

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم ، تحقیقات و فناوری
موسسه آموزش عالی انرژی ساوه
دانشکده فنی مهندسی
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی برق - برنامه ریزی و مدیریت سیستم های انرژی الکتریکی

عنوان:

بهینه سازی یک واحد تولید همزمان انرژی و توان به کمک سیکل رانکین ارگانیک بصورت ترکیبی با توربین های گاز به کمک الگوریتم ژنتیک

استاد راهنما :

دکتر مجتبی میرزایی

پژوهشگر:

عبدالرحیم مومن

تقدیم

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بی کران و در کمال احترام **تقدیم** می نمایم به :

- محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگیم انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند .
- به همسر مهربان و گرمی ام که در تمام طول تحصیل و زندگی همراه و همگام من بوده و هستند.
- به فرزندان دلبندم که حضورشان باعث دلگرمی ام شده اند.
- به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نموده اند.
- و به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه راهم بود.

*الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته آنان جامه عمل بپوشانم.

*پروردگارا حسن عاقبت ، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما .

*خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت

رشد و شکوفائی ایران کهنسال عنایت بفرما.

سپاسگزاری

سپاس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مقطع تحصیلی را به پایان رسانده و گامی در راستای اعتلای علم بردارم.

از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر میرزایی که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم بوده است و بدون شک انجام این پایان نامه بدون کمک و راهنمایی های ارزنده ایشان امکان پذیر نبوده است، کمال تشکر را دارم و همچنین از اساتید گرامی که زحمت داوری این رساله را داشتند نیز سپاسگزارم .

تشکر از تمامی معلمان و اساتیدی که توفیق دانش آموزی و دانشجویی در محضرشان را داشتم.

و در پایان از تمامی عزیزانی که در طول انجام این پروژه مرا یاری کرده اند کمال تشکر و قدردانی را ابرار می نمایم.

چکیده

در این مطالعه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تولید همزمان توان الکتریکی و آب گرم به کمک ۳ عدد توربین گازی مدل GE LM2500 بررسی می‌گردد از گرمای اگزااست این ۳ توربین گازی جهت تولید توان در سیکل ORC و تولید آب گرم استفاده شد. در این پژوهش بهینه‌سازی دو هدفه (راندمان سیکل ترکیبی و فاکتور بهره‌وری) به کمک الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. ۵ متغیر ترمودینامیکی از سیکل ترکیبی شامل دبی سیکل رانکین، فشار بویلر، دبی شاخه‌ی تولید توان، دمای خروجی بازیاب تولید توان و بخش تولید آب گرم به عنوان متغیرهای مستقل مساله در نظر گرفته شدند.

نتایج بهینه‌سازی دو هدفه نشان داد حداکثر راندمان قابل دسترسی برای سیکل ترکیبی در حدود ۴۸٪ است که ضریب بهره‌وری برای این حالت حداقل است. حداکثر ضریب بهره‌وری قابل استحصال در حدود ۵۷/۶٪ است که راندمان سیکل ترکیبی متناظر با آن حداقل (۴۴/۸٪) می‌باشد. میزان توان تولیدی سیکل ORC بین ۱۷ الی ۳۰ مگاوات متغیر بدست آمد در واقع مقدار توان تولیدی بسته میزان تولید بار حرارتی آب گرم تغییر می‌کند. میزان بار حرارتی آب گرم تولیدی بین ۰ تا ۲۹ مگاوات متغیر بدست آمد. میزان گاز کربنیک تولیدی به ازای هر مگاوات تولید توان، در مقایسه با حالت پایه بین ۱۶٪ تا ۲۵٪ کاهش نشان می‌دهد. با بالا بردن فشار بویلر زمانی که مابقی متغیرها ثابت هستند دمای ورودی (حداکثر دمای سیکل ORC) به توربین افزایش می‌یابد این مساله سبب بهبود راندمان سیکل ORC، مطابق با اصل کارنو می‌گردد. افزایش راندمان سیکل ORC به معنی تولید توان بیشتر می‌باشد. این به معنی افزایش راندمان سیکل ترکیبی و افزایش ضریب بهره‌وری است.

لغات کلیدی: سیکل رانکین ارگانیک - سیکل ترکیبی - تولید همزمان - الگوریتم ژنتیک

فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه.....	۱
۱-۲- سیکل رانکین ارگانیک.....	۳
۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق.....	۶
۱-۴- بیان مساله.....	۷
۱-۵- سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش.....	۷
۱-۶- اجزای اصلی سیکل رانکین ارگانیک.....	۸
۱-۶-۱- منبسط کننده ها.....	۸
۱-۶-۲- سیالات عامل.....	۹

فصل ۲: ادبیات تحقیق

۲-۱- مقدمه.....	۱۱
۲-۲- پیکربندی اجزای سیستم و انواع سیکل رانکین ارگانیک.....	۱۲
۲-۲-۱- ORC ساده (BORC).....	۱۴
۲-۲-۲- ORC به همراه بازیاب تک مرحله‌ای (SRORC).....	۱۴
۲-۲-۳- ORC به همراه بازیاب دومرحله‌ای (DRORC).....	۱۶
۲-۲-۴- ORC با حرارت دهی مجدد.....	۱۷
۲-۲-۵- ORC دارای رکوپراتور.....	۱۸
۲-۲-۶- ORC دو حلقه‌ای (DLORC).....	۱۹
۲-۳- بازیابی گرمای اتلافی چرخه رانکین آلی.....	۲۰

فصل ۳: مبانی الگوریتم بهینه سازی

۳-۱- تاریخچه الگوریتم ژنتیک.....	۲۴
۳-۱-۱- تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن.....	۲۵
۳-۱-۲- روند اجرا در الگوریتم ژنتیک.....	۲۶
۳-۱-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک.....	۲۶
۳-۱-۳-۱- تابع هدف (تابع شایستگی).....	۲۸
۳-۱-۳-۲- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک.....	۲۹
۳-۱-۳-۳- جمعیت و نسل ها.....	۲۹
۳-۱-۳-۴- والدین و فرزندان.....	۳۰
۳-۱-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک.....	۳۰
۳-۱-۴-۱- عملگر ترکیب (تلفیق).....	۳۱
۳-۱-۴-۲- جهش.....	۳۲
۳-۱-۵- توابع عملیاتی الگوریتم های ژنتیک.....	۳۳
۳-۱-۶- مزایای الگوریتم ژنتیک.....	۳۵
۳-۱-۷- محدودیت های الگوریتم ژنتیک.....	۳۷

فصل ۴: مدل سازی ترمودینامیکی

۴-۱- مقدمه.....	۳۹
۴-۲- پیکربندی سیکل ترکیبی.....	۴۰

۴۳	۴-۳- داده های مساله.....
۴۳	۴-۴- مدل سازی ترمودینامیکی سیستم ترکیبی.....
۴۳	۴-۴-۱- فرضیات مدل سازی ORC.....
۴۴	۴-۴-۲- روابط و معادلات ترمودینامیکی حاکم بر مساله.....
۴۵	۴-۴-۳- بهینه سازی دوهدفه.....
۴۷	۴-۴-۴- پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک.....
۴۹	۴-۵- نتایج.....
۵۰	۴-۵-۱- بیان انرژی.....
۵۳	۴-۵-۲- دیاگرام آنتروپی برحسب دما.....
۵۶	۴-۵-۳- کاهش دی اکسید کربن تولیدی.....
۵۷	۴-۵-۴- آنالیز حساسیت متغیرها.....

فصل ۵: نتیجه گیری ۶۳

۶۴	۵-۱- مقدمه.....
۶۵	۵-۲- نتیجه گیری و جمع بندی.....
۶۷	۵-۳- پیشنهادات برای آینده.....

مراجع ۶۸

پیوست ۷۲

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) سهم منابع مختلف انرژی در تولید الکتریسته در مقیاس جهانی ۱
- شکل (۱-۲) شماتیک سیکل رانکین ارگانیک و رانکین سنتی مشابه است ۳
- شکل (۱-۳) نمودار دما برحسب آنترپپی در فرآیندهای مختلف چرخه رانکین ۴
- شکل (۱-۴) دیاگرام اشباع دما برحسب آنترپپی برای سیکل رانکین ارگانیک و رانکین سنتی ۴
- شکل (۱-۵) دیاگرام T-S برای سیال مرطوب ۹
- شکل (۱-۶) دیاگرام T-S برای سیال آیزنتروپیک ۹
- شکل (۱-۷) دیاگرام T-S برای سیال خشک ۱۰
- شکل (۲-۱) رویکرد اصلی برای غلبه بر مشکلات زیست محیطی ۱۲
- شکل (۲-۲) منابع حرارتی مختلف برای بازیابی حرارت اتلافی ۱۳
- شکل (۲-۳) طرح شماتیک ORC (BORC) ۱۴
- شکل (۲-۴) دیاگرام T-S برای BORC ۱۵
- شکل (۲-۵) ORC با بازیاب تک مرحله ای (SRORC) ۱۶
- شکل (۲-۶) دیاگرام T-S برای SRORC ۱۶
- شکل (۲-۷) طرح شماتیک از یک ORC با بازیاب دومرحله ای (DRORC) ۱۷
- شکل (۲-۸) دیاگرام T-S برای DRORC ۱۷
- شکل (۲-۹) طرح شماتیک ORC با حرارتدهی مجدد (RORC) ۱۸
- شکل (۲-۱۰) دیاگرام T-S برای RORC ۱۸
- شکل (۲-۱۱) طرح شماتیک ORC دارای رکوپراتور ۱۹
- شکل (۲-۱۲) دیاگرام T-S برای ORC دارای رکوپراتور ۱۹
- شکل (۲-۱۳) طرح شماتیک ORC دو حلقه ای (DLORC) ۲۰
- شکل (۲-۱۴) دیاگرام T-S برای DLORC ۲۰
- شکل (۳-۱) فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل بهینه سازی ۲۷
- شکل (۳-۲) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک ۲۸
- شکل (۳-۳) در شکل بالا مفهوم نفروجمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است ۳۰
- شکل (۳-۴) تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان ۳۱
- شکل (۳-۵) عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته ۳۲
- شکل (۳-۶) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم ۳۳
- شکل (۳-۷) عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته ۳۳
- شکل (۳-۸) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم ۳۴
- شکل (۴-۱) سیکل تولید همزمان مورد بررسی در این پژوهش ۴۰
- شکل (۴-۲) شماتیک سیکل ترکیبی شامل (۳ توربین گاز + سیکل رانکین آلی + تولید آب گرم) ۴۱
- شکل (۴-۳) شماتیک سیکل ترکیبی شامل (سیکل توربین گاز + سیکل رانکین آلی + تولید آب گرم) ۴۲
- شکل (۴-۴) دیاگرام دما بر حسب آنترپپی (T-S) ۴۲
- شکل (۴-۵) توابع هدف مساله بهینه سازی دوهدفه ۴۵
- شکل (۴-۶) توابع هدف مساله بهینه سازی دوهدفه ۴۵
- شکل (۴-۷) فلوچارت حل مساله و نحوه بهینه سازی راندمان کل و ضریب بهره وری به کمک الگوریتم GA ۴۸

- شکل (۴-۸) جواب بهینه مساله بهینه سازی (جبهه پارتو)..... ۴۹
- شکل (۹-۴) بیلان انرژی ($GTG + ORC + HOT WATER + WASTED HEAT = ENERGY OF FUEL$)..... ۵۱
- شکل (۴-۱۰) نمودار راندمان سیکل ORC در مقایسه با راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره وری برای ۴ نقطه (A-B-C-D)..... ۵۲
- شکل (۴-۱۱) دیاگرام دما بر حسب آنترופی برای حالت A..... ۵۴
- شکل (۴-۱۲) دیاگرام دما بر حسب آنترופی برای حالت B..... ۵۵
- شکل (۴-۱۳) دیاگرام دما بر حسب آنترופی برای حالت C..... ۵۵
- شکل (۴-۱۴) دیاگرام دما بر حسب آنترופی برای حالت D..... ۵۶
- شکل (۴-۱۵) میزان دی اکسید کربن تولیدی به ازای تولید یک مگاوات برق رای ۴ حالت A-B-C-D..... ۵۶
- شکل (۴-۱۶) آنالیز حساسیت برای متغیر m_{11} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دوتابع هدف..... ۵۸
- شکل (۴-۱۷) آنالیز حساسیت برای متغیر T_{12} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دوتابع هدف..... ۵۹
- شکل (۴-۱۸) آنالیز حساسیت برای متغیر T_{22} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دوتابع هدف..... ۶۰
- شکل (۴-۱۹) آنالیز حساسیت برای متغیر m_{ORC} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دوتابع هدف..... ۶۱
- شکل (۴-۲۰) آنالیز حساسیت برای متغیر m_{ORC} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دوتابع هدف..... ۶۲

فهرست جداول

جدول (۱-۴) خصوصیات توربین گازی (GE LM2500) مورد استفاده در بخش تولید توان الکتریکی.....	۴۳
جدول (۴-۲) موازنه انرژی در اجزای ORC ساده (مربوط به).....	۴۴
جدول (۴-۳) توابع هدف و متغیرهای مستقل.....	۴۶
جدول (۴-۴) قیود نامساوی مساله بهینه سازی.....	۴۷
جدول (۴-۵) پارامترهای الگوریتم ژنتیک.....	۴۷
جدول (۴-۶) دمای خروجی بویلر سیکل ORC.....	۵۲
جدول (۴-۷) مشخصات فرآیندی و عملکردی بهینه (نقاط A-B-C-D).....	۵۳

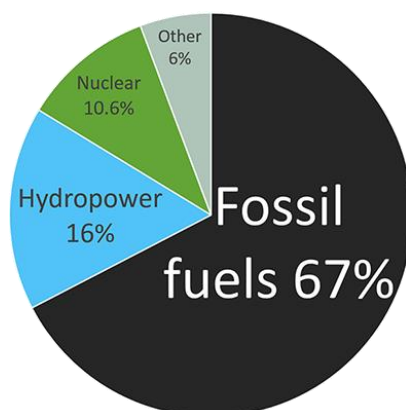
فصل ۱:

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

انرژی عاملی سرنوشت ساز و محرک توسعه و پیشرفت در صنعتی شدن کشورهاست، زیرا مهار و به کارگیری دوباره انرژی عامل بنیادین تمامی فعالیت های صنعتی و متمایز کننده آن از عملکرد انسان در دوره ماقبل صنعتی است. امروزه پیشرفت های حاصل در زندگی مدرن، رفاه، تولید و عرضه کالا، توسعه حمل و نقل و ارتباطات و فرآیندهای صنعتی و کشاورزی که به همراه داشته است. به عبارت دیگر سطح رفاه و کیفیت زندگی انسانی به شدت متأثر از میزان دسترسی و مصرف انرژی است.

منبع انرژی کافی و قابل اطمینان نیاز هر جامعه ای در حال توسعه و توسعه یافته ای می باشد. با توجه به گزارش منتشر شده از موسسه اطلاعات انرژی در سال ۲۰۱۸، مقدار مصرف انرژی در جهان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۳۵ به طور میانگین ۱٫۸ درصد هر سال افزایش پیدا خواهد کرد [۱] که این مقدار در خاور میانه ۲٫۱ درصد می باشد. همچنین انرژی الکتریکی نیز که می تواند از تبدیل منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر تولید شود با رشد میانگین سالیانه ۲٫۳ درصد روبه روست. در شکل زیر سهم منابع مختلف انرژی در تولید انرژی الکتریکی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میکنید سوخت های فسیلی سهم بزرگی در تامین انرژی دارند. رو به اتمام بودن و کمبود سوخت های فسیلی و بالا رفتن تدریجی قیمت آن از یک سو، و آلودگی های زیست محیطی و افزایش گرمای زمین از سوی دیگر باعث شده است بهینه سازی سیستم های انرژی در اولویت قرار گیرد.



شکل (۱-۱) سهم منابع مختلف انرژی در تولید الکتریسته در مقیاس جهانی

در میان روش‌های موجود استفاده از سیکل ارگانیک رانکین^۱ یا به اختصار (ORC) می‌تواند نقش اساسی داشته باشد زیرا:

۱- با بازیابی انرژی گرمایی اتلافی در بخش‌های مختلف صنعت نیروگاهی، نفت گاز پتروشیمی میتوان میزان مصرف سوخت را کاهش داد

۲- با بکارگیری این سیکل‌ها و بازیابی حرارت اتلافی می‌توان از تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری نمود.

۳- با بکارگیری صحیح این تکنولوژی میتوان هزینه‌های فرآیندی بسیاری از واحدها را تا حد امکان پایین آورد.

دمای خروجی از اگزاست بسیاری از بخش‌های صنعتی مانند خروجی توربین‌های گازی، کوره‌ها بویلرها کمتر از 400°C می‌باشد. این انرژی در اغلب موارد بدون بازیافت وارد محیط زیست شده و علاوه بر مشکلات زیست محیطی هزینه تولید انرژی را بالا می‌برد. چرخه رانکین ارگانیک این قابلیت را دارد تا از این منابع انرژی که دمای بالایی ندارند استفاده کند. یکی از مهمترین مزایای این سیکل‌ها این است که سیال عامل ارگانیک در این سیکل‌ها نقطه جوش پایین داشته و می‌تواند با جذب انرژی در دمای پایین، توان الکتریکی تولید کند.

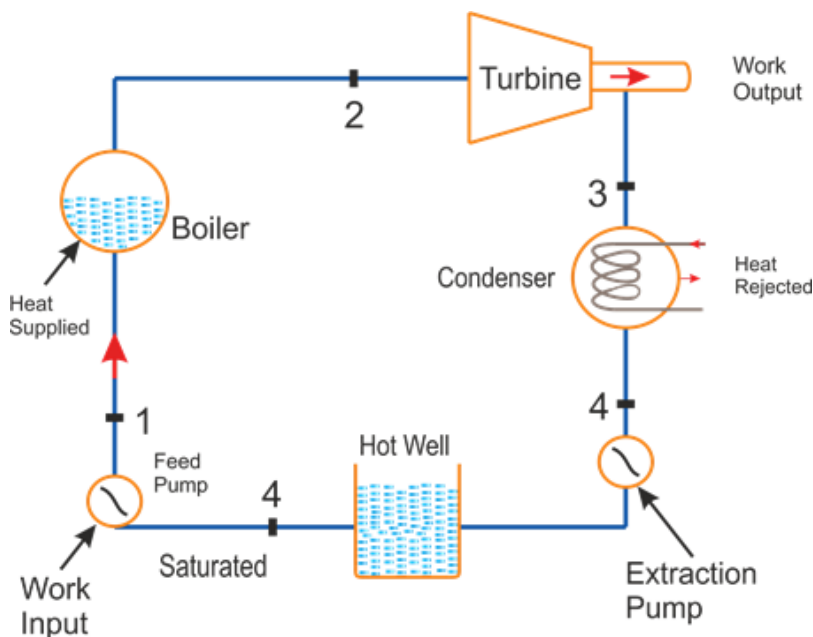
چرخه‌های رانکین ارگانیک با سیکل توربین گازی قابلیت کوپل شدن دارد و بازیافت گرمای خروجی سبب بالا رفتن راندمان کلی سیکل خواهند شد. در واقع چرخه رانکین ارگانیک به صورت طبیعی از گرمای اتلافی و یا از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و زمین گرمایی استفاده می‌کند به همین دلیل آلودگی زیست محیطی کمتری در مقایسه با سیکل‌های دیگر دارند.

در این مطالعه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی ترکیب یک چرخه رانکین آلی بمنظور بازیابی حرارت تلف‌شده از خروجی یک نیروگاه توربین گازی به همراه تولید همزمان آب گرم انجام می‌گیرد در انتها راندمان چرخه رانکین ارگانیک، راندمان کلی سیکل ترکیبی، فاکتور بهره‌وری کل، میزان کاهش انتشار گازکربنیک نسبت به حالت پایه محاسبه خواهد شد.

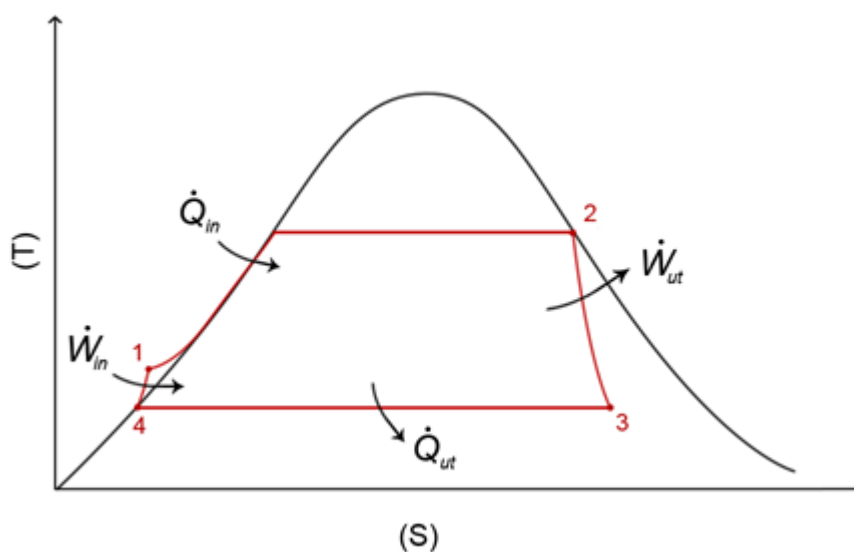
¹-Organic Rankine Cycle

۲-۱- سیکل رانکین ارگانیک

تکنولوژی سیکل رانکین ارگانیک به هفت دهه قبل باز می‌گردد. به کمک این تکنولوژی واحدهای کوچک نیروگاهی و تولید همزمان به کمک انرژی‌های تجدید پذیر تاسیس شد. اجزای اصلی یک چرخه رانکین ارگانیک از چهار بخش اصلی بویلر، توربین، کندانسور و پمپ تشکیل شده‌است. چرخه رانکین ارگانیک کاملاً مشابه با چرخه رانکین سنتی است با این تفاوت که به جای سیال آب از سیال‌های ارگانیک (حاوی کربن و هیدروژن) استفاده می‌کنند در شکل (۱-۱) شماتیک سیکل رانکین ارگانیک و سنتی و ارائه شده‌است. سیال در خروجی کندانسور به شکل مایع است با افزایش فشار توسط پمپ، سیال به بویلر ارسال شده و با دریافت انرژی تغییر فاز داده و به بخار تبدیل می‌گردد. انرژی بخار در توربین به کار مکانیکی تبدیل شده و نهایتاً بخار در کندانسور حرارت خود را از دست می‌دهد و مجدداً به مایع تبدیل می‌گردد. نمودار دما بر حسب آنتروپی برای چرخه رانکین در شکل (۱-۳) ارائه شده‌است.

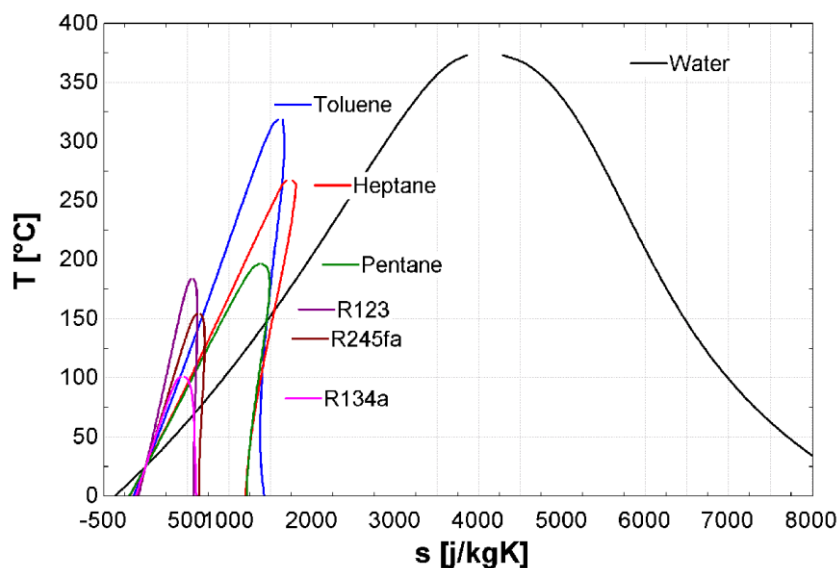


شکل (۱-۲) شماتیک سیکل رانکین ارگانیک و رانکین سنتی مشابه است



شکل (۱-۳) نمودار دما بر حسب آنترופی در فرآیندهای مختلف چرخه رانکین

منحنی اشباع (T-S) برای سیال آب و سیالهای ارگانیک در شکل (۱-۴) رسم شده است. مطابق این نمودار شیب منحنی اشباع برای سیال آب در ناحیه بخار، منفی است. در حالیکه شیب منحنی اشباع برای اغلب سیالهای ارگانیک در ناحیه بخار مثبت است.



شکل (۱-۴) دیاگرام اشباع دما بر حسب آنترופی برای سیکل رانکین ارگانیک و رانکین سنتی

از بزرگترین مزایای چرخه ارگانیک نسبت به چرخه سنتی این است که دمای جوش سیال ارگانیک پایین تر از دمای جوش سیال آب در سیکل رانکین سنتی است بنابراین از منابع دما پایین می توان در سیکل های ارگانیک بهره جست.

مطابق نمودار شکل (۴-۱) فاصله آنتروپی مایع اشباع و بخار اشباع برای سیال آب خیلی بزرگتر از سیال ارگانیک است بنابراین برای تولید توان یکسان دبی آب از دبی سیال ارگانیک کمتر می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا توان مصرفی پمپ سیکل ارگانیک از سیکل سنتی بیشتر باشد.

بدلیل پایین بودن نقطه جوش در چرخه رانکین ارگانیک نسبت به چرخه رانکین سنتی بازیابی حرارتی در دمای پایین امکان‌پذیر بوده و همین مساله سبب شده‌است تا بتوان از طیف گسترده‌ای از منابع انرژی با ارزش حرارتی پایین، مانند گرمای اتلافی واحدهای فرآیندی، انرژی حرارتی خورشیدی و انرژی زمین گرمایی استفاده نمود.

برای سیال‌های ارگانیک با توجه به مثبت بودن شیب منحنی اشباع در ناحیه بخار، عموماً سیال خارج شده از توربین به شکل سوپرهیت است، در نتیجه نیازی به مافوق گرم کردن سیال نیست. این مساله باعث می‌شود تا از خطر خوردگی پره‌های توربین کاسته شود زیرا قطرات مایع در توربین تشکیل نخواهد شد همین مساله سبب افزایش طول عمر توربین‌های ارگانیک نسبت به توربین‌های بخار می‌شود. دمای سیال ورودی به توربین در سیکل رانکین سنتی باید بیش از ۴۵۰ درجه سانتیگراد باشد تا در خروجی توربین مایعی تشکیل نشود و همین مساله سبب می‌شود تا ساخت توربین بخار نسبت به توربین ارگانیک هزینه ساخت بالاتری داشته باشد. عموماً دمای ورودی به توربین در سیکل ارگانیک زیر ۳۰۰ درجه سانتیگراد است. در سیکل بخار، فشار عموماً بالاتر از ۷۰ bar است و این سبب افزایش هزینه ساخت بویلر می‌شود در حالیکه حداکثر فشار در سیکل ارگانیک عموماً کمتر است. فشار کندانسور در سیکل رانکین سنتی منفی است و احتمال ورود هوا به داخل کندانسور وجود دارد. در حالیکه فشار کندانسور در سیکل‌های ارگانیک عموماً بالاتر از اتمسفر است. افت انرژی و افت فشار در توربین برای سیال ارگانیک کمتر از سیال آب است. بنابراین توربین‌های بخار عموماً دور بالاتر و مراحل بیشتری نسبت به توربین چرخه ارگانیک دارند و در اغلب موارد، توربین‌های چرخه ارگانیک کوپل مستقیم به ژنراتور هستند و نیازی به گیرکس کاهنده دور ندارند. راندمان سیکل‌های بخار غالباً در حدود ۳۰ درصد است در حالیکه راندمان سیکل‌های ارگانیک عموماً کمتر از ۱۵ درصد است و این به دلیل این است که در چرخه رانکین ارگانیک از منبع حرارتی دما پایین استفاده می‌کند و مطابق راندمان سیکل کارنو این چرخه راندمان بالایی ندارد.

۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

امروزه در یک نگاه سطحی به دلیل وفور و ارزانی منابع تجدیدناپذیر مانند گاز طبیعی در کشور، پرداختن جدی به مسایل بهینه‌سازی و سرمایه‌گذاری در این بخش غیرمنطقی به نظر می‌رسد، اما با بررسی عمیق‌تر این موضوع و همچنین نگاه به گذشته و آینده می‌توان متوجه شد که رو به پایان بودن انرژی‌های فسیلی یک واقعیت انکار ناشدنی است و در آینده‌ی نه‌چندان دور سوخت‌های فسیلی نمی‌توانند تأمین‌کننده‌ی نیاز انرژی بشر باشند. پس حرکت به سوی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اجتناب‌ناپذیر است. از این رو باید روند جایگزین کردن انرژی‌های فسیلی با منابع انرژی‌های پاک و قابل اطمینان هر چه سریع‌تر آغاز شود. همانطور که اشاره شد همواره در دهه‌های اخیر بهای سوخت‌های فسیلی با افزایش میزان تقاضا و با توجه به محدود بودن آن‌ها در حال افزایش بوده و این روند با شدت بیشتر در آینده نیز برقرار خواهد بود و این در حالی است که این منابع جزء سرمایه‌های ملی و تاثیرگذار در زمینه‌های گوناگون هستند از این رو مصرف داخلی سوخت‌های فسیلی به شکل کنونی و با این روند افزایشی به معنای به هدر دادن آن‌هاست. از نگاهی دیگر استفاده از سوخت‌های فسیلی بحران جدی گرمایش زمین که یک خطر جهانی است و ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو می‌باشد را بوجود آورده است. لذا ضرورت تغییر این روند بیش از پیش احساس می‌شود. مجموعه‌ی این عوامل باعث شده است که کشورهای پیشرفته و حتی کشورهای در حال توسعه‌ی جهان با توجه به شرایط و پتانسیل‌های موجود در کشور خود در حال سرمایه‌گذاری در بخش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی باشند.

حوزه انرژی از چالش‌های اقتصاد ایران به دور نیست و دسترسی آسان به انرژی ارزان و فراوان در فضای بسته و غیر رقابتی اقتصاد، بکارگیری و حفظ فناوری فرتوت قدیمی بسته و غیر رقابتی اقتصاد، بکارگیری و حفظ فناوری فرتوت قدیمی و ماشین‌آلات و تجهیزات فرسوده و کم بازده سبب گردیده است که شدت مصرف انرژی در بخش‌های مختلف روندی غیر مطلوب در قیاس با جوامع پیشرفته صنعتی داشته باشد. در حالی که سیاست‌های صرفه‌جویی و اقدامات بهینه‌سازی مصرف انرژی در بیشتر کشورهای جهان کاهش شدت مصرف انرژی را به همراه آورده است و این شاخص در ایران، روندی افزایشی را طی کرده است. عوامل گوناگونی در توسعه صنعتی کشورها نقش داشته و جوامع مختلف راه‌های متفاوتی را برای صنعتی شدن ملی کرده‌اند ولی در هر حال دسترسی مناسب و مطمئن به

انرژی ارزان و فراوان عامل کلیدی موفقیت در غالب فرآیندهای توسعه صنعتی بوده است. امروزه توسعه پیشرفت صنعتی کشورها آن چنان با میزان مصرف حامل‌های انرژی مرتبط شده که شاخص مصرف انرژی به یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی کشورها مبدل شده است. اگر چه طی دو قرن گذشته، مصرف بیشتر انرژی، عامل توسعه بسیاری از فناوری‌های جدید بوده ولی در سه دهه گذشته کاهش شاخص شدت مصرف انرژی عامل اصلی پدید آمدن فناوری‌های جدید بوده است. در ایران نیز دسترسی آسان به انرژی ارزان و فراوان به موازات یک فضای بسته و غیر رقابتی در اقتصاد کشور سبب شده بود تا رشد مصرف حامل‌های انرژی به صورتی غیر منطقی افزایش یافته و در نتیجه شدت مصرف انرژی در بسیاری از زیر بخش‌های اقتصاد ملی به چند برابر زیر بخش‌های مشابه کشورهای توسعه رسیده است. با این حال در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری جهت تغییر این روند آغاز شده است و نهادهای دولتی، بخش خصوصی، واحدهای صنعتی، دانشگاه‌ها و دیگر دست اندرکاران ضرورت بهینه‌سازی مصرف حامل‌های انرژی را مورد توجه قرار داده و اقدامات گوناگونی را جهت منطقی کردن مصرف حامل‌های انرژی آغاز کرده‌اند.

۴-۱- بیان مساله

در این پژوهش، مدل سازی و بهینه سازی فرآیند تولید همزمان توان الکتریکی و آب گرم به کمک بک سیکل رانکین ارگانیک کوپل شده به یک سیکل برایتون گازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به کمک این مدل میزان افزایش راندمان کل، میزان کاهش مصرف سوخت، میزان کاهش انتشار گاز کربنیک، ضریب بهره‌وری نسبت به حالتی که از سیکل رانکین ارگانیک استفاده نشود محاسبه خواهد شد. از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی دو هدفه (راندمان کل و ضریب بهره‌وری) استفاده خواهد شد.

۵-۱- سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش

در این پژوهش مهمترین سوالات تحقیق و فرضیات پژوهش:

۱- میزان بهبود راندمان کل زمانی که از چرخه رانکین ارگانیک استفاده می‌شود نسبت به حالت

پایه چه اندازه است؟

۲- در شرایط بهینه، مقدار متغیرهای مستقل (فشار بالای سیکل، دبی سیکل و) چه اندازه است؟

۳- میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای چه قدر است؟

۴- میزان ضریب بهره‌وری و راندمان کل در حالت بهینه چه اندازه است؟

۵- تاثیر متغیرهای مستقل بر راندمان کل و ضریب بهره‌وری چگونه است؟

۶-۱- اجزای اصلی سیکل رانکین ارگانیک

سیال کاری، انبساط‌کننده، مبدل حرارتی، پمپ و منبع حرارت اتلافی، از اجزای اصلی در یک سیستم ORC هستند.

۱-۶-۱- منبسط‌کننده‌ها

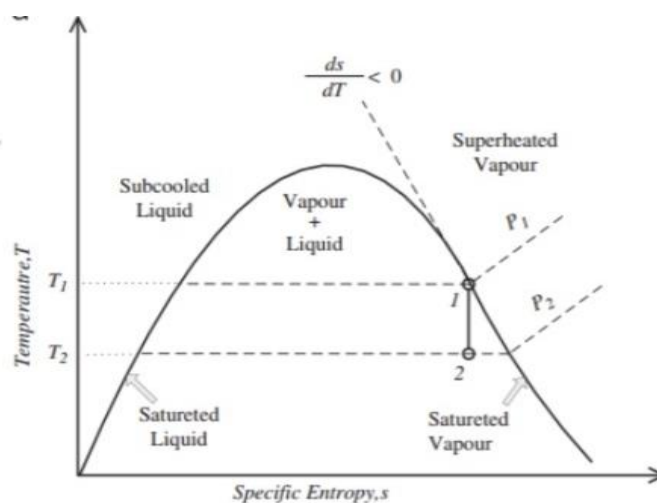
به طور کلی دو نوع منبسط‌کننده وجود دارد: یکی از نوع سرعت، مانند توربین‌های جریان محوری و شعاعی، و دیگری از نوع حجم مثبت، مانند اسکرو (پیچی)، اسکرو، منبسط‌کننده‌های پیستونی رفت و برگشتی، و منبسط‌کننده‌های دوار [۲]. سه نوع توربین وجود دارد: جریان محوری، جریان شعاعی (RIT) و توربین بیرون ریز شعاعی (ROT).

RIT در مقایسه با توربین جریان محوری، نیاز به مراحل کوچک‌تر و کمتری داشته که باعث کاهش هزینه و بهبود تراکم می‌شود. ROT در مقایسه با توربین محوری بازده بالاتری دارد [۳]. معمولاً، منبسط‌کننده اسکروولی دو پوشش مارپیچی دارد که در آن یکی ثابت و دیگری می‌چرخد.

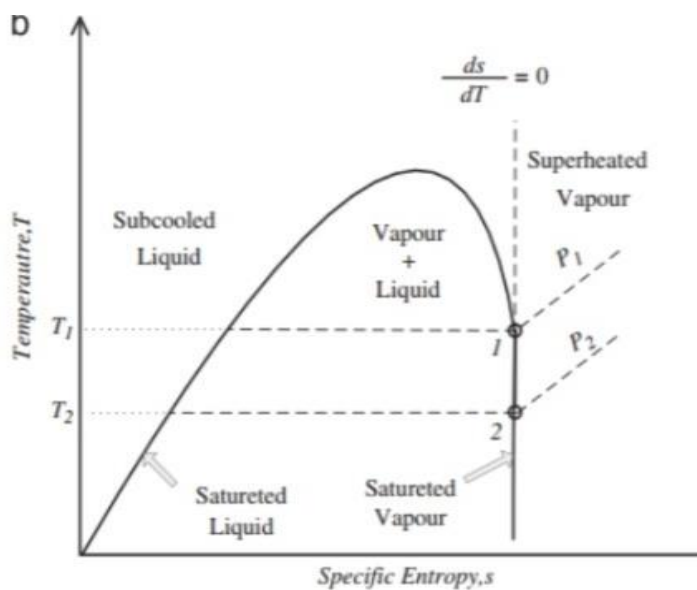
منبسط‌کننده‌های پیچی شامل یک جفت روتورهای مارپیچی می‌باشند، یک روتور نرو یک روتور ماده بوده که در یک کاور با فاصله اندک از یکدیگر قرار گرفته‌اند [۴]. منبسط‌کننده‌های پیستونی رفت و برگشتی وسایلی پیچیده هستند که به زمان‌بندی دقیق دریچه‌های ورودی و خروجی نیاز دارند. مزیت اصلی منبسط‌کننده پیستونی رفت و برگشتی این است که آن‌ها توانایی تحمل یک انبساط مرطوب را دارند [۵]. منبسط‌کننده‌های دوار پره‌ای می‌توانند طیف وسیعی از کیفیت بخار سیال عامل را تحمل کنند [۶].

۱-۶-۲- سیالات عامل

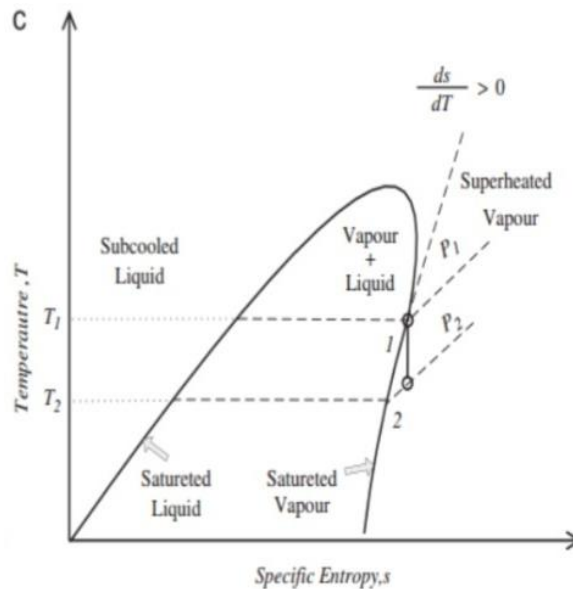
عموماً، سیال‌های آلی ترکیبات سنگین با وزن مولکولی زیاد و دمای جوش و فشار پایین هستند یکی از مهم‌ترین روش‌های شناسایی سیال‌های آلی استفاده از شیب منحنی بخار اشباع آن‌ها است که در شکل (۱-۵) الی شکل (۱-۷) نشان داده شده است. سیال‌های خشک، تر و آیزنتروپیک به ترتیب دارای شیب مثبت، منفی و بی‌نهایت هستند [۷].



شکل (۱-۵) دیاگرام T-S برای سیال مرطوب



شکل (۱-۶) دیاگرام T-S برای سیال آیزنتروپیک،



شکل (۷-۱) دیاگرام T - S برای سیال خشک

برای یک ORC با دماهای پایین عملیاتی، سیال‌های خشک و آیزنتروپیک عملکرد بهتری نسبت به سیال‌های مرطوب (تر) نشان می‌دهند. برای سیستم‌های ORC همراه با منابع گرمای اتلافی بی‌ارزش، سیال‌های آلی دارای گرمای نهان تبخیر پایین‌تر، عملکردهای حرارتی بهتری را نشان می‌دهند [۷]. سیالات آلی با حجم‌های ویژه پایین منجر به مبدل‌های حرارتی و منبسط‌کننده‌های کوچکتری شده، و اندازه و هزینه سیستم را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند [۸] برای کارایی چرخه بهتر است که دمای بحرانی سیال آلی نزدیک به ماکزیمم دمای منبع گرما باشد [۹]. نقطه انجماد سیال آلی باید پایین‌تر از پایین‌ترین دمای چرخه باشد. وزن مولکولی بالاتر، تعداد مراحل مورد نیاز برای منبسط‌کننده را کاهش داده که هزینه و پیچیدگی ساخت منبسط‌کننده را کاهش می‌دهد [۱۰].

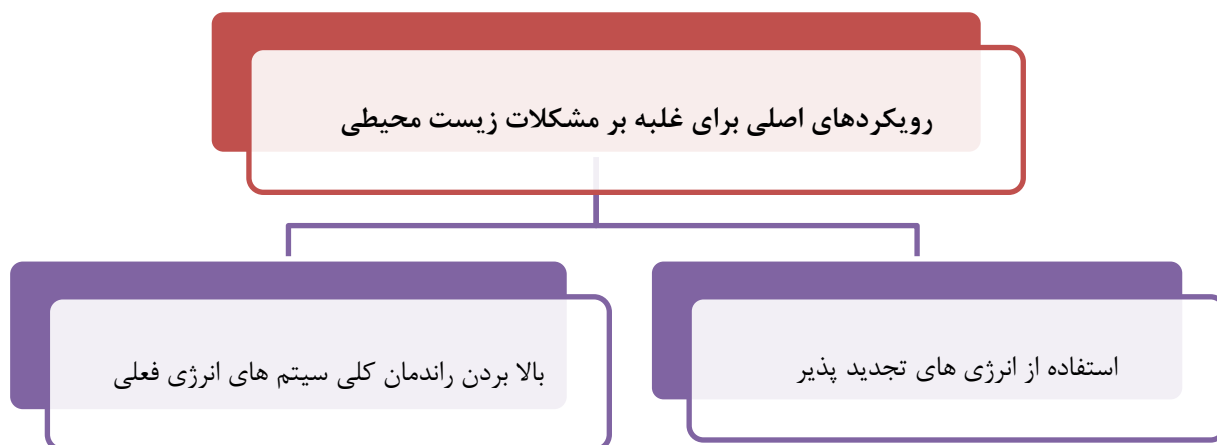
فصل ۲:

ادبیات تحقیق

۱-۲- مقدمه

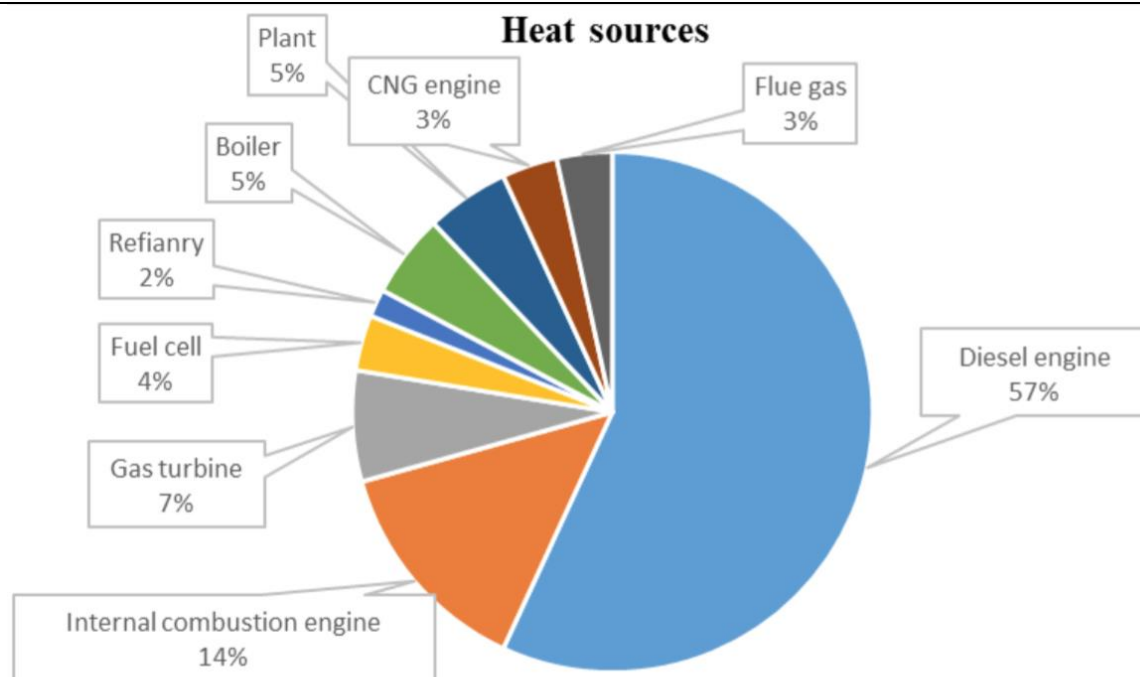
در طی دهه‌های گذشته، وابستگی انسان به انرژی افزایش یافته است طی مدت زمان اخیر، مصرف جهانی نفت حدود ۷۶ میلیون بشکه در روز بوده است این وضعیت می‌تواند به چالش‌های متعددی نظیر باران اسیدی، تخریب لایه ازن، تغییر آب و هوای جهانی و آلودگی هوا منجر شده، در حالیکه منابع جهانی انرژی نیز به کاهش خود ادامه می‌دهند [۱۱].

دو رویکرد اصلی برای غلبه بر مشکلات زیست‌محیطی وجود داشته: ابتدا توسعه و افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی، باد، زیست توده، و زمین گرمایی و رویکرد دیگر، یافتن راهی برای افزایش سیستم‌های تبدیل انرژی است به طوری که سیستم بطور موثر از انرژی که می‌تواند از یک منبع دریافت شود استفاده می‌کند.



شکل (۱-۲) رویکرد اصلی برای غلبه بر مشکلات زیست‌محیطی

شواهد نشان می‌دهد که بیش از ۵۰٪ انرژی مورد استفاده در جهان به صورت گرما تلف می‌شود [۱۲] سیستم‌های مختلف انرژی که دارای سطح بالایی از گرمای زاید بوده وجود داشته که از جمله ی آنها میتوان به توربین‌های گازی و بخاری، موتورهای احتراق داخلی، گرمای زاید صنعتی و خانگی و همچنین گرمای زمین گرمایی، گرمای زیست توده و تابش خورشیدی اشاره کرد [۱۳] (مطابق شکل (۲-۲))



شکل (۲-۲) منابع حرارتی مختلف برای بازیابی حرارت اتلافی

استفاده از فن‌آوری‌های موجود برای تولید نیرو از حرارت پسماند، بازده سیستم را افزایش داده و می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت شود. به عنوان مثال، نشان داده می‌شود که بازیافت گرمای زاید در یک کارخانه سیمان با اندازه متوسط می‌تواند بازده انرژی را تا ۲۰ درصد افزایش داده و میزان آلودگی گاز کربنیک را تا ۱۰,۰۰۰ تن در سال کاهش دهد [۱۴] پارامترهایی که می‌توانند بر امکان بازیافت گرمای زاید تاثیر بگذارند، دبی، دما و آنتالپی یا گرمای ویژه جریان گرمای زاید هستند.

به طور کلی چهار دسته از انرژی حرارتی پسماند وجود دارد که به ترتیب جریان‌های مایع، گازهای خروجی، بخار، و گازها و بخارات فرآیندی هستند. دامنه دمایی برای هر گروه به ترتیب ۵۰ - ۳۰۰ سانتی‌گراد، ۱۵۰ - ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰۰ - ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۸۰ - ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. در مقابل منابع تجدیدپذیر، برای گرمای اتلافی (حرارت پسماند) مزایای مختلفی وجود دارد. برخلاف باد یا منابع آبی، گرمای اتلافی نیازی به توسعه زمین یا استخراج منابع ندارد. در مقایسه با انرژی‌های خورشیدی یا بادی، گرمای اتلافی دارای ضریب بهره‌وری بالایی است [۱۵] تکنولوژی‌های مختلفی مثل سیکل بخار رانکین، سیکل کالینا، سیکل سه گانه، چرخه دی‌اکسید کربن فوق بحرانی، سیکل برایتون، سیکل استرلینگ و سیکل رانکین آلی وجود دارند که از گرمای اتلافی استفاده می‌کنند [۱۶].

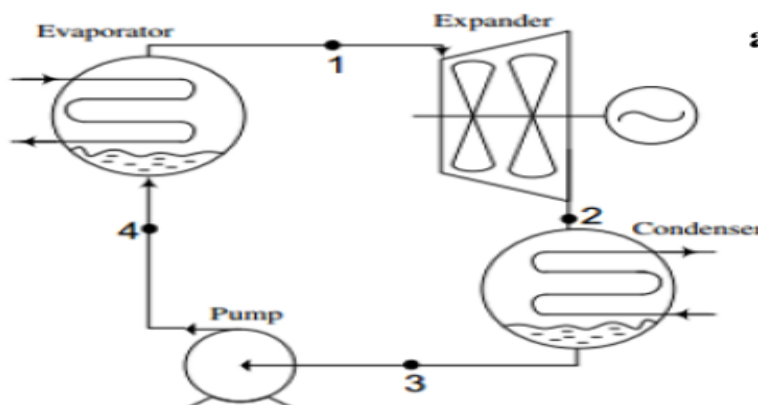
چرخه‌های مذکور در مقایسه با یک ORC مشکلات زیر را دارند. چرخه رانکین آلی به دلیل مزایایی از قبیل انعطاف‌پذیری، ایمنی بالا، الزامات نگهداری کم و عملکرد حرارتی خوب، یک راه‌حل امیدوارکننده برای بازیابی گرمای اتلافی است [۱۷]. سیستم ORC شبیه به سیکل رانکین مرسوم است. با این تفاوت که، از مایعات آلی فرار و یا مایعات مبرد به عنوان سیال عامل به جای آب استفاده می‌کند. سیال‌های عامل آلی به دلیل نقطه جوش پایین‌تر در مقایسه با آب، امکان بازیابی انرژی از منابع گرمای اتلافی دما پایین را ممکن می‌سازند. بازده حرارتی یک سیستم ORC به خواص ترمودینامیکی سیال عامل و شرایط عملیاتی منبع حرارتی، مخزن و سیکل بستگی دارد [۱۸]. بطور کلی، دامنه بازده حرارتی متوسط یک سیستم ORC از ۲٪ تا ۱۹٪ است و برای سیستم‌های کوچک (کم‌تر از ۵ کیلووات) بازده حرارتی کمتری دارد [۱۹].

۲-۲- پیکربندی و اجزای سیستم و انواع سیکل رانکین ارگانیک

اجزای اصلی یک ORC عبارتند از: تبخیر کننده، کندانسور (چگالنده)، توربین، پمپ، سیال عامل و منبع حرارت اتلافی در این بخش، مروری سریع بر گونه‌ها و اجزای مختلف ارائه شده است.

۲-۲-۱- ORC ساده^۱ (BORC)

BORC در مقایسه با ORCهای دیگر، در شرایط زیر دمای بحرانی کار کرده و به تعداد اجزای کمی نیاز دارد. همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود.

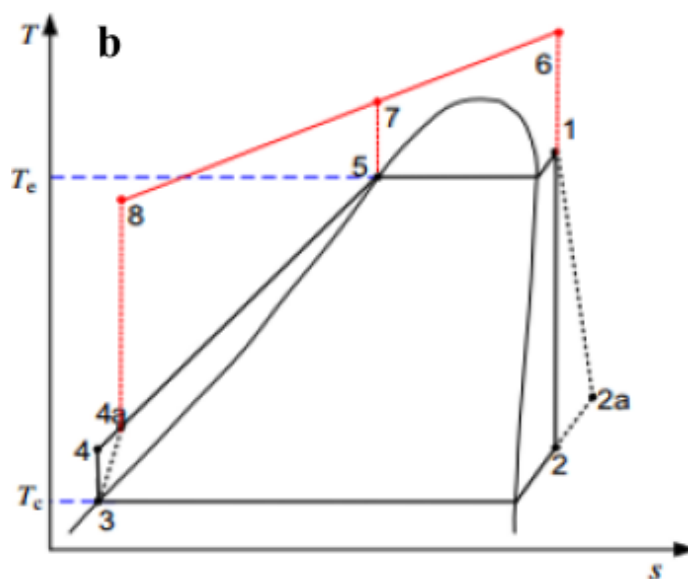


شکل (۲-۳) طرح شماتیک ORC (BORC)

¹Basic ORC (BORC)

BORC چهار فرآیند متفاوت دارد.

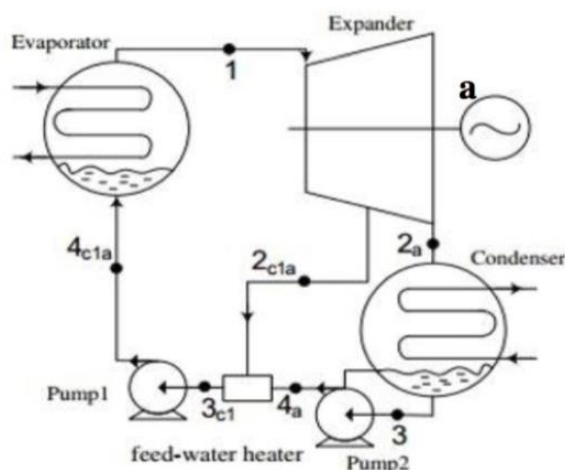
- تراکم آیزنتروپیک در پمپ فرآیند (۳ - ۴)
- افزودن حرارت فرآیند (۴ - ۱)
- انبساط حرارتی فرآیند (۱ - ۲)
- دفع حرارت در کندانسور فرآیند (۲ - ۳)



شکل (۲-۴) دیاگرام T-S برای BORC

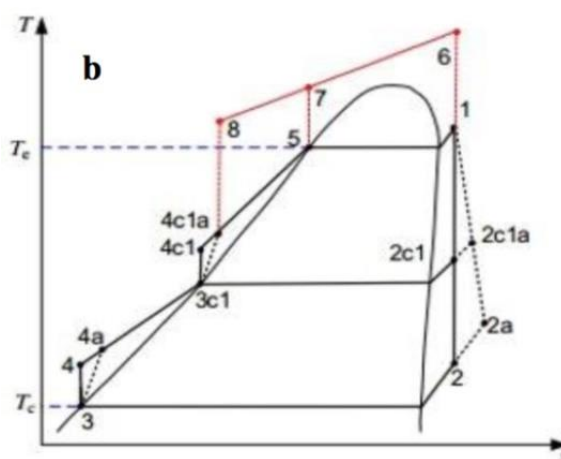
۲-۲-۲. ORC به همراه بازیاب تک مرحله‌ای^۱ (SRORC)

شکل (۲-۵)، یک سیستم SRORC را نشان می‌دهد. در این سیستم، بخشی از بخار موجود در بین دو مرحله از توربین برداشته شده و به هیتر آب - خوراک اضافه می‌شود بازیاب می‌تواند با کاهش افزودن حرارت از منبع حرارت تبخیرکننده، راندمان چرخه را افزایش دهد.



شکل (۲-۵) ORC با بازیاب تک مرحله‌ای (SRORC)

نمودار زیر دیاگرام T-S مربوط به سیکل با بازیاب حرارتی تک مرحله ارائه شده است.

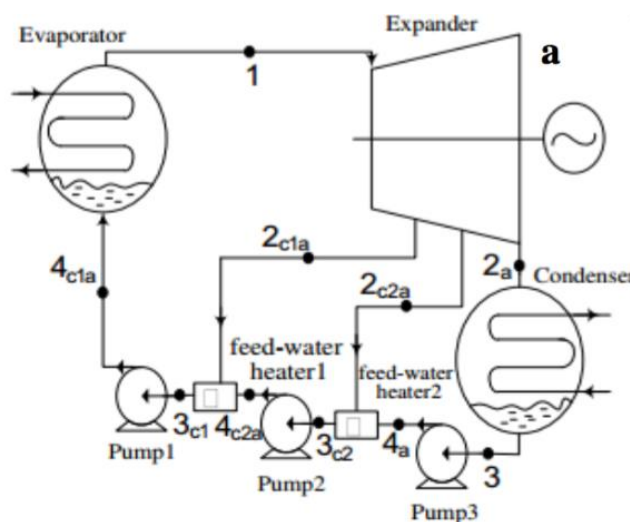


شکل (۲-۶) دیاگرام T-S برای SRORC

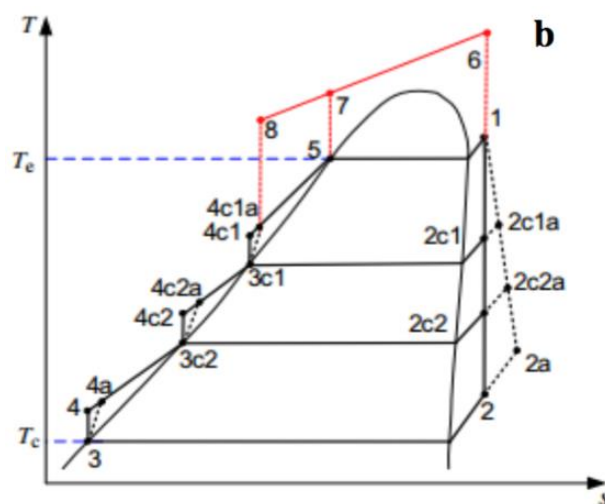
^۱ Single Stage Regenerative ORC

۲-۲-۳ ORC به همراه باریاب دو مرحله‌ای (DRORC)

شکل (۲-۷) یک سیستم DRORC را نشان می‌دهد. این سیستم همچنین شبیه SRORC بوده اما بین دو مرحله استخراج صورت می‌گیرد. DRORC راندمان حرارتی چرخه را با کاهش بار تبخیر کننده افزایش می‌دهد [۲۰] نمودار T-S سیستم DRORC در شکل (۲-۸) ارائه شده است.



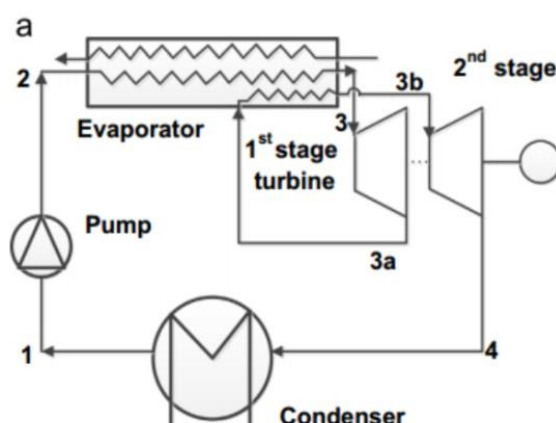
شکل (۲-۷) طرح شماتیک از یک ORC با باریاب دو مرحله‌ای (DRORC)



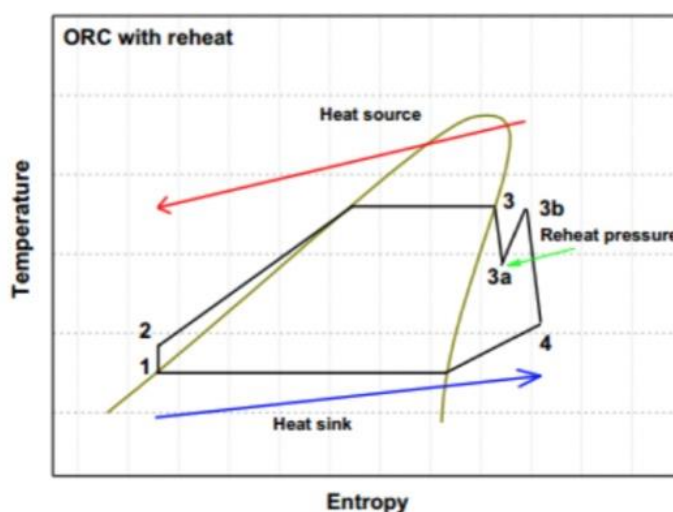
شکل (۲-۸) دیاگرام T-S برای DRORC

۲-۲-۴ ORC با حرارت دهی مجدد

شکل زیر یک سیستم RORC را نشان می‌دهد. در این سیستم، بخار مربوط به بخش تبخیر کننده، در فشار بالا وارد اولین توربین می‌شود. سپس بخار خروجی مجدداً به تبخیرکننده وارد شده و قبل از ورود به دومین توربین فشار پایین‌تر، با استفاده از منبع حرارتی مجدداً تحت گرمایش قرار می‌گیرد. هدف از سیستم RORC حذف رطوبت بخار در مراحل نهایی فرآیند انبساط است.



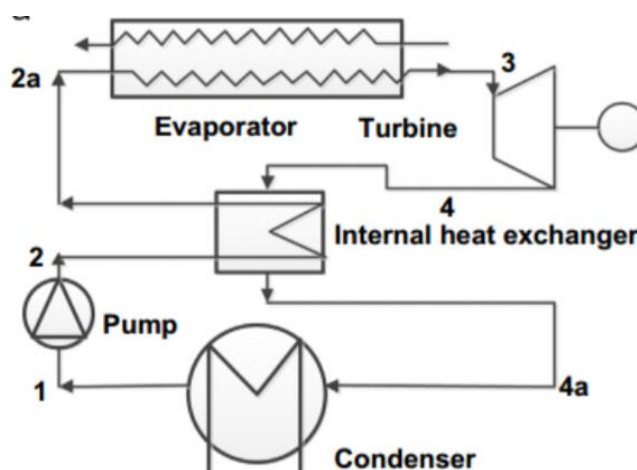
شکل (۲-۹) طرح شماتیک ORC با حرارت‌دهی مجدد (RORC)



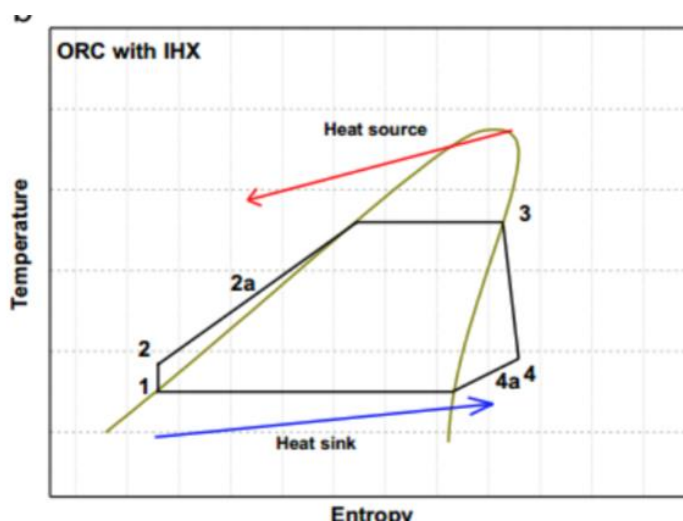
شکل (۲-۱۰) دیاگرام T-S برای RORC

۲-۵-۲-۲ ORC دارای رکوپراتور

شکل (۲-۱۱) یک ORC دارای رکوپراتور را نشان می‌دهد. در این سیستم به منظور افزایش راندمان، سیال عامل دما بالا از توربین حرارت خود را به سیال عامل دما پایین از پمپ منتقل می‌کند و در واقع خوراک ورودی به بویلر پیش گرم می‌گردد [۲۱]



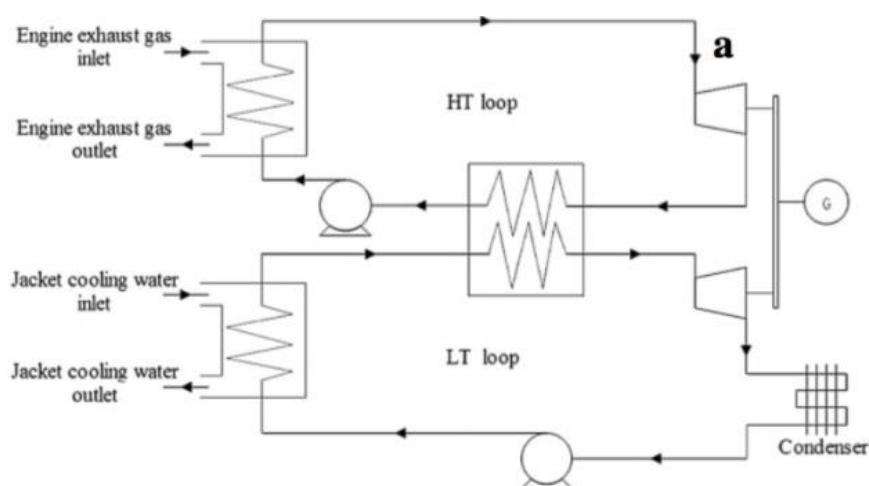
شکل (۲-۱۱) طرح شماتیک ORC دارای رکوپراتور



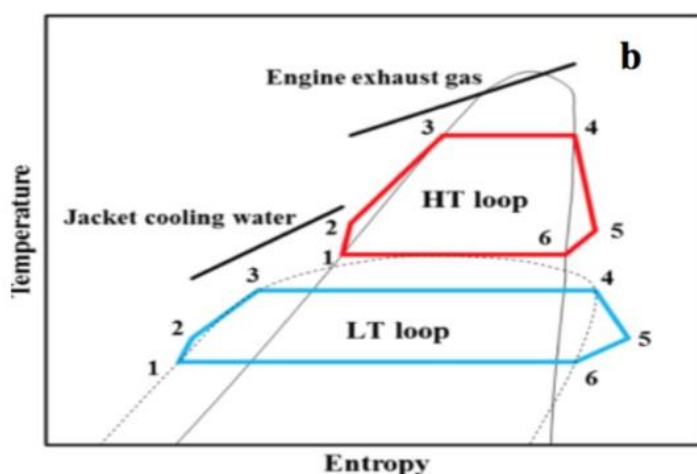
شکل (۲-۱۲) دیاگرام T-S برای ORC دارای رکوپراتور

۲-۲-۶ ORC دو حلقه‌ای (DLORC)

شکل ۷ یک سیستم DLORC را نشان می‌دهد. در این سیستم، از حلقه HT برای بازیابی منبع حرارت اتلافی استفاده می‌شود. از حلقه LT برای بازیابی حرارت گرماگیر آب سرد و گرمای اضافی حلقه HT استفاده می‌شود. این سیستم بازده کلی سیکل را با کاهش بار حرارتی که در محیط‌زیست رها شده، افزایش می‌دهد [۲۲]



شکل (۲-۱۳) طرح شماتیک دو حلقه‌ای (DLORC)



شکل (۲-۱۴) دیاگرام T-S برای DLORC

۳-۲- بازیابی گرمای اتلافی چرخه رانکین آلی

به طور کلی، تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر (از سال ۲۰۱۴) برای بهبود عملکرد سیستم را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: تاثیر پیکربندی‌های سیکل، انتخاب سیال عامل و شرایط کاری عملیاتی. لارسن و همکارانش [۲۳] سیستم رانکین سنتی، و چرخه ORC برای سیکل ترکیبی همراه با یک موتور دیزلی دو زمانه را مورد مقایسه قرار دادند. حداکثر قدرت از طریق استفاده از سیکل ORC بدست آمد و این در حالی است که سیکل رانکین سنتی و سیکل Kalina تنها ۷۵ درصد از توان ORC را تولید کردند. بازده حرارتی واحد سیکل ترکیبی با ORC ۲۵ درصد بود، که این مقدار برای سیکل‌های Kalina و رانکین به ترتیب، برابر با ۵۱ و ۵۱/۱ درصد محاسبه شد، که نتیجتاً منجر به یک افزایش احتمالی ۲/۶ درصدی در بازده کل واحد شد.

گیرگین و ازگی [۲۴] یک مطالعه ترمودینامیکی بر روی ORC مورد استفاده در بازیابی گازهای خروجی اتلافی از یک ژنراتور دیزلی در یک کشتی را مورد بررسی قرار دادند. در یک حالت ایده‌آل، با استفاده از تولوئن به عنوان سیال اصلی، ۹۲ کیلووات قدرت، علاوه بر صرفه‌جویی در استفاده از ۲۵۰۰۰ لیتر سوخت دیزل و کاهش ۶۷/۲ تن انتشار کربن دی‌اکسید، در پایان ۱۰۰۰ ساعت کاری، حاصل شد. چندین مطالعه‌ی دیگر مربوط به ORC در بازیابی حرارت تلف شده مورد بررسی قرار گرفتند. سوفیاتو و همکارانش [۲۵] بازیابی حرارت از ORC سه موتور دارای مشتق گاز مایع طبیعی را ارزیابی کردند. سه چرخه آلی رانکین بدین ترتیب بودند: ساده، با قابلیت بازتولید و ORC دو مرحله‌ای. نتایج نشان می‌دهد که سیکل دو مرحله به حداکثر قدرت خالصی می‌رسد که تقریباً دو برابر قدرت تولید شده به وسیله‌ی ORC ساده و با قابلیت بازتولید است.

سونگ و گو [۲۶] یک ORC دو مسیره (دو حلقه‌ای) برای بازیابی حرارت تلف شده از گاز خروجی موتور و ژاکت آب سرد را مورد بررسی قرار دادند. سیکلوهگزان، بنزن و تولوئن در حلقه‌ی دما مورد ارزیابی قرار گرفتند و این درحالی بود که در حلقه‌ی دما پایین از R123، R236fa و R345fa استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب سیکلوهگزان و R245fa حداکثر توان خالص را از خود نشان داده و توان اضافی تولید شده به ۱۱/۲ درصد از توان اصلی خروجی از موتور ربط دارد.

نیشیت و سانتاتو [۲۷] به بررسی استفاده از سیکل‌های رانکین ارگانیک در دماهای پایین پرداختند. آنها ۱۶ ماده ارگانیک در سیکل مدل شده بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند سیالات خشک قابلیت

بهتری برای استفاده در دماهای پایین دارند و بازدهی بیشتری در سیکل ایجاد خواهند کرد. همچنین طی تحقیقاتی که انجام دادند مزایای استفاده از سیکل رانکین ارگانیک را برای استفاده از بخش دمای پایین پینچ فرایندها بیان نمودند.

موهانتی و پالوسو [۲۸] معیار طراحی بهینه مقرون به صرفه برای چرخه‌های قدرت رانکین با استفاده از منابع حرارتی زمین‌گرمایی دما پایین ارائه کردند. نسبت مساحت مبدل حرارتی به توان خالص خروجی به عنوان تابع هدف استفاده شده و توسط روش نزولی بهینه‌سازی شد. عملکرد چرخه در مقایسه با سیالات کاری Pf505 پنتان و HCFC123 مورد بررسی قرار گرفت. روش بهینه‌سازی به یک روش یکتا برای مقادیر ویژه دماهای کندانس و تبخیر و سرعت‌های آب خنک‌کننده و دمای زمین منتهی شد. انتخاب سیال کاری می‌تواند تا حد زیادی بر روی تابع هدف که معیار اندازه‌گیری هزینه نیروگاه‌هاست تاثیر بگذارد و در برخی موارد تفاوت می‌تواند بیش از دو برابر باشد. آمونیاک حداکثر بهره‌برداری آب‌های زمین‌گرمایی را دارد اما لزوماً ماکزیمم کارایی چرخه را ندارد. تجزیه تحلیل اگزرژی نشان می‌دهد که کارایی سیکل آمونیاک تا حد زیادی در فرآیند بهینه‌سازی نسبت به دیگر سیالات کاری تضمین شده است. پنتان نسبت به PF5050 عملکرد بهتری دارد. اگرچه دومی از خواص فیزیکی و شیمیایی بهتری نسبت به HCFC123 و دیگر سیالات مطرح شده دارد. همچنین حضور بخار مرطوب در انتهای انبساط و فشار بخار بالا استفاده از آمونیاک را در کاربرد زمین‌گرمایی دما پایین محدود می‌کند.

بر اساس کار چن و همکارانش [۲۹]، سیالات عاملی مورد مطلوب هستند که در فاز مایع دارای گرمای نهان زیاد، جرم ویژه بالا، و گرمای ویژه پایین بوده که در نهایت منتج به توان توربین بالاتر و اندازه تجهیزات کوچکتر می‌شوند. علاوه بر این، بر اساس ریس [۳۰]، سیالات آلی باید علاوه بر ملزومات مربوط به ظرفیت انتقال انرژی، ملزومات دیگری، مثل پارامترهای مربوط به اثر بر محیط زیست، که از جمله آن‌ها می‌توان به میزان پتانسیل تخریب ازون (ODP)، میزان پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، و طول عمر آن‌ها در اتمسفر اشاره کرد، را نیز ارضاء کنند.

ولز و همکارانش [۳۱]، اظهار داشته‌اند که سیال مورد استفاده توسط شرکت Triogen برای موارد بازیابی حرارتی (با دمای منبع ۳۵۰ درجه سانتی‌گرادی)، تولوئن بوده است. علاوه بر این، صدیقی و همکارانش [۳۲]، هیدروکربن‌های نرمال-پنتان تا نرمال-دودکان را مورد قیاس با آب، بنزن و تولوئن برای استفاده در ORC به جهت بازیابی حرارت از یک توربین گازی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که

اگر منبع حرارتی در یک دمای بالاتر، مثل ۵۰۰ درجه سانتی گراد، باشد، نرمال-دودکان و تولوئن، سیالات مطلوبی هستند. در تحقیق آنها، گازهای خروجی از توربین گازی، دارای دمای بیش از ۴۸۰ درجه سانتی گراد هستند؛ بنابراین، در آنالیزها، تولوئن سیال عامل مورد استفاده خواهد بود.

فصل ۳:

مبانی الگوریتم بهینه‌سازی

۱-۳- تاریخچه الگوریتم ژنتیک

در پنجاه سال اخیر به طور گسترده از کامپیوتر در علوم مختلف استفاده می‌شود. در اواسط قرن بیستم برخی از دانشمندان علوم کامپیوتر کار بر روی سیستم‌های تکاملی را به امید آنکه بتوان از آن به عنوان مکانیسمی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده نمود، آغاز نمودند. در دهه هفتاد میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام جان هالند ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی‌های مهندسی مطرح کرد، به علاوه دانشجویان و همکارانش با همکاری هم این الگوریتم را توسعه دادند.

از الگوریتم ژنتیک بواسطه قدرت و کفایت و سادگی آن، در رشته‌های مختلف علمی استفاده شده است. برای مثال از آن برای حل مسائلی که تابع هدف پیچیده و تعداد متغیر مستقل زیاد دارند به وفور استفاده می‌شود. به طور کلی، در بیست سال اخیر، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک تکنیک بهینه برای توابع پیچیده مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. [۳۳]

الگوریتم ژنتیک اسرآمدروش‌های تکاملی است و الگوریتم‌های جستجو الهام گرفته از تکامل بیولوژیکی می‌باشد [۳۴ و ۳۵]. الگوریتم ژنتیک در مسایلی که ما با فضای بزرگی برای یافتن بهترین جواب روبه رو هستیم بهترین کارایی را دارند. البته این نکته قابل ذکر است که الگوریتم ژنتیک برای هر مسئله قابل پیاده‌سازی است. و بر خلاف دیگر روش‌های بهینه‌سازی که اغلب نیازمند داشتن مشتق تابع هدف نیز هستند این روش هیچ گونه نیازی به اطلاعات اضافه ندارد و پیاده‌سازی آن بسیار ساده است. در ادامه به مفاهیم آن و روش کار این الگوریتم پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن

الگوریتم ژنتیک بر اساس نظریه تکاملی داروین بنا نهاده شده است و جواب مساله‌ای که از طریق الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید گام به گام بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه از جواب‌ها که جمعیت نامیده می‌شود کار خود را شروع می‌کند. در واقع این مجموعه جواب‌ها جمعیت^۱ نام دارد. به عبارت دیگر جمعیت از تعداد مشخصی از نفرات تشکیل شده است. که هر نفر نماینده یک جواب مسئله است. ما بدنبال یافتن بهترین نفر (بهترین جواب) در طی فرآیند بهینه‌سازی هستیم.

در این الگوریتم جواب‌های مربوط به یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می‌شوند. الگوریتم روند کاوش و جستجوی خود را به امید یافتن جواب‌های بهتر نسل به نسل ادامه می‌دهد تا زمانی که به یکی از شرایط توقف خود برسد. در این فرآیند امید است که جمعیت جدید (فرزاندان)^۲ نسبت به جمعیت قبلی (والدین)^۳ بهتر باشند. در هر نسل جواب‌های جدیدی ساخته می‌شود که می‌بایست بهینه بودن آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. میزان بهینه بودن یک جواب به کمک تابع هدف سنجیده می‌شود. به عبارت دیگر جواب‌های جدید (فرزاندان) به کمک والدین شایسته از نسل قبل ساخته می‌شوند. والدینی که بر اساس تابع هدف از شایستگی مناسبی برخوردار نیستند رفته رفته حذف می‌شوند و در فرآیند تولید فرزند مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. مطابق با آنچه گفته شد طبیعی است که جواب‌های مناسب تر شانس بیشتری برای تولید فرزند دارند. این فرآیند تا برقراری شرایط توقفی که از قبل تعیین می‌شود (مانند تعداد جمعیت‌ها یا میزان بهبود جواب) ادامه پیدا خواهد کرد. در ادامه جدولی جهت تعریف مفاهیم پایه الگوریتم ژنتیک آورده شده است.

۳-۱-۲- روندا اجرا در الگوریتم ژنتیک

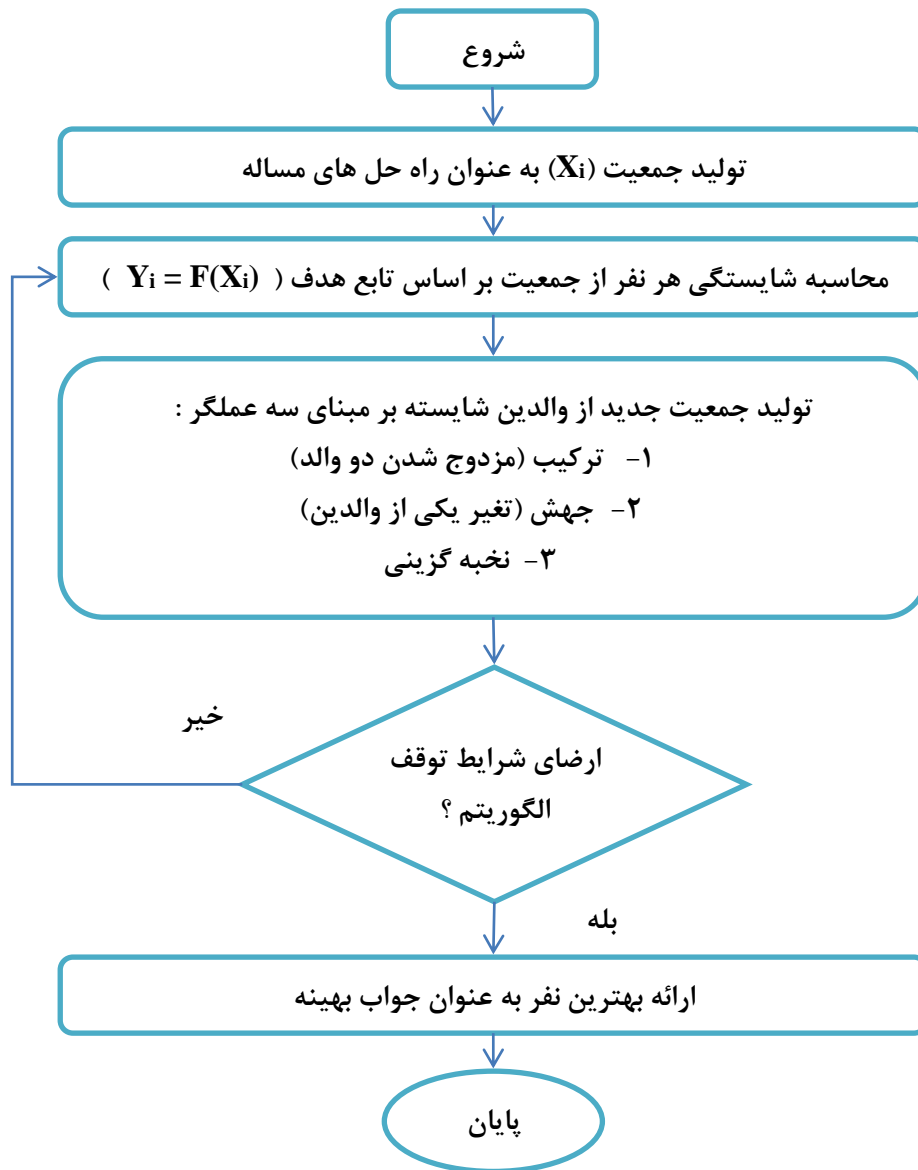
در شکل زیر نمای کلی الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود،

¹Population

²Offspring

³parents

اصول پایه ای الگوریتم ژنتیک بسیار عمومی است و می‌توان از آن برای انواع مسایل بهینه‌سازی مهندسی استفاده کرد و تنها تفاوت، به کار گرفتن توابع هدف مختلف بنا بر نیاز مساله‌ای است.



شکل (۳-۱) فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل مختلف بهینه‌سازی

مطابق شکل (۳-۱) سه عملگر مهم برای تولید جواب‌های جدید از جواب‌های نسل قبل وجود دارد این سه عملگر بسیار مهم و پایه‌ای الگوریتم ژنتیک عملگرهای ترکیب^۱ و جهش^۲ و نخبه‌گزینی^۳ هستند. سوال بعدی این است که برای ترکیب والدین به‌منظور ایجاد فرزندان جدید والدین چگونه

^۱ Cross over

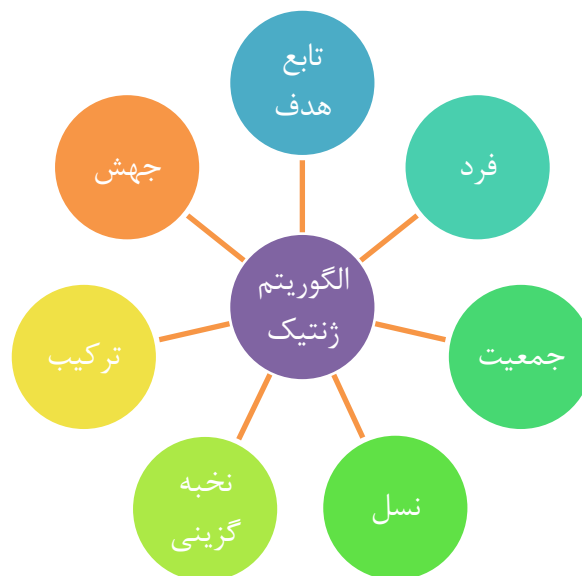
^۲ Mutation

^۳ Elite

انتخاب شوند؟ این کار به روش‌های مختلفی می‌تواند صورت گیرد. اما ایده اصلی در تمام آن‌ها این است که والدین بهتر (والدین شایسته) انتخاب شوند به این امید که والدین بهتر باعث ایجاد فرزندان بهتر شوند. برای عملگر دوم یعنی جهش نیز از والدین شایسته برای تولید فرزندان استفاده می‌شود مساله‌ای که در این جا مورد سوال می‌باشد این است که اگر جمعیت جدید تنها از طریق فرزندان جدید ایجاد شود، این فرآیند منجر به حذف والدین نسل قبل می‌گردد. برای جلوگیری از این پیشامد، همیشه بهترین جواب نسل قبل بدون هیچ تغییری به نسل جدید منتقل می‌شود (عملگر نخبه‌گزینی).

۳-۱-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک

در شکل (۳-۲) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک به اختصار آمده است. که در بخشهای بعدی به تفسیر هر کدام از آن‌ها توضیح داده می‌شود.



شکل (۳-۲) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک

۳-۱-۳-۱- تابع هدف (تابع شایستگی)

یکی از مراحل الگوریتم ژنتیک ارزیابی جواب‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله است. در واقع ارزش جواب‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله تعیین می‌شود. مناسب بودن یا نبودن جواب با معیاری که از تابع هدف به دست می‌آید، سنجیده می‌شود. هرچه که یک جواب مناسب‌تر باشد مقدار شایستگی بیشتری دارد که با استفاده از محدوده دانش مسئله به کار برده می‌شود. برای آن‌که شانس بقای چنین جوابی بیشتر شود احتمال بقای آن متناسب با مقدار برازندگی آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین رشته‌ای که برازنده‌تر است با احتمال بیشتری در تولید فرزندان شرکت می‌کند و دنباله‌های بیشتری را به وجود می‌آورد. با ارزش‌ترین جواب‌ها در هر مرحله مانند قویترین موجودات در یک جمعیت می‌باشند. در تکثیر، رشته‌های با میزان تطبیق کم، از جمعیت حذف می‌شوند و رشته‌های با میزان تطبیق زیاد، تأثیر بیشتری در تولید جمعیت بعدی خواهند داشت.

۳-۱-۳-۲- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک

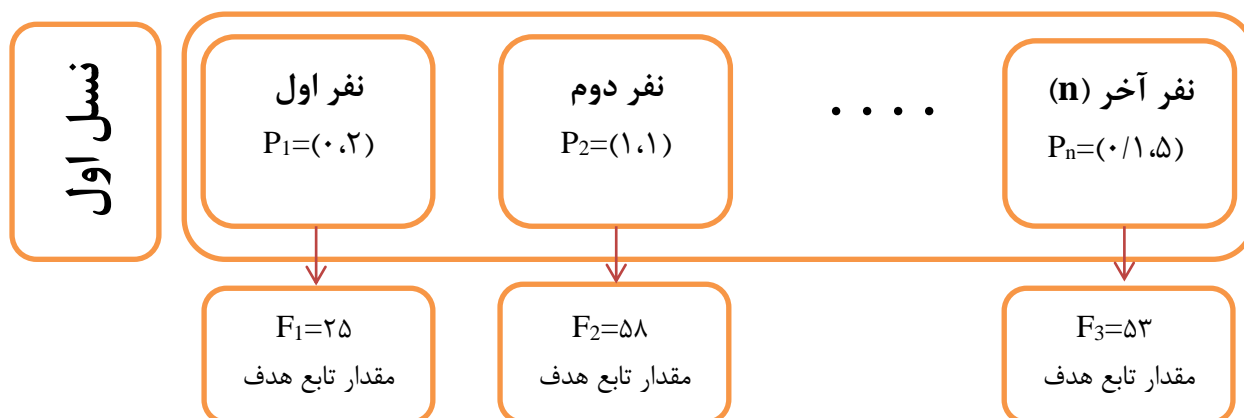
یک فرد عبارت است یک راه حل مسئله. مقدار شایستگی به ازای هر فرد، امتیاز آن فرد تلقی می‌شود. به عنوان مثال تابع هدف به صورت معادله زیر را در نظر بگیرید که x_1 و x_2 دو متغیر مستقل مسئله باشند. در این مثال هدف از بهینه‌سازی مینیم کردن این تابع هدف است.

$$F(x_1, x_2) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 \quad (3-1)$$

بردار $(x_1, x_2) = (0, 2)$ یک فرد تلقی می‌شود. مقدار شایستگی یک فرد نیز به کمک تابع هدف محاسبه می‌گردد، $F(0, 2) = 25$ بردار $(1, 1)$ نیز یک راه حل ممکن می‌تواند باشد (نفر دوم) که در واقع مقدار تابع هدف آن برابر است با $F(1, 1) = 58$. نفر اول از نفر دوم شایسته‌تر است زیرا $(25 < 58)$ در واقع نفر اول مقدار تابع هدف کوچکتری دارد و از آنجا که هدف مینیم کردن است بنابراین هرچقدر مقدار تابع هدف کوچکتر باشد امتیاز آن فرد بالاتر است. از آنجا که جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک مینیم تابع شایستگی را تعیین می‌کند، بهترین مقدار شایستگی برای کوچکترین مقدار تابع هدف از کل جمعیت می‌باشد.

۳-۱-۳-۳- جمعیت و نسل‌ها

جمعیت یک آرایه از افراد است. یک فرد ممکن است چندین بار در یک جمعیت تکرار شود. در هر تکرار، الگوریتم ژنتیک یک سری محاسبات روی جمعیت حاضر انجام داده و جمعیت جدید را تولید می‌کند. این جمعیت جدید تحت عنوان یک نسل جدید شناخته می‌شود.



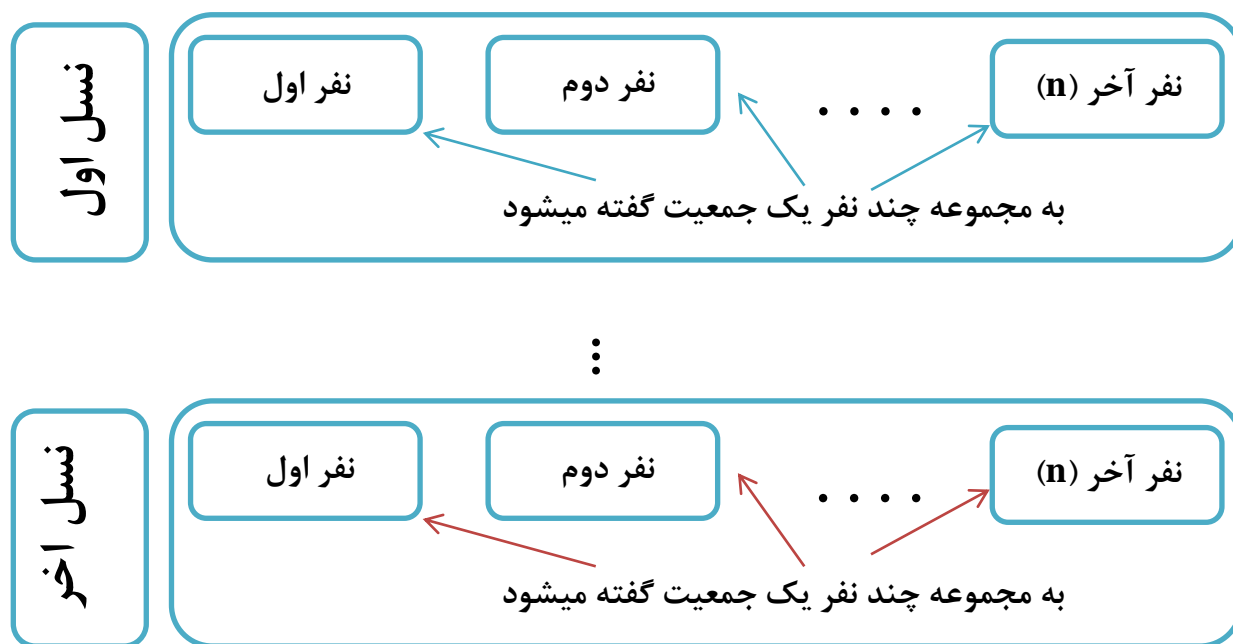
به مجموعه چند نفر یک جمعیت گفته میشود

در بین این سه نفر، نفر اول بیشترین امتیاز، نفر دوم کمترین امتیاز را دارد زیرا: $(25 < 53 < 58)$

شکل (۳-۳) در شکل بالا مفهوم نفر و جمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است

۳-۱-۳-۴- والدین و فرزندان

برای تولید نسل بعدی، الگوریتم ژنتیک تعداد خاصی از افراد جمعیت حاضر را که از آن‌ها تحت عنوان والدین یاد می‌شود، انتخاب می‌کند. والدین برای تولید افراد نسل بعدی که از آن تحت عنوان فرزندان یاد می‌شود، استفاده می‌گردند. الگوریتم ژنتیک تمایل به انتخاب افرادی تحت عنوان والدین دارد که مقدار شایستگی بهتری (بر مبنای تابع هدف) نسبت به سایرین داشته باشند. از این میان نیز، تعداد افراد با بهترین مقدار شایستگی در جمعیت حاضر، که بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند فرزندان نخبه نامیده می‌شوند. در شکل زیر شماتیک نسل، جمعیت، نفر، والدین و فرزندان آورده شده است.



تذکر : افراد نسل جدید فرزندان نسل قبلی محسوب میشوند

شکل (۳-۴) تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان

۳-۱-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک دارای روند تکراری بوده که جستجو را با جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه تصادفی آغاز می‌کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، عملگرهای ژنتیک در تولید نسل بعدی به کار گرفته می‌شوند تا جمعیت به روز شود. این الگوریتم از سه عملگر نخبه‌گزینی^۱، ترکیب^۲ و جهش^۳ برای تولید افراد نسل بعدی استفاده می‌نماید. والدینی که مقدار تابع هدف بهتری دارند شانس انتخاب شدن بیشتری برای تولید نسل بعدی دارند. برای تضمین اینکه همواره بهترین اعضا در نسل بعدی حضور خواهند داشت معمولاً ۲ تا ۵ درصد جمعیت که دارای بهترین مقادیر شایستگی هستند با عنوان فرزندان نخبه، بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند. عملیات ترکیب الگوریتم را قادر می‌سازد تا بهترین ژن‌ها را از افراد مختلف استخراج کرده و آن‌ها را در قالب فرزندان ممتازتر دوباره ترکیب کنند. عملیات جهش

¹elite

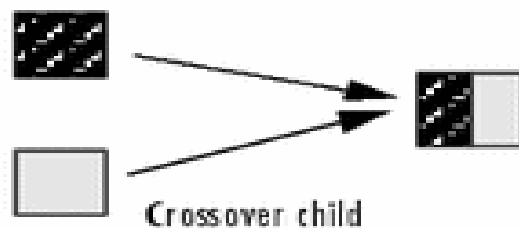
²Crossover

³Mutation

منجر به افزایش گوناگونی در جمعیت می‌شود. گوناگونی سبب می‌گردد الگوریتم ناحیه‌ی بزرگتری را مورد جستجو قرار دهد و در نتیجه کارایی الگوریتم افزایش یابد. بدون جهش الگوریتم تنها قادر به تولید فرزندی است که ژن‌های آن‌ها زیر مجموعه‌ای از ژن‌های جمعیت آغازین هستند. این وابستگی بالا به جمعیت آغازین باعث کاهش کارایی الگوریتم در بهینه‌سازی خواهد شد. انجام عمل جهش همچنین، مانع از همگرا شدن الگوریتم و ورود آن به نواحی مینیمم محلی مسئله می‌شود. در ادامه توضیحات مختصری در مورد عملگر ترکیب و جهش و نحوه گزینی در ادامه توضیح داده می‌شود.

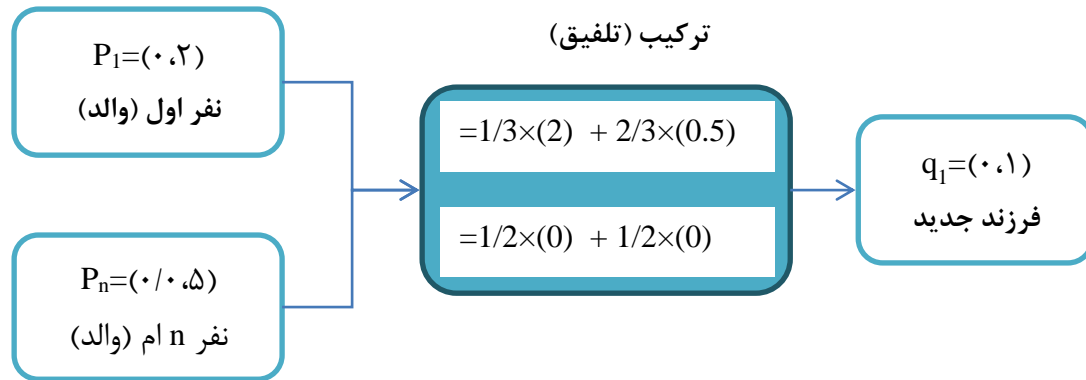
۱-۴-۱-۳- عملگر ترکیب (تلفیق)

در واقع عملگر ترکیب یک روش برای اشتراک اطلاعات مابین نفرات می‌باشد. این عملگر خصیصه‌های والدین را برای ساختن فرزندان ترکیب می‌کند تا این که فرزندان بهتری ایجاد شوند. ممکن است فرزندان بهتری تولید شود و یا ممکن است و دو فرزند برای هر جفت تولید می‌شود. عملگر ترکیب می‌تواند روی چندین والد نیز عمل کند که در این صورت خصیصه‌های بیش از دو والد را برای تولید فرزندان ترکیب می‌کند. علاوه بر این عملگر ترکیب می‌تواند بیش از دو فرزند را برای هر گروه از والدین تولید کند. وظیفه اصلی این عملگر بهبود شایستگی جمعیت می‌باشد. پیاده‌سازی این عملگر به روش مختلفی وابسته است. در ادامه، برای فهم بهتر مثالی آورده خواهد شد نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که عملگر ترکیب ممکن است منجر به ایجاد فرزند بهتر نشود.



شکل (۳-۵) عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته

فرض کنید در مثال قبل بخواهیم به با استفاده از نفر اول (p_1) و نفر دوم (p_2) و به کمک عملگر ترکیب فرزندی تولید کنیم. یکی از ساده‌ترین روش‌ها این است. که میانگین وزن دار از دو نفر بگیریم.



شکل (۳-۶) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

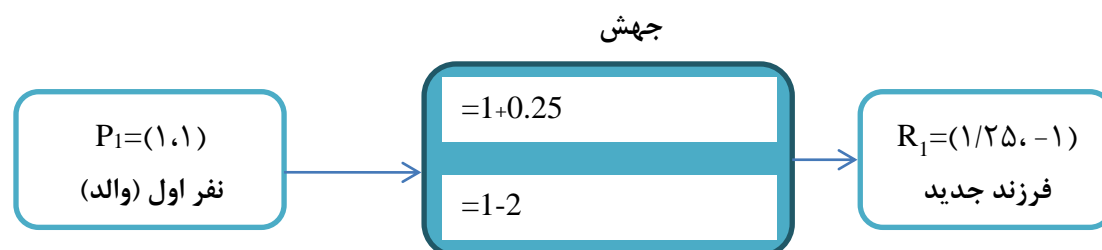
مطابق شکل (۳-۶) به کمک دو والد در نسل قدیم یک فرزند در نسل جدید ایجاد شد. این کار از طریق میانگین وزن دار صورت گرفت. روش های مختلفی برای ترکیب کردن وجود دارد که نمونه ای از آن در بالا توضیح داده شد.

۲-۴-۱-۳- جهش

بعد از اعمال عملگر ترکیب به منظور اجتناب از همگرایی به بهینه محلی و ایجاد تنوع و گوناگونی در جمعیت با استفاده از عملگر جهش می‌توان تغییر کوچکی در تعدادی از والدین شایسته تا فرزندان جدیدی حاصل شود. با این عمل نفرات جدیدی در کل جمعیت به وجود می‌آید. که ممکن است فرزندان شایسته‌تر از والدین باشد و یا بالعکس. در مثالی که در بخش‌های آتی آورده می‌شود این عملگر نیز توضیح داده می‌شود.



شکل (۳-۷) عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته



شکل (۸-۳) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

همانطور که مشاهده می‌کنید اپراتور جهش مقداری مثبت یا منفی به والدین نسل قبلی اضافه می‌کند. به عنوان مثال فرزند ایجاد شده به کمک جهش در مثال قبل $R_1=(1/25, -1)$ نسبت به والدین خود شایسته‌تر است و به جواب بهینه نزدیکتر است زیرا میزان تابع هدف آن $(F(1/25, -1)=13/25)$ است که نسبت به دیگر نفرات قبلی وضعیت مطلوب‌تری دارد (مینیمم‌تر است). عملگر جهش نسل به نسل سبب تولید نفرات جدید می‌شود که ممکن است وضعیت بهتری نسبت به والد خود داشته باشد. به طور خلاصه، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند، که طرح کلی آن به این صورت است:

- ۱- الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین که به صورت تصادفی تولید می‌شوند کار خود را آغاز می‌کند.
- ۲- سپس در ادامه یک ترتیب از جمعیت جدید را ایجاد می‌نماید (نسل‌ها). در هر گام الگوریتم با به کارگیری سه روش از افراد موجود در نسل حاضر برای تولید افراد نسل بعدی استفاده می‌نماید برای تولید نسل جدید الگوریتم ژنتیک مراحل زیر را انجام می‌دهد:
 - به هر عضو از جمعیت حاضر یک امتیاز اختصاص می‌دهد این کار با محاسبه‌ی مقدار شایستگی هر یک از افراد حاضر در جمعیت انجام می‌شود.
 - امتیازهای شایستگی به دست آمده به کمک مقیاس‌بندی به محدوده‌ی قابل استفاده‌تری از مقادیر تبدیل می‌شوند.
 - والدین بر اساس میزان شایستگی‌های اختصاص یافته به افراد انتخاب می‌شوند. در واقع از افراد

شایسته‌تر به عنوان والدین استفاده می‌شود.

- فرزندان به کمک والدین تولید می‌گردند. فرزندان با ایجاد تغییر تصادفی روی یکی از والدین (جهش) و یا با ترکیب بردارهای مربوط به هر دوی والدین (تلفیق) تولید می‌شوند.
 - جمعیت حاضر با فرزندان جایگزین می‌شوند و نسل بعدی شکل می‌گیرد.
- ۳- الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از شرایط توقف محقق شود.

۳-۱-۵- توابع عملیاتی الگوریتم‌های ژنتیک

همانطور که گفته شد الگوریتم ژنتیک به رویه تکراری می‌باشد که شامل یک جمعیت با اندازه ثابت است. هر یک از افراد این جمعیت با توجه به یک رشته محدود سمبول‌ها ارائه می‌شوند که از آن‌ها تحت عنوان ژنوم یاد می‌شود. هر یک از ژنوم‌ها یک راه‌حل ممکن در فضای مسئله را کد می‌کنند. از فضای مسئله به فضای جستجو تعبیر می‌شود که این فضا تمام راه‌حل‌های ممکن مسئله را در بر می‌گیرد. عموماً از الگوریتم ژنتیک در مورد مسائلی استفاده می‌شود که فضای جستجوی آن‌ها بسیار بزرگ بوده و روش‌های جستجو معمول در مورد آن‌ها کاربردی ندارد. یک الگوریتم ژنتیک استاندارد به صورت زیر عمل می‌کند:

ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی و یا اکتشافی فراهم آورده می‌شود. هر مرحله‌ی تکاملی یک نسل نامیده می‌شود، هر یک از افراد جمعیت حاضر بر مبنای یک تابع هدف از پیش تعریف شده ارزیابی می‌شوند و نتیجه کار تحت عنوان میزان شایستگی فرد شناخته می‌شود.

برای شکل‌گیری یک جمعیت جدید (نسل بعدی) افراد بر مبنای میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلفی برای انجام این انتخاب وجود دارند که ساده‌ترین آن‌ها که توسط هالند مطرح شده انتخاب متناسب با شایستگی می‌باشد. در این روش افراد با احتمالی متناسب با میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. به این ترتیب افراد شایسته‌تر چندین بار برای حضور در جمعیت جدید انتخاب شده و به این ترتیب شانس بیشتری برای تولیدمثل خواهند داشت. این در حالی است که افراد با شایستگی کمتر محو شده و شانسی برای انتخاب و تولیدمثل پیدا نمی‌کنند. بنابراین از نزدیک شدن به جواب محلی جلوگیری می‌شود. فرآیند انتخاب بر اساس ارزیابی صلاحیت مدل فردی است. صلاحیت یک مدل فردی مرتبط با هدف تابع می‌باشد و این تابع برای مثال می‌تواند در نتیجه مجموع مربع خطاها

مرتبط با اندازه‌گیری تعریف شود.

روال انتخاب به تنهایی نمی‌تواند هیچ فرد جدیدی را به جمعیت اضافه کند و به طبع هیچ نقطه‌ی جدیدی را در فضای جستجو پیدا نمی‌کند. بلکه این کار با استفاده از عملگرهای دیگر الهام گرفته از طبیعت از جمله تلفیق^۱ و جهش^۲ انجام می‌شود. این دو عملگر ژنتیکی در الگوریتم ژنتیک جهت تولید جمعیت جدید بکار می‌روند [۳۶]. تلفیق با توجه به یک احتمال تحت عنوان احتمال تلفیق و یا نرخ تلفیق بین دو فرد انتخاب شده انجام می‌شود. از این دو فرد تحت عنوان والدین یاد می‌شود. عملیات تلفیق از طریق مبادله‌ی اجزای ژنوم دو والد انجام می‌شود و به این ترتیب دو فرد جدید به وجود می‌آیند که از آن‌ها تحت عنوان فرزند یاد می‌شود.

جدول (۳-۱) شبه کد الگوریتم ژنتیک [۳۷]

مرحله	توضیحات
۱	تولید تصادفی نفرات به عنوان راه حل مسئله
۲	ارزیابی شایستگی هر نفر با استفاده از تابع هدف
۳	مراحل زیر تکرار شود
۴	انتخاب نفرات برتر برای عملیات ترکیب و جهش و انتقال مستقیم
۵	انجام عملیات ترکیب برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۶	عملیات جهش برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۷	انتقال مستقیم بهترین والدین به نسل جدید
۸	تکرار مراحل ۴ تا ۷ تا زمانی که شرایط توقف حاصل شود

عملگر تلفیق باعث می‌شود تا عملیات جستجو به مناطق جدیدی در فضای جستجو گسترش یابد. عملگر جهش در راستای جلوگیری از همگرایی زودرس در مینیمم‌های محلی به کار گرفته می‌شود. این عملگر نقاط جدیدی را به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌کند. این عملگر یک تغییر تصادفی را با احتمال اندک در چند بیت از ژنوم اعمال می‌کند.

الگوریتم ژنتیک یک فرآیند تکراری مبتنی بر شانس است که همگرایی را تضمین نمی‌کند. شرط پایان تکرار این الگوریتم با توجه به تعداد نسل‌ها و یا میزان شایستگی مطلوب تعیین می‌گردد. در جدول (۳-۱) شبه کد مربوط به یک الگوریتم ژنتیک استاندارد آمده است.

¹ Crossover

² Mutate

۶-۱-۳- مزایای الگوریتم ژنتیک

یکی از نقاط قوت الگوریتم‌های ژنتیک که در ابتدا یک کمبود به نظر می‌رسد این است که: GA ها هیچ چیزی در مورد مسائلی که حل می‌کنند نمی‌دانند و اصطلاحاً به آن‌ها «ساعت‌ساز نابینا» می‌گوییم. آن‌ها تغییرات تصادفی را در راه‌حل‌های کاندیدشان می‌دهند و سپس از تابع برازش برای سنجش این که آیا آن تغییرات پیشرفتی ایجاد کرده‌اند یا نه، استفاده می‌کنند. مزیت این تکنیک این است که به GA اجازه می‌دهد تا با ذهنی باز شروع به حل مسائل کند. از آنجایی که تصمیمات آن اساساً تصادفی است، بر اساس تئوری همه راه‌حل‌های ممکن به روی مسئله باز است، ولی مسائلی که محدود و به اطلاعات هستند باید از راه قیاس تصمیم بگیرند و در این صورت بسیاری از راه‌حل‌های نو و جدید را از دست می‌دهند.

یکی دیگر از مزایای الگوریتم این است که آن‌ها می‌توانند چندین پارامتر را همزمان تغییر دهند. بسیاری از مسائل واقعی نمی‌توانند محدود به یک ویژگی شوند تا آن ویژگی ماکسیم شود و باید چند جنبه در نظر گرفته شوند. GA ها در حل این گونه مسائل بسیار مفیدند، و در حقیقت قابلیت موازی کار کردن آن‌ها این خاصیت را به آن‌ها می‌بخشد. و ممکن است برای یک مسئله ۲ یا چند راه‌حل پیدا شود، که هر کدام با در نظر گرفتن یک پارامتر خاص به جواب رسیده‌اند.

به‌طور خلاصه مزایای الگوریتم ژنتیک را می‌توان در موارد زیر برشمرد:

- ۱- با متغیرهای پیوسته و هم‌گسسته می‌تواند عمل بهینه‌سازی را انجام دهد.
- ۲- نیازی به محاسبه مشتق توابع ندارد.
- ۳- بطور همزمان می‌تواند تمامی ناحیه جستجو شونده وسیع تابع هزینه را جستجو کند.
- ۴- قادر به بهینه‌سازی مسائل با تعداد متغیرهای زیاد می‌باشد.
- ۵- قابل اجرا از طریق کامپیوترهای موازی است.
- ۶- توابع هزینه‌ای که بسیار پیچیده باشند نیز از این طریق قابل بهینه‌سازی می‌باشند و الگوریتم در اکستریم محلی به دام نمی‌افتد.
- ۷- قادر است تا چند جواب بهینه را بطور همزمان به دست آورد نه فقط یک جواب.
- ۸- الگوریتم‌های ژنتیک بر روی مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها اعمال می‌شوند و نه بر روی یک راه‌حل خاص.

۹- قادر است تا متغیرها را کدبندی نموده و بهینه‌سازی را با متغیرهای کدبندی شده انجام دهد.

کدبندی سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش می‌دهد.

۱۰- الگوریتم توانایی کارکردن با داده‌های عددی تولید شده و داده‌های تجربی را علاوه بر توابع تحلیلی دارد.

۱۱- فرآیند ارائه شده توسط الگوریتم‌های ژنتیک بر روی فضایی از مجموعه نمایندگان یا همان فضای کروموزوم‌ها اعمال می‌گردد و نه بر روی خود فضای راه‌حل‌ها.

۱۲- الگوریتم‌های ژنتیک از قوانین انتقالی احتمالی بجای قوانین انتقالی قطعی استفاده می‌کنند، بدین معنا که حرکت آن در هر نقطه از الگوریتم کاملاً احتمالی بوده و بر اساس قطعیت صورت نمی‌پذیرد. این امر از مزایای مهم این روش بوده و از افتادن سیستم در کمینه محلی جلوگیری می‌نماید. البته میزان احتمال به گونه‌ای است که احتمال حرکت به سمت مسئله بیشتر از احتمال حرکت آن به سمت مخالف جواب می‌باشد.

۱۳- تنها ملاک ارزشیابی و سنجش میزان شایستگی هر راه‌حل توسط الگوریتم‌های ژنتیک، مقدار تابع شایستگی آن در فضای کروموزوم‌ها می‌باشد و نه معیارهای مورد نظر در سطح فضای راه‌حل‌ها.

۱۴- برای حل برخی از مسائلی از رده NP-Hard نیز استفاده می‌شود.

۱۵- این الگوریتم بیشتر در مسائل بهینه‌سازی و امثالهم بکار می‌رود.

۷-۱-۳- محدودیتهای الگوریتم ژنتیک

۱- حجم محاسباتی بالا

۲- سرعت همگرایی پایین در استخراج جواب (زمان اجرای طولانی)

فصل ۴:

مدل سازی ترمودینامیکی

۴-۱- مقدمه

در این مطالعه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تولید همزمانِ توان الکتریکی و آب گرم به کمک ۳ عدد توربین گازی مدل GE LM2500 بررسی می‌گردد از گرمای اگراست این ۳ توربین گازی جهت تولید توان در سیکل ORC و تولید آب گرم استفاده می‌شود. لازم بذکر است نسبت فشار این توربین در حدود ۲۱/۵ و از نوع راندمان بالا می‌باشد و دمای اگراست این توربین نیز در حدود 510°C است که میتوان از این اگزورژی و گرمای اتلافی استفاده نمود.

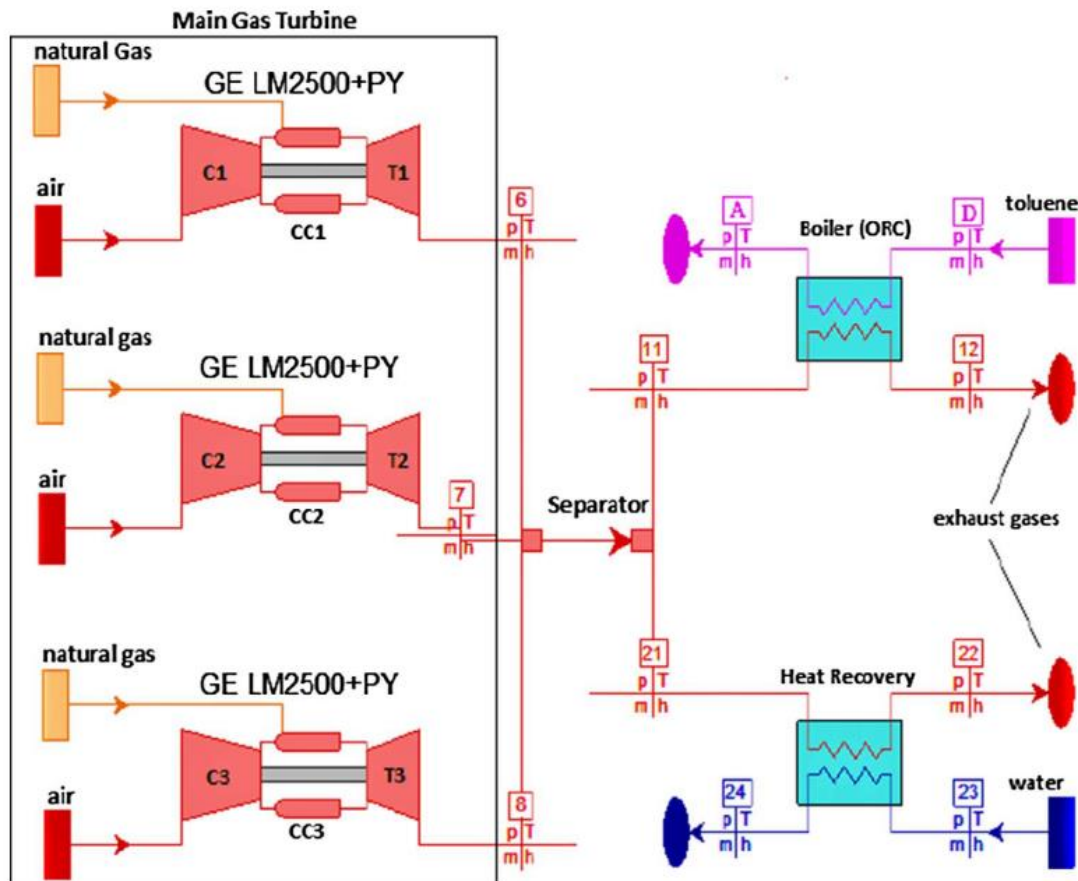
در این پژوهش، به کمک مدل‌سازی، راندمان سیکل ORC، راندمان سیکل ترکیبی، ضریب بهره‌وری، نقاط کار بهینه محاسبه می‌گردد. از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی دو هدفه (راندمان کل و ضریب بهره‌وری) استفاده می‌گردد. در انتها آنالیز حساسیت برای متغیرهای مستقل مساله صورت می‌گیرد و اثر هر متغیر بطور جداگانه بر توابع هدف محاسبه می‌شود.

۴-۲- پیکربندی سیکل ترکیبی

سیکل تولید همزمان مورد بررسی در این پژوهش مطابق شکل زیر است.



شکل (۴-۱) سیکل تولید همزمان مورد بررسی در این پژوهش

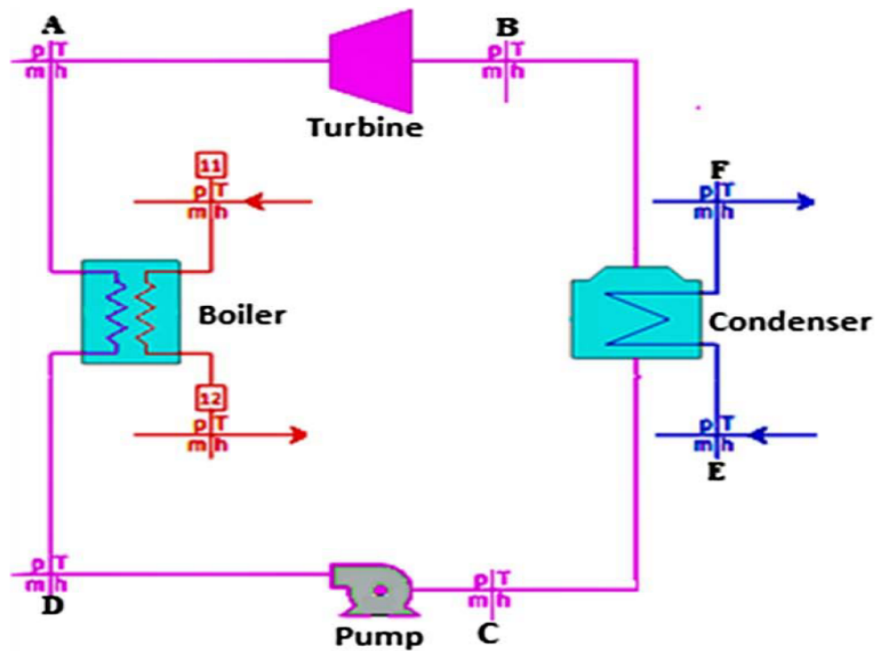


شکل (۲-۴) شماتیک سیکل ترکیبی شامل (۳ توربین گاز + سیکل رانکین آلی + تولید آب گرم)

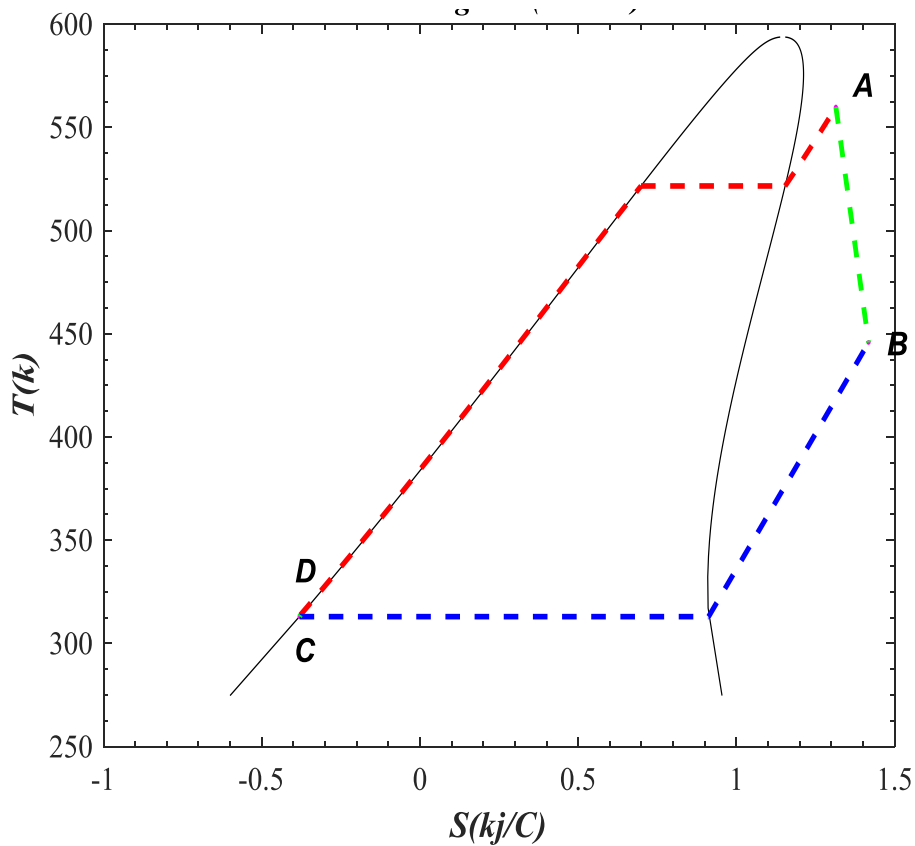
بر اساس مرجع [۳۸]، یک سیال آلی دارای وزن مولکولی بیشتر باعث افزایش نرخ جریان جرمی شده و منتج به بازده آیزنتروپیک بهتر و اتلاف کم تر در توربین ORC می شود از تولوئن به عنوان سیال عامل در سیکل ORC در این پژوهش استفاده خواهد شد. مطابق شکل (۲-۴)، محصولات احتراق، پس از خروج از ۳ توربین گازی با یکدیگر مخلوط شده و یک بخشی از آن برای رفع نیاز حرارتی آب گرم ارسال می شود. بخش دوم از محصولات احتراق، جهت راه اندازی سیکل ORC بکار گرفته می شود.

مطابق شکل (۳-۴) سیال تولوئن در حالت اشباع (نقطه C) وارد پمپ شده و پس از فشار افزایشی وارد بویلر (مبدل حرارتی) می شود (نقطه D)، با جذب گرمای اگزاست توربین، دما و آنتالپی تولوئن افزایش می یابد (نقطه A) با ورود سیال به توربین از آنتالپی سیال کاسته شده و بخشی از انرژی به توان الکتریکی تبدیل می شود. نهایتاً بخار کم فشار که در وضعیت مافوق گرم است (نقطه B) وارد کندانسور شده و به شکل مایع اشباع خارج می گردد (نقطه C). در شکل (۴-۴) نمودار دما بر حسب آنتروپی برای سیکل ORC مورد مطالعه رسم شده است. همانطور در این شکل مشاهده می کنید سیال عامل تولوئن از نوع خشک بوده و شیب نمودار اشباع در بخش بخار منفی است ($dt/ds < 0$) این مساله

سبب می‌شود تا به هنگام انبساط سیال در توربین در مراحل پایانی، قطرات مایع تشکیل نشود و سیال بصورت مافوق گرم از توربین خارج گردد.



شکل (۳-۴) شماتیک سیکل ترکیبی شامل (سیکل توربین گاز + سیکل رانکین آبی + تولید آب گرم)



شکل (۴-۴) دیاگرام دما بر حسب آنترپوی (T-S)

۳-۴- داده های مساله

از داده های فنی مربوط به توربین گازی مدل GELM2500 در مدل سازی در این پژوهش استفاده شده است. داده ها و مشخصات اسمی مربوط به این توربین در جدول (۴-۱) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می کنید راندمان این مدل توربین در حدود ۴۰ درصد و دمای خروجی اگراست ۵۱۰ °C است. دمای بالای اگراست، نشان دهنده اتلاف بالای حرارت در حالت پایه است.

جدول (۴-۱) خصوصیات توربین گازی (GE LM2500) مورد استفاده در بخش تولید توان الکتریکی

مشخصات اسمی توربین GE LM2500		واحد
راندمان اسمی	۳۹/۹	%
توان اسمی	۳۰/۴	MW
نسبت فشار	۲۱/۵	-
دمای خروجی	۵۱۰	°C
دبی جرمی خروجی توربین	۸۳	Kg/s

۴-۴- مدل سازی ترمودینامیکی سیستم ترکیبی

۴-۴-۱- فرضیات مدل سازی ORC

برای مدل سازی ترمودینامیکی ORC، از فرضیات زیر استفاده شد.

- شرایط عملیاتی پایا
- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز است
- بازده آیزنتروپیک توربین، معادل ۸۰ درصد فرض می شود
- بازده آیزنتروپیک پمپ، معادل ۶۰ درصد فرض می شود
- سیال در ورودی پمپ، مایع اشباع است
- سیال خنک کننده در کندانسور آب بوده و دمای کندانس تولوئن، ۴۰ درجه سانتی گراد است
- از افت فشار در مبدل های حرارتی صرف نظر می شود.

۴-۲- روابط و معادلات ترمودینامیکی حاکم بر مساله

قواعد قانون بقای جرم و انرژی، به هر جزء شکل (۴-۳) اعمال شده این معادلات بقا برای سیکل رانکین در جدول (۴-۲) ارائه شده است.

جدول (۴-۲) موازنه انرژی در اجزای ORC ساده (مربوط به)

$\dot{W}_t = \dot{m}_A(h_A - h_B)$	Turbine Energy balance	(۴-۱)
$\eta_t = \frac{h_A - h_{B,r}}{h_A - h_{B,s}}$	Isentropic efficiency	(۴-۲)
$\dot{W}_p = \dot{m}_A(h_D - h_C)$	Pump Energy balance	(۴-۳)
$\eta_p = \frac{h_{C,s} - h_D}{h_{C,r} - h_D}$	Pump Isentropic efficiency	(۴-۴)
$\dot{Q}_{co} = \dot{m}_A(h_B - h_C) = \dot{m}_E(h_E - h_F)$	Condenser Energy balance	(۴-۵)
$\dot{Q}_b = \dot{m}_A(h_D - h_A) = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12})$	Energy balance	(۴-۶)

بازده حرارتی ORC، چنانکه در معادله (۴-۷) نشان داده شده است، به شکل نسبت توان خالص، \dot{W}_{ORC} ، به حرارت ورودی به چرخه، \dot{Q}_b می باشد. بازده کل سیستم در معادله (۴-۸) ارائه شده، که بر اساس نسبت توان کل تولید شده توسط سیستم (توربین های گازی اصلی + ORC) به انرژی آزاد شده توسط سوخت در محفظه احتراق توربین های گازی می باشد. ضریب بهره که بر اساس معادله (۴-۹) مشخص شده، به سهم انرژی تامین شده توسط سوخت برای سیستم گفته می شود، که از آن برای تولید نیرو یا حرارت استفاده می گردد.

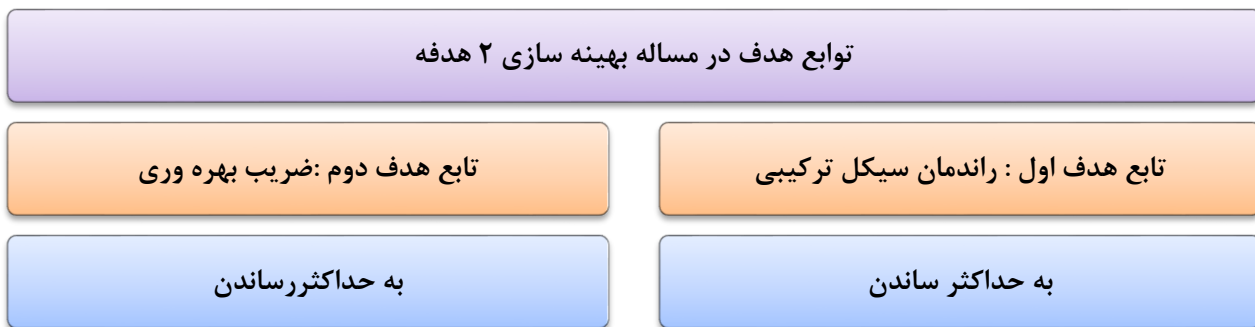
$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{ORC}}{\dot{Q}_{in,ORC}} \quad (۴-۷)$$

$$\eta_{ove} = \frac{\sum \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ORC}}{(\dot{m}.LHV)_{fuel}} \quad (۴-۸)$$

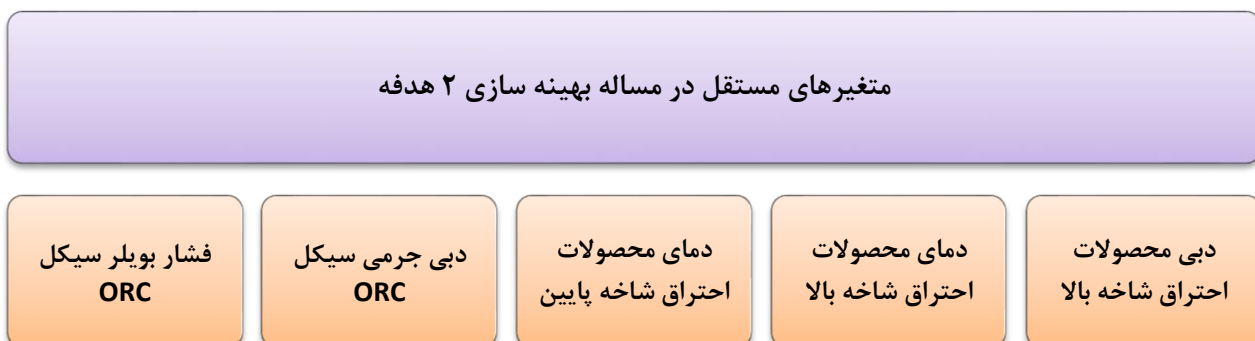
$$\epsilon_u = \frac{\sum \dot{W} + \dot{Q}}{(\dot{m}.LHV)_{fuel}} \quad (۴-۹)$$

۴-۳-۴- بهینه سازی دو هدفه

بعد از ارائه مدل ترمودینامیکی، جهت پیش بینی راندمان متوسط سیکل ترکیبی و ضریب بهره وری می توان به کمک الگوریتم ژنتیک به بهینه سازی این دو متغیر خروجی پرداخت. برای پیاده سازی بهینه سازی، یک برنامه به زبان متلب نوشته شد. و این دو تابع هدف هزاران بار توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه گردید. (در هر بار تکرار، ۵ متغیر اصلی مستقل مساله که در جدول آمده است تغییر داده می شود) سپس، به جستجوی راه حل های بهینه در بین راه حل ها می پردازد. مطابق شکل زیر، بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک، از طریق بهینه سازی توابع هدف راندمان سیکل ترکیبی (η_{ove}) و بهینه سازی درصد ضریب بهره وری (ϵ_u) انجام می گیرد.



شکل (۴-۵) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه



شکل (۴-۶) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه

متغیرهای مستقل و توابع هدف در مساله بهینه سازی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۳-۴) توابع هدف و متغیرهای مستقل

توضیحات	نمایش	متغیر مستقل و وابسته	توابع هدف
راندمان سیکل ترکیبی	$\eta_{Ove}(\%)$	Combine cycle Efficiency	توابع هدف
ضریب بهره وری	$\epsilon_u(\%)$	Utilization Factor	
دبی محصولات احتراق شاخه بالا شاخه	$m_{11}(\frac{kg}{s})$	Part of exhaust mass flow rate	متغیرهای مستقل
دمای خروجی محصولات احتراق شاخه بالا	$T_{12}(^{\circ}C)$	Outlet temp of recuperator 1	
دمای خروجی محصولات احتراق شاخه پایین	$T_{22}(^{\circ}C)$	Outlet temp of recuperator 2	
دبی جرمی سیکل ORC	$m_{ORC}(\frac{kg}{s})$	ORC mass flow rate	
فشار بالای سیکل ORC (فشار بویلر)	$P_{ORC}^{up}(kpa)$	upper pressure of ORC cycle	

مطابق رابطه زیر راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره وری به دبی محصولات احتراق شاخه بالا شاخه (m_{11})، دمای خروجی محصولات احتراق شاخه بالا، دمای خروجی محصولات احتراق شاخه پایین، دبی جرمی سیکل ORC (m_{ORC})، فشار بالای سیکل ORC (P_{ORC}^{up}) وابسته است. (متغیرهای مستقل ارائه شده در بالا در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است)

$$\eta_{Ove} = f(m_{11}, T_{12}, T_{22}, m_{ORC}, P_{ORC}^{up}) \quad (۴-۱۰)$$

$$\epsilon_u = g(m_{11}, T_{12}, T_{22}, m_{ORC}, P_{ORC}^{up}) \quad (۴-۱۱)$$

هر مساله بهینه سازی در مهندسی شامل یک سری قیود و محدودیت ها می باشد قیود مساله بهینه سازی در این پژوهش در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۴-۴) قیود نامساوی مساله بهینه سازی

متغیر	متغیر	حد بالا	حد پایین
دبی محصولات احتراق شاخه بالا شاخه	$m_{11}(\frac{kg}{s})$	۲۴۹	۸۳
دمای خروجی محصولات احتراق شاخه بالا	$T_{12}(^{\circ}C)$	۲۵۰	۲۰۰
دمای خروجی محصولات احتراق شاخه پایین	$T_{22}(^{\circ}C)$	۲۵۰	۲۰۰
دبی جرمی سیکل ORC	$m_{ORC}(\frac{kg}{s})$	۲۰۰	۷۰
فشار بالای سیکل ORC (فشار بویلر)	$P_{ORC}^{up}(kpa)$	۲۵۰۰	۱۰۰۰
حداکثر دمای سیکل ORC	$T_{ORC}^{MAX}(^{\circ}C)$	۴۸۰	-

۴-۴-۴ پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک

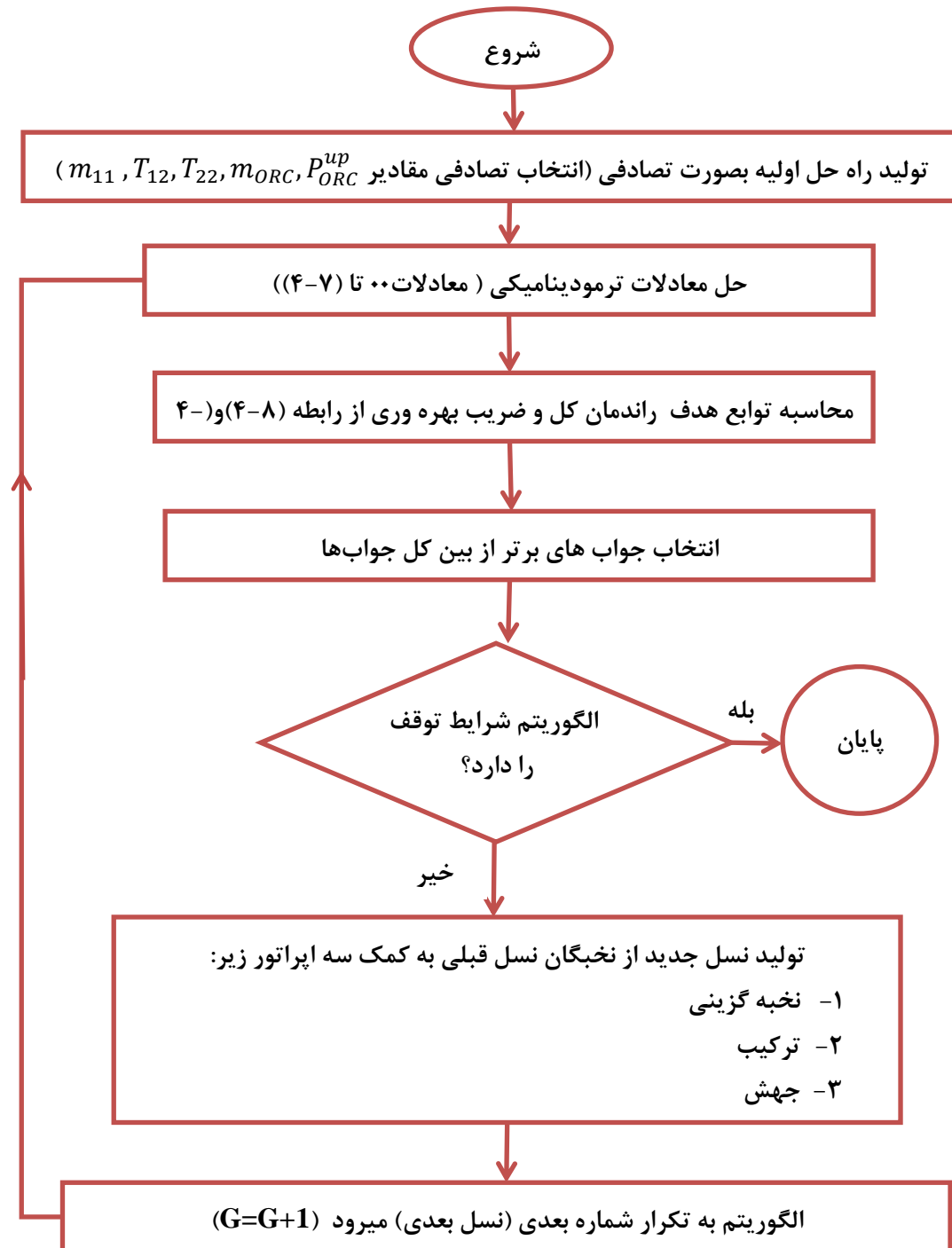
در جدول زیر پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. توضیحات مربوط به هر کدام از این پارامترها (تعداد نسل، تعداد نفرات در هر نسل، تعداد نخبه و درصد ترکیب) به تفصیل در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۴-۵) پارامترهای ژنتیک الگوریتم

پارامتر	مقدار
تعداد نسل	۲۰۰
تعداد نسل واماندگی	۵۰
تعداد نفرات	۵۰۰
تعداد نخبه	۲
ضریب ترکیب	۰/۸

در این مطالعه، تعداد ۱۰۰۰۰۰ راه حل مورد ارزیابی قرار می گیرد. لازم بذکر است الگوریتم ژنتیک به تعداد ۲۰۰ بار تکرار می گردد که در هر تکرار ۵۰۰ راه حل ارزیابی می شود. در هر بار ارزیابی، کل

معادلات ترمودینامیکی مورد نیاز، حل می‌گردد و مقادیر راندمان کلی سیکل ترکیبی (η_{ove}) و ضریب بهره‌وری (ϵ_u) محاسبه می‌گردد. در هر تکرار تنها ۵ متغیر اصلی ($m_{11}, T_{12}, T_{22}, m_{ORC}, P_{ORC}^{up}$) تغییر داده می‌شود و مقادیر بهینه این ۵ متغیر در انتها محاسبه می‌شود. در ادامه فلوچارت ورود بهینه‌سازی ارائه شده است.



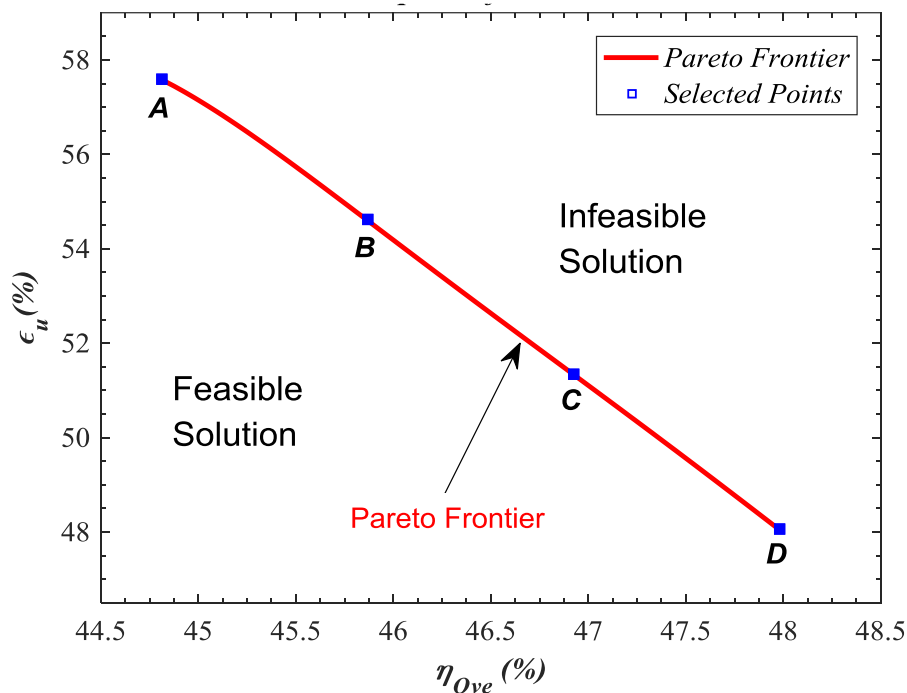
شکل (۷-۴) فلوچارت حل مساله و نحوه بهینه‌سازی راندمان کل و ضریب بهره‌وری به کمک الگوریتم GA

روند بهینه سازی بدین شکل است که ابتدا تعدادی راه حل بصورت تصادفی تولید می شود. سپس با جای گذاری در معادلات ترمودینامیکی توابع هدف (راندمان و ضریب بهره‌وری) محاسبه می گردد. راه‌حلی که منجر به بالاترین راندمان و ضریب بهره‌وری می شود شایسته تر تلقی شده و شانس انتخاب آن برای تولید نسل بعدی بیشتر است.

راه‌حل‌های نخبه برای تولید راه‌حل‌های نسل بعدی انتخاب می شوند و راه‌حل‌هایی که منجر به تولید راندمان پایین می شوند حذف می گردد. به کمک سه اپراتور ترکیب، جهش و نخبه‌گزینی راه‌حل‌های نسل بعدی (فرزاندن) از روی نسل قبلی (والدین) تولید می شوند. این عمل تا جایی ادامه پیدا می کند که شرایط توقف الگوریتم فرارسد. در انتها بهترین راه‌حل انتخاب می شود و مقادیر بهینه‌ی $m_{11}, T_{12}, T_{22}, m_{ORC}, P_{ORC}^{up}$ ارائه می گردد. از آنجا که دو تابع هدف وجود دارد بنابراین جواب بهینه یک نقطه نیست و به شکل یک منحنی به نام **جبهه پارتو** است.

۵-۴- نتایج

به کمک الگوریتم ژنتیک، دو تابع هدف به حداکثر ممکن رسید جواب بهینه به شکل یک جبهه است که در شکل زیر ارائه شده است.



شکل (۵-۴) جواب بهینه مساله بهینه سازی (جبهه پارتو)

مطابق نمودار شکل (۸-۴) با افزایش راندمان سیکل ترکیبی (بهبود تابع هدف اول)، میزان ضریب بهره‌وری (تابع هدف دوم) به سمت نامطلوب شدن پیش می‌رود و در واقع ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد. زیرا درصد بیشتری از حرارت در شاخه بالا (جهت تولید توان در ORC) استفاده شده و حرارت کمتری جهت تولید آب گرم در شاخه پایین، استفاده می‌گردد. همانطور که این نمودار نشان می‌دهد یک تضادی بین دو تابع هدف وجود دارد. و بسته به اینکه کدام تابع هدف اهمیت بیشتری دارد میتوان یکی از این نقاط موجود بر روی جبهه پارتو را انتخاب نمود. در واقع انتخاب این نقطه در یک فرآیند تصمیم‌سازی^۱ انجام می‌گیرد.

نقاط زیر جبهه پارتو به راه‌حل‌های ممکن، (feasible solution) مشهور است. نقاط بالای منحنی جبهه پارتو راه‌حل‌های غیرممکن، (infeasible solution) نامیده می‌شود. برای روشن شدن بیشتر این موضوع، نقطه B از جبهه پارتو را در نظر بگیرید میزان راندمان سیکل ترکیبی برای نقطه B در حدود ۴۵/۹٪ و میزان ضریب بهره‌وری آن حدود ۵۴/۶٪ است. عملاً به دلیل قیود و محدودیت‌های موجود، دسترسی به ضریب راندمان بالاتر از ۵۴/۶٪ زمانیکه راندمان ترکیبی ۴۵/۹٪ است وجود ندارد. بنابراین ناحیه بالای جبهه پارتو به ناحیه راه‌حل‌های غیرممکن مشهور است.

مطابق نتایج بدست آمده از جبهه پارتو (شکل (۸-۴)) حداکثر راندمان قابل دسترسی برای سیکل ترکیبی در حدود ۴۸٪ است که ضریب بهره‌وری برای این حالت حداقل است. حداکثر ضریب بهره‌وری قابل استحصال در حدود ۵۷/۶٪ است که راندمان سیکل ترکیبی متناظر با آن حداقل (۴۴/۸٪) می‌باشد.

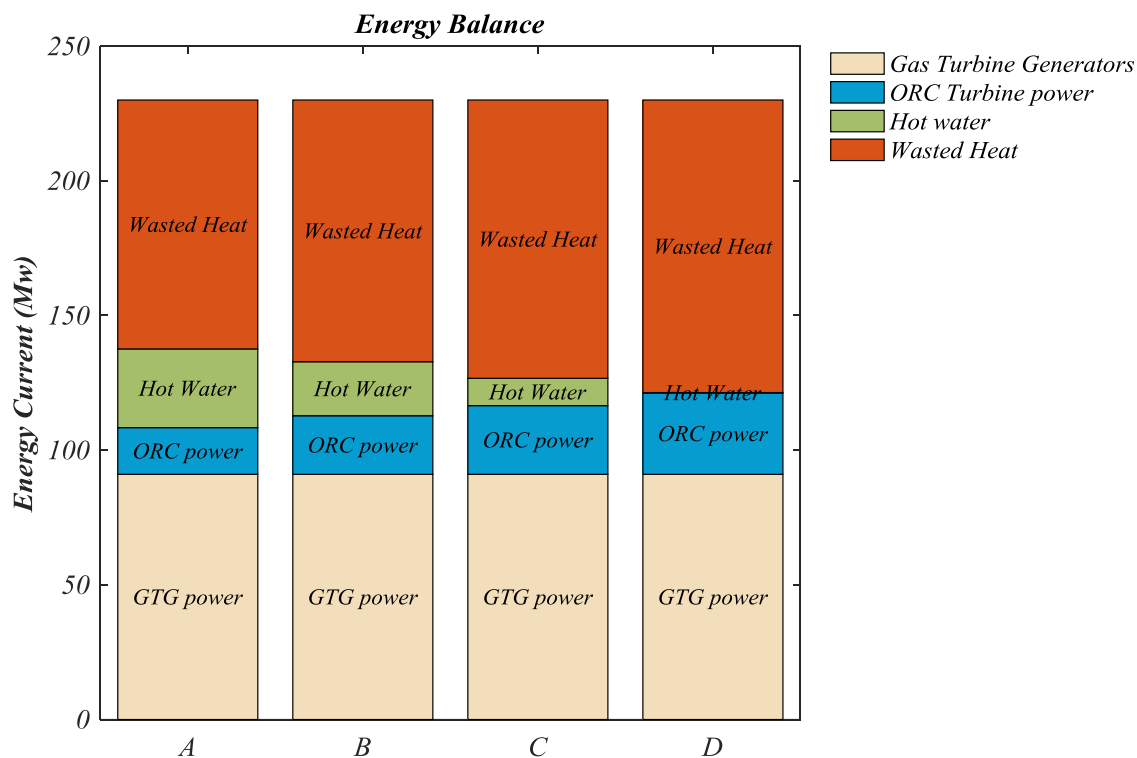
۴ نقطه از جبهه پارتو (نقاط A-B-C-D) جهت آنالیز بیشتر انتخاب شد. بیلان انرژی، نمودار ترمودینامیکی T-S و آنالیز حساسیت برای این ۴ نقطه در بخش‌های بعدی به ترتیب ارائه می‌گردد.

۴-۵-۱- بیلان انرژی

شکل (۴-۹) بیلان انرژی را برای ۴ نقطه بهینه A-B-C-D از جبهه پارتو نشان می‌دهد انرژی ورودی به توربین‌ها (ورودی سوخت) برای هر ۴ نقطه ثابت است (در تمامی حالت‌ها بار هر توربین ۱۰۰٪ فرض شده است). انرژی ورودی به توربین‌ها (ورودی سوخت) به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود.

¹Decision making

بخش مفید آن از طریق توربین‌های گازی به توان الکتریکی تبدیل شده (انرژی توربوژنراتور GTG) و بقیه‌ی آن توسط گازهای خروجی به بیرون برده می‌شود. از این گازها برای بازیابی انرژی در واحد بازیابی حرارت استفاده شده، که بخشی از آن از طریق ORC منجر به حصول انرژی الکتریکی شده و از باقی‌مانده نیز برای گرمادهی استفاده می‌شود (آب داغ) و نهایتاً مقداری از آن بصورت حرارت اتلافی به اتمسفر تخلیه می‌شود. برای تمامی حالت‌های مورد بررسی در این پژوهش سه توربین در وضعیت ۱۰۰٪ بار در نظر گرفته شد.



شکل (۹-۴) بیلان انرژی (GTG+ORC+HOT WATER + WASTED HEAT = ENERGY OF FUEL)

در شکل زیر (شکل (۴-۱۰) راندمان سیکل ORC در مقایسه با راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره‌وری ارائه شده است. لازم بذکر است در تعریف راندمان سیکل ORC، مخرج کسر گرمای انتقال داده شده در بویلر در نظر گرفته شده است (Q_b) در حالیکه در تعریف راندمان سیکل ترکیبی، مخرج کسر، انرژی آزاد شده سوخت مصرفی لحاظ شده است ($m_f LHV_f$)

مطابق با رابطه‌ی راندمان چرخه کارنو (معادله (۱۲-۴))، میزان راندمان یک سیکل تولید توان، به دمای منبع گرم (T_H) و دمای منبع سرد (T_L) وابسته است. هر اندازه دمای منبع گرم بالاتر باشد راندمان سیکل تولید توان بیشتر است

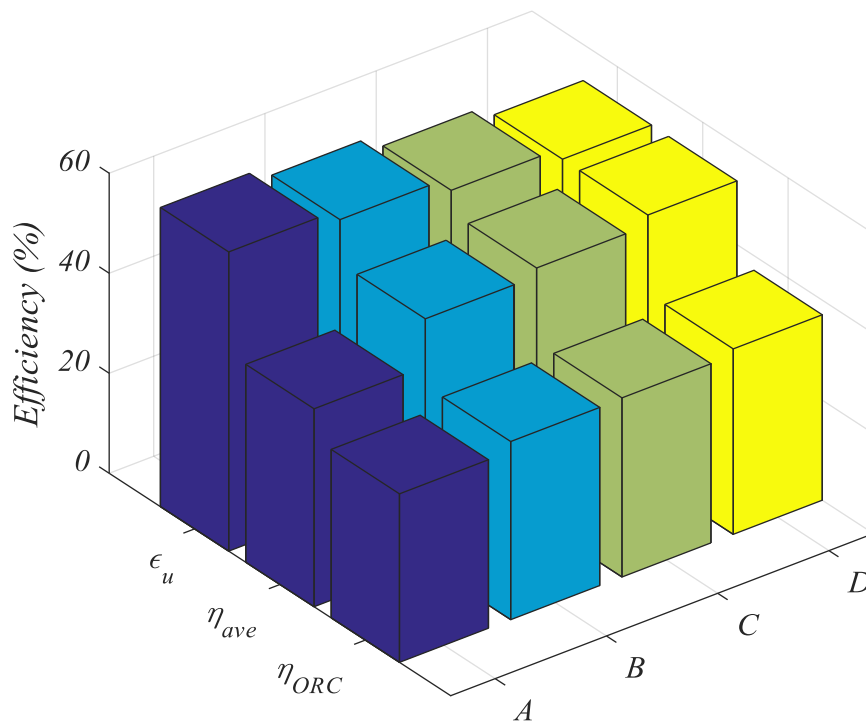
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (4-12)$$

مطابق با اصل کارنو، میزان راندمان سیکل ORC، به دمای بالا (بویلر) و دمای پایین (کندانسور) بستگی دارد. در این پژوهش، دمای بالای سیکل برای ۴ حالت مورد بررسی به شرح زیر است

جدول (۴-۶) دمای خروجی بویلر سیکل ORC

دمای خروجی تولون از بویلر	$T_D^{\text{max boiler}}$	$T_C^{\text{max boiler}}$	$T_B^{\text{max boiler}}$	$T_A^{\text{max boiler}}$
کلون	562.6	553.8	552.4	534.1

مطابق با نتایج جدول بالا بدیهی است راندمان ORC بر این نقطه D نسبت به ۳ نقطه‌ی دیگر بالاترین باشد. $(\eta_D > \eta_C > \eta_B > \eta_A)$ از آنجا که اختلاف دمای این ۴ نقطه $(T_D - T_C - T_B - T_A)$ اندک و ناچیز است. اختلاف میزان راندمان ORC برای این ۴ نقطه نیز اندک بدست آمد. لازم بذکر است دمای پایین سیکل ORC برای تمامی حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. دمای پایین سیکل (دمای کندانس تولون) 40°C برای کلیه حالت‌ها فرض شده است (فرضیات مدل سازی)



شکل (۴-۱۰) نمودار راندمان سیکل ORC در مقایسه با راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره وری برای ۴ نقطه A-B-C-D

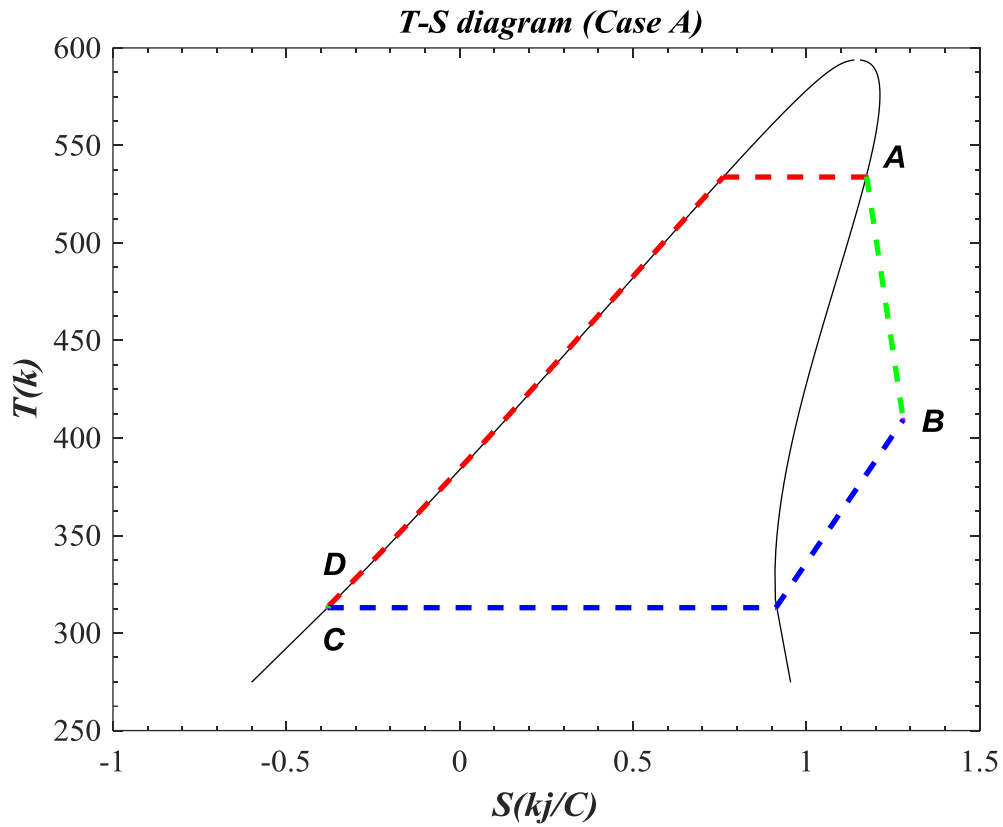
جدول (۴-۷) مشخصات فرآیندی و عملکردی بهینه (نقاط A-B-C-D)

Variables	Unit	D	C	B	A
m_{11}	kg/s	248.6	217	186.2	157.3
T_{12}	°C	200.3	200.2	200.3	201.2
T_{22}	°C	221.3	211	209.1	209.3
m_{ORC}	kg/s	107.8	96.87	83.45	73.42
P_{ORC}^{up}	kPa	2305	2292	2288	1951
η_{ove}	-	0.53	0.51	0.49	0.47
ϵ_u	-	0.53	0.55	0.58	0.60
w_{pump}	kW	416.73	372.43	320.21	240.23
$w_{turbine}$	MW	30.670	25.888	22.078	17.585
w_{net}	MW	30.253	25.516	21.757	17.344
T_{max}^{ORC}	K	562.6	553.8	552.4	534.1
η_{ORC}	-	0.37	0.36	0.36	0.34
Q_{boiler}^{ORC}	MW	81.594	71.237	61.088	51.490
$Q_{Hot\ water}$	MW	0.115	10.140	20.047	29.224
Q_{waste}	MW	108.611	103.323	97.174	92.410
$(mLHV)_f$	MW	230.01	230.01	230.01	230.01

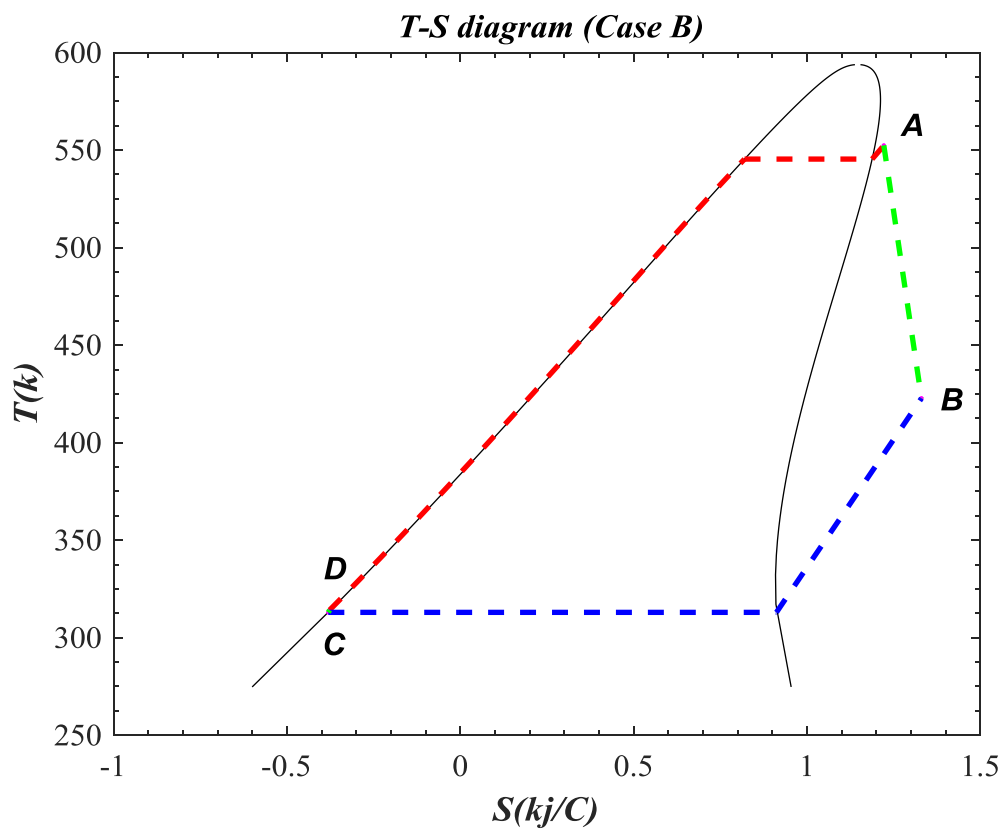
۴-۵-۲- دیاگرام آنتروپی بر حسب دما

در شکل (۴-۱۱) شکل (۴-۱۴) دیاگرام دما بر حسب آنتروپی برای ۴ نقطه (A-B-C-D) رسم گردید. همانطور که مشاهده می کنید حداکثر دمای سیکل ORC مربوط به دمای خروجی از بویلر نقطه D است. فرآیند A-B فرآیند تولید توان در توربین می باشد که این فرآیند با افزایش آنتروپی همراه است (بازده آیزنتروپیک توربین ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است) فرآیند B-C فرآیند انجام شده در کندانسور است. در این فرآیند تولوئن گرمای خود را ازدست می دهد تا مایع اشباع حاصل شود. (مطابق فرضیات مدلسازی دمای کندانس تولوئن ۴۰ °C در نظر گرفته شده است) فرآیند C-D فرآیند فشار افزایی در پمپ است. این فرآیند نیز با افزایش آنتروپی همراه می باشد. فرآیند انتقال حرارت در بویلر

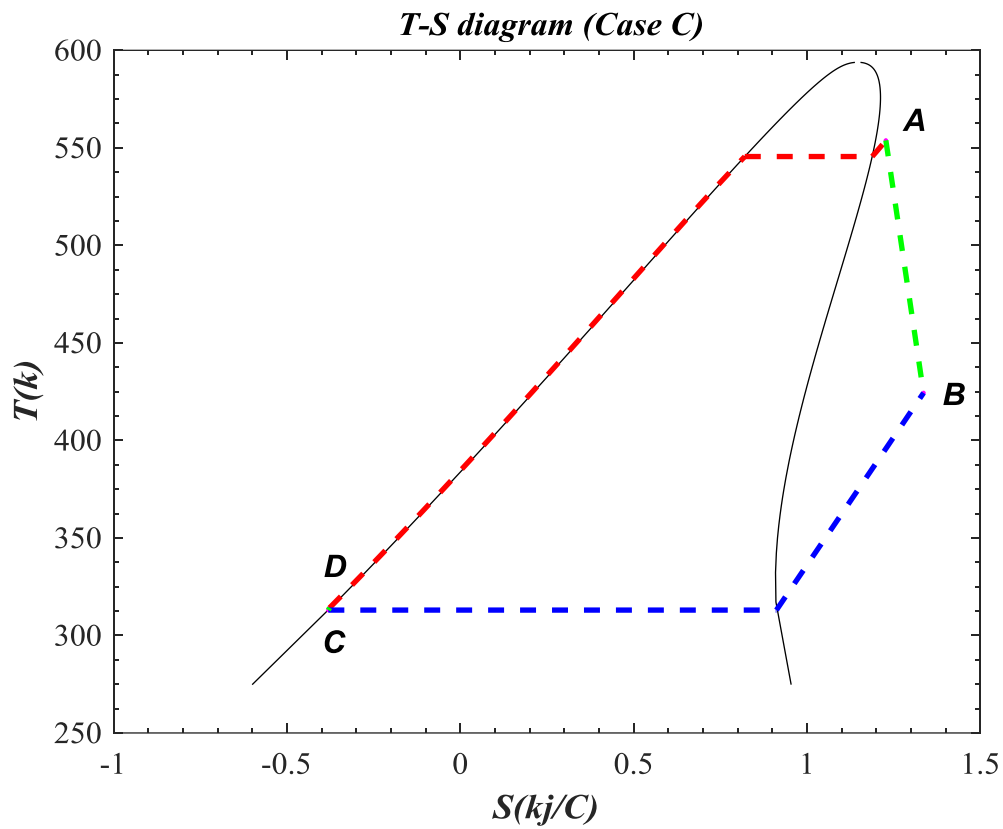
یک فرآیند تقریباً هم فشار است که بصورت (D-A) بر روی نمودار T-S قابل مشاهده است.



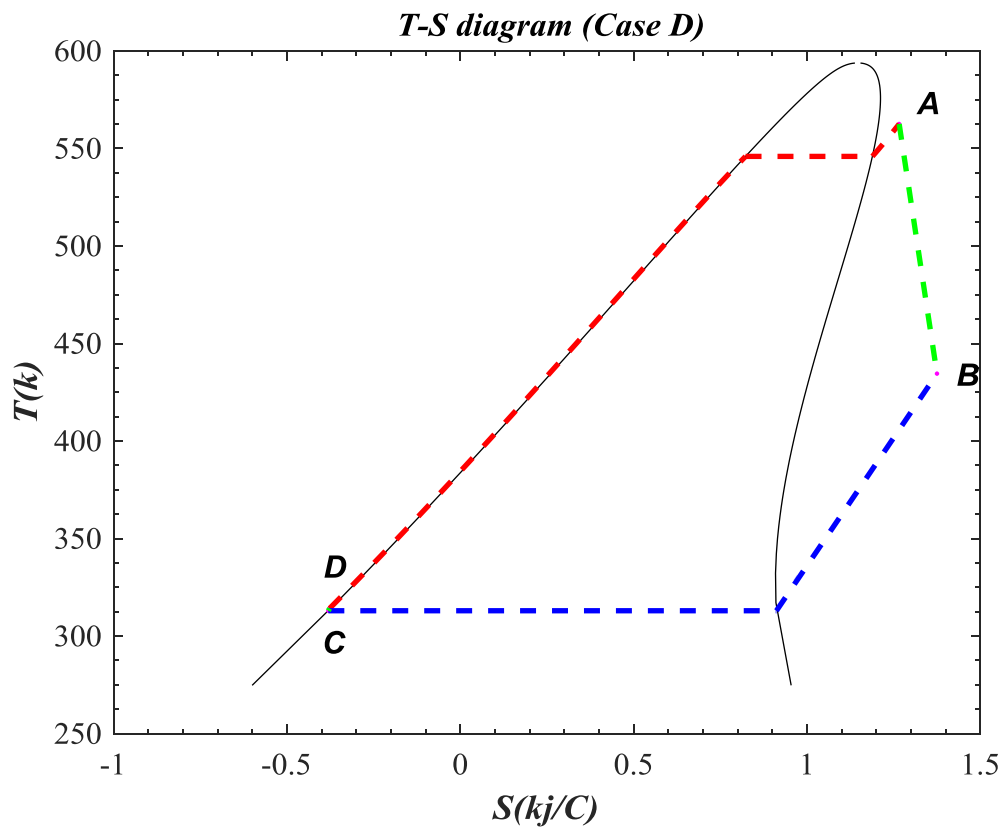
شکل (۴-۱۱) دیاگرام دما بر حسب آنتروپی برای حالت A



شکل (۴-۱۲) دیاگرام دما بر حسب آنتروپی برای حالت B



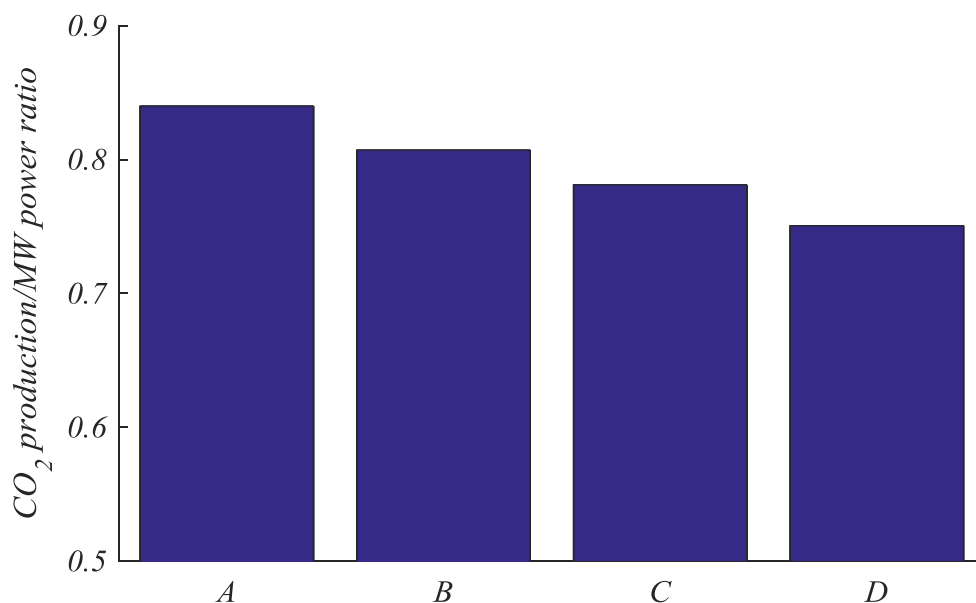
شکل (۴-۱۳) دیاگرام دما بر حسب آنتروپی برای حالت C



شکل (۴-۱۴) دیاگرام دما بر حسب آنتروپی برای حالت D

۴-۵-۳- کاهش دی اکسید کربن تولیدی

نتایج جدول (۴-۷) نشان می دهد که در شرایط کاری نقطه ی D، میزان تولید توان ۳۳ درصد نسبت به حالت مبنا (حالتی که از سیکل ORC استفاده نمیشود) بیشتر است (توان تولیدی سیکل از ۹۱/۲ مگاوات به ۱۲۱/۴ مگاوات میرسد) این در حالی است که میزان دی اکسید کربن تولیدی تغییر نمی کند چون مصرف سوخت در توربین ثابت است. در واقع زمانیکه از سیکل ORC بصورت ترکیبی با سیکل توربین گاز استفاده می شود میزان دی اکسید کربن تولیدی به ازای تولید یک مگاوات برق در حدود ۲۵٪ کاهش می یابد. میزان تولید گاز کربنیک برای سیکل ترکیبی در مقایسه با سیکل توربین گازی به تنهایی برای ۴ نقطه A-B-C-D در نمودار شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می کنید گاز کربنیک تولیدی به ازای هر مگاوات توان در مقایسه با حالت پایه به ترتیب ۱۶٪ - ۱۹/۳٪ - ۲۱٪ - ۲۵٪ کاهش نشان می دهد.



شکل (۴-۱۵) میزان دی اکسید کربن تولیدی به ازای تولید یک مگاوات برق برای حالت A-B-C-D

۴-۵-۴- آنالیز حساسیت متغیرها

همیشه در بیشتر تحقیق‌های کمی و کیفی پیدا کردن مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار یکی از دغدغه‌های پژوهشگران بوده است. علت آن پیچیده‌تر شدن روابط بین متغیرها و پدیده‌های تحت بررسی است. در این خصوص متغیر وابسته فقط تحت تاثیر یک متغیر مستقل قرار ندارند بلکه تعداد زیادی متغیرهای شناخته شده و شناخته نشده‌ای وجود دارند که متغیر وابسته را تحت تاثیر قرار می‌دهند که این متغیرها نیز ممکن است خودشان تحت تاثیر یک دسته از متغیرهای دیگر باشند. بنابراین تشخیص اینکه کدام متغیر می‌تواند تاثیر بیشتری بر متغیر وابسته بگذارد چالش برانگیز می‌شود.

در آنالیز حساسیت متغیرها، تمام متغیرهای مستقل را ثابت فرض کرده و تنها یک متغیر مستقل را در بازه‌ی مجاز تغییر می‌دهیم تا تاثیر آن متغیر را بر متغیر وابسته بررسی کنیم. در این پژوهش متغیر وابسته راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره‌وری می‌باشد.

در این پژوهش متغیرهای مستقل شامل $m_{11}, T_{12}, T_{22}, m_{ORC}, P_{ORC}^{up}$ می‌باشد. که نتایج مدل سازی آن در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

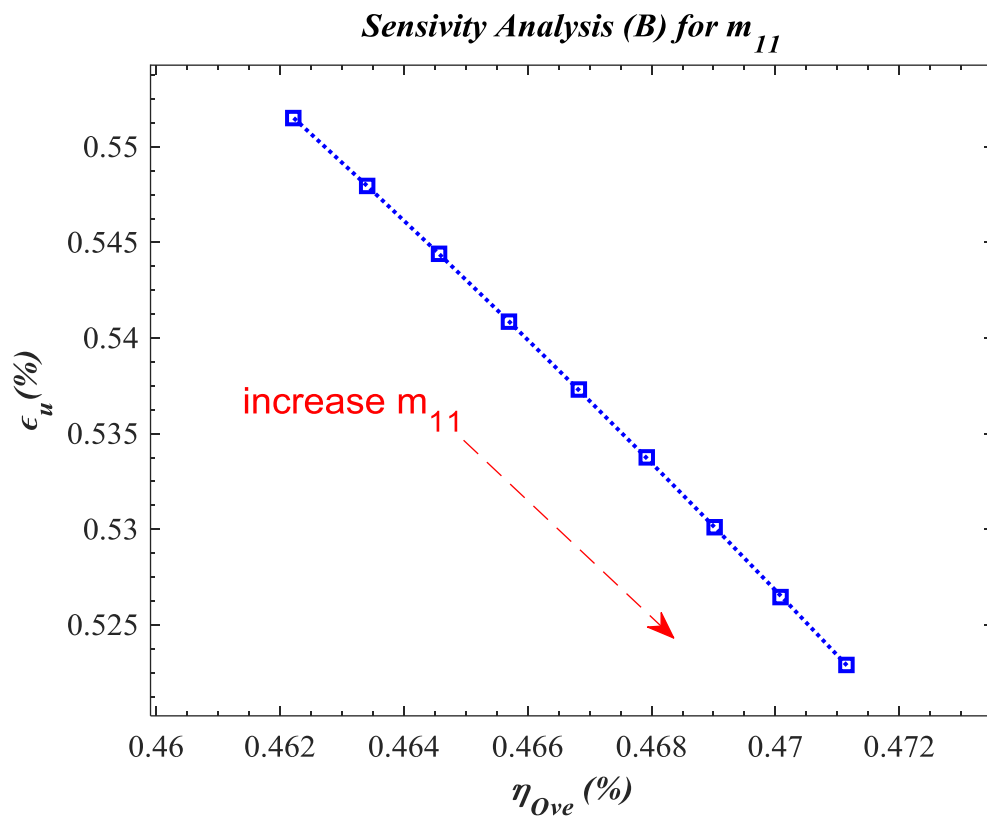
متغیر m_{11} بخشی از جریان محصولات احتراق است که به سمت شاخه تولید می‌رود با افزایش دبی m_{11} میزان دبی m_{21} کاهش می‌یابد زیرا مجموع آنها ثابت است. (دبی m_{21} بخشی از دبی محصولات احتراق است که به شاخه‌ی پایینی جهت تولید آب گرم ارسال می‌گردد)

$$m_{21} + m_{21} = m_{exh} = cte \quad (4-13)$$

بنابراین واضح است که با افزایش دبی m_{11} راندمان سیکل ترکیبی بهبود می‌یابد چون میزان توان الکتریکی تولیدی سیکل ORC افزایش می‌یابد. در واقع مطابق با رابطه زیر گرمای انتقال یافته در بویلر سیکل ORC به دبی m_{11} وابسته است. و با افزایش آن میزان گرمای بیشتری به سیکل ORC منتقل شده و کار بیشتری تولید می‌گردد. (Q_b : گرمای انتقال یافته در بویلر)

$$Q_b = m_{11}(T_{11} - T_{12}) \quad (4-14)$$

از طرف دیگر با افزایش دبی m_{11} میزان دبی m_{21} کاهش می‌یابد بنابراین آب گرم کمتری تولید شده و ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد. پس بطور کلی مطابق نتایج با افزایش دبی m_{11} میزان راندمان سیکل ترکیبی افزایش و میزان ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد.

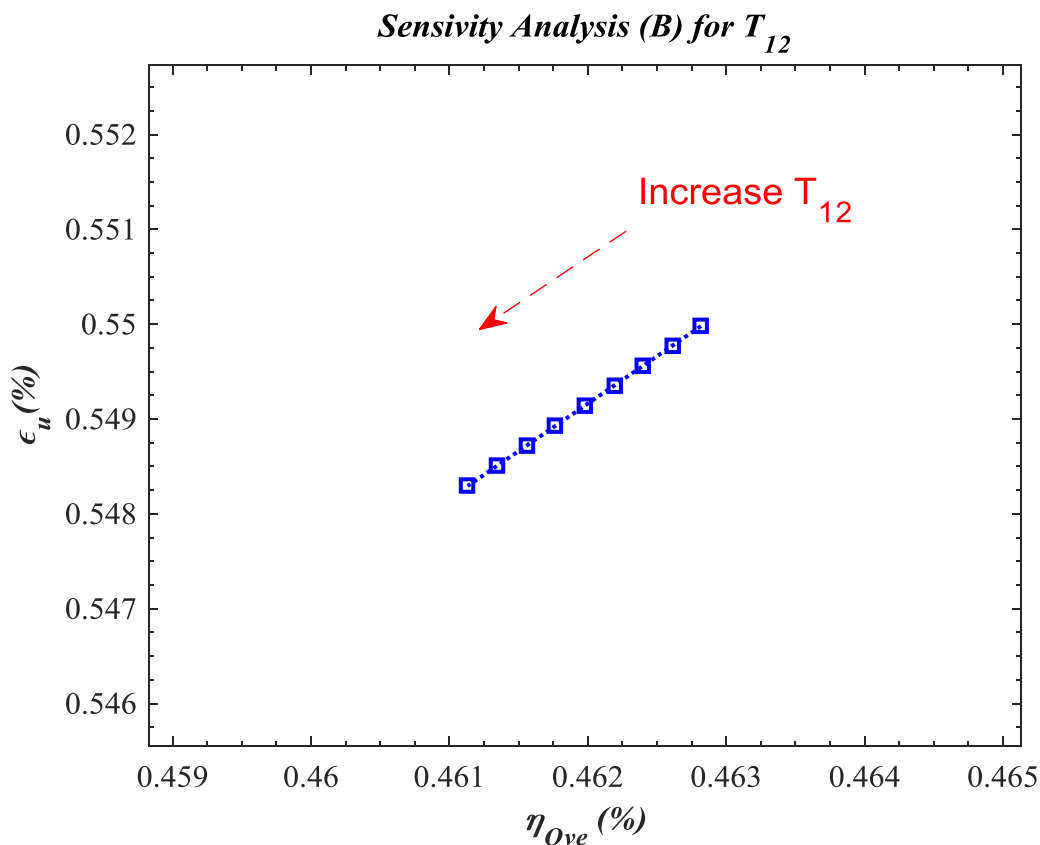


شکل (۴-۱۶) آنالیز حساسیت برای متغیر m_{11} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دو تابع هدف

متغیر T_{12} دمای خروجی محصولات احتراق از بویلر بازیاب است. هر اندازه T_{12} کوچکتر باشد این به آن معناست که گرمای بیشتری در بویلر بازیاب ریکاوری شده است. در واقع مطابق با رابطه زیر گرمای انتقال یافته در بویلر سیکل ORC به دمای T_{12} وابسته است. و با افزایش آن میزان گرمای کمتری به سیکل ORC منتقل شده و کار کمتری تولید می گردد. (Q_b : گرمای انتقال یافته در بویلر)

$$Q_b = m_{11}(T_{11} - T_{12}) \quad (۴-۱۵)$$

با افزایش T_{12} بخش زیادی از انرژی گازهای گرم بازیاب نشده و به اتمسفر تخلیه می گردد بنابراین مطابق شکل (۴-۱۷) با افزایش T_{12} تولید توان در سیکل ORC کاهش می یابد و ضریب بهره وری و راندمان سیکل ترکیبی افت می کند.

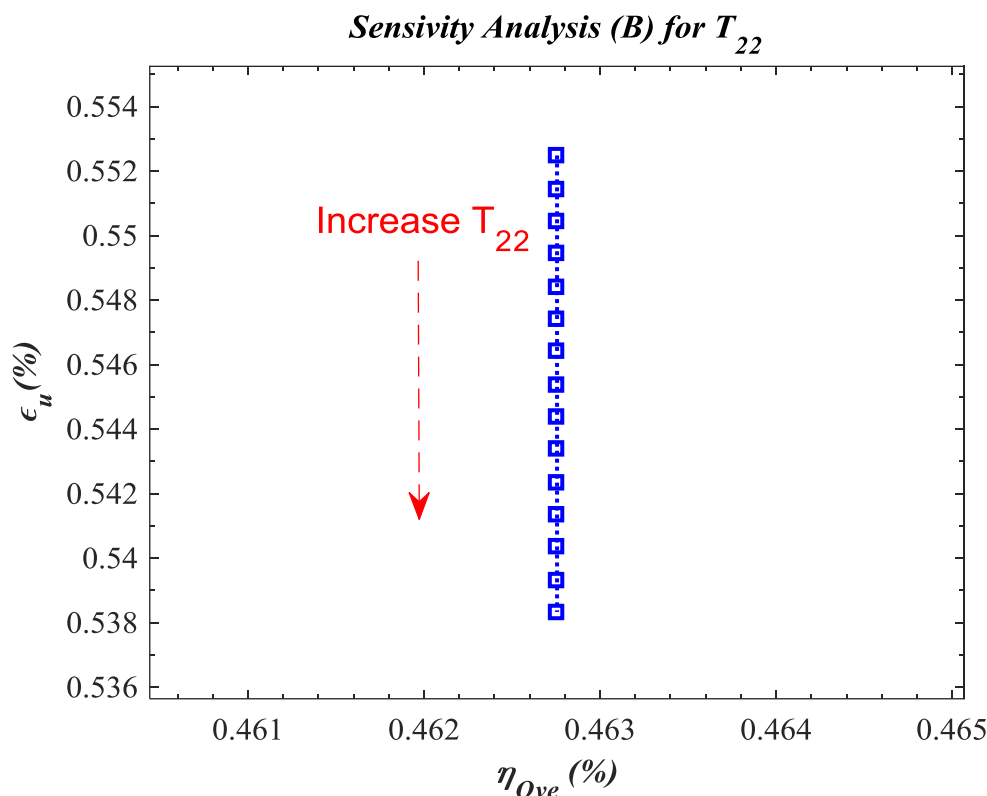


شکل (۴-۱۷) آنالیز حساسیت برای متغیر T_{12} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دو تابع هدف

متغیر T_{22} دمای خروجی محصولات احتراق از بویلر بازیاب بخش تولید آب گرم است. هر اندازه T_{22} کوچکتر باشد این به آن معناست که گرمای بیشتری در بویلر بازیاب آب گرم ریکاوری شده است. در واقع مطابق با رابطه زیر گرمای انتقال یافته در بویلر بازیاب آب گرم به دمای T_{22} وابسته است. و با افزایش آن میزان گرمای کمتری به سیکل بازیاب آب گرم منتقل می شود. (Q_{HW} : گرمای انتقال یافته در بویلر تولید آب گرم (hot water))

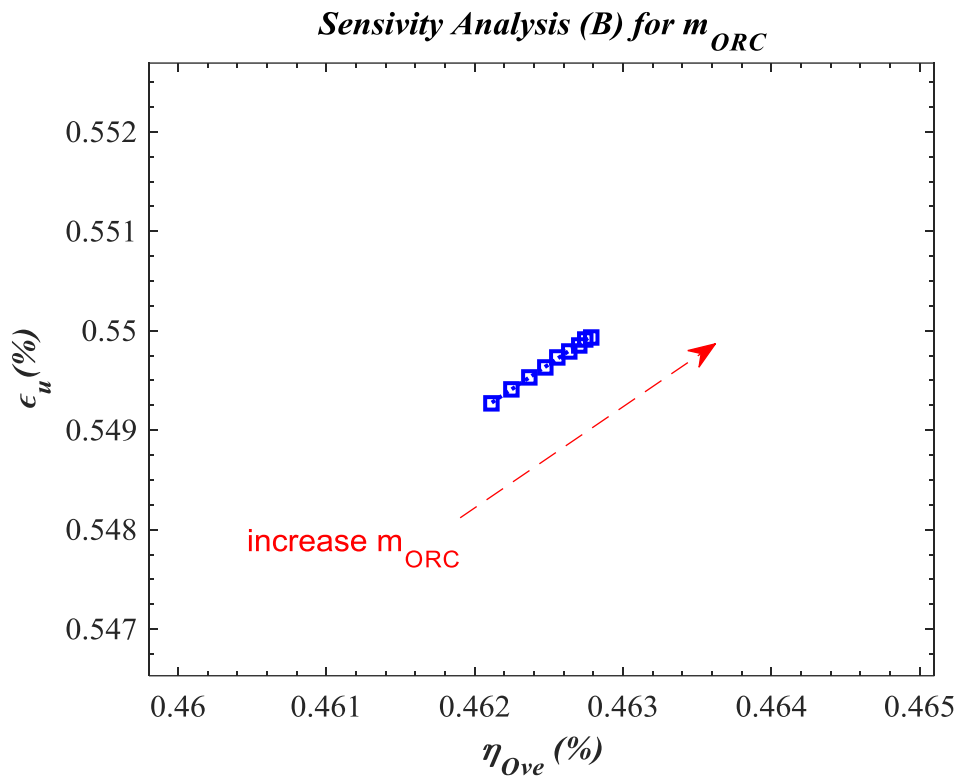
$$Q_{HW} = m_{21}(T_{21} - T_{22}) \quad (4-16)$$

لازم بذکر است T_{22} هیچ ارتباطی با میزان توان تولیدی سیکل ORC ندارد. بنابراین با افزایش T_{22} راندمان سیکل ترکیبی ثابت می ماند ولیکن با افزایش T_{22} بخش زیادی از انرژی گازهای گرم بازیاب نشده و به اتمسفر تخلیه می گردد در نتیجه مطابق شکل (۴-۱۷) با افزایش T_{22} ضریب بهره وری افت می کند.



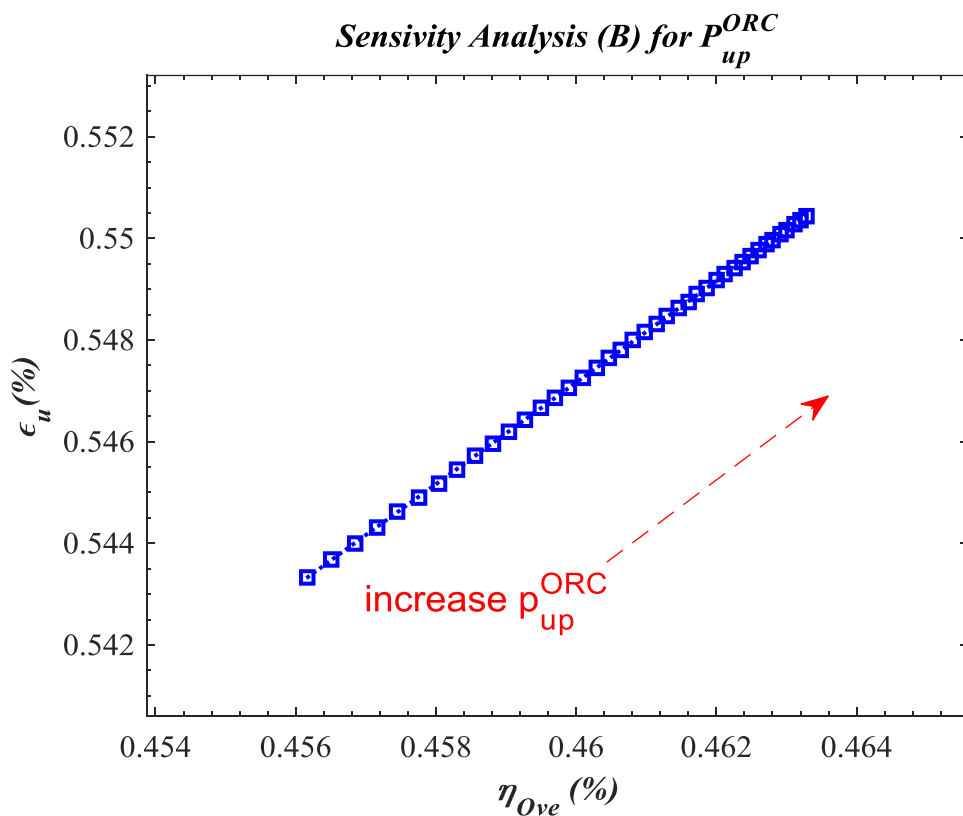
شکل (۴-۱۸) آنالیز حساسیت برای متغیر T_{22} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دو تابع هدف

متغیر m_{ORC} دبی جرمی سیکل رانکین می‌باشد بدیهی است با افزایش دبی سیکل رانکین میزان دبی توربین تولید توان افزایش می‌یابد و همین مساله سبب افزایش تولید توان سیکل ORC می‌گردد. در واقع با افزایش دبی m_{ORC} ضریب بهره‌وری و راندمان سیکل ترکیبی افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۱۹) آنالیز حساسیت برای متغیر m_{ORC} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دو تابع هدف

متغیر p_{up}^{ORC} فشار بالای بویلر (حداکثر فشار سیکل ORC) است با بالا بردن فشار بویلر زمانیکه مابقی متغیرها ثابت هستند دمای ورودی (حداکثر دمای سیکل ORC) به توربین افزایش می‌یابد این مساله سبب بهبود راندمان سیکل ORC، مطابق با اصل کارنو می‌گردد. افزایش راندمان سیکل ORC به معنی تولید توان بیشتر می‌باشد. این به معنی افزایش راندمان سیکل ترکیبی و افزایش ضریب بهره‌وری مطابق شکل (۲۰-۴) است. بطور خلاصه، افزایش فشار کاری بویلر سبب افزایش حداکثر دمای سیکل می‌گردد زیرا در حالت کلی همیشه دمای خروجی از بویلر از دمای اشباع در فشار p_{up}^{ORC} بزرگتر است.



شکل (۲۰-۴) آنالیز حساسیت برای متغیر p_{up}^{ORC} در نقطه B و بررسی اثر آن بر روی دو تابع هدف

فصل ۵:

نتیجه گیری

۱-۵- مقدمه

در این مطالعه، مدلسازی و بهینه‌سازی فرآیند تولید همزمان توان الکتریکی و آب گرم به کمک ۳ عدد توربین گازی مدل GE LM2500 بررسی می‌گردد از گرمای اگزااست این ۳ توربین گازی جهت تولید توان در سیکل ORC و تولید آب گرم استفاده شد. به کمک مدلسازی، راندمان سیکل ORC، راندمان سیکل ترکیبی، ضریب بهره‌وری، نقاط بهینه (جبهه پارتو) محاسبه گردید. از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی دو هدفه (راندمان کل و ضریب بهره‌وری) استفاده شد. در انتها آنالیز حساسیت برای متغیرهای مستقل مساله صورت گرفت و اثر هر متغیر بطور جداگانه بر توابع هدف محاسبه گردید.

راندمان سیکل ترکیبی و ضریب بهره‌وری به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند و بر مبنای این دو متغیر ۲ تابع هدف تعریف گردید دبی محصولات احتراق شاخه تولید توان (m_{11})، دمای خروجی محصولات احتراق شاخه تولید توان (T_{12})، دمای خروجی محصولات احتراق شاخه پایین (T_{22})، دبی جرمی سیکل ORC (m_{ORC})، فشار بالای سیکل ORC (P_{ORC}^{up}) به عنوان متغیرهای مستقل مساله انتخاب شدند.

در این مطالعه، تعداد ۱۰۰۰۰۰ راه حل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است الگوریتم ژنتیک به تعداد ۲۰۰ بار تکرار می‌گردد که در هر تکرار ۵۰۰ راه حل ارزیابی می‌شود. در هر بار ارزیابی، کل معادلات ترمودینامیکی مورد نیاز، حل می‌گردد و مقادیر راندمان کلی سیکل ترکیبی (η_{ove}) و ضریب بهره‌وری (ϵ_u) محاسبه می‌گردد.

۲-۵- نتیجه گیری و جمع بندی

- جواب مساله بهینه سازی دو هدفه به شکل یک نقطه نیست بلکه به شکل یک منحنی است که این منحنی به جبهه پارتو معروف است. این منحنی بصورت گرافیکی ارائه شد همچنین تمامی مشخصات مقادیر بهینه ی سیکل در یک جدول ارائه گردید.
- با افزایش راندمان سیکل ترکیبی (بهبود تابع هدف اول)، میزان ضریب بهره وری (تابع هدف دوم) به سمت نامطلوب شدن پیش می رود و در واقع ضریب بهره وری کاهش می یابد. زیرا درصد بیشتری از حرارت در شاخه بالا (جهت تولید توان در ORC) استفاده شده و حرارت کمتری جهت تولید آب گرم در شاخه پایین، استفاده می گردد. در واقع یک تضادی بین دو تابع هدف وجود دارد. و بسته به اینکه کدام تابع هدف اهمیت بیشتری دارد میتوان یکی از این نقاط موجود بر روی جبهه پارتو را انتخاب نمود.
- نقاط زیر جبهه پارتو به راه حل های ممکن، (feasible solution) و نقاط بالای منحنی جبهه پارتو راه حل های غیر ممکن، (infeasible solution) نامیده می شود.
- نتایج بهینه سازی دو هدفه نشان داد حداکثر راندمان قابل دسترسی برای سیکل ترکیبی در حدود ۴۸٪ است که ضریب بهره وری برای این حالت حداقل است. حداکثر ضریب بهره وری قابل استحصال در حدود ۵۷/۶٪ است که راندمان سیکل ترکیبی متناظر با آن حداقل (۴۴/۸٪) می باشد.
- میزان توان تولیدی سیکل ORC بین ۱۷ الی ۳۰ مگاوات متغیر بدست آمد در واقع مقدار توان تولیدی بسته میزان تولید بار حرارتی آب گرم تغییر میکند. میزان بار حرارتی آب گرم تولیدی بین ۰ تا ۲۹ مگاوات متغیر بدست آمد.
- میزان گاز کربنیک تولیدی به ازای هر مگاوات تولید توان، در مقایسه با حالت پایه بین ۱۶٪ تا ۲۵٪ کاهش نشان می دهد.
- با افزایش دبی محصولات احتراق در شاخه بویلر ORC، راندمان سیکل ترکیبی بهبود می یابد چون میزان توان الکتریکی تولیدی سیکل ORC افزایش می یابد. همچنین با افزایش دبی m_{11} میزان آب گرم کمتری تولید شده و ضریب بهره وری کاهش می یابد. بطور کلی با افزایش دبی m_{11} میزان راندمان سیکل ترکیبی افزایش و میزان ضریب بهره وری کاهش

می یابد.

- با افزایش دمای خروجی محصولات احتراق از بویلر بازیاب (T_{12}) ORC، بخش زیادی از انرژی گازهای گرم بازیاب نشده و به اتمسفر تخلیه می گردد با افزایش T_{12} تولید توان در سیکل ORC کاهش می یابد و ضریب بهره وری و راندمان سیکل ترکیبی افت می کند.
- هر اندازه دمای خروجی محصولات احتراق از بویلر بازیاب بخش تولید آب گرم (T_{22}) کوچکتر باشد گرمای بیشتری در بویلر بازیاب آب گرم، ریکاوری می گردد. بنابراین با افزایش T_{22} میزان گرمای کمتری به سیکل بازیاب آب گرم منتقل می شود T_{22} هیچ ارتباطی با میزان توان تولیدی سیکل ORC ندارد. بنابراین با افزایش آن راندمان سیکل ترکیبی ثابت می ماند.
- با بالا بردن فشار بویلر زمانی که مابقی متغیرها ثابت هستند دمای ورودی (حداکثر دمای سیکل ORC) به توربین افزایش می یابد این مساله سبب بهبود راندمان سیکل ORC، مطابق با اصل کارنو می گردد. افزایش راندمان سیکل ORC به معنی تولید توان بیشتر می باشد. این به معنی افزایش راندمان سیکل ترکیبی و افزایش ضریب بهره وری است.

۳-۵- پیشنهادات برای آینده

در ادامه پیشنهاداتی جهت ادامه این پژوهش ارائه می گردد:

- بررسی سیالات زروتروپیک و بهینه سازی و مدلسازی سیکل و انتخاب بهترین سیال
- مدلسازی راندمان قانون اول و دوم و هزینه به کمک شبکه های عصبی و هوش مصنوعی
- انتخاب پیکربندی بهینه ی سیکل (بازگرمایش - مبدل یازیاب).
- انتخاب تابع هدف راندمان و هزینه کل برای سیستم همزمان تولید توان و حرارت
- انتخاب تابع هدف راندمان قانون دوم ترومودینامیک و تحلیل اگزرژی

مراجع

مراجع

۱. سند راهبردی و نقشه‌ی راه توسعه‌ی فناوری سیستم‌های تولید هم زمان برق حرارت، برودت و آب شیرین، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۴
۲. Qiu, G., H. Liu, and S. Riffat, Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2011. 31(16): p. 3301-3307.
۳. Sauret, E. and A.S. Rowlands, Candidate radial-inflow turbines and high-density working fluids for geothermal power systems. *Energy*, 2011. 36(7): p. 4460-4467
۴. Qiu, G., H. Liu, and S. Riffat, Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2011. 31(16): p. 3301-3307.
۵. Wang, T., et al., A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011. 15(6): p. 2862-2871.
۶. Musthafah, M.-T. and N. Yamada, Thermodynamic analysis of expansion profile for displacement-type expander in low- temperature Rankine cycle. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2010. 5(1): p. 61-74.
۷. Bao, J. and L. Zhao, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 24: p. 325-342.
۸. Macchi, E. and A. Perdichizzi, Efficiency prediction for axial-flow turbines operating with nonconventional fluids. *Journal of engineering for power*, 1981. 103(4): p. 718-724.
۹. Invernizzi, C., P. Iora, and P. Silva, Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines. *Applied thermal engineering*, 2007. 27(1): p. 100-110.
۱۰. Stijepovic, M.Z., et al., On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance. *Applied Thermal Engineering*, 2012. 36: p. 406-413.
۱۱. Elzinga, D., et al., Energy technology perspectives 2014: harnessing electricity's potential. International Energy Agency (IEA), Paris, France, 2014.
۱۲. Rayegan, R. and Y. Tao, A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). *Renewable Energy*, 2011. 36(2): p. 659-670.
۱۳. Hasanuzzaman, M., et al., Energy savings and emissions reductions for rewinding and replacement of industrial motor. *Energy*, 2011. 36(1): p. 233-240. 17. Teng, H., G. Regner, and C. Cowland, Waste heat recovery of heavy-duty diesel engines by organic Rankine

cycle part I: hybrid energy system of diesel and Rankine engines. 2007, SAE Technical Paper.

۱۴. Börrnert, T. and T. Bürki, ABB's flexible ORC power plant. ABB Switzerland Ltd, 2010.

۱۵. Jung, H.-C., S. Krumdieck, and T. Vranjes, Feasibility assessment of refinery waste heat-to-power conversion using an organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 2014. 77: p. 396-407.

۱۶. Singh, R., et al., Dynamic characteristics of a direct-heated supercritical carbon-dioxide Brayton cycle in a solar thermal power plant. *Energy*, 2013. 50: p. 194-204.

۱۷. Tian, H., et al., Fluids and parameters optimization for the organic Rankine cycles (ORCs) used in exhaust heat recovery of Internal Combustion Engine (ICE). *Energy*, 2012. 47(1): p. 125-136

۱۸. Tchanché, B.F., et al., Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2009. 29(11): p. 2468-2476.

۱۹. Li, M., et al., Construction and preliminary test of a low-temperature regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) using R123. *Renewable energy*, 2013. 57: p. 216-222.

۲۰. Li, G., Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 53: p. 477-499.

۲۱. Uusitalo, A., et al., A thermodynamic analysis of waste heat recovery from reciprocating engine power plants by means of Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2014. 70(1): p. 33-41.

۲۲. Zhou, Y., et al., Performance analysis of zeotropic mixtures for the dual-loop system combined with internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 2016. 118: p. 406-414.

۲۳. Larsen U, Sigthorsson O, Haglind F. A comparison of advanced heat recovery power cycles in a combined cycle for large ships. *Energy* 2014;74:260–8.

۲۴. Girgin I, Ezgi C. Design and thermodynamic and thermoeconomic analysis of an organic Rankine cycle for naval surface ship applications. *Energy Convers Manage* 2017;148:623–34.

۲۵. Soffiato M, Frangopoulos CA, Manente G, Rech S, Lazzaretto A. Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier. *Energy Convers Manage* 2015;92:523–34

۲۶. Song J, Gu C. Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery. *Energy Convers Manage* 2015;105:995–1005
۲۷. Desai, N.B. and Bandyopadhyay, S., 2009. Process integration of organic Rankine cycle. *Energy*, 34(10), pp.1674-1686.
۲۸. Mohanty, B. and Paloso Jr, G., 1992. Economic power generation from low-temperature geothermal resources using organic Rankine cycle combined with vapour absorption chiller. *Heat Recovery Systems and CHP*, 12(2), pp.143-158.
۲۹. Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:3059–67.
۳۰. Reis MML dos. Comparison of energy efficiencies among heat pump systems to meet the demands of air conditioning and water heating in a building. *Unicamp – University of Campinas*; 2014 [in Portuguese].
۳۱. Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low- grade heat for power generation. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:4175–89.
۳۲. Siddiqi MA, Atakan B. Alkanes as fluids in Rankine cycles in comparison to water, benzene and toluene. *Energy* 2012;45:256–63
۳۳. Michalewicz, Z., 1992. *Genetic Algorithms + Data structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, 250 p.
۳۴. Mitchell, M., 1998. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Published by: A Bradford Book, 221 p.
۳۵. Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press (Ann Arbor).
۳۶. Reformat, M., 1997. *Application of Genetic Algorithms in Control Design for Advanced Static VAR Compensator at ac/dc Interconnection*. University of Manitoba Press, 129 p.
۳۷. Milidui, R.L., Duarte, J.C., Santos, C.N., 2007. Evolutionary TBL template generation, *J. Braz. Comp. Soc.*, Vol. 13, No. 4, pp. 39-50.
۳۸. Rowshanzadeh R. Performance and cost evaluation of Organic Rankine Cycle at different technologies; 2011.p. 97.

پیوست

پیوست کد متلب

```

clc
clear
global T_cond m_EXH T_EXH mLHV eta_pump eta_Turb wf W_GTG p_cond S_g_A S_C S_D S_A S_B
T_B T_C T_D T_A
wf=char('toluene');

m6=83;
W6=30340;
T_cond=40+273;
m_EXH=3*m6;
T_EXH=510;
mLHV=230e3;
eta_pump=0.7;
eta_Turb=0.80;
W_GTG=30340;

LB=[m_EXH/3 200 200 70 1000];
UB=[m_EXH 250 250 200 2500];

% LB=[m_EXH/2 175 175 100 1750];
% UB=[m_EXH/2 175 175 400 1750];

NVAR=length(LB);
options=gaoptimset();
options=gaoptimset(options,'PopulationSize',500);
options=gaoptimset(options,'generation',500);
options=gaoptimset(options,'plotfcn',{@gaplotpareto,@gaplotscorediversity});
[X_opt,Fval] = gamultiobj(@My_obj,NVAR,[],[],[],[],LB,UB,[],options);

eta_ove=-Fval(:,1);
e_u=-Fval(:,2);
[eta_ove,indx]=sort(eta_ove);
e_u=e_u(indx);
X_opt=X_opt(indx,:);

eta_GTG=3*W_GTG/mLHV;

polyf=polyfit(eta_ove,e_u,5);
E_U=polyval(polyf,eta_ove);

figure(2)
plot(100*eta_ove,100*E_U,'-r','linewidth',2)
hold on
axis on
xlabel('\eta_{O_v_e} (%)','fontangle','italic','fontname','times new roman','fontweight','bold','fontsize',13);
ylabel('\epsilon_u (%)','fontangle','italic','fontname','times new roman','fontweight','bold','fontsize',13);
axis auto
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on')
title('pareto frontier','fontangle','italic','fontname','times new roman','fontweight','bold','fontsize',13);

eta_A=eta_ove(1);
eta_B=2/3*eta_ove(1)+1/3*eta_ove(end);
eta_C=1/3*eta_ove(1)+2/3*eta_ove(end);
eta_D=eta_ove(end);

[~,ind_A]=min(abs(eta_ove-eta_A));
[~,ind_B]=min(abs(eta_ove-eta_B));
[~,ind_C]=min(abs(eta_ove-eta_C));
[~,ind_D]=min(abs(eta_ove-eta_D));

```

```

X_A=X_opt(ind_A,:);
X_B=X_opt(ind_B,:);
X_C=X_opt(ind_C,:);
X_D=X_opt(ind_D,:);

ETA_4P=[eta_A eta_B eta_C eta_D];
E_U_4P=polyval(polyf,ETA_4P);

figure(2)
plot(100*ETA_4P,100*E_U_4P,'bs','markersize',5,'markerfacecolor','b')
xlim([44.5 48.5]);
ylim([46.5 59]);
tt=text(99.85*ETA_4P(1),99*E_U_4P(1),'A');
set(tt,'fontname','timesnewroman','fontsize',12,'fontangle','italic','fontweight','bold')
tt=text(99.85*ETA_4P(2),99*E_U_4P(2),'B');
set(tt,'fontname','timesnewroman','fontsize',12,'fontangle','italic','fontweight','bold')

tt=text(99.85*ETA_4P(3),99*E_U_4P(3),'C');
set(tt,'fontname','timesnewroman','fontsize',12,'fontangle','italic','fontweight','bold')

tt=text(99.85*ETA_4P(4),99*E_U_4P(4),'D');
set(tt,'fontname','timesnewroman','fontsize',12,'fontangle','italic','fontweight','bold')

hleg=legend('Pareto Frontier','Selected Points','location','NE');
set(hleg,'fontangle','italic','fontname','times new roman','fontsize',12);

[eta_ove_A,e_u_A,W_pump_r_A,W_Turb_r_A,W_net_orc_A,eta_ORC_A,Q_boil_A,Q_hw_A,Q_wast_A,
T_max_A] = ORC_Results( X_A );
[eta_ove_B,e_u_B,W_pump_r_B,W_Turb_r_B,W_net_orc_B,eta_ORC_B,Q_boil_B,Q_hw_B,Q_wast_B,
T_max_B] = ORC_Results( X_B );
[eta_ove_C,e_u_C,W_pump_r_C,W_Turb_r_C,W_net_orc_C,eta_ORC_C,Q_Coil_C,Q_hw_C,Q_wast_C,
T_max_C] = ORC_Results( X_C );
[eta_ove_D,e_u_D,W_pump_r_D,W_Turb_r_D,W_net_orc_D,eta_ORC_D,Q_Doil_D,Q_hw_D,Q_wast_D,
T_max_D] = ORC_Results( X_D );

D=[3*W_GTG W_net_orc_A Q_hw_A Q_wast_A
    3*W_GTG W_net_orc_B Q_hw_B Q_wast_B
    3*W_GTG W_net_orc_C Q_hw_C Q_wast_C
    3*W_GTG W_net_orc_D Q_hw_D Q_wast_D]/1000;
figure(3)
hBar = bar(D, 'stacked');
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'XTick', xt, 'XTickLabel', {'A','B','C','D'})
set(gca,'fontname','times new roman','fontangle','italic','fontsize',12)

yd = get(hBar, 'YData');
yjob = {'GTG power','ORC power','Hot Water','Wasted Heat'};
barbase = cumsum([zeros(size(D,1),1) D(:,1:end-1)],2);
joblblpos = D/2 + barbase;
for k1 = 1:size(D,1)
    text(xt(k1)*ones(1,size(D,2)), joblblpos(k1,:), yjob,
        'HorizontalAlignment','center','fontname','times new
        roman','fontangle','italic','fontsize',10)
end

ylabel('Energy Current (Mw)','fontname','times new
roman','fontweight','bold','fontsize',12);
h=legend('Gas Turbine Generators','ORC Turbine power','Hot water','Wasted
Heat','location','northeastoutside');
set(h,'fontname','times new roman','fontangle','italic');
legendboxoff
title('Energy Balance','fontname','times new roman','fontangle','italic','fontsize',12)

D=[eta_GTG 0 e_u_A
eta_ove_B eta_ORC_B e_u_B
eta_ove_C eta_ORC_C e_u_C
eta_ove_D eta_ORC_D e_u_D]*100;

```

```

figure(5)
% x=[3 12 15 18 21];
% CC=[602.5 599.9 605.9 600.4 612.2; 470.52 426.16 461.91 543.78 542.57 ;466.39
452.35 454.72 540.59 533.48];
CC=[ e_u_A eta_GTG eta_ORC_A
e_u_B eta_ove_B eta_ORC_B
e_u_C eta_ove_C eta_ORC_C
e_u_D eta_ove_D eta_ORC_D]*100;

Year=['A' 'B' 'C' 'D'];

hbar=bar3(CC);
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'XTick', xt, 'XTickLabel', {'A' 'B' 'C' 'D'})
set(gca, 'fontname', 'times new roman', 'fontangle', 'italic', 'fontsize', 12)

yt = get(gca, 'YTick');
set(gca, 'YTick', yt, 'YTickLabel', {'\epsilon u'\eta_a v_e'\eta_O R C'})
set(gca, 'fontname', 'times new roman', 'fontangle', 'italic', 'fontsize', 12)

xlabel('Efficiency (%)')

X_ANALYSIS=X_B;
F = My_obj( X_ANALYSIS );
P_up_orc=X_ANALYSIS(5);
T_point=[T_A T_B T_C T_D];
S_point=[S_A S_B S_C S_D];

figure(6)
f = T_S_diagram( wf );
hold on
plot(S_point, T_point, 'm.', 'markerfacecolor', 'm', 'markersize', 5);
f = iso_p_plot( S_D, S_A, P_up_orc, wf, [1 0 0]);
f = iso_p_plot( S_C, S_B, p_cond, wf, [0 0 1]);
line([S_A S_B], [T_A T_B], 'LineWidth', 2, 'Color', [0 1 0], 'linestyle', '--');
line([S_C S_D], [T_C T_D], 'LineWidth', 2, 'Color', [0 1 0], 'linestyle', '--');
tt=text(1.05*S_D, 1.07*T_D, 'D');
set(tt, 'fontname', 'timesnewroman', 'fontsize', 12, 'fontangle', 'italic', 'fontweight', 'bold')
tt=text(1.05*S_C, 0.95*T_C, 'C');
set(tt, 'fontname', 'timesnewroman', 'fontsize', 12, 'fontangle', 'italic', 'fontweight', 'bold')
tt=text(1.04*S_A, 1.02*T_A, 'A');
set(tt, 'fontname', 'timesnewroman', 'fontsize', 12, 'fontangle', 'italic', 'fontweight', 'bold')
tt=text(1.04*S_B, T_B, 'B');
set(tt, 'fontname', 'timesnewroman', 'fontsize', 12, 'fontangle', 'italic', 'fontweight', 'bold')

axis on
xlabel('S(kJ/C)', 'fontangle', 'italic', 'fontname', 'times new
roman', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 13);
ylabel('T(k)', 'fontangle', 'italic', 'fontname', 'times new
roman', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 13);
axis auto
set(gca, 'fontname', 'times new roman', 'FONTSIZE', 12)
set(gca, 'XMinorTick', 'on', 'YMinorTick', 'on')
title(' T-S diagram (Case D)', 'fontangle', 'italic', 'fontname', 'times new
roman', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 13);

figure(3)
CC=[3*W_GTG/(3*W_GTG+W_net_orc_A)
3*W_GTG/(3*W_GTG+W_net_orc_B)
3*W_GTG/(3*W_GTG+W_net_orc_C)
3*W_GTG/(3*W_GTG+W_net_orc_D)
];
CC=flipud(CC);

hbar=bar3(CC);
yt = get(gca, 'YTick');
set(gca, 'YTick', yt, 'YTickLabel', { 'D' 'C' 'B' 'A' })
set(gca, 'fontname', 'times new roman', 'fontangle', 'italic', 'fontsize', 12)

xlabel('CO_2 production/MW power ratio')
view([90 0])
xlim([0.5 0.9])
grid off

```

پیوست توابع

```

function F = My_obj( X )
global T_cond m_EXH T_EXH mLHV eta_pump eta_Turb wf W_GTG p_cond S_g_A S_C S_D S_A S_B
T_B T_C T_D T_A
m1=X(1);
T12=X(2);
T22=X(3);
m_orc=X(4);
P_up_orc=X(5);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PUMP %%%%%%%%%%
h_C=refpropm('H','T',T_cond,'Q',0,wf)*1E-3;
T_C=T_cond;

p_cond=refpropm('p','T',T_cond,'Q',1,wf);
S_C=refpropm('S','T',T_cond,'Q',0,wf)*1E-3;

S_D_isn=S_C;
h_D_isn=refpropm('H','P',P_up_orc,'S',S_D_isn*1E3,wf)*1E-3;
W_pump_isn=m_orc*(h_D_isn-h_C);
W_pump_r=W_pump_isn/eta_pump;
h_D=h_C+W_pump_r/m_orc;
S_D=refpropm('S','H',h_D*1E3,'P',P_up_orc,wf)*1E-3;
T_D=refpropm('T','H',h_D*1E3,'P',P_up_orc,wf);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BOILER %%%%%%%%%%
T11=T_EXH;
h11 = Air_prop( T11 );
h12 = Air_prop( T12 );
Q_b=m11*(h11-h12);
QM=Q_b/m_orc;
h_A=h_D+Q_b/m_orc;
S_A=refpropm('S','H',h_A*1E3,'P',P_up_orc,wf)*1E-3;

S_g_A=refpropm('S','P',P_up_orc,'Q',1,wf)*1E-3;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Turbine %%%%%%%%%%
T_A=refpropm('T','H',h_A*1E3,'P',P_up_orc,wf);
if (T_A>480+273 || S_A<S_g_A || S_A>1.4);

    F=[-0.3 -0.5];
else

    S_B_isn=S_A;
    h_B_isn=refpropm('H','P',p_cond,'S',S_B_isn*1E3,wf)*1E-3;
    W_Turb_isn=m_orc*(h_A-h_B_isn);
    W_Turb_r=W_Turb_isn*eta_Turb;
    h_B=h_A-W_Turb_r/m_orc;
    S_B=refpropm('S','H',h_B*1E3,'P',p_cond,wf)*1E-3;
    T_B=refpropm('T','H',h_B*1E3,'P',p_cond,wf);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% heat recovery %%%%%%%%%%
    m21=m_EXH-m11;
    T21=T_EXH;
    h21 = Air_prop( T21 );
    h22 = Air_prop( T22 );
    Q_hr=m21*(h21-h22);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% net work %%%%%%%%%%
    W_net_orc=W_Turb_r-W_pump_r;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2 objective function %%%%%%%%%%
    eta_ave=(3*W_GTG+W_net_orc)/mLHV;
    e_u=(3*W_GTG+W_net_orc+Q_hr)/mLHV;

F=[-eta_ave -e_u];
end
end

```

Abstract:

In present study, modeling & optimizing the process for simultaneous production of the electric power & hot water are examined through there models of GE LM2500 gas turbines. The exhaust heat from these three gas turbines were used to generate power in Organic Rankine cycle (ORC) and to produce hot water. Bi-objective optimization was done using the genetic algorithm (combined cycle efficiency & productivity factor). Five thermodynamic variables from combined cycle were considered as independent variables which includes flow rate of Rankine cycle, boiler pressure, flow rate in power generation branch, output temperature from optimization recovery of power generation & sector's hot water production.

Results from bi-objective optimization suggested that the maximum efficiency available for combined cycle is about %48, which coefficient of productivity is minimum for this mode. In addition, maximum acquirable coefficient of productivity is %57.6 for this mode, which the efficiency of its corresponding combined cycle is minimum (i.e. % 44.8). The amount of power generated from Organic Rankine cycle was determined between 17 and 30 MW variably. In fact, the amount of power generated changes depending on the amount of thermal load generated by hot water. The amount of thermal load generated by hot water was obtained between 0 and 29 MW variably. Compared to the base state, the amount of CO₂ produced per each megawatt of power generation decreased between 16 and % 25. As the boiler pressure increases (when remaining variables are constant), input temperature (the highest temperature of Cycle) of ORC to turbine is increased. According to the Carnot's Theorem, it optimizes the efficiency of Organic Rankine Cycle. Increasing the efficiency of ORC means generating more power. It refers to the increasing the efficiency of the combined cycle and the coefficient of productivity.

Keywords: Organic Rankine Cycle- Combined Cycle-Simultaneous Production- Genetic Algorithm



University of ...
Department of ...

M. Sc. Thesis

Topic

By:

...

Supervisor:

...

...