorber</u> (٣)
Q <sub>gene</sub>	rator +Qevaprator
ده با استفاده از	توان تولید شده توسط چرخه رانکین اصلاح ش
	معادله زیر تعیین میشود:
$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_{tu}$	$r_{b}$ - $\dot{W}_{pump}$ (*)
ای ارائه شده در	مدل سازي الكتروليز PEM با استفاده از معادله ه
	: بر تعبین میشود [۲۴و ۲۵]:

$$W_{PEM} = 0.25 \times W_{Total} \tag{(a)}$$

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

على عيوضي و همكاران

$M_{H2} = a_{H2} \times W_{\text{DEM}}^{bH2} + c_{H2}$	(8)
H2out H2 H PEM CH2	
$N_{H2out} = 3600 \times M_{H2out}$	(Y)
ب a، و c به ترتیب مقادیر ۳/۳۸۲، ۰/۹۷ و ۵/۹۲۸ میباشد.	ضراي
ی و اگزرژی سیستم را میتوان با استفاده از روابط زیر محاسبه	بازده انرژ
	کرد:
$\eta_{energy} = \frac{W_{ORC} + W_{chiler} + W_{claude} - W_{PEM}}{m_1 h_1}$	(۶)
$ \begin{aligned} \eta_{exergy} \\ \_ W_{ORC} + W_{chiler} + W_{claude} - W_{PEM} + Ex_{35} + E_{cooling} \end{aligned} $	(Y)
$-\frac{1}{m_1e_1}$	

جدول ۲ معادلات تخریب اگزرژی را در اجزای مختلف سیستم تولید همزمان ارائه میدهد.

#### جدول۲:روابط نابودی اگزرژی اجزای مختلف سیستم

معادله نابودي اگزرژي	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
$\dot{E}_{15}$ - $\dot{E}_{16}$ - $Q_{Cond,LiBr}$	كندانسور سيكل جذبى
$\dot{E}_{17}$ - $\dot{E}_{18}$ + $Q_{Evap,LiBr}$	اواپراتور سيكل جذبى
$\dot{E}_{21} + \dot{E}_{23} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{20}$	مبدل حرارتي بخار جذبي
$\dot{E}_7$ - $\dot{E}_8$ + $Q_{Cond,ORC1}$	کندانسور سیکل رانکین ۱
$\dot{E}_{13}$ - $\dot{E}_{12}$ + $W_{Pump,ORC}$	پمپ سيکل رانکين
$\dot{E}_6$ - $\dot{E}_7$ - $W_{Turb,ORC1}$	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
$\dot{E}_{27} + \dot{E}_{28}$ -	الكترولايزر
$\dot{E}_{26} + W_{Electroliz,PEM}$	
$\dot{E}_5 + \dot{E}_{26} - \dot{E}_4 - \dot{E}_{25}$	مبدل حرارتی ۱
$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{11}$	مبدل حرارتی ۲
$\dot{E}_6 + \dot{E}_{38} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{39}$	گرمكن الكترولايزر
$\dot{E}_4 + \dot{E}_9 - \dot{E}_3 - \dot{E}_{14}$	ژنراتور مبدل حرارتی بخار
W <sub>Comp rev</sub> -W <sub>Comp act</sub>	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

۲ ۰ ۲

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

ترمواکونومیک رشتهای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی را از طریق تحلیل اگزرژی با اصول اقتصادی ادغام میکند و بینشهای ارزشمندی را برای دستیابی به عملکرد بهینه سیستم به طراحان ارائه میدهد. هدف تحلیل ترمواکونومیک در سیستم های ترمودینامیکی تعیین هزینه واحد خروجی اگزرژی با ارزیابی تلفات اگزرژی در هر جزء از سیستم است. در تحلیل اقتصادی، معادله تعادل هزینه حالت پایدار سیستم با رابطه زیر نشان داده میشود:

 $\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{F,total} + \dot{Z}_{CI,total} + \dot{Z}_{OM,total}$  (1.)

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

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

$$LCOH = \frac{AOC}{((LHV_{H_2}\dot{N}_{H_2}\dot{m}_{H_2}) + Q_{cooling} + Q_{heating}) \times \tau}$$
(17)

در این سناریو ها، ۲ 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:

 $AOC = (TOC \times \varphi \times CRF) \tag{17}$ 

در این زمینه، کل هزینه های عملیاتی (TOC) تمام هزینه های عملیاتی را در بر می گیرد، در حالی که  $\varphi$  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]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^{n}}{(1+i)^{n}-1}$$
(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].

 $Z_{Toatal} = (TOC \times \varphi \times CRF)/t \tag{10}$ 

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 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 میدهد. علاوه بر این، آنها 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 بهینهسازی 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 میشود. در این تحقیق، بهینه سازی دو هدفه جهت به حداکثر رساندن بازده اگزرژی 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 میشود. متغیرهای بهینه سازی برای سیستم شامل نسبت فشار کمپرسور و بازده ایزنتروپیک توربین و کمپرسور است.

### ۷–اعتبار سنجی

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.

، نتايج مرجع	به دست	نتايج	پارامتر
		آمده	
2940/28	2962		گرمای جاذب
			چرخه
			جذبی(kw)
۲۵۰۵/۹۱	20.8		گرمای کندانسور
			چرخه
			جذبی(kw)
2300/4	۲۳۵۵		گرمای اواپراتور
			چرخه
			جذبی(kw)
•/४۶•٩	•/٧٩		ضريب عملكرد
			چرخه جذبی(٪)
۲۰/۴۷۸	٧٠/١۶		نابودی اگزرژی
			جاذب چرخه
			جذبی(kw)
81.88	818 · 8		نابودی اگزرژی
			كندانسور (kw)
<b>۸۶/۲۷۵</b>	<b>۱۶/۲۸</b>		نابودی اگزرژی
			اوا پرا تور (kw)

علی عیوضی و همکاران

۲۰۳ تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی ...

جدول ٣: توابع هزينه اجزاى مختلف سيستم		
تابع هزينه	اجزاى سيستم	
$z = 17500 \times \left(\frac{A_{Gen}}{100}\right)^{0.6}$	ژنراتور سیکل خنک کننده جذبی	
$z = 8000 \times \left(\frac{A_{Cond}}{100}\right)^{0.6}$	کندانسور سیکل خنک کننده جذبی	
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Absorb}}{100}\right)^{0.6}$	جاذب سیکل خنک کننده جذبی	
$z = 16000 \times \left(\frac{A_{Evap}}{100}\right)^{0.6}$	اواپراتور سیکل خنک کننده جذبی	
$z = 12000 \times \left(\frac{A_{SHE}}{100}\right)^{0.6}$	مبدل حرارتی بخار سیکل خنک کنندہ جذبی	
$z = 516.62 \times (A_{Cond})^{0.6}$	کندانسور چرخه رانکین آلی	
$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$	توربين چرخه رانكين ألى	
$z = 200 \times \left(W_{Pump}\right)^{0.65}$	پمپ سیکل <sub>ر</sub> انکین آلی	
$Z = 130 \times \left(\frac{A_{heat \ exchanger}}{0.093}\right)^{0.78}$	مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۱	
$z = 4122 \times (A_{heat \ exchanger})^{0.6} z = 7900 \times (W_{Comp})^{0.62}$	مبدل حرارتی چرخه رانکین آلی ۲ کمپرسور سیکل رانکین ارگانیک	
$z = 8500 + 409 \times (A_{heat \ exchanger})^{0.8}$	مبدل حرارتی سیکل کلود	
$Z = 1000 \times (W_{elec})$	چرخه الکتروليز PEM	

### 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.

مقدار	پارامتر
۴۲	بازده انرژی سیستم (٪)
۵١	بازده اگزرژی سیستم (٪)
۴/۸۸	نرخ توليد هيدروژن(kg/hr)
440/1	توان خروجي چرخه الكترولايزر (kw)
17/77	توان خروجی چرخه مایع سازی(kw)
1420	توان خروجی کل(kw <i>)</i>

#### نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

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

جدول ۶: نتایج نابودی اگزرژی اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
47290	الكترولايزر (kw)
<i>٨۶/</i> ۲٩	اواپراتور چرخه جذبی(kw)
۲/۱۹۶	پمپ چرخه رانکین اصلاح شده(kw)
1700	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح شده(kw)
1849	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح شده(kw)
8/88	کندانسور چرخه جذبی(kw)
2221	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح شده(kw)
202	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح شده(kw)
41/98	ژنراتور چرخه جذبی(kw)
8/984	شیر انبساط چرخه جذبی(kw)
۶/۳۳	مبدل حرارتی بخار چرخه جذبی(kw)
۵/۰۹۴	مبدل حرارتی (kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی kw)۲)
۸۴۰/۵	ژنراتور مبدل حرارتی بخار (kw)
V/7 V V	کمپرسور چرخه کلود(kw)
۸١/١۶	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود(kw)
14/04	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود(kw)
<b>V</b> ٩/۶V	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود(kw)
۶/۳۲۸	مبدل حرارتی ۴ چرخه کلود(kw)
111/4	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود(kw)
0814.	کل سیستم(kw)

### سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

Archive of SID.ir

5.4

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 میدهد.

جدول ۷: نتایج نرخ هزینه اجزای مختلف سیستم

مقدار	پارامتر
81992	جاذب چرخه سرمایش جذبی(GJ\$))
١١٧٨	پمپ چرخه رانکین اصلاح شده(GJ/\$)
4.2200	توربین ۱ چرخه رانکین اصلاح شده(GJ/\$)
١١٢٩١	کندانسور چرخه سرمایش جذبی(GJ/\$)
17476	ژنراتور چرخه سرمایش جذبی(GJ/\$)
٩٣٢٢	مبدل حرارتی بخار چرخه سرمایش جذبی(GJ/\$)
1120200	توربین ۲ چرخه رانکین اصلاح شده(GJ/\$)
21212	کندانسور ۱ چرخه رانکین اصلاح شده(GJ/\$)
0.27806	الكترولايزر (GJ/\$)
٨۶٩٨	کندانسور ۲ چرخه رانکین اصلاح شده(GJ/\$)
88186	اواپراتور چرخه سرمایش جذبی(GJ/\$)
4.102	کمپرسور چرخه کلود(GJ/\$)
1946	مبدل حرارتی ۱ چرخه کلود(GJ/\$)
٨٥۴٩	مبدل حرارتی ۲ چرخه کلود(GJ/\$)
٨۵٢٠	مبدل حرارتی ۳ چرخه کلود(GJ/\$)
۸۵۱۶	مبدل حرارتی۴ چرخه کلود(GJ/\$)
٨٦٠٩	مبدل حرارتی ۵ چرخه کلود(GJ/\$)

جدول ۸ برخی از نتایج اساسی را برای تحلیل اقتصادی نشان میدهد. نرخ کل هزینه سیستم ۳۷/۱۶ دلار بر گیگا ژول است که نشان دهنده كارايى اقتصادى قابل توجه سيستم پيشنهادى است. هزينه توليد برق (LCOE) و هزينه توليد هيدروژن (LCOH) با مقادیر ۱۹/۸ سنت در هر کیلووات ساعت و ۲۴/۳۹دلار به ازای هر کیلوگرم، فاکتورهای حیاتی در ارزیابی اقتصادی سیستم هستند.

جدول۸: نتایج ارزیابی اقتصادی		
مقدار	پارامتر	
۱۹/۸	هزینه تولید برق( cent/kwh)	
26/29	هزينه توليد هيدروژن(kg/\$)	
١٨	دوره بازگشت سرمایه	
۳۷/۱۶	هزینه کل سیستم(GJ/\$)	

۲۰۵ تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی ...

#### ۸-۱- تحلیل پارامتریک

تجزیه و تحلیل پارامتریک یک تکنیک موثر برای ارزیابی عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف است که درک کاملی از سیستم مورد نظر ارائه میدهد. سیستم پیشنهادی بررسی میکند 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 میگذارند.

### ۱–۱–۸– اثر تغییرات بازده ایزنتروپیک توربین بر عملکرد سیستم

شکل ۲ چگونگی تأثیر تغییرات راندمان توربین بر توان تولیدی سیستم، تخریب کل اگزرژی، نرخ هزینه و همچنین راندمان انرژی و اگزرژی 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 الكتريكي دارد. از آنجايي كه الكترولايزر با استفاده از الكتريسيته توليد شده توسط توربین کار میکند، افزایش تولید توان باعث افزایش عملکرد الکترولایزر می شود و در نتیجه تولید هیدروژن در سیستم را افزایش میدهد. افزایش راندمان توربین منجر به بهبود راندمان انرژی و اگزرژی سیستم، در کنار کاهش هزینه تولید برق، هزینه تولید هیدروژن و نرخ هزینه کل سیستم شده است. افزایش اگزرژی نشان داده شده در این نمودار را میتوان به همبستگی مستقیم بین بازده اگزرژی و توان خروجی سیستم نسبت داد. با افزایش کار سیستم، اگزرژی آن نیز افزایش مییابد. افزایش نرخ هزینه را میتوان به این واقعیت نسبت داد که هزینههای سیستم در کنار قدرت کلی سیستم رشد میکنند و تجهیزات بزرگتر و جامعتری را ضروری میکنند. 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. اگزرژی به حداکثر کار قابل استخراج از سیستم اشاره دارد. به عبارت دیگر، کار مفید تولید شده توسط توربین در این سیستم را نشان میدهد. افزایش راندمان توربین به طور مثبت بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تأثیر می گذارد و در عین حال راندمان انرژی و

على عيوضي و همكاران

اگزرژی آن را نیز بهبود می بخشد. علاوه بر این، منجر به کاهش تخریب اگزرژی در سیستم میشود و در نتیجه توان خروجی افزایش مییابد. الف)



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

8.8

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

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 اگزرژی، نرخ هزینه و کارایی انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می گذارد. با افزایش فشار خروجی توربین ۱، تخریب اگزرژی در سیستم نیز افزایش مییابد که منجر به تلفات بیشتر در توان خروجی میشود و بر عملکرد سیستم تأثیر منفی می گذارد. از آنجایی که توان خروجی مستقیماً با بازده اگزرژی مرتبط است، افزایش تخریب اگزرژی منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی 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.





شکل ۳: تأثیر تغییرات فشار در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم الف)بازده انرژی و اگزرژی ب) نرخ هزینه ج) نابودی اگزرژی 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 اگزرژی، نرخ هزینه و راندمان انرژی و اگزرژی بررسی می کند. با افزایش دمای خروجی توربین ۱ از ۷۰ درجه سانتی گراد به ۹۰ درجه سانتی گراد، تلفات سیستم و تخریب اگزرژی افزایش مییابد. در نتیجه، ظرفیت انجام کار کاهش مییابد و منجر به کاهش توان خروجی میشود. راندمان اگزرژی مستقیماً با توان خروجی مرتبط است. بنابراین، کاهش توان تولیدی سیستم بر عملکرد ترمودینامیکی آن تأثیر منفی می گذارد و منجر به کاهش راندمان انرژی و اگزرژی میشود. کاهش ظرفیت تولید منجر به کاهش هزینه تولید برق، کاهش هزینه تولید هیدروژن و نرخ کلی سرمایه گذاری در تجهیزات بزرگتر میشود و در نتیجه قابلیت اقتصادی سیستم را افزایش میدهد.



Archive of SID.ir

سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

۲۰۷ تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی ...



شکل۴: تأثیر تغییرات دما در خروجی توربین ۱ روی عملکرد سیستم الف)بازده انرژی و اگزرژی ب) نرخ هزینه ج) توان د) نابودی اگزرژی

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 اگزرژی، نرخ هزینه و بازده انرژی و اگزرژی سیستم تأثیر می گذارد. 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،

علی عیوضی و همکاران

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



#### نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک



شکل ۵: تأثیر تغییرات دما در خروجی مولد بخار بازیافت حرارتی روی عملکرد سیستم الف)بازده انرژی و اگزرژی ب) نابودی اگزرژی ج) هزینه د) توان

#### ۸–۲– بهینه سازی دو هدفه

این مطالعه از بهینه سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه برای تعیین بهترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه سازی استفاده می کند. هدف یافتن بهینه ترین مقادیر برای دو تابع هدف راندمان اگزرژی و هزینه سیستم است. بهینه سازی بر بهبود پارامترهای عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی، به ویژه با افزایش کارایی اگزرژی و کاهش همزمان هزینه های سیستم متمرکز است. جدول ۹ نتایج بدست آمده از طریق بهینه سازی الگوریتم ژنتیک دوهدفه را بیان می کند. نتایج بهینه سازی نشان میدهد که با عملکرد بهینه، سیستم میتواند به بازده انرژی ۲۴۰٬ بازده اگزرژی ۵۳٪ و نرخ هزینه ۳۷/۰۷ دلار بر گیگا ژول برسد.

بهينه	ىقادىر	o : 9	جدول
-------	--------	-------	------

مقدار بهينه	پارامتر
۳۷/۰۷	هزینه کل سیستم(GJ/\$)
۵۳	بازده اگزرژی سیستم(%)
44	بازده انرژی سیستم(%)
٧٠	بازده ايزونتروپيک توربين(%)
٨٧	بازده ایزونتروپیک کمپرسور (%)
٨٢	بازده ایزونتروپیک پمپ(%)
49/90	فشار خروجی توربین ۱ (kPa)
۱۳۳/۳	دمای ورودی توربین ۲(C)
1985	هزينه توليد برق (cent/kwh)
26/61	هزينه (\$/kg)

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

# Archive of SID.ir

سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

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 آنها 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 اگزرژی 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 اگزرژی و هزینه تولید برق را نشان میدهد، در حالی که شکل ۸ بر بازده اگزرژی و هزينه توليد هيدروژن متمركز است.



شکل۷:نمودار پارتو بازده اگزرژی و هزینه تولید الکتریسیته

Eta\_exergy(%)

0.52

0.5

0.54

0.56

0.46

0.48



شکل۸: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 می کند. 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 مایع سازی کلود به شکل مایع تبدیل می شود و کارایی ذخیره سازی و حمل و نقل آن را افزایش میدهد. با پیش سرد کردن گاز هیدروژن در چیلر جذبی انرژی مصرفی در چرخه مایع سازی کاهش مییابد و غوطه ور 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 می شود. 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 قابلتوجه در تخریب اگزرژی برای سیستم پیشنهادی شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی عملكرد سيستم تحت شرايط مختلف انجام شد. اين تحقيق با هدف بهینه سازی پیکربندی اجزای سیستم برای حداکثر بازده در شرایط ایده آل و همچنین افزایش عملکرد ترمودینامیکی سیستم تمرکز دارد. سیستم تجزیه و تحلیل شده عملکرد رضایت بخشی 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

### علی عیوضی و همکاران

سیستمی انجام شده است که با کارایی اقتصادی بالا مشخص می شود. یافته ها نشان می دهد که دستیابی به کارایی اقتصادی مطلوب برای کل سیستم هزینه ای معادل ۳۷/۱۶ دلار به ازای هرگیگا ژول را به همراه دارد. تأثیر شش متغیر تصمیم گیری 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. بهینه سازی دو هدفه به طور قابل توجهی بازده اگزرژی سیستم را افزایش می دهد، با استفاده از معیار تصمیم گیری تاپسیس نقطه عملکرد بهینه شناسایی شده و سیستمی با نرخ هزینه بهینه جهت بهبود توجیه قتصادی به کارگیری سیستم تولید همزمان پیشنهادی ارایه می کند.

Archive of SID.ir

#### ۱۰-فهرست علائم

ئم انگلیسی	
اگزرژی، kJ /kg	Ex
انتالپی مخصوص، kJ/kg	h
شدت جریان جرمی، kg/s	ṁ
فشار، kPa	Р
آهنگ انتقال گرما، kW	Ż
انتروپی مخصوص، kJ /kg.K	S
دما، °C	Т
آهنگ کار مبادله شده، kW	Ŵ
هزینه تولید برق، cent/kwh	LCOE
هزینه تولید هیدروژن، kg/\$g\$	LCOH
هزينه عملياتى سالانه	AOC
ضریب بازگشت سرمایه	CRF
کل هزینه های عملیاتی	TOC
یونانی	
بازده، ٪	η
	زيرنويس
خروجى	e
اگزرژی	Ex
ورودى	i
كل	Total
توربين	Turb
الكترولايزر	PEM

۲۱۰

سال ۱۴۰۳/ دوره بهار و تابستان/ شماره ۱

- [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-enviroexergoeconomic 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 gridconnected 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.

#### 11- منابع

- [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.

علی عیوضی و همکاران

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 thermoenvironomic 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). Thermoeconomic 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

### ۲۱۱ تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی ...