

مطالعه محدود به بررسی اثر هندسه و مشخصات اجکتور بود و در آن ارزیابی چندمعیاره شامل انرژی، انرژی و اثرات اقتصادی انجام نگردید. یانگ و همکاران [۲] سیستم نوین تلفیقی ORC با ERC را بوسیله سیالات عامل زئوتروپیک مورد ارزیابی قرار دادند. بازده انرژی این سیستم در بیشترین حالت برای ترکیب ۴۰ به ۶۰ ایزوبوتان - پنتان برابر با ۱۰/۲۹ درصد و بیشترین بازده انرژی برای ترکیب ۷۰ به ۳۰ ایزوبوتان - پنتان برابر با ۱۰/۷۷ درصد محاسبه گردید. این پژوهش از تلفات صنعتی استفاده نکرد و تولید سرمایه در دو سطح دمایی مد نظر قرار نگرفت. رستمزاده و همکاران [۳] از گرمای اتلافی ORC در سیستم تبرید اجکتوری استفاده نمودند و تلاش کردند با اضافه نمودن تجهیزات جانبی بازده سیستم پایه را افزایش دهند. نتایج این پژوهش نشان داد که چرخه ORC همراه با بازیاب و گرمکن تغذیه سیال دارای بیشترین بازده انرژی و انرژی بوده که به ترتیب برابر ۳۶/۱۷ و ۵۱/۱۷ درصد است. در این حالت از سیال عامل R123 برای ORC و از ایزوبوتان برای ERC استفاده گردیده است. ژنگ و ونگ [۴] سیستمی مبتنی بر ORC و ERC پیشنهاد کردند که با منبع گرمایی دما پایین قابل استحصال بود که در این سیستم، جریان خروجی توربین به عنوان سیال اولیه اجکتور عمل می‌کند. در مدل پیشنهادی این محققان از سیال عامل R245fa استفاده شده و بازده انرژی و انرژی به ترتیب برابر ۳۴/۱ و ۵۶/۸ درصد محاسبه گردید. با وجود نتایج مثبت این تحقیق، تحلیل جامع چندمعیاره و بررسی عملکرد سیستم در سناریوهای واقعی عملیاتی ارائه نگردید. در پژوهشی دیگر به منظور بررسی تاثیر سیال عامل بر عملکرد چرخه‌های تولید همزمان، حبیبزاده و همکاران [۵] اثر ۵ سیال عامل مختلف را در ساختار تولید همزمان از منظر ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج بدست آمده، سیال عامل R601 به عنوان بهترین سیال پیشنهاد گردید. همچنین این محققان مقادیر بهینه برای پارامترهای کلیدی سیستم را محاسبه نمودند. به منظور افزایش قابلیت ذخیره‌سازی و ساختاردهی بهتر به سیستم‌های توان‌تبرید، شی و عسگری [۶] به طراحی یک سیستم ذخیره‌ساز هوا به همراه سیستم ترکیبی چندفشاره رانکین آلی و تبرید اجکتوری پرداختند. در این ساختار از سیالات عامل چندجزئی استفاده شده و سیستم از منظر انرژی، انرژی، انرژی، ترمو اقتصادی و محیط‌زیستی مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین بازده ۵۴/۲۵ درصد گزارش گردید. به دلیل اینکه در بسیاری از صنایع نیاز به تامین سرمایه در سطوح دمایی مختلف بود، عبداللہی و همکاران [۷] چرخه رانکین آلی را با چرخه تبرید اجکتوری آبشاری به منظور رفع نیاز توان و برودت در دو سطح (تهویه مطبوع و یخچال) تلفیق کردند که باعث افزایش بازده انرژی و انرژی سیستم ترکیبی به ۴۸/۳۲ درصد و ۶۵/۳ درصد گردید. بالاترین بازده ذکر شده مربوط به تلفیق چرخه رانکین آلی مجهز به مبدل میانی و بازیاب با چرخه تبرید اجکتوری آبشاری معرفی گردید. به منظور استفاده از گرما در سطوحی دمایی بالاتر، حاوی عقیلی و همکاران [۸] تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی یک سیستم یکپارچه انرژی خورشیدی متشکل از گردآور سهموی خطی، چرخه رانکین آلی و چرخه تبرید اجکتوری دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی را ارائه دادند. یافته‌ها نشان‌دهنده بازده انرژی ۲۵/۱ درصد و بازده انرژی ۱۲/۶۷ درصد بود. خروجی توان خالص سیستم ۲۵۸/۹ کیلووات و میزان تخریب انرژی کل ۲۳۳۳

کیلووات گزارش گردید و هزینه عملیاتی سیستم ۳/۷۵۲ دلار آمریکا در ساعت محاسبه شد.

با توجه به مرور منابع فوق، مشخص می‌شود که مطالعات گذشته عمدتاً بر افزایش توان خروجی یا بازده انرژی و انرژی تمرکز کرده و تحلیل جامع چندهدفه و بهینه‌سازی سیستم با تولید همزمان مبتنی بر ORC و ERC ارائه نگردیده است. لذا با استفاده از سیال عامل تولوئن و بهره‌گیری از تلفات صنعتی برای تولید همزمان برق و سرمایه در ساختاری دوگانه و حلقوی و در دو سطح دمایی، سیستمی نوین طراحی گردید و از تحلیل چندمعیاره مبتنی بر انرژی، انرژی، اقتصاد، محیط‌زیست و ایمنی برخوردار گردید.

نوآوری‌های طرح پیشنهادی به طور خلاصه به شرح زیر بیان می‌شود:

- ارائه یک سیستم نوین DL/CCP (CCP حلقه دوگانه) برای تولید برق و سرمایه در دو سطح دمایی مختلف با استفاده از تلفات صنعتی

- آنالیز سیستم پیشنهادی از دیدگاه انرژی، انرژی، اقتصادی، محیط‌زیست و ایمنی.

- بهینه‌سازی چندهدفه سیستم پیشنهادی با در نظر گرفتن معیارهای انرژی، انرژی، اقتصادی، محیط‌زیستی و ایمنی، با استفاده از تکنیک NSGA-II.

۲- توضیح سیستم

در سیستم ارائه شده در شکل ۱ با استفاده از اتصالات صنعتی تولید توان و برودت در دو سطح دمایی انجام می‌شود. سیال عامل استفاده شده تولوئن بوده که توانایی کارکرد در محدوده دمایی بالاتری را دارا بوده و اثرات زیست‌محیطی و مخاطرات پایینی برای گرمایش زمین دارد. طرحواره سامانه‌ی پیشنهادی بر پایه حلقه دوگانه طراحی شده است. این سامانه برای تأمین هم‌زمان توان الکتریکی و بار سرمایه‌ی مورد نیاز واحدهای تجاری و مسکونی طراحی شده و بر پایه‌ی یک پیکربندی ترکیبی شامل دو چرخه رانکین آلی (ORC) و دو چرخه تبرید اجکتوری (ERC) عمل می‌کند. تولید سرمایه در دو سطح دمایی متمایز، پاسخ‌گوی نیازهای تهویه مطبوع و انجماد بوده و تولید توان نیز از طریق دو توربین در دو سطح فشاری صورت می‌پذیرد. در این سامانه، محصولات احتراق بیوگاز به‌عنوان منبع گرمایی، انرژی ورودی چرخه ORC دمای بالا را فراهم می‌کنند. بخار اشباع پس از خروج از ژنراتور وارد توربین شده و توان الکتریکی تولید می‌نماید (حالت ۱→۲). جریان خروجی توربین به‌عنوان جریان اولیه وارد اجکتور نخست شده و بخار کم‌فشار خروجی از تبخیرکن اول را به‌عنوان جریان ثانویه مکش می‌کند (حالت ۳). دو جریان پس از اختلاط در محفظه مخلوط‌کننده، با فشاری افزایش یافته از اجکتور خارج می‌شوند (حالت ۵). فرایند مذکور در بخش کم‌فشار نیز تکرار می‌شود؛ بدین صورت که خروجی توربین دوم وارد اجکتور دوم شده (حالت ۱۳) و بخار کم‌دما و کم‌فشار خروجی از تبخیرکن دوم را مکش می‌کند (حالت ۱۸)، و متعاقباً جریان با فشار بالاتر از اجکتور دوم خارج می‌گردد (حالت ۱۴). جریان خروجی از دو اجکتور وارد چگالنده شده و پس از تقطیر به دو شاخه تقسیم می‌شود. شاخه نخست پس از عبور از شیر انبساط شماره ۱ (حالت ۹→۸) وارد تبخیرکن اول شده و سرمایه‌ی مورد نیاز تهویه مطبوع را تأمین می‌کند (حالت ۳). شاخه دوم به حلقه

۳-۴- تحلیل ترموآکونومیکی

معادلات موازنه هزینه به همراه معادلات کمکی برای هر عضو سیستم اعمال شده‌اند. معادله موازنه هزینه می‌تواند به صورت نرخ هزینه مربوط به تولید محصول سیستم (\dot{C}_P) برابر با نرخ کل هزینه-های ایجادشده برای تولید محصول (\dot{C}_F) و نرخ هزینه در ارتباط با سرمایه گذاری ثابت (\dot{Z}^{CI}) و هزینه اجرا و نگهداری (\dot{Z}^{OM}) باشد [۱۵]:

$$\dot{C}_{P,total} = \dot{C}_{F,total} + \dot{Z}_{total}^{CI} + \dot{Z}_{total}^{OM} \quad (۴)$$

که در آن:

$$\dot{C} = c \times \dot{E}x \quad (۵)$$

۳-۵- مدل سازی ریاضی تحلیل اگزرژی- محیط زیستی

برای هر جز از یک سامانه، می‌توان موازنه‌ی کلی اگزرژی- محیط‌زیستی را مطابق رابطه‌ی ارائه‌شده نوشت [۱۶]:

$$\dot{B}_{P,i} = \dot{B}_{F,i} + \dot{Y}_i \quad (۶)$$

در فرمول (۶)، نمادهای $\dot{B}_{P,i}$ ، $\dot{B}_{F,i}$ و \dot{Y}_i به ترتیب معرف میزان اثرگذاری زیست‌محیطی تجهیز، جریان مرتبط با سوخت و جریان خروجی به‌عنوان محصول هستند. همچنین ضرایب $b_{P,i}$ و $b_{F,i}$ شدت اثر زیست‌محیطی جریان‌های سوخت و محصول را مشخص می‌سازند که طبق روابط زیر تعریف می‌شوند [۱۶]:

$$\dot{B}_{F,i} = b_{F,i} \dot{E}x_{F,i} \quad (۷)$$

$$\dot{B}_{P,i} = b_{P,i} \dot{E}x_{P,i} \quad (۸)$$

مشابه تحلیل ترموآقتصادی، می‌توان برای جریان‌های ورودی، خروجی، توان مکانیکی و تبادل گرما نیز ضرایب زیست‌محیطی تعریف کرد. این روابط در معادلات زیر آمده‌اند [۱۶]:

$$\dot{B}_{W,i} = b_{W,i} \dot{E}x_{W,i} \quad (۹)$$

$$\dot{B}_{in,i} = b_{in,i} \dot{E}x_{in,i} \quad (۱۰)$$

$$\dot{B}_{Q,i} = b_{Q,i} \dot{E}x_{Q,i} \quad (۱۱)$$

$$\dot{B}_{out,i} = b_{out,i} \dot{E}x_{out,i} \quad (۱۲)$$

برای محاسبه‌ی اثرات محیط‌زیستی هر تجهیز، از رویکرد ارزیابی چرخه‌ی عمر (LCA) استفاده می‌شود. در این روش، سهم ناشی از ساخت (\dot{Y}_i^{Co}) ، بهره‌برداری و نگهداری (\dot{Y}_i^{OM}) و پایان عمر تجهیز (\dot{Y}_i^{Di}) در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه زیر جمع‌بندی می‌گردد [۱۶]:

$$\dot{Y}_i = \dot{Y}_i^{Co} + \dot{Y}_i^{OM} + \dot{Y}_i^{Di} \quad (۱۳)$$

در عمل، این مقادیر عمدتاً با بهره‌گیری از شاخص Eco-Indicator 99 و متناسب با جرم تجهیزات برآورد می‌شوند. علاوه بر این، بخشی از

سمت چپ هدایت شده و پس از عبور از پمپ (حالت ۱۱→۱۰) وارد بخش مربوطه می‌شود. بخش دیگری از جریان چگالیده (حالت ۱۵) نیز وارد حلقه سمت راست شده و با انجام فرایندی مشابه، بار سرمایشی دمای پایین موردنیاز کاربردهای انجمادی را فراهم می‌سازد.

۳- روش شناسی

۳-۱- فرضیات ترمودینامیکی

فرضیات ارائه‌شده برای این تحلیل این زیرسیستم عبارتند از:
 - دما و هوای محیط ۲۹۸ کلوین و ۱ بار فرض شده است و تمامی فرایندها در حالت پایا هستند [۷].
 - بازده ایزنتروپیک توربین و پمپ ۹۰ و ۹۵ درصد فرض می‌گردد [۹].
 - دمای تهویه مطبوع و یخچال به ترتیب ۲۸۳/۲ و ۲۶۸/۹ کلوین در نظر گرفته شده است [۷].
 - دمای چگالنده ۳۰۳ کلوین فرض شده است [۷].
 - برای مدلسازی اجکتور و فرضیات آن از مرجع [۷] انجام شده است.
 - دمای اتاق سرد تبخیرکنها ۵ کلوین بیشتر از دمای تبخیرکن فرض شده است [۷].
 - اختلاف دمای تنگش ژنراتور ۱۰ کلوین لحاظ شده است [۱۰].
 - محصولات احتراق زیست‌گاز دارای دمای ۷۱۸/۱ کلوین، فشار ۱۰۵/۳ کیلوپاسکال، دبی جرمی ۴/۶۶۷ کیلوگرم بر ثانیه و هزینه واحد ۱۲/۵۷ دلار بر گیگاژول هستند. همچنین در مرجع ذکرشده بررسی فرایند احتراق هم به شکل مبسوط بیان گردیده است [۱۱].

۳-۲- موازنه جرم و انرژی

با فرض شرایط پایا برای هر حجم کنترل در شکل ۱، موازنه جرم و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم به‌صورت روابط (۱) و (۲) خواهد بود [۱۲]:

$$\sum_i \dot{m}_{in} = \sum_o \dot{m}_{out} \quad (۱)$$

$$\sum_i \dot{E}_{in} = \sum_o \dot{E}_{out} \quad (۲)$$

که \dot{E}_{in} مقدار انرژی ورودی و \dot{E}_{out} مقدار انرژی خروجی به حجم کنترل است.

۳-۳- آنالیز اگزرژی

اگزرژی هر جریان، بیشینه کار نظری قابل حصول از آن جریان است، در شرایطی که آن جریان فقط با محیط تبادل گرما داشته باشد و به فشار و دمای محیط برسد. با صرف‌نظرکردن از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل جریان، موازنه اگزرژی برای هر یک از حجم کنترل‌ها از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

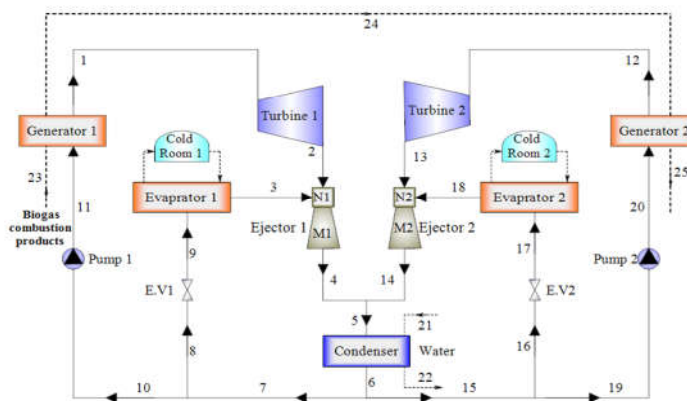
$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P - \dot{E}x_L \quad (۳)$$

که $\dot{E}x_F$ ، $\dot{E}x_P$ و $\dot{E}x_L$ به‌ترتیب مربوط به نرخ اگزرژی سوخت واردشده، نرخ اگزرژی محصولات تولیدشده و نرخ اگزرژی اتلافی هستند

[۱۳، ۱۴].

¹ Capital Investment

² Operating and Maintenance



شکل ۱- سیستم حلقه دوگانه پیشنهادی

می‌شود.

اثرات زیست‌محیطی به دلیل تخریب انرژی به وجود می‌آید. هنگامی که این مقدار افزایش یابد، هزینه زیست‌محیطی مضاعفی به سیستم تحمیل می‌شود. این پارامتر از طریق رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\dot{B}_{D,i} = b_{P,i} \dot{E}_{D,i} \quad (If: \dot{E}_{P,i} = Constant) \quad (14)$$

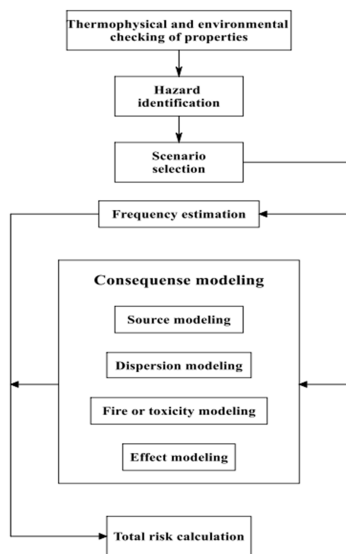
۳-۶- مدل‌سازی ایمنی

برای ارزیابی ایمنی سیستم، از روش تحلیل کمی ریسک (QRA) استفاده شده است. این روش شامل چندین مرحله متوالی جهت تعیین ریسک نهایی سامانه است که سلسله‌مراتب اجرایی آن در فلوچارت شکل ۲ نمایش داده شده است. مراحل اصلی تحلیل شامل انتخاب سیال کاری، شناسایی مخاطرات، انتخاب سناریوهای محتمل، تحلیل فراوانی وقوع، تحلیل پیامد و در نهایت کمی‌سازی پیامدها است.

در این بخش، کد محاسباتی اختصاصی با در نظر گرفتن اجزای مختلف چرخه طراحی گردیده است تا میزان نشتی هر تجهیز و اثرات احتمالی آن بر نواحی اطراف محل حادثه را ارزیابی نماید. نتایج حاصل از این تحلیل، شامل برآورد میزان خسارت انسانی (اعم از مصدومیت یا مرگ) بوده که بر اساس آن، مقدار ریسک نهایی سیستم محاسبه می‌شود. بدیهی است با کاهش این مقدار، ایمنی کلی سیستم افزایش یافته و سطح پایداری عملکرد سامانه بهبود می‌یابد [۱۷].

۳-۷- روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر طبقه‌بندی غیرمغلوب^۱ (NSGA)

روش NSGA از تلفیق کد نوشته شده در نرم افزار EES با فضای بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB بدست می‌آید. از مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌ها تشخیص جبهه پارتو^۲ برای مسائل غیرمحدب، کاهش زمان گام و ترسیم جبهه پارتو در یک گام است. در این روش، متغیرهای تصمیم در ابتدا به شکل تصادفی با در نظر گرفتن مقررات بهینه‌سازی انتخاب شده و روش NSGA برای تک‌تک جمعیت انتخاب شده بر مبنای تابع هدف چندگانه اعمال می‌شود. عملگرهای ژنتیک در روش NSGA به منظور بهینه‌سازی هر فرد در یک فرایند تکاملی اعمال



شکل ۲- فلوچارت تحلیل ایمنی سیستم

بنابراین پاسخ‌ها با رتبه بالاتر که بعد از بررسی نسل‌های مختلف دارای ویژگی برتر هستند، ذخیره شده و جواب‌های غیرمغلوب به عنوان جواب‌های بهینه تشکیل جبهه پارتو می‌دهند. فلوچارت این روش در شکل ۳ ترسیم شده است. این روش به دنبال افزایش بازده انرژی و بازده انرژی و کاهش هزینه واحد تولید محصول، تاثیر محیط‌زیستی محصول و ریسک نهایی می‌باشد. در این روش با انتخاب محدوده متغیرهای تصمیم و همچنین مشخص کردن تابع هدف، عملیات بهینه‌سازی انجام می‌گردد. در حین بهینه‌سازی تعداد جمعیت برابر با ۵۰۰ انتخاب می‌گردد. نرخ جهش و شمارش تصادفی ۰/۱ و ۰/۹ بوده و زمانی بیشتر از ۱۰ ساعت برای همگرایی نیاز است [۱۸، ۱۹].

این روش توانایی بالایی در حل مسائل چندهدفه غیرخطی داشته و بدون نیاز به وزن‌دهی اولیه، جبهه پارتوی متنوع و دقیقی ارائه می‌کند. سازوکار مرتب‌سازی پارتو موجب حفظ تنوع راه‌حل‌ها و همگرایی سریع‌تر آن نسبت به الگوریتم‌های دیگری مانند MOGA، SPEA و SPEA2 می‌شود. همچنین، استقلال آن از مشتق و پایداری مناسب در

^۱ Non-dominant Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

^۲ Pareto frontier

تابع از میان اقتصاد و محیط‌زیست، سه ضلع تابع هدف را تشکیل می‌دهد. چهارسناریوی انرژی-اقتصاد-ریسک (سناریوی اول)، انرژی-محیط‌زیست-ریسک (سناریوی دوم)، انرژی-محیط‌زیست-ریسک (سناریوی سوم) و انرژی-اقتصاد-ریسک (سناریوی چهارم) مشخص گردید.

جدول ۳- اعتبارسنجی چرخه رانکین آلی با مرجع [۲۱]

پارامتر	مرجع (۲۱)	پژوهش حاضر
بار ژنراتور (kW)	۲۵۲	۲۵۲
بار چگالنده (kW)	۲۰۴	۲۰۳/۴
توان پمپ (kW)	۱/۹۶	۳/۰۹۴
توان توربین (kW)	۵۱	۳/۰۹۴
توان خالص (kW)	۴۹/۰۴	۴۸/۵۸
بازده چرخه (%)	۱۹/۴۶	۲۱/۷۳
مقدار سیال عامل (kg)	۱/۰۶	۱/۰۴۳
مقدار آب (kg)	۴/۶۸	۴/۸۶۳

با توجه به محدوده متغیرهای تصمیم در معادله و انجام فرایند با روش NSGA که پیشتر به تفصیل شرح داده شد، مقادیر بهینه انتخاب و مشخص گردیده‌اند. طبق نتایج جدول ۴، در سه سناریوی اول همه توابع هدف اتخاذ شده به مقدار بهینه نرسیده‌اند، در حالیکه در سناریوی ۴ مقادیر بهینه تمام توابع هدف از مقدار پایه خود بهینه‌تر بوده و پاسخ مطلوب‌تری می‌دهند. در سناریوی ۴، بازده انرژی و انرژی به $۵۶/۰۹$ و $۲۵/۴۵$ درصد، مقدار هزینه واحد تولید محصول، اثر محیط‌زیستی محصول و ریسک کلی به $۳۷/۵۴$ دلار بر گیگاژول، ۴۰۲۶ میلیون نقطه گیگاژول و ۱۷۱۶ دلار بر سال رسیده است.

۳-۴- نتایج بهینه تمامی سناریوها

جبهه پارتو نشان‌داده‌شده در فلوچارت مربوط به سناریوی چهارم است که بهترین پاسخ‌های حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه را ارائه می‌دهد. برای درک بهتر، تصویر دوبعدی این جبهه نیز ترسیم شده است. بر اساس این نتایج، چهار نقطه‌ی شاخص A، B، C و D به‌عنوان حالت‌های بهینه انتخاب شده‌اند که مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق داده‌ها، بیشترین بازده انرژی کل با مقدار $۶۰/۸۱$ درصد در نقطه‌ی A به دست آمده است. این مقدار در مقایسه با حالت پایه ($۴۷/۰۵$ درصد) افزایش قابل‌توجهی دارد و نشان‌دهنده‌ی بهبود چشمگیر عملکرد گرمایی سیستم است. با وجود این، هزینه واحد محصول در این حالت برابر با $۴۲/۹۴$ دلار بر گیگاژول بوده و نسبتاً بالا است. بنابراین نقطه‌ی A به‌عنوان حالت بهینه از دیدگاه انرژی شناخته می‌شود. در نقطه‌ی B، تمرکز بر بهینه‌سازی اقتصادی موجب کاهش هزینه واحد محصول به کمترین مقدار یعنی $۳۲/۰۸$ دلار بر گیگاژول شده است. هرچند بازده انرژی در این نقطه ($۳۰/۲۱$ درصد) کمتر است، اما با کاهش هزینه و اثرات زیست‌محیطی (۳۷۵۱ میلیون نقطه بر گیگاژول)، این حالت به‌عنوان گزینه‌ی اقتصادی و پایدار از نظر محیط‌زیستی مطرح می‌شود.

مواجهه با توابع پیچیده، NSGA-II را به گزینه‌ی مناسب برای بهینه‌سازی مدل حاضر تبدیل کرده است. در نهایت روابط حاصل از سیستم کل به‌صورت جدول ۱ بیان می‌گردد.

جدول ۱- روابط کلیدی سیستم برای تحلیل انرژی، انرژی، اقتصاد و محیط‌زیستی کل

توان خالص خروجی	$W_{net} = W_{t1} + W_{t2} - W_{p1} - W_{p2}$
ضریب عملکرد سیستم	$\eta_{en} = \frac{W_{net} + \dot{Q}_{e1} + \dot{Q}_{e2}}{\dot{Q}_{g1} + \dot{Q}_{g2}}$
بازده انرژی کل	$\eta_{ex,tot} = \frac{W_{net} + \dot{Q}_{e1} \left(\frac{T_0}{T_{CR1}} - 1 \right) + \dot{Q}_{e2} \left(\frac{T_0}{T_{CR2}} - 1 \right)}{\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{25}}$
هزینه واحد تولید محصول	$UCP_{tot} = \frac{\dot{C}_{w,net} + c_{q,e1} \dot{Q}_{e1} \left(\frac{T_0}{T_{CR1}} - 1 \right) + c_{q,e2} \dot{Q}_{e2} \left(\frac{T_0}{T_{CR2}} - 1 \right)}{W_{net} + \dot{Q}_{e1} \left(\frac{T_0}{T_{CR1}} - 1 \right) + \dot{Q}_{e2} \left(\frac{T_0}{T_{CR2}} - 1 \right)}$
تأثیر محیط‌زیستی محصول	$EEP_{tot} = \frac{\dot{B}_{w,net} + b_{q,e1} \dot{Q}_{e1} \left(\frac{T_0}{T_{CR1}} - 1 \right) + b_{q,e2} \dot{Q}_{e2} \left(\frac{T_0}{T_{CR2}} - 1 \right)}{W_{net} + \dot{Q}_{e1} \left(\frac{T_0}{T_{CR1}} - 1 \right) + \dot{Q}_{e2} \left(\frac{T_0}{T_{CR2}} - 1 \right)}$

۴- نتایج

۴-۱- صحت‌سنجی طرح

با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی دارای دو زیر سیستم رانکین آلی و تبرید اجکتوری است، این دو سیستم اعتبارسنجی می‌گردند. برای اعتبارسنجی چرخه تبرید اجکتوری، از مدل مربوط به تحقیق اسمیرسیو و همکاران [۲۰] استفاده شده و نتایج حاصل در جدول ۲ مشخص شده است.

همچنین برای اعتبارسنجی چرخه رانکین آلی نیز، مدل پیشنهادی را با پژوهش صفریان و آرامون [۲۱] اعتبارسنجی کرده و نتیجه در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

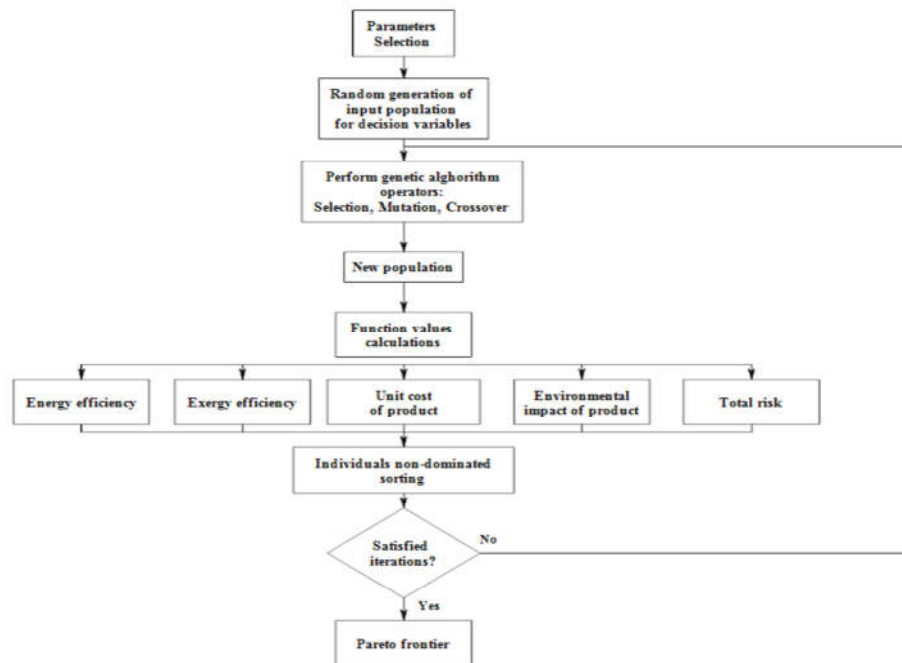
جدول ۲- اعتبارسنجی چرخه تبرید اجکتوری با مرجع [۲۰]

پارامتر	مرجع [۲۰]	پژوهش حاضر
بار ژنراتور (kW)	۹	۸/۷۱۳
بار چگالنده (kW)	۱/۷۵	۱/۷۰۶
ظرفیت تبرید (kW)	۱۱/۲۸	۹/۸۲۶
توان مصرفی پمپ (kW)	۰/۰۲	۰/۰۱۷
نسبت ورود جرمی اجکتور (μ)	۰/۲۴	۰/۲۴۲
ضریب عملکرد چرخه تبرید	۰/۱۹	۰/۱۹۵۴

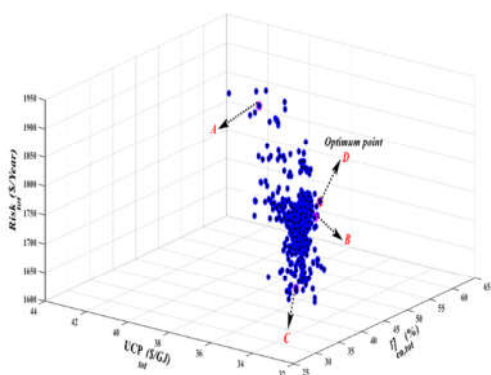
از نتایج بدست آمده می‌توان اذعان داشت که هر دو اعتبارسنجی دارای دقت بالایی بوده و میزان اختلاف نسبی کمی با مرجع دارد.

۴-۲- نتایج کلی

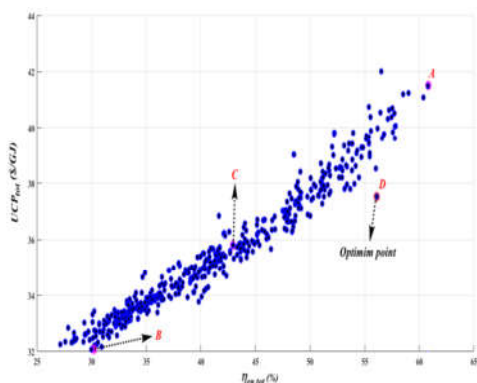
در این مطالعه، روش بهینه‌سازی چند هدفه برای چهار سناریوی بسط داده شده است. در تمامی این سناریوها یکی از پایه‌های ثابت تابع هدف، مقدار ریسک بوده است. یک تابع از میان انرژی و انرژی و یک



شکل ۳- بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک مبتنی بر NSGA



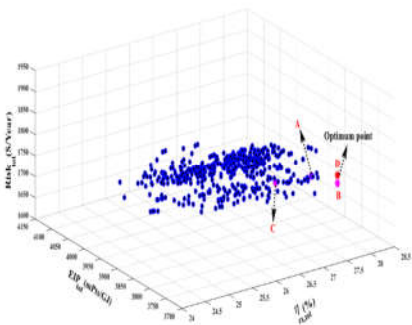
شکل ۲- نمودار سه بعدی جبهه پارتو مبتنی انرژی- اقتصاد- ایمنی



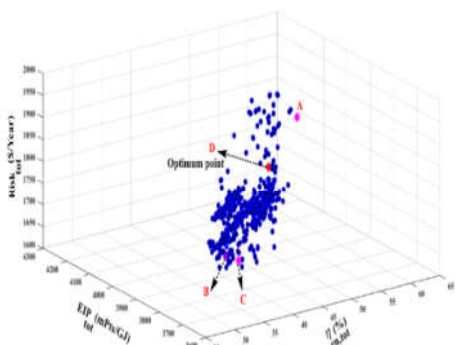
شکل ۳- نمودار دوبعدی جبهه پارتو مبتنی بر انرژی- اقتصاد- ایمنی

جدول ۴- نتایج سناریو مختلف بهینه‌سازی NSGA

سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	حالت پایه	مقادیر توابع هدف
۵۶/۰۹	۳۳/۳۷	۳۰/۸۳	۵۷/۵۲	۴۷/۰۵	بازده انرژی η_{en} (%)
۲۵/۴۵	۲۷/۶۶	۲۷/۸	۲۳/۴۵	۲۴/۱۸	بازده انرژی η_{ex} (%)
۳۷/۵۴	۳۴/۲۵	۳۴/۵۵	۴۱/۷۱	۳۸/۷۶	هزینه واحد محصول، UCP_{tot} (\$/G)
۴۰۲۶	۳۸۲۲	۳۷۷۳	۴۱۴۸	۴۱۷۷	تأثیر محیط‌زیستی EEP_{tot} (mPts/G)
۱۷۱۶	۱۶۹۴	۱۷۵۶	۱۷۱۶	۱۷۹۸	ریسک کلی، $Risk_{tot}$ (\$/year)



شکل ۵- نمودار سه بعدی جبهه پارتو مبتنی اگزورزی- محیط زیست-ایمنی

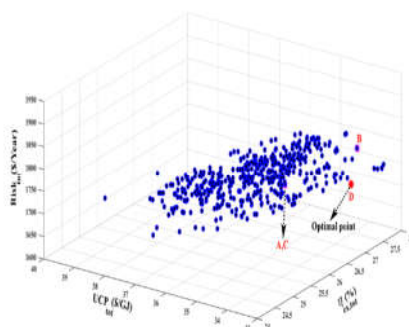


شکل ۶- نمودار سه بعدی جبهه پارتو مبتنی انرژی- محیط زیست- ایمنی

نقطه‌ی D نیز با بازده ۲۷/۶۶ درصد، تأثیر زیست محیطی ۳۸۲۲ میلیون نقطه بر گیگاژول و ریسک ۱۶۹۴ دلار بر سال، حالتی متعادل ارائه می‌دهد. در سناریوی سوم، بهینه‌سازی سیستم با توجه به سه معیار بازده انرژی، اثرات زیست محیطی و ریسک کلی انجام شده است. نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که بیشترین بازده انرژی کل در نقطه‌ی A به دست آمده که نسبت به حالت پایه بهبود قابل توجهی دارد. کمترین تأثیر محیط‌زیستی محصول در نقطه‌ی B مشاهده شده و نشان‌دهنده‌ی کاهش آلاینده‌ها و مصرف انرژی اولیه در این حالت است. همچنین، کمترین ریسک کلی در نقطه‌ی C حاصل شده و ایمنی و پایداری سیستم را افزایش داده است. نقطه‌ی D با بازده انرژی ۵۷/۵۲ درصد، اثر محیط‌زیستی ۴۱۴۸ میلیون نقطه بر گیگاژول و ریسک ۱۷۹۸ دلار بر سال حالتی متعادل ارائه می‌دهد.

نقطه‌ی C دارای کمترین ریسک کلی سیستم (۱۶۲۹ دلار بر سال) است و با بازده و هزینه متوسط، تعادلی میان عملکرد فنی و اطمینان عملیاتی برقرار می‌کند. در مقابل، نقطه‌ی D با بازده ۵۶/۰۹ درصد و هزینه ۳۷/۵۴ دلار بر گیگاژول، حالتی میانی و متعادل میان سه تابع هدف انرژی، اقتصاد و ریسک را نشان می‌دهد. به صورت مشابه، جبهه پارتو برای سه حالت دیگر به قرار زیر ترسیم شده است.

در سناریوی اول، بهینه‌سازی بر پایه‌ی سه معیار اگزورزی، اقتصاد و ریسک انجام شده است. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که بیشترین بازده اگزورزی (۲۸/۰۱ درصد) در نقطه‌ی A حاصل شده که نسبت به حالت پایه (۲۴/۱۸ درصد) بهبود قابل توجهی دارد.



شکل ۴- نمودار سه بعدی جبهه پارتو مبتنی اگزورزی-اقتصاد- ایمنی

هرچند هزینه تولید در این حالت (۳۶/۸۲ دلار بر گیگاژول) نسبتاً بالا است. در مقابل، نقطه B با کمترین هزینه واحد محصول (۳۳/۱۶ دلار بر گیگاژول) و حداقل تأثیر زیست محیطی (۳۷۵۱ میلیون نقطه بر گیگاژول) به‌عنوان حالت اقتصادی‌تر و پایدارتر شناخته می‌شود. نقطه‌ی C با کمترین ریسک (۱۶۲۹ دلار بر سال) ایمن‌ترین وضعیت را دارد و نقطه‌ی D نیز حالتی متعادل میان سه هدف را ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، انتخاب نهایی نقطه بهینه بستگی به اولویت طراحی سیستم دارد؛ به‌گونه‌ای که نقطه‌ی A برای بیشینه بازده، نقطه‌ی B برای حداقل هزینه و نقطه‌ی C برای کاهش ریسک مناسب‌تر است.

در سناریوی دوم، بهینه‌سازی سیستم بر اساس سه معیار اگزورزی، اثرات زیست محیطی و ریسک انجام شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که بیشترین بازده اگزورزی (۲۸/۰۳ درصد) در نقطه‌ی A حاصل شده که نسبت به حالت پایه (۲۴/۱۸ درصد) افزایش قابل توجهی داشته است. در مقابل، کمترین تأثیر زیست محیطی در نقطه‌ی B مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان انتشار یا مصرف انرژی اولیه در این حالت است. همچنین، کمترین ریسک کلی در نقطه‌ی C به‌دست آمده که بیانگر ایمنی و پایداری بالاتر سیستم است.

جدول ۵- مقدار متغیرهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی در نقاط بهینه (انرژی-اقتصاد-ریسک)

نقطه D	نقطه C	نقطه B	نقطه A	حالت پایه	پارامترها
خروجی‌های سیستم					
۵۶/۰۹	۴۲/۵۱	۳۰/۲۱	۶۰/۸۱	۴۷/۰۵	بازده انرژی، $\eta_{en,tot} (\%)$
۳۷/۵۴	۲۵/۸۱	۳۲/۰۸	۴۲/۹۴	۳۸/۷۶	هزینه واحد محصول، $UCP_{tot} (\$/GJ)$
۴۰۲۶	۳۹۹۵	۳۷۵۱	۴۳۰۹	۴۱۷۷	تأثیر محیط‌زیستی محصول، $EEP_{tot} (mPts/GJ)$
۱۷۱۶	۱۶۲۹	۱۸۳۴	۱۸۲۹	۱۷۹۸	ریسک کلی، $Risk_{tot} (\$/year)$
متغیرهای تصمیم					
۲۹/۵۱	۱۰/۸۶	۱۰/۲	۴۱/۰۹	۱۰	اختلاف دمای تنگش ژنراتور، $PP_g(K)$
۱۶/۹۶	۱۵/۴۱	۱۶/۷۴	۱۶/۷۴	۱۵/۶۲	نسبت انبساط توربین ۱، $ER_{t1,1}$
۱۳/۵۹	۱۳/۰۹	۱۲/۶۱	۱۱/۸۳	۱۲	نسبت انبساط توربین ۲، $ER_{t2,2}$
۹/۹۸	۲/۷۴	۲/۴۱	۵/۹۸	۵	اختلاف دمای پایانه چگالنده، $TTD_c(K)$
۲۶۹/۹۵	۲۸۱/۵۸	۲۸۳/۸۵	۲۸۴/۲۵	۲۸۳/۲	دمای تبخیرکن ۱، $T_{e1}(K)$
۲۸۴/۳۸	۲۶۵/۳	۲۶۸/۷۸	۲۶۵/۷۲	۲۶۸/۹	دمای تبخیرکن ۲، $T_{e2}(K)$
۳۰۰/۵۲	۳۰۱/۷۵	۳۱۳/۴۹	۳۰۰/۰۸	۳۰۳	دمای چگالنده، $T_c(K)$
۷۰۰/۵۵	۶۷۵/۳۹	۶۹۰/۲۲	۷۰۱/۸۹	۷۱۸/۱	دمای منبع گرم، $T_{HS}(K)$

جدول ۶- مقدار متغیرهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی در نقاط بهینه (اگرزری-اقتصاد-ریسک)

نقطه D	نقطه C	نقطه B	نقطه A	حالت پایه	پارامترها
خروجی‌های سیستم					
۲۷/۶۶	۲۸/۰۱	۲۶/۹۱	۲۸/۰۱	۲۴/۱۸	بازده اگرزری، $\eta_{ex,tot} (\%)$
۳۴/۲۵	۳۶/۸۲	۳۳/۱۶	۳۶/۸۲	۳۸/۷۶	هزینه واحد محصول، $UCP_{tot} (\$/GJ)$
۴۰۲۶	۳۹۹۵	۳۷۵۱	۴۳۰۹	۴۱۷۷	تأثیر محیط‌زیستی محصول، $EEP_{tot} (mPts/GJ)$
۱۶۹۴	۱۶۲۹	۱۸۳۴	۱۶۲۹	۱۷۹۸	ریسک کلی، $Risk_{tot} (\$/year)$
متغیرهای تصمیم					
۸/۸۲	۱۰/۸۶	۱۰/۲	۱۰/۸۶	۱۰	اختلاف دمای تنگش ژنراتور، $PP_g(K)$
۱۵/۱۸	۱۵/۴۱	۱۶/۷۴	۱۵/۴۱	۱۵/۶۲	نسبت انبساط توربین ۱، $ER_{t1,1}$
۱۳/۴۵	۱۳/۰۹	۱۲/۶۱	۱۳/۰۹	۱۲	نسبت انبساط توربین ۲، $ER_{t2,2}$
۹/۳۸	۲/۷۴	۲/۴۱	۲/۷۴	۵	اختلاف دمای پایانه چگالنده، $TTD_c(K)$
۲۸۱/۹۵	۲۸۱/۵۸	۲۸۴/۹۸	۲۸۱/۵۸	۲۸۳/۲	دمای تبخیرکن ۱، $T_{e1}(K)$
۲۶۸/۳۲	۲۶۵/۳	۲۶۸/۷۸	۲۶۵/۳	۲۶۸/۹	دمای تبخیرکن ۲، $T_{e2}(K)$
۳۰۸/۴	۳۰۱/۷۵	۳۱۳/۴۹	۳۰۱/۷۵	۳۰۳	دمای چگالنده، $T_c(K)$
۶۷۷/۶۸	۶۷۵/۳۹	۶۹۰/۲۲	۶۷۵/۳۹	۷۱۸/۱	دمای منبع گرم، $T_{HS}(K)$

جدول ۷- مقدار متغیرهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی در نقاط بهینه (آگزروی-محیط‌زیست-ریسک)

پارامترها	حالت پایه	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نقطه D
خروجی‌های سیستم					
بازده آگزروی، $\eta_{ex,tot} (\%)$	۲۴/۱۸	۲۸/۰۳	۲۷/۶۲	۲۸/۰۱	۲۷/۶۶
تأثیر محیط‌زیستی محصول، $EEP_{tot} (mPts/GJ)$	۴۱۷۷	۳۸۸۶	۳۷۴۷	۳۹۹۴	۳۸۲۲
ریسک کلی، $Risk_{tot} (\$/year)$	۱۷۹۸	۱۶۹۴	۱۷۵۴	۱۶۲۹	۱۶۹۴
متغیرهای تصمیم					
اختلاف دمای تنگش ژنراتور، $PP_g(K)$	۱۰	۶/۹۲	۷/۹۴	۱۰/۸۶	۱۰/۷۹
نسبت انبساط توربین ۱، $ER_{t1,1}$	۱۵/۶۲	۱۶/۷۱	۱۴/۹۶	۱۵/۴۱	۱۵/۸۱
نسبت انبساط توربین ۲، $ER_{t2,2}$	۱۲	۱۳/۵۱	۱۳/۲۳	۱۳/۰۹	۱۳/۲۳
اختلاف دمای پایانه چگالنده، $TTD_c(K)$	۵	۳/۴۳	۴/۶۹	۲/۷۴	۴/۶۳
دمای تبخیرکن ۱، $T_{e1}(K)$	۲۸۲/۲	۲۸۴/۱۹	۲۸۴/۰۹	۲۸۱/۵۸	۲۸۲/۵۱
دمای تبخیرکن ۲، $T_{e2}(K)$	۲۶۸/۹	۲۶۷/۶۷	۲۶۹/۶۷	۲۶۵/۳	۲۶۹/۴۲
دمای چگالنده، $T_c(K)$	۳۰۳	۳۰۵/۰۳	۳۱۲/۶	۳۰۱/۷۵	۳۱۱/۰۲
دمای منبع گرم، $T_{HS}(K)$	۷۱۸/۱	۶۸۳/۱۳	۶۷۵/۲۲	۶۷۵/۳۹	۶۷۷/۵۱

جدول ۸- مقدار متغیرهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی در نقاط بهینه (انرژی-محیط‌زیست-ریسک)

پارامترها	حالت پایه	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نقطه D
خروجی‌های سیستم					
بازده انرژی، $\eta_{en,tot} (\%)$	۲۴/۱۸	۶۰/۸۱	۳۰/۲۳	۴۲/۲۹	۵۷/۵۲
تأثیر محیط‌زیستی محصول، $EEP_{tot} (mPts/GJ)$	۴۱۷۷	۴۱۰۹	۳۶۴۷	۳۸۹۴	۴۱۴۸
ریسک کلی، $Risk_{tot} (\$/year)$	۱۷۹۸	۱۸۲۹	۱۷۵۴	۱۸۲۹	۱۷۹۸
متغیرهای تصمیم					
اختلاف دمای تنگش ژنراتور، $PP_g(K)$	۱۰	۴۱/۰۹	۷/۹۴	۱۰/۸۶	۴۹/۲۸
نسبت انبساط توربین ۱، $ER_{t1,1}$	۱۵/۶۲	۱۲/۳۷	۱۴/۹۶	۱۵/۴۱	۱۲/۰۴
نسبت انبساط توربین ۲، $ER_{t2,2}$	۱۲	۱۱/۸۳	۱۳/۲۳	۱۳/۰۹	۱۲/۲۹
اختلاف دمای پایانه چگالنده، $TTD_c(K)$	۵	۵/۹۸	۴/۶۹	۲/۷۴	۳/۳۴
دمای تبخیرکن ۱، $T_{e1}(K)$	۲۸۲/۲	۲۸۴/۲۵	۲۸۴/۰۹	۲۸۱/۳	۲۸۳/۱۴
دمای تبخیرکن ۲، $T_{e2}(K)$	۲۶۸/۹	۲۶۵/۷۲	۲۶۹/۹۷	۲۶۵/۳	۲۶۸/۲۸
دمای چگالنده، $T_c(K)$	۳۰۳	۳۰۰/۰۸	۳۱۲/۶	۳۰۱/۷۵	۳۰۰/۲۲
دمای منبع گرم، $T_{HS}(K)$	۷۱۸/۱	۷۰۱/۸۹	۶۷۵/۲۲	۶۷۵/۳۹	۶۸۰/۳۱

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به رشد روزافزون مصرف برق، افزایش نیاز به تهویه مطبوع و سرمایه‌ش در صنایع و ساختمان‌ها، و همچنین حجم قابل‌توجه اتلاف گرما در فرآیندهای صنعتی، توسعه سامانه‌هایی که بتوانند به‌صورت همزمان برق و بار برودتی را تأمین کنند از اهمیت بالایی برخوردار است.

علاوه بر افزایش بازده کلی، می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش آلاینده‌ها و بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی واحدهای صنعتی داشته باشد. بنابراین بررسی، تحلیل و بهینه‌سازی چنین سامانه‌هایی ضرورت انجام این پژوهش را توجیه می‌کند.

در این پژوهش، با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و بر پایه‌ی رویکرد ترکیبی انرژی-آگزروی-اقتصاد-محیط‌زیست-ایمنی، عملکرد یک سیستم تولید توان/تبرید با حلقه دوگانه مورد ارزیابی قرار

modified power generation systems fueled by biogas. Energy conversion and management. 2019;181:463-75.

[12] Ghaebi H, Soleymani E. Investigating the effect of parameters in the thermodynamic analysis of the solid oxide fuel cell cycle using response surface methodology. Scientific Reports. 2025;15(1):181.

[13] Cao Y, Hamidvand S, Bezaatpour M, Ebadollahi M, Ghaebi H. Microporous foam, magnetic nanoparticles, and revolutionary tubes: Sophisticated combination of three solar energy materials in flat plate solar collectors. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2022;235:111464.

[14] Pazuki M-M, Kolahi M-R, Ebadollahi M, Amidpour M. Enhancing efficiency in an innovative geothermal poly-generation system for electricity, cooling, and freshwater production through integrated multi-objective optimization: A holistic approach to energy, exergy, and enviroeconomic effects. Energy. 2024;313:133862.

[15] Zare V, Mahmoudi SS, Yari M, Amidpour M. Thermo-economic analysis and optimization of an ammonia-water power/cooling cogeneration cycle. Energy. 2012;47(1):271-83.

[16] Meyer L, Tsatsaronis G, Buchgeister J, Schebek L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. Energy. 2009;34(1):75-89.

[17] Wang J, Dai Y, Gao L. Parametric analysis and optimization for a combined power and refrigeration cycle. Applied energy. 2008;85(11):1071-85.

[18] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyerivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation. 2002;6(2):182-97.

[19] Han H, Yu R, Li B, Zhang Y. Multi-objective optimization of corrugated tube inserted with multi-channel twisted tape using RSM and NSGA-II. Applied Thermal Engineering. 2019;159:113731.

[20] Śmierciew K, Gagan J, Butrymowicz D, Karwacki J. Experimental investigations of solar driven ejector air-conditioning system. Energy and Buildings. 2014;80:260-7.

[21] Safarian S, Aramoun F. Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). Energy reports. 2015;1:1-7.

گرفت.

برای این منظور، چهار سناریو با ترکیب‌های مختلف از توابع هدف شامل انرژی، انرژی، اگرزری، اقتصاد، محیط‌زیست و ریسک تعریف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که در حالی‌که در سه سناریوی نخست، دستیابی هم‌زمان به مقادیر بهینه برای تمامی توابع هدف ممکن نبود، سناریوی چهارم (انرژی-اقتصاد-ریسک) توانست پاسخ‌های بهینه‌تری در تمام جنبه‌ها ارائه دهد.

در این سناریو، بازده انرژی و اگرزری به ترتیب ۵۶/۰۹ و ۲۵/۴۵ درصد بوده، در حالی‌که هزینه واحد محصول، اثر محیط‌زیستی و ریسک کلی به ترتیب به ۳۷/۵۴ دلار بر گیگاژول، ۴۰۲۶ میلیون نقطه بر گیگاژول و ۱۷۱۶ دلار بر سال کاهش یافته‌اند.

تحلیل جبهه پارتو برای این سناریو نشان داد که نقاط A، B و C به ترتیب به‌عنوان بهترین گزینه‌ها از نظر بیشینه بازده انرژی، حداقل هزینه واحد محصول و حداقل ریسک قابل انتخاب هستند این نتایج تأیید می‌کنند که ترکیب انرژی-اقتصاد-ریسک متوازن‌ترین ساختار عملکردی را میان اهداف مختلف ارائه داده و از دیدگاه فنی، اقتصادی و ایمنی به‌عنوان گزینه بهینه نهایی قابل معرفی است.

۶- مراجع

- [1] Haghparast P, Sorin MV, Richard MA, Nesreddine H. Analysis and design optimization of an ejector integrated into an organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering. 2019;159:113979.
- [2] Yang X, Zheng N, Zhao L, Deng S, Li H, Yu Z. Analysis of a novel combined power and ejector-refrigeration cycle. Energy conversion and management. 2016;108:266-74.
- [3] Rostamzadeh H, Ebadollahi M, Ghaebi H, Amidpour M, Kheiri R. Energy and exergy analysis of novel combined cooling and power (CCP) cycles. Applied Thermal Engineering. 2017;124:152-69.
- [4] Zheng B, Weng Y. A combined power and ejector refrigeration cycle for low temperature heat sources. Solar Energy. 2010;84(5):784-91.
- [5] Habibzadeh A, Rashidi M, Galanis N. Analysis of a combined power and ejector-refrigeration cycle using low temperature heat. Energy Conversion and Management. 2013;65:381-91.
- [6] Shi K, Asgari A. Energy, exergy, and exergoeconomic analyses and optimization of a novel thermal and compressed air energy storage integrated with a dual-pressure organic Rankine cycle and ejector refrigeration cycle. Journal of Energy Storage. 2022;47:103610.
- [7] Ebadollahi M, Rostamzadeh H, Ghaebi H, Amidpour M. Exergoeconomic analysis and optimization of innovative cascade bi-evaporator electricity/cooling cycles with two adjustable cooling temperatures. Applied Thermal Engineering. 2019;152:890-906.
- [8] Ogaili HH, Khalilarya S, Chitsaz A, Mojaver P. Energy, exergy, and economic performance analysis of integrated parabolic trough collector with organic rankine cycle and ejector refrigeration cycle. Energy Conversion and Management: X. 2025;25:100843.
- [9] Rostamzadeh H, Ebadollahi M, Ghaebi H, Shokri A. Comparative study of two novel micro-CCHP systems based on organic Rankine cycle and Kalina cycle. Energy conversion and management. 2019;183:210-29.
- [10] Somehsaraei HN, Majoumerd MM, Breuhaus P, Assadi M. Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model. Applied thermal engineering. 2014;66(1-2):181-90.
- [11] Gholizadeh T, Vajdi M, Mohammadkhani F. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and