

شبیه سازی و بهینه سازی سیکل رانکین آلی بازیافت انرژی حرارت اقلافی پالایشگاه با سیال عامل مخلوط

بهنام سمیع^۱

مسعود ترابی آزاد^{۲*}

M_Azad@Iau-tnb.ac.ir

غلامرضا صالحی^۳

کامران لاری^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

چکیده

زمینه و هدف: اتلافات انرژی در پالایشگاههای نفت و گاز را میتوان با استفاده از سیکلهای رانکین آلی به توان تبدیل نمود و میزان مصرف سوخت کاهش و الایندی را کاهش داد. تحقیق حاضر به بهینه سازی چرخه رانکین آلی با سیال عامل مخلوط با الگوریتم ازدحام ذرات میپردازد.

روش بررسی: دو مدل سیکل مختلف سیکل رانکین ساده (BORC)، سیکل رانکین با مبدل میانی (RORC) در نرم افزار ASPEN HYSYS شبیه سازی شده و این مدل ها برای توابع هدف راندمان انرژی و نرخ هزینه کل بهینه سازی شده اند. حرارت گاز خروجی سیکل گازی خروجی پالایشگاه به عنوان منبع اصلی گرما در سیکل ها استفاده شده است. تعداد ۱۰ سیال انتخاب و حالت خالص و ترکیب چند جزئی این سیالات با دقت ۰/۱ به عنوان سیال عامل استفاده شده است.

یافته ها: تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و ترمو اکونومیکی برای هر سیکل انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند. اثر سیالات عامل مختلف، فشار ورودی پمپ و فشار خروجی پمپ بر عملکرد سیکل نیز ارزیابی شده است. انتخاب سیال عامل بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تأثیر می گذارد، زیرا تفاوت چشم گیری در عملکردهای ترمودینامیکی در یک سیکل با شرایط یکسان با سیال عامل مختلف دیده می شود.

بحث و نتیجه گیری: وجود مبدل میانی باعث کاهش اکسرژی تخریب شده کندانسور می شود. همچنین از نتایج مشاهده می شود که افزایش فشار ورودی کندانسور تأثیر منفی بر عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی دارد و عملکرد ترمودینامیکی سیکل ها با افزایش فشار ورودی توربین افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: سیکل رانکین آلی، ترمو اکونومیک، اکسرژی، بهینه سازی ازدحام ذرات، سیال عامل مخلوط.

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی سیستم های انرژی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران * (مسئول مکاتبات)

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۴ دانشیار گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Simulation and optimization of organic Rankine cycle with mixed working fluid for refinery application

Behnam Samie¹

Masoud Torabi Azad^{2*}

M_Azad@Iau-tnb.ac.ir

Gholamreza Salehi³

Kamran Lari⁴

Admission Date: June 11, 2025

Date Received: January 6, 2025

Abstract

Background and Objectives: Energy losses in oil and gas refineries can be converted into power using organic Rankine cycles. The present study focuses on optimizing the organic Rankine cycle with mixed working fluid using particle swarm optimization.

Material and Methodology: Energy losses in oil and gas refineries can be converted into power using organic Rankine cycles. The present study focuses on optimizing the organic Rankine cycle with mixed working fluid using particle swarm optimization. For this purpose, two different cycle models are simulated in Aspen Hysys software and these models are optimized for the objective functions of energy efficiency and total cost rate. The simulated cycles are: simple Organic Rankine Cycle (BORC), Rankine cycle with intermediate heat exchanger (RORC). The exhaust gas heat of the refinery outlet gas cycle is used as the main heat source in the cycles. 10 fluids are selected and the pure state and multicomponent mixture of these fluids are used as working fluids with an accuracy of 0.1.

Finding: Thermodynamic and thermoeconomic analysis are performed for each cycle and the results are compared with each other. The effect of different working fluids, pump inlet pressure and pump outlet pressure on the cycle performance is also evaluated. The choice of working fluid affects the thermodynamic performance of the system, because a significant difference in thermodynamic performances is seen in a cycle with the same conditions with different working fluids.

Discussion and conclusion: The presence of an intermediate exchanger reduces the destroyed exergy of the condenser. It is also observed from the results that increasing the condenser inlet pressure has a negative effect on the thermodynamic and economic performance, and the thermodynamic performance of the cycles increases with increasing turbine inlet pressure.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Thermoeconomic, Exergy, Particle swarm optimization (PSO)

¹ PhD Student in Energy Systems Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Marine Physics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
**(Corresponding Author)*

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Marine Physics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

۱- مقدمه

بسیاری از کاربردها مانند فرآیندهای صنعتی، توربین‌های گازی، موتورهای احتراق داخلی و غیره باعث گرم شدن جو می‌شوند. زیرا، دمای این حرارت اتلافی برای استفاده مجدد در سیستم بسیار کم است. حرارت اتلافی همیشه دمای کمتری نسبت به منبع انرژی اصلی و دمای بالاتر از محیط دارد. بازیافت حرارت اتلافی فرایندی است که در آن حرارت اتلافی قبل از رها سازی در محیط برای کاربردهای مفیدتری استفاده می‌شود.

منابع حرارتی را می‌توان با توجه به دامنه دما طبقه بندی کرد. منابع حرارتی دمای بالا ۶۵۰ درجه سانتیگراد یا بالاتر، منابع حرارتی دمای متوسط ۲۳۰ درجه سانتیگراد تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد و منابع حرارتی دمای پایین ۲۳۰ درجه سانتیگراد یا کمتر دارند. با توجه به راندمان کارنو، کار تولیدی سیکل ترمودینامیکی متناسب با اختلاف دما بین منبع گرما و منبع سرد است. بنابراین می‌توان گفت که هرچه دمای منبع گرم بیشتر باشد، بازده سیستم نیز بالاتر است. با این حال، اکثر منابع حرارتی اتلافی بالقوه برای کاربردهای بازیابی گرما در محدوده دمای متوسط و پایین هستند. بنابراین، ممکن است بازیابی این حرارت اتلافی در دمای پایین به دلیل محدودیت های ترمودینامیکی دشوار باشد.

مشکلات دیگری نیز در برنامه های بازیافت حرارت اتلافی وجود دارد که با دمای پایین منابع گرما نیز ارتباط نزدیک دارد. هزینه ها، محدودیت های مواد و میزان پایین انتقال حرارت سیال عامل، ترکیبات شیمیایی گازهای خروجی و ضرورت طراحی و مقیاس سازی تجهیزات برای هر مورد خاص از دیگر موارد مهم استفاده از بازیافت حرارت اتلافی است. علاوه بر این موارد، بازیافت حرارت اتلافی مزایای زیادی دارد از جمله اینکه سوخت کمتری برای همان میزان انرژی مصرفی مصرف می‌شود، به دلیل انتشار کم CO₂ آسیب کمتری به محیط زیست می‌رساند، از آنجا که مقدار و دمای گازهای خروجی کاهش می‌یابد، هزینه سرمایه گذاری برای تجهیزات مدیریت گازهای خروجی کاهش می‌یابد.

اگرچه چندین فناوری برای کاربردهای بازیافت حرارت اتلافی استفاده شده است، سیکل رانکین آلی (ORC) از رایج ترین و پیشرفته‌ترین فناوری‌ها می‌باشد. سیکل رانکین آلی نوعی سیکل رانکین است که از سیالات آلی به عنوان سیال عامل به جای آب استفاده می‌کند.

مطالعات زیادی برای انتخاب سیکل مناسب صورت گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به زی و همکاران [۱] اشاره کرد که با بهینه‌سازی سیکل‌های ORC ساده، زیرکش یک مرحله‌ای، زیرکش دو مرحله‌ای و استفاده از ۶ سیال عامل

مختلف نشان دادند سیکل ORC با زیرکش دو مرحله‌ای و سیالات R11 و R141b مناسبترین عملکرد ترمودینامیکی را دارند. غائبی و همکاران [۲] اشاره کرد که چهار سیکل ORC ساده، با زیرکش، بلیدینگ و زیرکش- بلیدینگ با استفاده از ۸ سیال عامل مختلف بررسی کرد که سیال R113 و R236fa بیشترین و کمترین راندمان انرژی را داشتند. ضمنا راندمان انرژی، اگر ORC شامل زیرکش- بلیدینگ باشد، می‌تواند بسیار بالاتر باشد. محمدزاده و همکاران [۳] تاثیر وجود مبدل میانی را در سیکل ORC بررسی کرد. تحلیل و مقایسه از جنبه انرژی، اقتصادی و زیست محیطی (3E) برای دو سیکل ORC ساده و با مبدل میانی با ترکیب سیکل زمین گرمایی نشان داد که وجود مبدل میانی حدود ۳ درصد راندمان انرژی را افزایش و حدود ۷ درصد نرخ هزینه را کاهش می‌دهد و حدود ۳/۶ درصد باعث کاهش انتشار CO₂ نسبت به ORC معمولی می‌شود.

صفاریان و آرامون [۴] تجزیه و تحلیل نظری از سیکل اصلاح شده رانکین آلی بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک، با استفاده از R113 به عنوان سیال عامل را بیان کردند. آن‌ها نشان دادند که ORC با توربین بلیدینگ و بازیاب بیشترین بازده حرارتی و اکسرژی را دارد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که اواپراتور سهم اصلی در اکسرژی تخریب کل دارد که می‌تواند با افزایش فشار اواپراتور بهبود یابد. تافولو و همکاران [۵] برای انتخاب ORC بهینه چند معیار اتخاذ کرد. آن‌ها قصد داشتند با توجه به معیارهای اقتصادی و راندمان حرارتی، پیکربندی انتخاب کنند. آن‌ها از سیال عامل ایزوبوتن و R134a استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سیکل پیش گرم کردن می‌تواند از نظر فنی و اقتصادی قدرت و کارایی را بالا ببرد.

سیال عامل نقش مهمی در عملکرد سیکل رانکین دارد. مایززا و همکاران [۶] در مورد خصوصیات فیزیکی و ترمودینامیکی برخی از سیالات غیر متعارف برای ORC برای بازیافت منابع انرژی اتلافی تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها نتایج ترمودینامیکی را برای هر یک از سیالات عامل مقایسه کردند. آن‌ها همچنین معیارهای تحلیلی را برای انتخاب سیال عامل بهینه بر اساس مشخصات ترمودینامیکی بیان کردند. بکیلوگلو و همکاران [۷] از سیالات عامل مختلف در سیکل ORC برای سه منبع گرمایی (۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد) استفاده کرد. R1234yf، R1234ze و ایزوبوتان به ترتیب سیال عامل مطلوب برای منبع گرمایی ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد هستند.

رحمان و همکاران [۸] با شبیه‌سازی سیکل ORC در هایسیس به انتخاب سیال عامل مطلوب پرداخت. سیال R21 با توجه به

شرایط محیطی پاکستان به دلیل توان تولیدی مناسب پیشنهاد شد. شکوت و همکاران [۹] به بهینه‌سازی سیکل ORC با سیال عامل مختلف پرداخت که در آن R-11 کمترین و R245fa بیشترین توان تولیدی را داشتند. ضمناً این پژوهش تاثیر دمای محیط بر نرخ اکسرژی تخریب شده را نشان داد. لیو و همکاران [۱۰] چندین سیال عامل را در دماهای مختلف اواپراتور مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بازده تبخیرکننده در حالتی که سیالاتی با انتالپی تبخیر پایین تر استفاده شوند، بیشینه خواهد بود.

دای و همکاران [۱۱] استفاده از ۱۰ سیال عامل مختلف را بر روی عملکرد سیکل مطالعه کردند و نتیجه گرفتند در شرایط در نظر گرفته شده، اضافه کردن مبدل حرارتی داخلی به بهبود عملکرد سیکل کمکی نمی‌کند، همچنین برای سیالاتی که شیب منحنی بخار اشباع آن‌ها در نمودار T-S منفی نیست، سوپرهیت کردن سیال باعث افزایش بازده نخواهد شد و در بین سیالات مطالعه شده نیز R236ea به عنوان مناسب‌ترین سیال معرفی شد. چاکارتگی و همکاران [۱۲] یک سیکل ترکیب GT-ORC با سیالات عامل مختلف را مورد بررسی قرار داد و تولوئن و سیکلوکسان را که بالاترین راندمان را دارند معرفی کردند. یو و همکاران [۱۳] با استفاده از یک روش جدید مبتنی بر پینچ و بررسی سیالات عامل و شرایط کار در یک ORC برای بازیابی گرمای اتلافی. دو عامل برای تعیین اثر بخشی پارامترهای سیال عامل یافتند: (الف) نقطه بحرانی سیال عامل و (ب) اختلاف دمای اشباع با دمای منبع حرارت. در میان سیالات معرفی شده، سیالات R600 و R600a قدرت قابل توجهی با اثرات زیست محیطی بهینه را به نمایش گذاشتند.

مطالعات بسیاری در زمینه مخلوط سیالات آلی به عنوان سیال عامل صورت گرفته است. چهارطاقی و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر استفاده از مخلوط های دو جزئی با شیب های دمایی متفاوت هنگام تغییر فاز، بر روی عملکرد سیکل ORC می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به مطابقت شیب دمایی در چگالنده و تبخیرکننده در استفاده از سیال مخلوط دوجزبی، در مقایسه با سیال کاری خالص افزایش بازده حرارتی و اکسرژی حدود ۹ درصد در سیکل ساده و ۱۴ درصد در سیکل با مبدل حرارتی میانی، قابل دسترس است. رن و همکاران [۱۵] یک سیکل ترکیبی GT-ORC را با سیال‌های مختلف مقایسه کردند و دریافتند که مخلوط ها راندمان انرژی بالاتری نسبت به سیالات خالص دارند. ضمناً آنالیز ترمودینامیکی نشان داد که افزایش فشار ورودی توربین باعث افزایش راندمان انرژی می‌شود. در این بررسی مخلوط تولوئن/ بنزن مناسب‌ترین سیال عامل بودند.

ستنفول و همکاران [۱۶] پتانسیل سیالات زئوتروپیک در سیکل ORC برای بازیابی گرمای اتلافی درجه پایین را بررسی کرد و مخلوطی چند جزئی را به عنوان سیال عامل مطلوب معرفی کرد. چیس و همکاران [۱۷] اثر استفاده از مخلوط ها به عنوان سیال عامل در سیکل رانکین آلی را مورد بررسی قرار دادند. برای منابع گرمایی در ۱۵۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب افزایش ۱۶ و ۶ درصدی در راندمان انرژی حاصل شد. فنگ و همکاران [۱۸] عملکرد ORCs را با استفاده از سیالات عامل خالص و مخلوط از دیدگاه ترمواکونومیکی مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که سیالات عامل مخلوط همیشه عملکرد بهتری از نمونه‌های خالص ندارند. زو و همکاران [۱۹] عملکرد مخلوط زئوتروپیک برای بازیافت حرارت اتلافی از موتورهای احتراق داخلی را تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که مخلوط ها بهتر از سیال خالص کار می‌کنند. زی و همکاران [۲۰] اشاره کرد که مخلوط های زئوتروپیک می‌تواند به طور قابل توجهی باعث افزایش تولید خروجی ORC شود، در حالی که به طور همزمان سرمایه گذاری تجهیزات افزایش می‌یابد.

تحلیل اکونومیکی سیستم کمک شایانی در انتخاب اجزا سیکل و سیال عامل سیستم می‌کند. شوکتی و همکاران [۲۱] با روش SPECO به تحلیل ترمواکونومیکی سیکل ترکیبی راکتور هلیوم توربین گاز مدولار (GT-MHR) با مدل های مختلف سیکل ORC ساده (BORC)، با مبدل میانی (RORC) و با زیرکشی یک مرحله‌ای (SRORC) پرداخت. نتایج نشان داد که سیکل ترکیبی GT-MHR/SRORC کمترین و GT-MHR/RORC بیشترین هزینه واحد توان تولید شده و همچنین GT-MHR/SRORC بالاترین و GT-MHR/RORC کمترین میزان تخریب اکسرژی را دارند. شوکتی و همکاران [۲۲] سیکل‌های مختلف را برای تولید توان از انرژی زمین گرمایی از نظر ترمودینامیکی و ترمواکونومیکی مقایسه کرد. از روش SPECO برای آنالیز ترمواکونومیکی استفاده شد و نتایج پس از بهینه‌سازی نشان داد که سیکل دو فشاری بیشترین تولید توان را نسبت به سیکل ORC ساده، سیکل ORC دو سیالی و سیکل کالینا دارد و سیکل کالینا کمترین مقدار واحد هزینه را دارد.

خوالجانی و همکاران [۲۳] پارامتر های ترمودینامیکی سیکل ترکیبی گازی و ORC را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تخریب اکسرژی در محفظه احتراق اتفاق می‌افتد. فاکتور ترمواکونومیکی سیکل ۱۰/۵۹ درصد است و افزایش فشار ورودی توربین باعث کاهش راندمان انرژی می‌شود. خوالجانی و همکاران [۲۴] راندمان اکسرژی و نرخ هزینه کل را برای سیکل ترکیبی گازی و ORC با الگوریتم

طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) انتخاب کردند.

در کار حاضر برخلاف دیگر کارها که به تحلیل سیکل رانکین با سیال عامل خالص پرداخته شده، سیال عامل به صورت مخلوط انتخاب شده و شبیه‌سازی با حالت‌های مختلف مخلوط‌های ممکن که ۴۰۵ حالت مخلوط دو جزیی و ۴۳۲۰ حالت مخلوط سه جزیی ۱۰ سیال انتخابی است، انجام پذیرفت و همچنین بهینه‌سازی ترکیب مخلوط نیز صورت گرفته است. برای بهینه‌سازی، ترکیبات مختلف و همچنین پارامترهای شبیه‌سازی نظیر فشار ورودی و خروجی پمپ به نرم‌افزار داده شده است. بهینه‌سازی راندمان انرژی و نرخ هزینه کل سیکل با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برای دو سیکل مختلف رانکین آلی صورت پذیرفت. این سیکل‌ها عبارتند از: سیکل رانکین ساده (BORC)، سیکل رانکین با مبدل میانی (RORC).

۲- معرفی سیکل رانکین آلی (ORC)

یکی از متداول ترین سیکل‌های مورد استفاده برای بازیابی حرارت تلف شده، سیکل رانکین است. سیکل رانکین ارگانیک آلی، سیکل رانکینی است که سیالی آلی با عدد مولکولی بالا به عنوان سیال عامل و به جای سیال آب در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از خواص مهم این سیال‌های عامل می‌توان به رخ دادن تغییرات در فازهای مایع و بخار و همچنین نقطه جوش اینگونه سیال‌ها در دمای کمتر از دمای تغییرات فازی در سیال آب اشاره نمود. همچنین تعدد و فراوانی بسیار زیاد این نوع سیال‌ها که شامل صدها سیال با خواص و مشخصات مختلف می‌باشند، در مقایسه با سیال آب قابل توجه است. حدوداً از دو دهه گذشته تا کنون و در موضوع بازیابی حرارت و تولید انرژی‌های جدید و تجدید پذیر، استفاده از سیکل‌های رانکین ارگانیک به نسبت سیکل‌های رانکین، رشد چشم گیری داشته است.

به کارگیری سیال‌های آلی، موجب فراهم شدن امکان بازیابی حرارت از منابع دارای دمای کمتر مانند گرمای مازاد صنعتی، حوضچه خورشیدی، احتراق زیست توده و... خواهد شد.

۲-۱- سیال عامل

انتخاب یک سیال عامل در سیکل ORC به دلیل تاثیر بر راندمان سیستم، اندازه تجهیزات سیکل، طراحی نمودن توربین، پایدار نمودن سیستم، ایمنی و حفظ محیط زیست و قیمت و هزینه‌های تمام شده سیستم، از اهمیت بسیاری برخوردار است. دو دلیل اساسی ذیل را می‌توان از عوامل پیچیدگی در انتخاب سیال‌های عامل در سیکل‌های ORC نام برد:

۱- ژنتیک بهینه‌سازی کرد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که نسبت به حالت پایه راندمان اکسرژی حدود ۵ درصد افزایش و نرخ هزینه کل ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

کارلاس و همکاران [۲۵] تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی در سیکل ارگانیک رانکین ORC و سیکل فشرده سازی بخار (VCC) را بر اساس استفاده از زیست توده و انرژی خورشیدی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد که راندمان حرارتی سیکل پیشنهادی هنگام استفاده از R245fa به عنوان یک سیال عامل حداکثر خواهد شد. حقیقت ممقانی و همکاران [۲۶] انرژی، اکسرژی، اقتصادی، زیست محیطی سیکل مخزن سوخت، توربین گازی و ORC را آنالیز کرده است. سیکل از نظر بهره‌وری اقتصادی و اکسرژی بهینه شده است. آن‌ها گزارش دادند که سیکل رانکین آلی ۵٪ راندمان اکسرژی را افزایش داده است.

همچنین بسیاری از تحقیقات بر بهینه‌سازی سیستم صورت گرفته شده است. زوا و همکاران [۲۷] به بهینه‌سازی سیکل ترکیبی زمین گرمایی و ORC دو فشاره با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) پرداخت. نتایج نشان داد که ترکیب پنتان و سیس-۲-بوتن با راندمان انرژی ۱۸/۴۳ درصد بالاترین مقدار را دارا بود. زائو و همکاران [۲۸] خلاصه ای از پیشینه تحقیقات اولیه در مورد پیشرفت‌های اخیر تکنیک هوش مصنوعی در سیستم‌های سیکل ORC ارائه داد. آن‌ها مشکلات طراحی را به سه قسمت، بهینه‌سازی و پیش‌بینی پارامترها، بررسی پیشینه تحقیق با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و چشم انداز آینده تقسیم کردند. لی و همکاران [۲۹] جنبه‌های ترمودینامیکی و ایمنی طراحی سیکل ORC بهینه‌سازی کرد. علاوه بر این، راه حل نهایی مطلوب با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری LINMAP و TOPSIS انتخاب شده‌اند.

رهبر و همکاران [۳۰] به مدل سازی و بهینه‌سازی سیکل ORC با توربین ورودی شعاعی پرداخته و راندمان ثابت توربین را با راندمان دینامیکی جایگزین کرد و نشان داد که این سیکل تخمین واقعی تری از عملکرد سیستم دارد. نتایج بهینه‌سازی پیش بینی کرد که ایزوبوتان با حداکثر راندمان انرژی سیکل ۱۳/۲۱ درصد و اندازه کلی توربین ۰/۱۴۳۴ متر بهترین عملکرد را به نمایش می‌گذارد. لیو و همکاران [۳۱] مطالعات بهینه‌سازی سیکل رانکین آلی را با تمرکز بر روی طراحی سیکل‌های مختلف برای بازیابی با راندمان بالا از منابع گرمای مختلف بررسی کرده‌اند. لیو و همکاران [۳۲] پنج پارامتر کلیدی اواپراتور را به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و سه پارامتر به عنوان اهداف بهینه‌سازی برای به دست آوردن یک

¹ Particle Swam Optimization

این امر باعث تلف شدن توان و افزایش بار بر روی کندانسور خواهد بود.

۳- شبیه سازی سیکل ها

۳-۱ بخش گازی

توربین گازی زیر با توجه به میزان دمای خروجی آگروز برای این مطالعه انتخاب شده است که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱). مقدار پارامترهای توربین تجاری

Table (1). Value of commercial turbine parameters

Mercury 50		نام تجاری
واحد	مقدار	پارامتر
kW	۴۶۰۰	توان تولیدی خالص
%	۳۸/۵	راندمان
Kg/s	۱۷/۶۹	میزان جریان جرم
°C	۳۶۵	دمای گاز خروجی

علاوه بر این، محصولات احتراق توربین گازی مخلوطی از نیتروژن، اکسیژن، بخار و دی اکسید کربن است. مقدار کسر مولی برای هر جز در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) کسر مولی اجزا محصول احتراق توربین گازی

Table (2) mole fraction of gas turbine combustion product components

O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂	جز
۱۲/۲۴	۹/۳۹	۳/۸۱	۷۴/۵۵	کسر مولی (/.)

۳-۲ سیکل BORG

ابتدایی ترین طرح سیکل رانکین آلی شامل پمپ، اواپراتور، توربین و کندانسور است. با توجه به شکل (۲) در سیکل رانکین چهار فرایند اصلی وجود دارد که هر کدام شرایط سیال عامل را تغییر می دهند. سیال عامل از فشار پایین به فشار بالاتر پمپ می شود و از آنجایی که سیال در این مرحله در حالت مایع اشباع قرار دارد، پمپ به انرژی ورودی کمی نیاز دارد. این مایع فشار بالا وارد اواپراتور می شود که در این مرحله در فشار ثابت بوسیله منبع گرمایی خارجی گرم شده و تبدیل به بخار اشباع می شود. بخار اشباع بوسیله توربین منبسط می شود و تولید توان می کند. این عمل باعث کاهش فشار و دمای بخار می شود و ممکن است چگالش مختصری هم رخ بدهد (برای سیالات خشک چگالش صورت نمی گیرد). بخار وارد کندانسور می شود و در داخل آن در یک فرایند فشار ثابت تبدیل به مایع اشباع

گسترده گی بسیار زیاد در منابع گرمایی و شرایط کاری سیکل های ORC. به طوریکه از دماهای پایین در انرژی زمین گرمایی (۸۰ °C) تا دماهای بالا در زیست توده و خروجی های صنعتی (۵۰۰ °C) متغیر هستند.

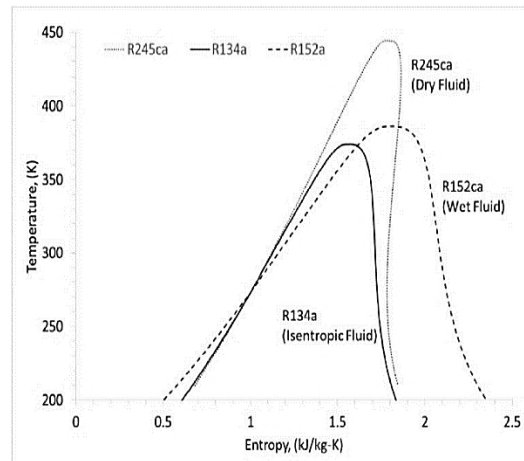
به غیر از سیال هایی که دارای دماهای بحرانی بسیار پایین یا بسیار بالا هستند، ده ها ماده توانایی به کار گیری در سیکل ORC را به عنوان یک سیال عامل دارا هستند که شامل: الکلها، هیدروکربن های آروماتیک، سیکلو هگزان ها، پرفلور کربن ها، هیدروکربن ها، اترها

۲-۲ دسته بندی سیالات

فارغ از ساختار مولکولی و همچنین مدل اتمی سیال های عامل، آن ها را می توان طبق منحنی T-S تقسیم بندی کرد. آن گونه که در دیاگرام شکل (۱) تصویر شده است.

بطور کلی بخار اشباع دارای سه نوع منحنی در دیاگرام T-S می باشد:

- سیال تر با شیب منفی
- سیال آیزنتروپیک
- سیال خشک با شیب مثبت



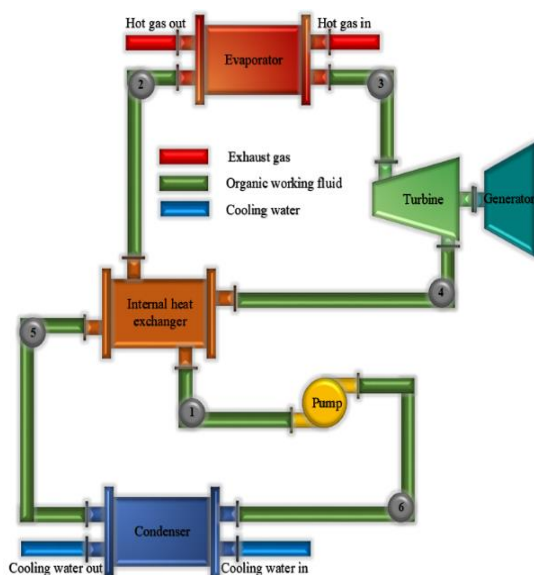
شکل (۱) دسته بندی سیالات

Figure (1) Classification of fluids

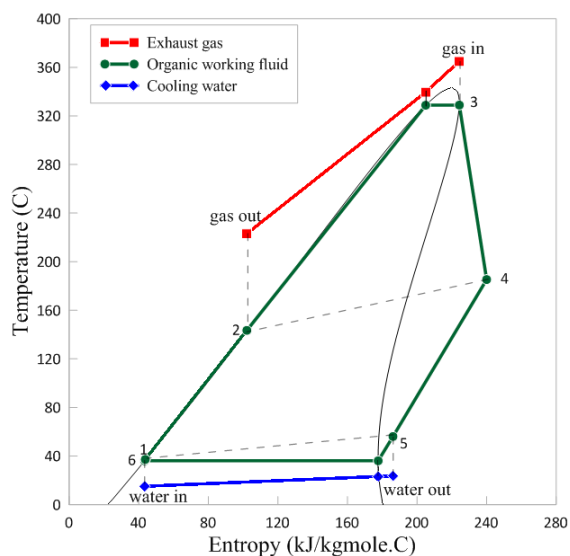
چنانچه سیالات تر که در منحنی بخار اشباع دارای شیب منفی هستند در سیکل ORC بکار رود، این احتمال وجود دارد که راندمان توربین به واسطه تولید قطره در خروجی توربین و ایجاد آسیب در پره های توربین، کاسته شود. سیالات خشک یا آیزنتروپیک به علت عدم تولید این قطرات در پره های توربین، انتخاب بهتری هستند اما خشکی بیش از حد سیال موجب تخلیه بخار انبساط یافته به شکل فوق داغ از توربین می گردد که

تبادل حرارت دارند.

می‌شود. شکل (۳) نمودار (T-S) سیکل BORC را نشان می‌دهد.



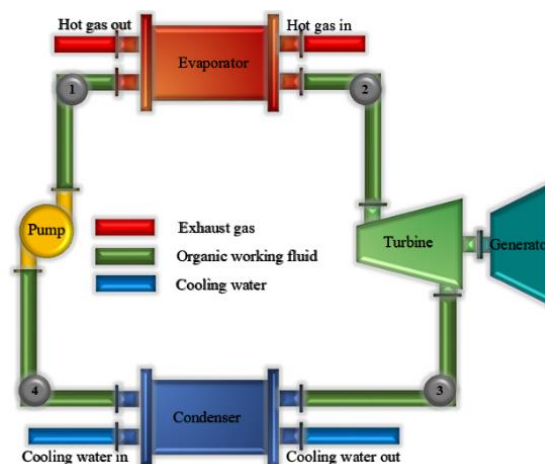
شکل (۴) شماتیکی از سیکل RORC
Figure (4) schematic of the RORC cycle



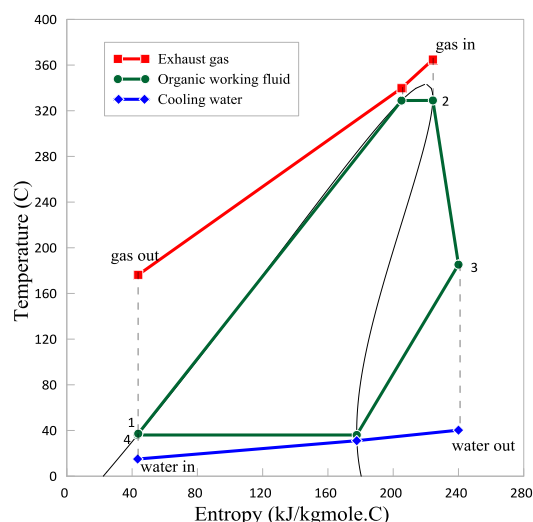
شکل (۵) نمودار (T-S) برای سیکل RORC
Figure (5) diagram (T-S) for RORC cycle

۳-۴ شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی سیکل از نرم‌افزار اسپن هایسیس به دلیل کتابخانه قدرتمند و محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی سیالات مخلوط استفاده شده است. از دیگر ویژگی‌های این نرم‌افزار قابلیت اتصال نرم‌افزار متلب به آن است. لذا از نرم‌افزار متلب برای محاسبات راندمان و بهینه‌سازی سیکل استفاده می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار هایسیس در جدول (۳) آمده است.



شکل (۲) شماتیکی از سیکل BORC
Figure (2) Schematic of the BORC cycle



شکل (۳) نمودار (T-S) برای سیکل BORC
Figure (3) diagram (T-S) for BORC cycle

۳-۳ سیکل RORC

سیکل RORC اساسی‌ترین سیکل بین تمام حالت‌های سیکل ORC است که در این مطالعه بررسی می‌شود. اما هنوز هم پیشرفته‌تر از BORC است زیرا RORC از مبدل میانی (IHE) برای بازیابی گرمای اتلافی استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است IHE بعد از خروجی توربین و قبل از اواپراتور قرار می‌گیرد. برای گرم کردن سیال عامل با فشار بالا قبل از ورود به اواپراتور با انتقال گرما از سیال عامل با درجه حرارت بالا که از توربین خارج می‌شود، استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۵) مشخص است، مرحله (۴-۵) با مرحله (۲-۱)

خواص مخلوط ها تا حد زیادی به ترکیب و غلظت آن ها بستگی دارد. هنگامی که خصوصیات سیال عامل با منبع گرما مطابقت داشته باشد، می توان میزان کمتری اکسرژی را به دست آورد. بنابراین، فشار بخار اشباع شده سیالات مخلوط شده باید بیشتر باشد تا سیال عامل کارآمدتری بدست آید.

۴- روابط حاکم و بهینه سازی

۴-۱- روابط ترمودینامیکی

در بررسی سیکل های ORC مورد نظر با استفاده از مفهوم انرژی، معادلات موازنه جرم و انرژی برای هر جز توسط روابط زیر بدست می آید:

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

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

$$\dot{W}_{net} = \sum \dot{W}_T - \sum \dot{W}_P \quad (3)$$

که در آن $\dot{W}_T$ توان تولیدی توربین و $\dot{W}_P$ توان مصرفی پمپ سیکل ORC می باشد. در روابط فوق زیروند $\dot{m}_{in}$ و $\dot{m}_{out}$ به معنای ورود و خروج است. راندمان انرژی یا قانون اول ترمودینامیک از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\eta_{orc} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (4)$$

رابطه (4) را برای هر سیکل می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

برای سیکل BORC و RORC:

$$\eta_{orc} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_P}{\dot{m}_{gas}(h_{g,in} - h_{g,out})} \quad (5)$$

۴-۲- روابط اکسرژی

اکسرژی یک سیستم به اکسرژی ترمومکانیکی و اکسرژی شیمیایی تقسیم می شود. اکسرژی به آن بخشی از کل انرژی گفته می شود که به مصرف مفید می رسد و در غیاب اثرات کشش مغناطیسی، الکتریکی، هسته ای و سطحی تعریف می شود [21].

$$\dot{E}^{th} = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{KN} + \dot{E}^{PT} \quad (6)$$

در این شرایط، اکسرژی ترمومکانیکی ($\dot{E}^{th}$) یک سیستم را می توان به سه جز تقسیم کرد: اکسرژی فیزیکی ($\dot{E}^{PH}$)، اکسرژی جنبشی ($\dot{E}^{KN}$)، اکسرژی پتانسیل ($\dot{E}^{PT}$). اکسرژی جنبشی و پتانسیل در این کار نادیده گرفته شده است. بنابراین، اکسرژی ترمومکانیکی در این کار فقط از مولفه فیزیکی تشکیل شده است. کسرژی مخصوص فیزیکی به صورت زیر است [21]:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (7)$$

جدول (۳) شرایط مرزی و مورد نیاز شبیه سازی

Table (3) boundary conditions and simulation requirements

شرایط	مقدار	واحد
دمای محیط	۲۵	°C
فشار محیط	۱۰۱/۳	kPa
دمای گاز خروجی	۳۵۰ >	°C
دمای آب خنک کن	۱۵	°C
اختلاف دمای بین مبدل میانی و کندانسور	۲۰	°C
درجه سوپر هیت در اواپراتور	۰/۱	°C
اختلاف دمای پینچ در اواپراتور	۱۰	°C
اختلاف دمای پینچ در کندانسور	۵	°C
کیفیت بخار ورودی پمپ	۰	-
بازده آیزنتروپیک توربین	۸۵	%
بازده آیزنتروپیک پمپ	۸۰	%

۳-۵ انتخاب سیال عامل

با توجه به توضیحات فصل اول در مورد خصوصیات و رفتار سیالات در این پژوهش ۱۰ سیال آلی خشک انتخاب شده که در جدول (۴) مشخصات آن ها آمده است. مخلوط چند جزیی آن ها نیز علاوه بر حالت خالص هر کدام در شبیه سازی استفاده شده است که کسر مولی هر کدام با دقت ۰/۱ در نظر گرفته شده است و از معادله پنگ رابینسون به عنوان معادله حالت برای محاسبه خواص سیالات مخلوط استفاده شده است. در میان سیالات انتخابی، p-Xylene با ۳۴۳ °C بالاترین و n-Butane با ۱۵۲ °C پایین ترین دمای بحرانی را دارند.

جدول (۴) مشخصات سیالات آلی خشک انتخابی [۱۶،۲۴]

Table (4) characteristics of selected dry organic fluids [16,24]

سیال	$T_{cr}(^{\circ}C)$	$P_{cr}(kPa)$	GWP(100 y)
Benzene	۲۸۹	۴۹۰۷	~۲۰
Toluene	۳۱۹	۴۱۲۶	~۲۰
n-Pentane	۱۹۶	۳۳۶۹	~۲۰
n-Hexane	۲۳۴	۳۰۲۰	~۲۰
n-Butane	۱۵۲	۳۷۹۶	~۲۰
n-Octane	۲۹۷	۲۴۸۶	~۲۰
Cyclopentane	۲۳۸	۴۵۷۱	~۲۰
p-Xylene	۳۴۳	۳۵۳۲	~۲۰
Cyclohexane	۲۸۰	۴۰۸۱	~۲۰
E-Benzene	۳۴۴	۳۶۲۲	~۲۰

عملیاتی و نگهداری می‌باشد. همچنین CRF ^۲ فاکتور بازیابی سرمایه است. ϕ ضریب نگهداری (۱/۰۶) و N تعداد ساعت کار سیستم در سال (۷۴۴۶ ساعت) است. با تعریف نرخ بهره (i) که ۱۰٪ و تعداد سال های طول عمر (BL) که ۲۰ سال می‌باشد، فاکتور بازیابی سرمایه CRF را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$CRF = \frac{i(1+i)^{BL}}{(1+i)^{BL}-1} \quad (۱۵)$$

هزینه سرمایه گذاری اجزای سیستم (PEC) به تفکیک در زیر ذکر شده است که مربوط به سال ۲۰۲۳ می‌باشد. هزینه هر یک از اجزا تابعی از متغیر ترمودینامیکی مولفه است بجز مبدل میانی و کندانسور که به مساحت سطح انتقال حرارت بستگی دارد. شاخص هزینه تجهیزات مارشال و سوئیفت، برای یافتن PEC سال استفاده می‌شود. رابطه (۱۸) نرخ هزینه سال مرجع را به نرخ هزینه سال حاضر تبدیل می‌کند [۳۲].

$$\text{Cost at present year} = \text{original cost} \times \frac{\text{Cost index for present year}}{\text{Cost index for the year of original cost}} \quad (۱۶)$$

برای توربین:

$$PEC_T = 6000(\dot{W}_T)^{0.7} \quad (۱۷)$$

برای کندانسور:

$$PEC_{Con} = 1773(\dot{m}_{steam}) \quad (۱۸)$$

برای اواپراتور:

$$PEC_{Eva} = 309(A_{Eva}) + 232 \quad (۱۹)$$

برای پمپ:

$$PEC_P = 3540(\dot{W}_P)^{0.71} \quad (۲۰)$$

برای مبدل میانی:

$$PEC_{IHE} = 1.3(190 + 310A_{IHE}) \quad (۲۱)$$

با حل معادلات کمکی و هزینه برای هر جز، هزینه های مجهول جریان های سیستم بدست می‌آید که عبارتند از هزینه واحد سوخت (C_F)، هزینه واحد محصول (C_P)، نرخ هزینه تخریب اکسرژی ($\dot{C}_D$) و فاکتور ترمواکونومیکی (f).

$$C_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (۲۲)$$

$$C_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (۲۳)$$

$$\dot{C}_{D,k} = C_{P,k} \dot{E}_{D,k} \text{ اگر } \dot{E}_{F,k} = \text{fixed} \quad (۲۴)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (۲۵)$$

نرخ هزینه کل سیکل ORC ($\dot{C}_{orc}$) از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$\dot{C}_{orc} = \sum_k \dot{Z}_k + \sum_k \dot{C}_{D,k} \quad (۲۶)$$

$$\dot{E} = m\dot{e} \quad (۸)$$

که در آن s, h, T به ترتیب انتالپی، انترپی و دما هستند. زیروند 0 نشان دهنده شرایط محیطی است و $(\dot{m})$ دبی جرمی سیال می‌باشد. اتلاف اکسرژی ($\dot{E}_D$) هر جز سیستم را می‌توان از معادله موازنه اکسرژی برای آن حجم کنترل بدست آورد.

$$\dot{E}_{heat} - \dot{W} = \sum \dot{E}_{out} - \sum \dot{E}_{in} + \dot{E}_D \quad (۹)$$

$$\dot{E}_{heat} = (1 - T_0/T)\dot{Q} \quad (۱۰)$$

در روابط بالا $\dot{E}_{heat}$ انتقال اکسرژی در دمای T است. نسبت تخریب اکسرژی هر جز به کل اکسرژی تخریب شده در سیکل از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$y_{d,k} = \dot{E}_{D,k} / \dot{E}_{D,total} \quad (۱۱)$$

۳-۴- روابط ترمواکونومیکی

به منظور بهینه‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی، علاوه بر مطالعات ترمودینامیکی، ملاحظات ترمواکونومیکی نیز باید برای داشتن یک سیستم مقرون به صرفه با ارائه دانش اساسی برای طراحی در نظر گرفته شود. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل ترمواکونومیکی مانند نظریه هزینه اکسرژی، رویکرد هزینه متوسط و هزینه ویژه اکسرژی (SPECO)^۱ معرفی شده است. برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های تبدیل انرژی، روش SPECO یک طرح ساده را ارائه می‌دهد و با استفاده از یک فرمول ماتریس، زمان محاسبه را کاهش می‌دهد [۲۱].

بنابراین، از روش هزینه ویژه اکسرژی (SPECO) در این مطالعه استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا باید تمام جریان‌های انرژی را در حجم کنترل قطعات مورد نظر تعیین شود. تعیین سوخت و محصول هر قسمت مرحله دوم است. تمام اکسرژی ورودی به یک جز به عنوان سوخت و کلیه خروجی‌ها اکسرژی از آن به عنوان محصول محاسبه می‌شود. سرانجام، معادله موازنه هزینه برای هر قسمت به صورت زیر نوشته شود [۲۱].

$$\sum \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (۱۲)$$

$$\dot{C} = c \cdot \dot{E} \quad (۱۳)$$

$$\dot{Z}_k = PEC_k \cdot CRF \cdot \phi / (N) \quad (۱۴)$$

جایی که $\dot{C}_q$ ، $\dot{C}_w$ و $\dot{C}_k$ به ترتیب نرخ هزینه جریان، انتقال گرما و توان در دلار بر ساعت است. c نرخ هزینه اکسرژی واحد جریان، $\dot{Z}_k$ نرخ هزینه سرمایه‌گذاری سرمایه و هزینه‌های

^۲ Capital Recovery Factor

^۳ Purchase equipment cost

^۱ Specific Exergy Cost Method

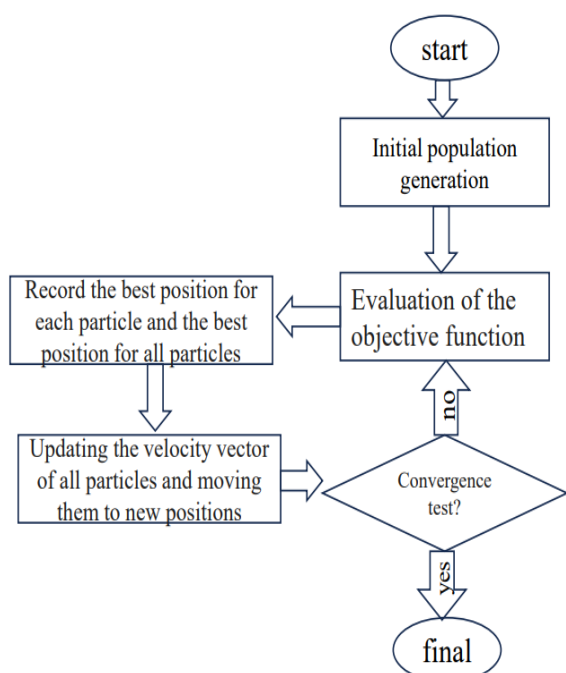
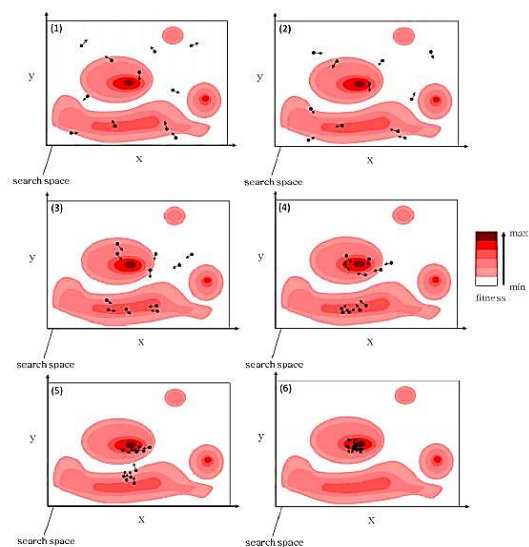


Figure (6) flowchart of calculation steps of particle swarm optimization algorithm



شکل (۷) مراحل پیشرفت ذرات در الگوریتم ازدحام ذرات [۳۳]

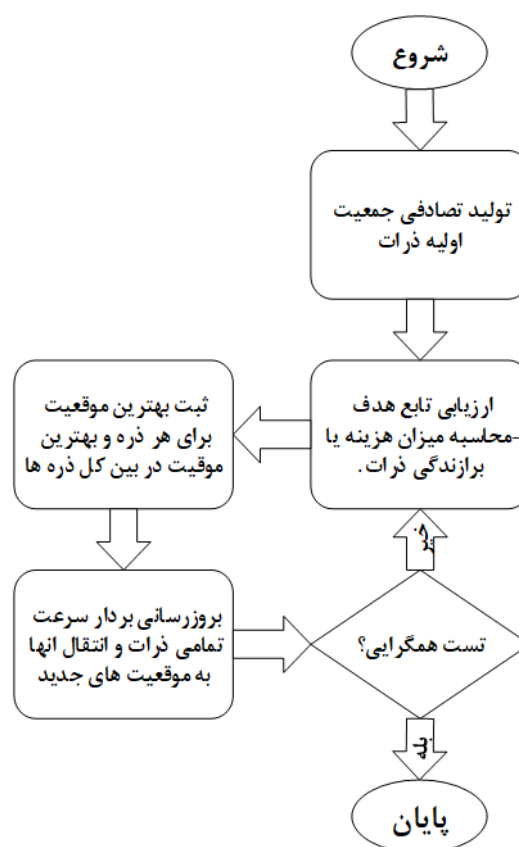
Figure (7) steps of particle progress in the particle swarm algorithm [33]

۴-۵ روند بهینه‌سازی

دو فشار ورودی و خروجی پمپ سیکل به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود. بیشینه راندمان انرژی (رابطه ۳-۴) و کمینه نرخ هزینه کل (رابطه ۲۶) به عنوان توابع هدف تعریف شده‌اند. در ابتدا یک سیال انتخاب می‌شود و با توجه به

۴-۴ الگوریتم بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. روش ازدحام ذرات یا PSO اولین بار توسط کندی و ابرهات در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی محاسباتی تکاملی است که الهام گرفته از طبیعت و رفتار اجتماعی حیواناتی مانند پرندگان و ماهی‌ها و بر اساس تکرار می‌باشد. در این روش تعداد مشخصی از ذرات بطور تصادفی، مقادیر اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو پارامتر وضعیت و سرعت تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می‌شوند. این ذرات بصورت تکرار شونده‌ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن موجود را جستجو کنند. ذرات با توجه به حافظه قبلی فضای جدیدی را جستجو می‌کنند تا به جواب بهینه برسند [۳۳]. شکل (۶) مراحل محاسبات الگوریتم را نشان می‌دهد. شکل (۷) مراحل پیشرفت الگوریتم PSO به تصویر کشیده شده است که همگرایی به سمت بهینه‌های محلی را قبل از همگرا شدن همه ذرات به بهینه جهانی نشان می‌دهد.



شکل (۶) فلوچارت مراحل محاسبات الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۴-۶ روش تصمیم‌گیری

مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با مجموعه نقاط بهینه در نمودار پارتو حل می‌شود، که با بهینه‌سازی تک هدفه متفاوت است. به عبارت دیگر، بهینه‌سازی چند هدفه نقطه بهینه جهانی ندارد. عملاً می‌توان با برآیند توابع هدف جواب بهینه را بدست آورد. دو روش کاربردی در انتخاب جواب نهایی وجود دارد که در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شود [۳۸].

۴-۶-۱ روش LINMAP

(Linear Programming Technique for Multidimensional Analysis of Preference)

جوابی که حداقل فاصله از جواب ایده‌آل را در نمودار پارتو داراست به عنوان جواب نهایی مطلوب در LINMAP انتخاب می‌شود. رابطه فاصله از جواب ایده‌آل در روش LINMAP را می‌توان به شرح زیر نوشت:

$$d_{i+} = \sum_{j=1}^m (F_{ij} - F_j^{ideal})^2 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (27)$$

$$i_{final} = i \quad (28)$$

$$\in \min(d_{i+})$$

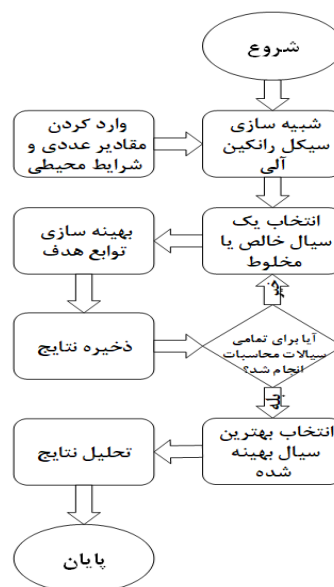
d_{i+} فاصله هر جواب از نقطه ایده‌آل می‌باشد. i به معنی جواب و j به معنی هدف است. n تعداد جواب بهینه در نمودار پارتو و m تعداد توابع هدف می‌باشد. i_{final} جواب روش LINMAP می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- اعتبار سنجی

اطلاعات و مقادیر مورد نیاز برای شبیه‌سازی از مراجع معتبری گرفته شده است. برای شبیه‌سازی سیکل رانکین ساده از مرجع [۱۱] استفاده شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار فرترن برای مدل سازی و تحلیل و از رفیراپ برای محاسبه خواص سیال استفاده شده است. کار حاضر با شبیه‌سازی دو سیکل در نرم‌افزار هایسیس و تحلیل در نرم‌افزار متلب در شرایط یکسان با مرجع، دارای خطای بسیار پایینی در نتایج حاصله است. لازم به ذکر است منبع حرارتی این مطالعه، منبع حرارتی درجه پایین می‌باشد. سیکل رانکین با مبدل میانی با سیال عامل مخلوط در شرایط مشابه با مرجع [۱۱] شبیه‌سازی شده است. توان تولیدی کار حاضر با اختلاف ۱/۱ درصدی از مرجع نشان دهنده صحت شبیه‌سازی است. نتایج اعتبار سنجی کار حاضر در جدول (۵) آمده است.

ویژگی‌هایش وارد الگوریتم ازدحام ذرات می‌شود و طبق پارامترهای وارد شده در نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی انجام می‌شود و نتایج آن سیال ثبت می‌گردد (کد نرم‌افزار متلب برای محاسبات و بهینه‌سازی سیکل BORG در پیوست ب آمده است). این روند برای تمامی حالت‌های سیال که ۱۰ حالت خالص، ۴۰۵ حالت مخلوط دو جزیی و ۴۳۲۰ حالت مخلوط سه جزیی سیالات انتخابی می‌باشد، انجام می‌شود. در انتها سیالی که بهترین عملکرد را پس از بهینه‌سازی دارد انتخاب می‌شود.



شکل (۸) فلوجارت روند انتخاب بهترین سیال بهینه‌سازی

شده

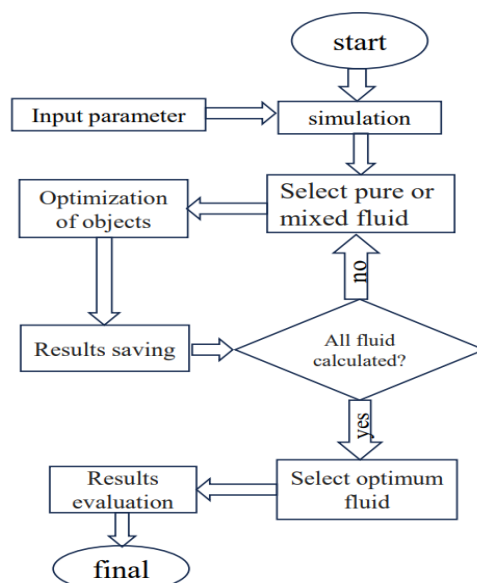
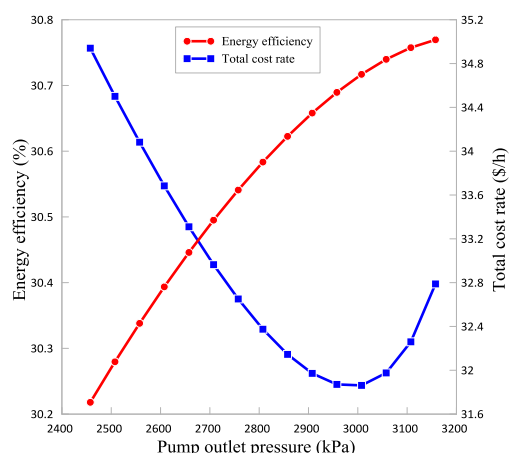


Figure (8) flowchart of the selection process of the best optimized fluid

مشخصی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار سیال در محدوده فشار ۲-۴ kPa بهترین عملکرد را داراست.

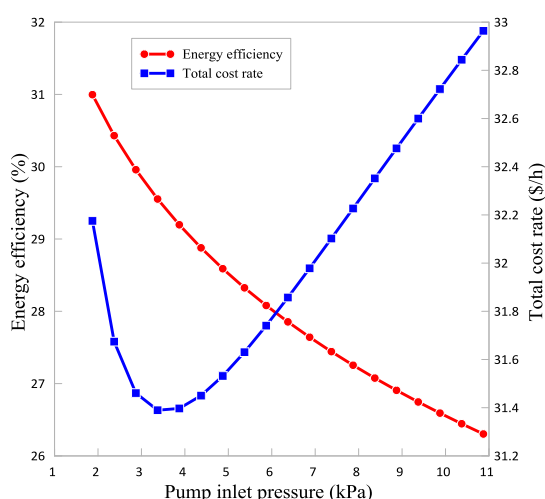


شکل (۹) تاثیر فشار خروجی پمپ بر توابع هدف

Figure (9) The effect of pump output pressure on objective functions

۵-۵- پار تو

در نمودار پارتو مقادیر توابع هدف برای حالت های مختلف در بهینه‌سازی نمایش داده شده است. در این نمودار ارتباط بین توابع هدف نیز مشخص می‌شود. همان‌طور که در نمودار (۱۱) مشخص است با افزایش راندمان انرژی نرخ هزینه کل افزایش می‌یابد و بالعکس. برای انتخاب بهینه ترین حالت در میان جواب ها، از روش LINMAP در این پژوهش استفاده می‌شود. نقطه ایده‌آل بیشینه راندمان انرژی و کمینه نرخ هزینه کل است.



شکل (۱۰) تاثیر فشار ورودی پمپ بر توابع هدف

Figure (10) The effect of pump inlet pressure on objective functions

جدول (۵) اعتبار سنجی سیکل‌های شبیه‌سازی شده کار حاضر

Table (5) validation of the simulated cycles of the present work

سیکل سیال	BORC			RORC		
	R11			Toluene/Benzene		
مقادیر	مرجع [۱۱]	کار حاضر	خطا (%)	مرجع [۱۱]	کار حاضر	خطا (%)
راندمان (%)	۱۳/۸۹	۱۴/۱۲	۱/۷	۳/۳۶	۳۱/۲۲	۲/۸۳
توان (kW)	۳۸/۶۴	۳۹/۶	۲/۵	۱۵۹/۳	۱۶۱۲	۱/۱

۵-۲- حدود متغیرهای مستقل برای بهینه‌سازی

سیکل BORC و RORC با متغیرهای مستقل فشار ورودی و خروجی پمپ در محدوده مشخص شده در جدول (۶) برای سیال‌های عامل مختلف بهینه‌سازی می‌شود. فشار ورودی و خروجی هر دو پمپ سیکل DLORC نیز در محدوده مشخص شده در جدول (۶) متغیر در نظر گرفته می‌شود. اما سیکل SRORC به علت وجود فشار میانی در سیکل دارای سه فشار به عنوان متغیر مستقل است. در جدول (۶) محدوده متغیرهای سیکل SRORC آورده شده است.

جدول (۶) حد بالا و پایین متغیر بهینه‌سازی سیکل BORC و RORC

Table (6) upper and lower limits of BORC and RORC cycle optimization variable

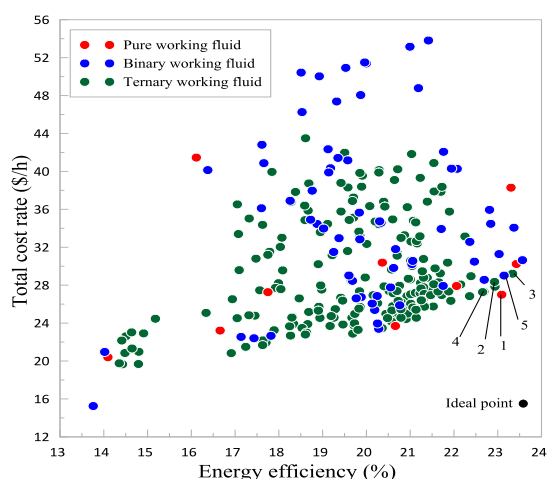
متغیر	حد پایین	حد بالا	واحد
فشار ورودی پمپ	$p_{T=20C}$	$0.1 p_{cr}$	kPa
فشار خروجی پمپ	$0.7 p_{cr}$	$0.9 p_{cr}$	kPa

۵-۳- تاثیر فشار خروجی پمپ بر توابع هدف

در شکل (۹) تاثیر فشار خروجی پمپ بر توابع هدف با سیال p-Xylene نشان داده شده است. با افزایش فشار سیال ورودی به توربین، راندمان انرژی همواره افزایش یافته است. نرخ هزینه کل تا فشار مشخصی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار سیال در فشار ۲۹۶۰ kPa بهترین عملکرد را داراست.

۵-۴- تاثیر فشار ورودی پمپ بر توابع هدف

در نمودار (۱۰) تاثیر فشار ورودی پمپ بر توابع هدف با سیال p-Xylene نشان داده شده است. با افزایش فشار سیال ورودی به پمپ راندمان انرژی همواره کاهش و نرخ هزینه کل تا فشار



شکل (۱۲) مقایسه سیالات خالص و مخلوط بر اساس توابع

هدف در سیکل BORC

Figure (12) Comparison of pure and mixed fluids based on objective functions in the BORC cycle

جدول (۶) نتایج پنج سیال عامل برتر در بهینه‌سازی سیکل

BORC

Table (6) results of the top five operating fluids in BORC cycle optimization

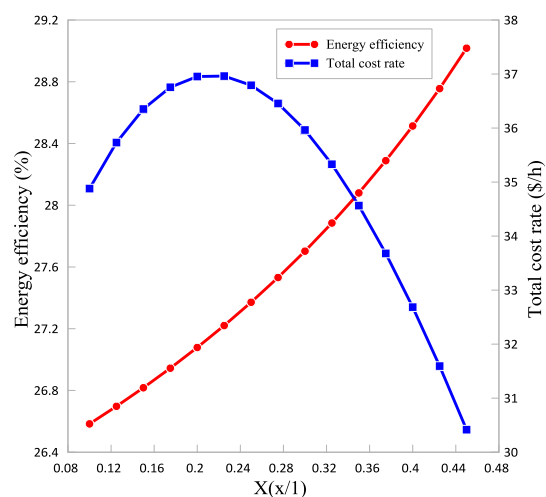
ردیف	سیال عامل	نسبت مولی (X/1)	نتایج بهینه سازی	
			راندمان انرژی (%)	نرخ هزینه کل (h/\$)
۱	p-Xylene	۱	۲۳/۹	۲۷
۲	Benzene/ Cyclopentane/ Cyclohexane	۰/۸-۰/۱-۰/۱	۲۲/۶۵	۲۷/۲۶
۳	Benzene/Toluene /Cyclohexane	۰/۸-۰/۱-۰/۱	۲۳/۳۳	۲۹/۲
۴	Benzene/Toluene/ Cyclopentane	۰/۸-۰/۱-۰/۱	۲۲/۹	۲۸/۳۴
۵	Benzene/ Cyclopentane	۰/۹-۰/۱	۲۳/۱۴	۲۹/۱

جدول (۷) نتایج پنج سیال عامل برتر در بهینه‌سازی سیکل

RORC

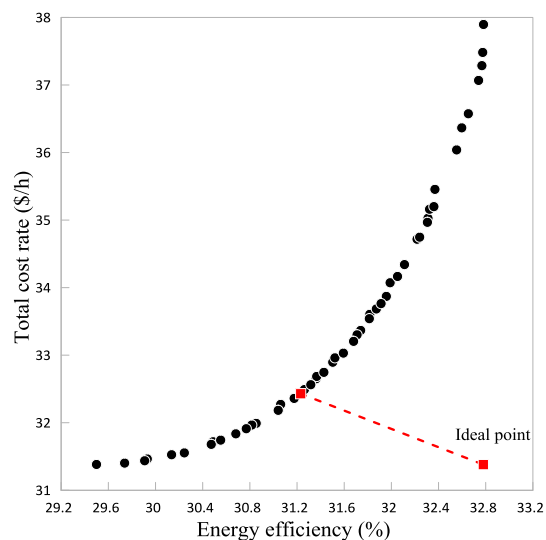
Table (7) results of the top five operating fluids in RORC cycle optimization

ردیف	سیال عامل	نسبت مولی (X/1)	نتایج بهینه سازی	
			راندمان انرژی (%)	نرخ هزینه کل (h/\$)
۱	p-Xylene	۱	۳/۷۹	۳۱/۳
۲	E-Benzene	۱	۳۱/۲	۳۲/۳
۳	p-Xylene/ Toluene	۰/۹-۰/۱	۳/۳	۳۵/۶۶
۴	p-Xylene/ E- Benzene/ Toluene	۰/۴-۰/۱ ۰/۵	۳/۵	۳۶/۳
۵	E-Benzene/ p- Xylene/ Toluene	۰/۲-۰/۱ ۰/۷	۳/۴	۳۶/۱۵



شکل (۱۱) تاثیر پارامتر x بر توابع هدف در سیکل SRORC

Figure (11) The effect of parameter x on the objective functions in the SRORC cycle



شکل (۱۱) نمودار پارتو برای سیال p-Xylene در سیکل

RORC

Figure (11) Pareto diagram for p-Xylene fluid in RORC cycle

۵-۶ نتایج بهینه‌سازی

نمودار (۱۲) نتیجه بهینه‌سازی تمامی سیالات مختلف خالص و مخلوط که با روش LINMAP بدست آمده است را برای سیکل BORC به نمایش و با هم مقایسه کرده است. نمودار با دو محور راندمان انرژی و نرخ هزینه کل از جنس نمودار پارتو می‌باشد. لذا از روش LINMAP این بار برای انتخاب بهترین سیال استفاده نموده و نتایج ۵ سیال برتر در جدول (۴-۵) آورده شده است. در جداول (۴-۶) تا (۸-۴) نیز به ترتیب نتایج سیکل‌های RORC، DLORC و SRORC آمده است.

۸-۵- تحلیل اکسرژی و ترموآکونومیکی سیکل‌ها

در جداول (۸) و (۹) پارامترهای تحلیل اکسرژی و ترموآکونومیکی اجزای سیکل‌ها آمده است. پارامترهای ترموآکونومیکی مانند تخریب اکسرژی ($\dot{E}_D$) و فاکتور ترموآکونومیکی (f) در تمام جدول‌ها به طور خلاصه درج شده است. تخریب اکسرژی، نقش مهمی در تحلیل ترموآکونومیکی دارد. مقادیر بالاتر فاکتور ترموآکونومیکی نشان می‌دهد که هزینه عملکرد و تعمیر و نگهداری موثرتر از تخریب اکسرژی است. بنابراین، مقدار بالای f برای اواپراتور نشان می‌دهد که کاهش هزینه سرمایه گذاری در چنین تجهیزاتی مقرون به صرفه است. برای توربین، فاکتور ترموآکونومیکی نشان می‌دهد که ۹۷/۵٪ از اختلاف هزینه نسبی ناشی از هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری است و ۲/۵٪ باقیمانده توسط تخریب اکسرژی ایجاد می‌شود. برای اینگونه مولفه‌ها، کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری پیشنهاد می‌شود تا از راندمان اکسرژی کمتر و تخریب اکسرژی بالاتر جلوگیری شود.

هزینه سرمایه گذاری پیش گرم کن مایع تغذیه بسیار کمتر از سایر اجزای سیکل است. در این مطالعه از هزینه‌های این جز صرف نظر می‌شود و در محاسبات تاثیری ندارد.

در جداول (۸)، کندانسور با ۲۶۸ kW بیشترین و پمپ با ۴/۶ kW کمترین تخریب اکسرژی را دارند. نرخ هزینه تخریب اکسرژی کل سیستم ۲۰/۸۱ \$/h است که اواپراتور با ۱۶/۴ \$/h بالاترین سهم را داراست.

با توجه به جدول (۹) توربین حدود نیمی از تخریب اکسرژی کل سیکل را داراست. با اضافه شدن مبدل میانی به سیکل، تخریب اکسرژی کندانسور نسبت به سیکل ساده کاهش پیدا کرده است. فاکتور ترموآکونومیکی سیکل نشان می‌دهد که ۷۶/۵٪ هزینه‌های سیستم مربوط به هزینه‌های سرمایه گذاری و مابقی مربوط به تخریب اکسرژی است.

جدول (۸) مقادیر پارامترهای اکسرژی و ترموآکونومیکی

سیکل BORC

Table (8) values of exergy and thermoeconomic parameters of BORC cycle

پارامتر	$\dot{E}_D (kW)$	$\gamma_d (\%)$	$\dot{C}_D (\$/h)$	$f_k (\%)$
توربین	۲۰۱/۱	۲۷/۳	۳/۳	۴۷/۲
کندانسور	۲۶۸/۹	۳۶/۳	۱/۰۸	۱۷/۷
پمپ	۴/۶	۰/۶	۰/۰۳	۴۰/۷
اواپراتور	۲۶۵/۲	۳۵/۸	۱۶/۴	۹۷/۵
کل سیکل	۷۳۹/۸	—	۲۰/۸۱	۶۹/۳

جدول (۹) مقادیر پارامترهای اکسرژی و ترموآکونومیکی

سیکل RORC

Table (9) values of exergy and thermoeconomic parameters of RORC cycle

پارامتر	$\dot{E}_D (kW)$	$\gamma_d (\%)$	$\dot{C}_D (\$/h)$	$f_k (\%)$
توربین	۲۰۱/۲	۴۵/۴۳	۳/۳۶	۴۲/۲
کندانسور	۸۱/۳	۱۸/۳	۱/۷	۴۸/۴
پمپ	۴/۶	۱/۰۳	۰/۰۳	۴۰/۷
مبدل میانی	۵۸/۲	۱۳/۱۷	۳/۶	۷۳/۴
اواپراتور	۹۷/۸	۲۲/۰۷	۱۷/۱	۹۹/۱
کل سیکل	۴۴۳/۱	—	۲۵/۷۹	۷۶/۵

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، سیالات عامل مختلف برای ORC ساده و همچنین سه مدل اصلاح شده مقایسه شد. ۱۰ سیال عامل مختلف برای این تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی انتخاب شد و حالت خالص و ترکیب چند جزیی این سیالات با دقت ۰/۱ به عنوان سیال عامل استفاده شد که هر یک از آن‌ها ویژگی‌های مختلفی را نشان می‌دهد. برخی از این سیالات عامل مانند p-Xylene به عنوان یک سیال عامل مناسب برای سیکل‌ها، از نظر ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی توصیه شده است. مقدار بهینه فشار اواپراتور و فشار کندانسور نیز با استفاده از سیالات عامل مختلف به منظور به حداقل رساندن نرخ هزینه کل و حداکثر راندمان انرژی در سیکل‌ها ارائه شد. برخی از نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

✓ افزایش فشار اواپراتور باعث افزایش راندمان انرژی سیکل می‌شود.

✓ افزایش فشار کندانسور باعث کاهش راندمان انرژی سیکل می‌شود.

✓ سیکل DLORC و SRORC به ترتیب دارای بیشترین و کمترین نرخ هزینه کل را تحت شرایط یکسان دارند.

✓ سیکل RORC و BORC دارای بیشترین و کمترین راندمان انرژی تحت شرایط یکسان می‌باشند.

✓ وجود مبدل میانی باعث کاهش تخریب اکسرژی در کندانسور می‌شود.

✓ در بین سیالات عامل بررسی شده، p-Xylene مناسب‌ترین سیال از نظر ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی با راندمان انرژی ۳۰/۷۹٪ و نرخ هزینه ۳۱/۳ \$/h در سیکل RORC می‌باشد.

✓ در میال سیالات مخلوط، مخلوط Benzene/Cyclohexane/n-Hexane در سیکل

grade waste heat by using genetic algorithm, Global journal for research analysis: Volume-6, Issue-3.

- [10] Liu, Bo-Tau & Chien, Kuo-Hsiang & Wang, Chi-Chuan. (2004). Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy*. 29. 1207-1217. 10. 1016/j. energy. 2004. 01. 004.
- [11] Dai, Yiping & Wang, Jiangfeng & Gao, Lin. (2009). Parametric optimization and comparative study of Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. 50. 576-582. 10. 1016/j. enconman. 2008. 10. 018.
- [12] Chacartegui, Ricardo & Sánchez, David & Muñoz, J. M. & Sanchez, Tatiana. (2009). Alternative ORC bottoming cycles FOR combined cycle power plants. *Applied Energy*. 86. 2162-2170. 10. 1016/j. apenergy. 2009. 02. 016.
- [13] Yu, Haoshui & Feng, Xiao & Wang, Yufei. (2015). A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste heat. *Energy*. 90. 10. 1016/j. energy. 2015. 02. 059.
- [14] chahartaghi M, Babaei M. (2014). Energy and exergy analysis of Organic Rankine Cycle with using two-component working fluid in specified heat source conditions. *Modares Mechanical Engineering*. 14 (3) :145-156
- [15] Ren, Jingqi & Cao, Yue & Long, Ying & Qiang, Xiongchao & Dai, Yiping. (2019). Thermodynamic Comparison of Gas Turbine and ORC Combined Cycle with Pure and Mixture Working Fluids. *Journal of Energy Engineering*. 145. 10. 1061/(ASCE)EY. 1943-7897. 0000580.
- [16] Satanphol, K. & Pridasawas, W. & Suphanit, B. (2017). A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery. *Energy*. 123. 10. 1016/j. energy. 2017. 02. 024.
- [17] Chys, Michael & Van den Broek, Martijn & Vanslambrouck, Bruno & De Paepe, Michel. (2012). Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles. *Energy*. 44. 623-632. 10. 1016/j. energy. 2012. 05. 030.
- [18] Feng, Yongqiang & Hung, TzuChen & Greg, Kowalski & Zhang, Yaning & Li, Bing-Xi & Yang, Jinfu. (2015). Thermoeconomic comparison between pure and mixture working fluids of organic Rankine cycles (ORCs) for low temperature waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. 106. 859-872. 10. 1016/j. enconman. 2015. 09. 042.
- [19] Zhou, Yaodong & Wu, Yuandan & Li, Feng & Yu, Lijun. (2016). Performance analysis of

SRORC بهترین عملکرد ترمودینامیکی را با توجه به توابع هدف دارا می‌باشد.

منابع

- [1] Xi, Huan & Li, Ming-Jia & Xu, Chao & He, Ya-Ling. (2013). Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm. *Energy*. 58. 473-482. 10. 1016/j. energy. 2013. 06. 039.
- [2] Ghaebi, Hadi & Rostamzadeh, Hadi & Rostamzadeh, Javad & Ebadollahi, Mohammad & Abioghli, Hadi. (2018). Comparison of Different Working Fluids Operation for Basic and Modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Journal of Energy Management and Technoogy*. 10. 22109/jemt. 2018. 100794. 1036.
- [3] Mohammadzadeh Bina, Saeid & Jalilinasrabady, Saeid & Fujii, Hikari. (2017). Energy, Economic and Environmental (3E) Aspects of Internal Heat Exchanger for ORC Geothermal Power Plants. *Energy*. 140. 10. 1016/j. energy. 2017. 09. 045.
- [4] Safarian, Sahar & Aramoun, Fereshteh. (2015). Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Reports*. 1. 1-7. 10. 1016/j. egypt. 2014. 10. 003.
- [5] Toffolo, Andrea & Lazzaretto, Andrea & Manente, Giovanni & Paci, Marco. (2014). A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems. *Applied Energy*. 121. 219-232. 10. 1016/j. apenergy. 2014. 01. 089.
- [6] Maizza, V. & Maizza, A. (2001). Unconventional Working Fluids in Organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*. 21. 381-390. 10. 1016/S1359-4311(00)00044-2.
- [7] Bekiloğlu, Hasan Eren & Bedir, Hasan & Anlaş, Günay. (2018). Multi-objective optimization of ORC parameters and selection of working fluid using preliminary radial inflow turbine design. *Energy Conversion and Management*. 183. 10. 1016/j. enconman. 2018. 12. 039.
- [8] Ur-Rehman, M. & Khurram, M. Sh & Rafiq, Sikander & Memon, Sh. A. & Ghauri, Moinuddin & Jamil, Farrukh & Jaffery, M. H. & Doggar, M. Gh. (2018). Modeling of organic Rankine cycle for suitable working fluid in HYSYS for power generation in Pakistan. *Bulgarian Chemical Communications*. 50. 254-264.
- [9] Dharmendra Singh Shekhawat, M. N. Karimi, (2017). Optimization of Organic Rankine Cycle for different working fluids operated by low

- [27] Zhou, Yuhong & Li, Shanshan & Sun, Lei & Zhao, Shupeng & Talesh, Seyed. (2019). Optimization and thermodynamic performance analysis of a power generation system based on geothermal flash and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures. *Energy*. 194. 116785. 10. 1016/j. energy. 2019. 116785.
- [28] Zhao, Dongpeng & Deng, Shuai & Zhao, Li & Xu, Weicong & Wang, Wei & Nie, Xianhua & Chen, Mengchao. (2020). Overview on artificial intelligence in design of Organic Rankine Cycle. *Energy and AI*. 1. 100011. 10. 1016/j. egyai. 2020. 100011.
- [29] Lee, Younggeun & Kim, Jeongnam & Ahmed, Usama & Kim, Changsoo & Lee, Youn-Woo. (2019). Multi-objective optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) design considering exergy efficiency and inherent safety for LNG cold energy utilization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 58. 10. 1016/j. jlp. 2019. 01. 006.
- [30] Rahbar, Kiyarash & Mahmoud, Saad & Aldadah, Raya & Moazami, Nima. (2015). Integrated Modelling and Multi-Objective Optimization of Organic Rankine Cycle Based on Radial Inflow Turbine. 10. 1115/GT2015-42835.
- [31] Liu, Xiaomin & Wei, Ming & Yang, Luona & Wang, Xing. (2017). Thermo-economic analysis and optimization selection of ORC system configurations for low temperature binary-cycle geothermal plant. *Applied Thermal Engineering*. 125. 10. 1016/j. applthermaleng. 2017. 07. 016.
- [32] Liu, Hongda & Zhang, Hongguang & Yang, Fubin & Hou, Xiaochen & Yu, Fei & Song, Songsong. (2017). Multi-objective optimization of fin-and-tube evaporator for a diesel engine-organic Rankine cycle (ORC) combined system using particle swarm optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*. 151. 147-157. 10. 1016/j. enconman. 2017. 08. 081.
- [33] Kennedy, J. Eberhart, (1995). Particle swarm optimization (pso). In: *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia. pp. 1942–1948.
- [34] Ahmadi, Pouria & Dincer, Ibrahim & Rosen, Marc. (2017). Optimization of Energy Systems. 10. 1002/9781118894484.
- zeotropic mixtures for the dual-loop system combined with internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*. 118. 406-414. 10. 1016/j. enconman. 2016. 04. 006.
- [20] Xi, Xinming & Zhou, Yingyan & Guo, Cong & Yang, Lijun & Du, Xiaoze. (2015). Characteristics of Organic Rankine Cycles with Zeotropic Mixture for Heat Recovery of Exhaust Gas of Boiler. *Energy Procedia*. 75. 1093-1101. 10. 1016/j. egypro. 2015. 07. 496.
- [21] Shokati, Naser & Mohammadkhani, Farzad & Yari, Mortaza & Mahmoudi, S. M. s & Rosen, Marc. (2014). A Comparative Exergoeconomic Analysis of Waste Heat Recovery from a Gas Turbine-Modular Helium Reactor via Organic Rankine Cycles. *Sustainability*. 6. 2474-2489. 10. 3390/su6052474.
- [22] Shokati, Naser & Ranjbar, Faramarz & Yari, Mortaza. (2015). Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renewable Energy*. 83. 527-542. 10. 1016/j. renene. 2015. 04. 069.
- [23] Khaljani, Mansureh & Saray, R. & Bahlouli, Keyvan. (2015). Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*. 97. 10. 1016/j. enconman. 2015. 02. 067.
- [24] Khaljani, Mansureh & Saray, R. & Bahlouli, Keyvan. (2015). Thermodynamic and thermoeconomic optimization of an integrated gas turbine and organic Rankine cycle. *Energy*. 93. 2136–2145. 10. 1016/j. energy. 2015. 10. 002.
- [25] Karellas, Sotirios & Braimakis, Konstantinos. (2014). Energy-exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC-VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power. *Energy Conversion and Management*. 107. 10. 1016/j. enconman. 2015. 06. 080.
- [26] Haghighat Mamaghani, Alireza & Najafi, Behzad & Shirazi, Ali & Rinaldi, Fabio. (2015). 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (molten carbonate fuel cell) and ORC (organic Rankine cycle) system. *Energy*. 82. 10. 1016/j. energy. 2015. 01. 074.

شکل (۱) - طبقه بندی رایج در روش‌های ارزیابی ریسک محیط زیستی

Figure (1) - Common classification in environmental risk assessment methods

سپس در قسمت ارزش‌های موجود، استاندارد ها، نظرات کارشناسی، نگرانی‌های اجتماعی و سیاست‌های مدیریتی تعیین می‌گردند. در نهایت با مشخص شدن این بخش‌ها به تصمیم‌گیری در مورد شاخص‌های عمل کرد محیط زیستی تعریف شده، پرداخته می‌شود. به طور کلی آلودگی ها، تغییر اکوسیستم و صدمات اجتماعی-اقتصادی مهم ترین اثرات محیط زیست به شمار می‌روند (۱۶-۱۷-۱۸).

لازم به توضیح است که در مطالعه موردی مهم ترین اثرات محیط زیستی، انتشار آلاینده‌های هوا، آب و خاک و هم چنین تغییرات اکولوژیکی در محدوده تعیین شده میدان گازی پارس جنوبی با استفاده از داده‌های فاز یکم می‌باشند. از جمله معیارهای قضاوت و پذیرش نیز استاندارد OGP^۲، مقادیر طراحی و SPGC^۳ (شرکت گاز پارس جنوبی) هستند. برای این که بتوان اقدامات اصلاحی اثربخش را برای توسعه محصول یا خدمت تعیین نمود، نتایج حاصل از تمامی فرایندهای اصلی باید اندازه‌گیری شوند. بدین ترتیب، فرایندهای ویژه ای که نیازمند تغییر هستند، می‌توانند در صورتی که پیشرفت رضایت بخش نباشد، تعیین شوند (۱۹). تعهد کارفرمایان به ایمنی و HSE به خوبی به واسطه شاخص‌ها و معیارهای سنجش و اندازه‌گیری عمل کرد HSE قابل توصیف است (۲۰).

از دیدگاهی کلان نگر، هدف از اریه چنین شاخص‌هایی را می‌توان پاسخ‌گویی به نیاز وجود یک برنامه ریزی کلان در خصوص شناخت و تعریف محیط‌های کاری و صنعتی پرخطر، شناسایی فعالیت‌های کاری مخاطره آمیز و تلاش در جهت ایمن سازی و بهینه سازی آن را در سطح ملی و یا حتی بین المللی دانست. شاخص‌های عمل کرد، جهت استفاده مؤثر باید مشخصات مشترک ذیل را دارا باشند:

انعکاس نیازمندی‌های سیستم، وضوح و قابلیت درک، قابلیت به کارگیری در سطح وسیع، عدم امکان تفاسیر متفاوت، سازگاری با دیگر شاخص‌ها، تفسیر دقیق نتایج و نیز به صرفه بودن به کارگیری آن‌ها (۲۱).

روش شناسی تحقیق حاضر بر مبنای شکل شماره (۲) به صورت ترکیبی از روش‌های ارزیابی ریسک FMEA^۴ و فرآیند آنالیز سلسله مراتبی AHP^۵ انجام پذیرفته است. این فرآیند یک روش تحلیلی بوده و تلاش می‌کند تا حد ممکن پیامدهای بالقوه و یا بالفعل موجود در محدوده ای که در آن ارزیابی انجام

ارزیابی اثرات محیط زیستی EIA: ارزیابی اثرات محیط زیستی اغلب توسط نهادهای دولتی و مقامات محیط زیستی به منظور تأیید صلاحیت واحدهای صنعتی و مطابقت آن‌ها با استانداردها و معیارهای مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۲). عوامل مطالعه در EIA، شاخص‌های کیفیت و عمل کرد محیط زیست می‌باشند که می‌توانند شاخص‌هایی در زمینه‌های شیمی، معدنی، زیستی، عمرانی و حتی توسعه ای باشند. این در حالی است که عوامل مطالعات ارزیابی ریسک محیط زیست از جنس احتمال و پیامد بوده و اغلب توسط سامانه‌های مدیریت محیط زیستی ISO 14001 و HSE-MS در واحدهای صنعتی به صورت امری درون سازمانی انجام می‌پذیرند. یکی از محدودیت‌های ارزیابی اثرات محیط زیستی را می‌توان کمبود روش‌های تمام کمی به منظور برآورد احتمال اثرات دارای پتانسیل آسیب به محیط زیست در نظر گرفت (۱۳-۱۲). ارزیابی اثرات محیط زیستی EIA را می‌توان شناسایی و برآورد نظام مند اثرات محتمل پروژه ها، برنامه‌ها و قوانین پیشنهادی بر حوزه‌های شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی محیط زیست تعریف نمود (۱۴-۳)؛ به طوریکه فرآیند ارزیابی اثرات محیط زیست، شامل مراحل؛ تعیین محدوده مطالعه، متون و دستورالعمل‌ها، شناسایی اثرات دارای پتانسیل، تعیین اثرات دارای اهمیت و برآورد این اثرات و مدیریت اثرات ارزیابی شده می‌باشند (۳). شاخص‌های مطالعه در ارزیابی اثرات محیط زیستی برای مقوله هوا و آب معمولاً غلظت آلاینده‌ها می‌باشد (۱۵). در بحث ارزیابی اثرات محیط زیستی، به منظور کمی سازی تاثیرگذاری ریسک و تاثیرپذیری گیرنده‌ها از شاخص‌هایی با عنوان شاخص‌های عمل کرد محیط زیستی استفاده می‌شود.

در این تحقیق از شاخص‌های انتشارات مشعل، انتشار گاز اسیدی و غلظت آلاینده‌ها در هوا (TSS, pH, COD) و Oil در آب و تولید پسماند استفاده شده است. پسماندها از جمله متنوع ترین نوع شاخص‌ها می‌باشند که در میان آن‌ها پسماندهای شیمیایی مواد خطرناک نیاز به مدیریت و هزینه بیش تر دارند مانند پسماند شیمیایی کرومات. پسماندهای روغن سوخته و گازوییل نیز می‌توانند در ردیف شاخص‌های آب، خاک و ضایعات به صورت هم زمان قرار گیرند.

مطالعه موردی

در فرآیند تصمیم‌گیری در ارزیابی اثرات محیط زیست EIA^۱ در مرحله اول، مهم ترین اثرات محیط زیستی برآورد می‌شوند.

^۲ Oil and Gas Producers

^۳ South Pars Gas Complex

^۴ Failure mode and Effect Analysis

^۵ Analytical Hierarchy Process

^۱ Environmental Impact Assessment

می شود و نیز علل و اثرات مرتبط با آن را شناسایی و رتبه بندی نماید.

یافته ها

آلودگی هوا: در پالایش گاه فاز ۱ پارس جنوبی، از دو شاخص خروجی مشعل و انتشار گاز اسیدی در بحث اثرات آلودگی هوا استفاده می شود. خروجی مشعل در واقع میزان تن خروجی مشعل به ازاء کیلو تن هیدروکربن تولیدی می باشد. انتشار گاز اسیدی نیز میزان تن گاز اسیدی سوزانده شده به ازاء کیلو تن هیدروکربن تولیدی می باشد. شکل (۳) روند تغییرات این دو شاخص هوا را در سال ۱۳۹۱ در پالایش گاه فاز یک (مطالعه موردی)، SPGC و OGP نشان می دهد.

با توجه به نمودارهای بالا، میزان شاخص خروجی مشعل پروژه همواره بالاتر از حد OGP در بازه زمانی مورد نظر می باشد. اما از نظر مقایسه با پارس جنوبی، تقریباً میزان کم تر یا مساوی این شاخص در فاز یکم دیده می شود. این امر می تواند با توجه به ویژگی خاص منطقه صنعتی پارس جنوبی با عنوان منطقه ویژه اقتصادی و انرژی پارس توجیه شود. در خصوص انتشار گاز اسیدی می توان دریافت که میزان این شاخص در فاز یک بسیار پایین تر از SPGC می باشد. بر طبق نمودار، ماه ژوئن بیش ترین میزان شاخص های آلودگی هوا را داشته است که می تواند ریشه های فرآیندی داشته باشد.

آلودگی پساب: در پالایش گاه یکم در بحث آلودگی پساب، شاخص های COD، pH و TSS در تخلیه به محیط زیست (Out Fall Basin) پر اهمیت شناخته شده اند. شکل (۴) نمودار درصد انطباق با حد طراحی را برای شاخص های مذکور در فاز یکم و پارس جنوبی نشان می دهد.

با توجه به نمودار می توان گفت شاخص TSS همواره در انطباق کامل با حد طراحی بوده است (۱۰۰٪ و ۱۰۰٪) و این میزان برای فاز یک بسیار بالاتر از حد SPGC می باشد. از سوی دیگر شاخص COD در زمستان ۹۰ تفاوت چشم گیری با بهار ۹۱ داشته است (۴۱،۶٪ و ۹۱،۲٪) و این در حالی می باشد که درصد انطباق شاخص های دیگر در زمستان ۹۰ و بهار ۹۱، مقادیر بسیار نزدیکی داشته اند. به طور کلی از لحاظ آلودگی آب و پساب، شاخص های مطالعه مورد نظر در وضعیت بهتری نسبت به SPGC هستند و به حدود طراحی بسیار نزدیک می باشند. لازم به توضیح است که شاخص Oil و TDS^۱ مورد اندازه گیری واقع نشده اند، در حالی که این شاخص ها از جمله مهم ترین استانداردهای تخلیه به شمار می

روند. در این خصوص در جلسات راهبردی HSE، راه کار اداره گیری آلاینده ها در پایش ارائه گردیده است.

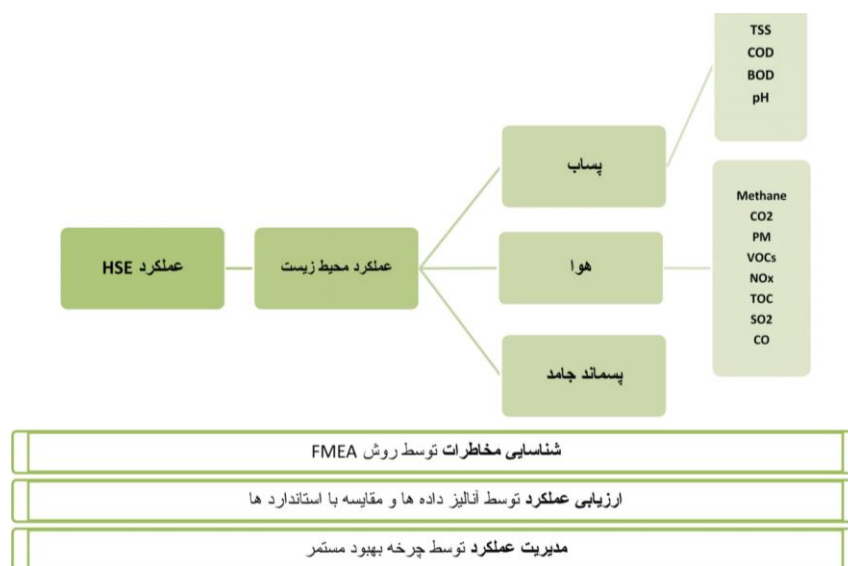
در بخش پساب فاز ۹ و ۱۰ روند تغییر شاخص های مورد مطالعه و هم چنین مقایسه مقادیر با حدود استاندارد موجود می باشند. با توجه به این داده ها می توان گفت در سال ۲۰۱۳ تقریباً تمامی شاخص های بخش پساب در مطالعه موردی در تطابق کامل با حدود استاندارد قرار گرفته اند و این امر نشان گر استقرار سامانه مدیریت HSE در سازمان می باشد. از سوی دیگر شاخص های pH و TSS همواره در انطباق با حد استاندارد بوده اند.

آلودگی پسماند: در این بحث از شاخص میزان پسماند تولید شده به ازاء هر ۳ ماه استفاده می شود. میزان این شاخص در هر دو فاز تقریباً یکسان بوده که شامل ضایعات فلزی، شیشه، کاغذ، پلاستیک و رستوران می باشد. در زمینه بهبود شاخص های آلودگی پسماند از سوی جلسات راه بردی HSE راه کار هایی از قبیل؛ برنامه ریزی برای مدیریت پسماندها در تعمیرات اساسی پالایش گاه اول، مزایده پسماندهای پالایش گاه، انجام پایش های محیط زیستی در بازه های ۳ ماهه و برگزاری دوره های آموزشی محیط زیست ارایه شده است.

بحث و نتیجه گیری

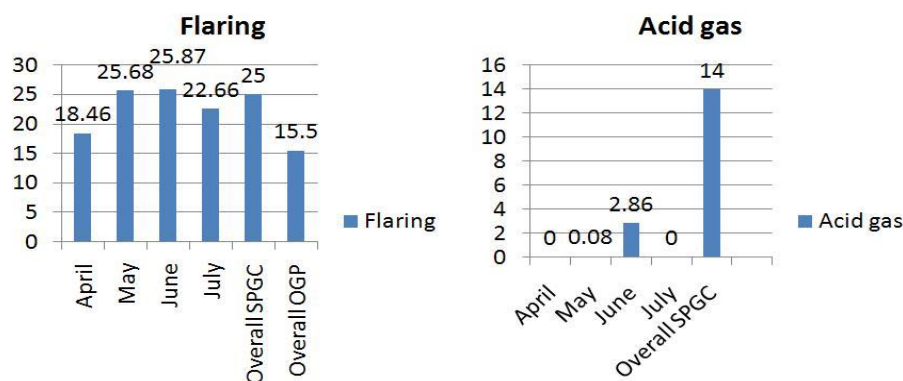
فرآیند مدیریت ایمنی سازمان های مدرن و پویا، بر اساس چرخه بهبود مستمر قرار دارد. در این زمینه لازم است شاخص های مناسب عمل کرد برای سیستم های مختلف، از جمله ایمنی تعریف شده، به طور منظم و مداوم تحت اندازه گیری و پایش قرار گرفته و در صورت لزوم اصلاح شوند (۲۲-۲۳) نتایج ممیزی های سیستم مدیریت HSE در زمینه محیط زیست برای فاز یکم نشان دهنده مواردی از عدم انطباق ها می باشد. ۴ مورد از راه کارهای اتخاذ شده سیستم مدیریت محیط زیستی به منظور پیش گیری و کاهش آلودگی های محیط زیستی در شکل (۵) ارایه شده است.

¹ Total Dissolved Solids



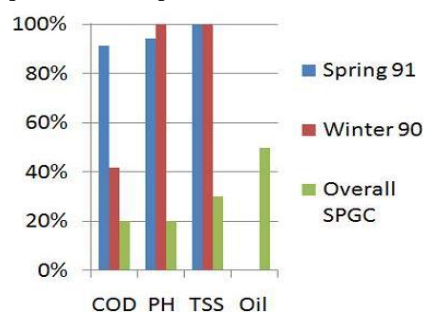
شکل (۲) - فرآیند روش شناسی مطالعه موردی

Figure (2) - Case study methodology process



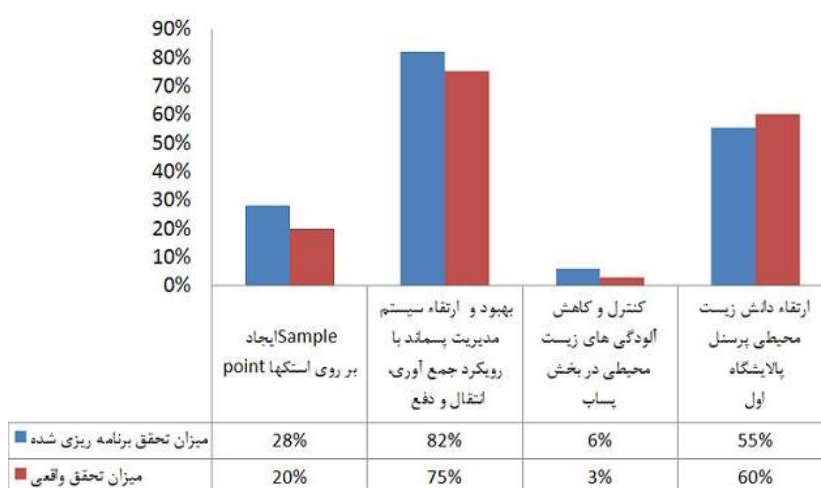
شکل (۳) - مقایسه شاخص‌های آلودگی هوا در پالایشگاه فاز شماره ۱

Figure (3) - Comparison of air pollution indicators in the Phase 1 refinery



شکل (۴) - نمودار درصد انطباق با طراحی برای شاخص‌های آلودگی آب و پساب

Figure (4) - Chart of percentage compliance with design for water and wastewater pollution indicators



شکل (۵) - نمودار درصد تحقق راه کارهای پیش گیری از آلودگی های محیط زیست در فاز شماره ۱

Figure (5) - Percentage chart of implementation of environmental pollution prevention solutions in Phase 1

نمونه از اثرات استقرار سامانه مدیریت HSE در پالایش گاه فاز ۹ و ۱۰ شامل؛ فرهنگ سازی HSE، برگزاری دوره های آموزشی متناوب، مدیریت آلاینده های محیط زیست، اصلاح فرآیند تصفیه پساب، تغییر در طراحی تصفیه خانه و انجام آنالیز ریسک سیستماتیک می باشند. توجه ویژه سازمان ها و شرکت های بزرگ نفت، گاز و پتروشیمی در جهان به سامانه HSE_MS حاکی از اهمیت آن در طرح ریزی و توسعه محصولات، خدمات و فرآیندها با در نظر گرفتن ملاحظات بهداشتی، ایمنی و محیط زیستی آنها می باشد (۲۳-۲۵). پارس جنوبی به عنوان بزرگ ترین میدان گازی مشترک جهان در کنار نقاط قوت اقتصادی و صنعتی موثر می تواند اثرات منفی محیط زیستی ایجاد نماید. بدین منظور ارزیابی اثرات محیط زیستی از طریق شاخص های عمل کرد محیط زیستی می تواند در استقرار و توسعه سیستم مدیریت محیط زیستی و در نهایت سیستم مدیریت یکپارچه HSE نقش موثری ایفا کرده و مشکلات ناشی از اثرات محیط زیستی را کاهش دهد. در این مطالعه با استفاده از شاخص های عمل کرد محیط زیستی به ارزیابی اثرات محیط زیستی شرکت گاز پارس جنوبی فاز شماره ۱ و فازهای شماره ۹ و ۱۰ پرداخته شد. در فاز ۱ شاخص های آلودگی هوا بالاتر از حد OGP بوده ولی از حد SPGC فراتر نبوده اند. شاخص های آلودگی پساب به صورت قابل قبول در حد طراحی بودند. برای فاز یکم در زمینه آلودگی پسماند ها، سیستم مدیریت پسماند با رویکرد جمع آوری، انتقال و دفع با میزان ۷۵٪ تحقق واقعی از جمله نقاط قوت سیستم مدیریت HSE می باشد. راه کارهای ارائه شده توسط سیستم مدیریت HSE در پیش گیری از آلودگی هوا و پساب، درصد پیشرفت پایینی داشته و مستلزم تمرکز و تلاش بیش تر

بر طبق نمودار، راه کارهای بهبود و ارتقاء سیستم مدیریت پسماند و ارتقاء دانش محیط زیستی کارکنان به ترتیب دارای بیش ترین میزان پیشرفت و تحقق بوده اند. میزان تحقق واقعی ارتقاء دانش کارکنان بالاتر از تحقق برنامه ریزی شده بوده (۶۰٪ < ۵۵٪) که نشان دهنده تعهد بسیار عالی و مشارکت بیش از انتظار کارکنان در زمینه حفاظت از محیط زیست می باشد. با تکمیل شدن میزان تحقق راه کار ارتقاء سیستم مدیریت پسماند، اثرات محیط زیستی این آلودگی ها را می توان ناچیز در نظر گرفت. هم چنین شرکت باید در زمینه کنترل و مدیریت آلودگی های هوا و پساب تلاش های بیش تری انجام دهد. به همین منظور در جلسات راه بردی HSE راه کارهای زیر ارائه شده است:

- ایجاد کمیته بهینه سازی تصفیه پساب
- ایجاد فضای سبز در نواحی صنعتی و غیر صنعتی
- انجام ممیزی مراقبتی سیستم مدیریت محیط زیست ISO 14001 و برنامه ریزی رفع عدم انطباق های مجتمع
- برگزاری مناقصه و عقد قرارداد با آزمایش گاه معتمد محیط زیست

با توجه به آغاز فاز عملیات و بهره برداری پالایش گاه ۹ و ۱۰ مجتمع گاز پارس جنوبی در سال ۲۰۰۹ می توان مغایرت های شاخص های عمل کرد HSE سازمان با استانداردهای مربوطه را به دلیل عدم استقرار و پایداری نظام مدیریت HSE در سال های ابتدایی توجیه نمود. از سوی دیگر در دو سال بعد از آغاز فاز عملیات و بهره برداری، استقرار سامانه مدیریت HSE_MS در سازمان منجر به کاهش عدم انطباق های موجود در زمینه شاخص های عملکرد محیط زیست گردیده است. چند

9. Mao, X.L., Zhao, Z.J., Zhang, H., 1998. Introduction of APELL and its application in EIA, *Environmental Science*, No. 19, pp. 1-5.
10. Du, S.J., 2006. Advances in Environmental Risk Assessment, *Environmental Science and Management*, No. 31, pp. 193-194.
11. Sarkhil. Hamid et al., 2014, Review and comparison of environmental assessment studies and environmental risk assessment, history, methods and application with a case study of the Yaran Shamali oil field, Second National Conference on Crisis Management and HSE in Vital Arteries, Industries and Urban Management, Tehran, University of Tehran, Volume 2, p. 42.12.
12. Zhang, K., Pei, Y., Lin, C., 2010. An investigation of correlations between different environmental assessments and risk assessment, *Procedia Environmental Sciences*, No. 2, pp. 643-649.
13. Kelvin, S.H., 2005. Environmental impact assessment: Practice and participation, Oxford Uni. Press.
14. Canter, L., 1996. Environmental Impact Assessment, Singapore, McGraw-Hill.
15. BRITISH STANDARD (B.S.), BS 8800, 1996. Guide to Occupational health and safety management systems. Copyright by the British Standards institution.
16. Liu, K. F. R., 2007. Evaluating environmental sustainability: An integration of multiple-criteria decision-making and fuzzy logic, *Environmental Management*, No. 39, pp. 721-736.
17. Kevin, F.R.L., Jia-Hong, L., 2009. Decision-support for environmental impact assessment: A hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process, *Expert Systems with Applications*, No. 36, pp. 5119-5136.
18. Shepard, R.B., 2005. Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic, New York: Springer.
19. Artley, W., Stroh, S., 2001. Establishing an Integrate Performance Measurement System, The Performance-Based Management Handbook, Volume 2, Performance-Based Management special Interest Group (PBM SIG).
20. Omidvari. Manouchehr and Norouzi. Sajid, 2012, Investigation and analysis of occupational and industrial accidents using indicators and criteria for measuring and evaluating safety performance, *Industrial Management Organization Publications*, first edition.21. Willie H., 1993. Product Safety Management and Engineering, Library of Congress- in publication date.
21. Mohammadfam. Iraj and Mahmoudi. Shahram, 2009, Design and presentation of a شرکت در این دو مقوله می باشد. در پالایشگاه فاز ۹ و ۱۰ شاخص‌های عمل کرد محیط زیستی روند مناسبی داشته و نشان دهنده تاثیر استقرار سامانه‌های مدیریتی HSE_MS و ISO 14001 می باشند.

منابع

1. Nasiri. Parvin et al., 2013, Identification and assessment of potential hazards in a manufacturing company using the job safety analysis method, *Environmental Science and Technology*, Volume 8, Issue 4, pp. 77-87.
2. Sarkhil. Hamid et al., 2014, Health, Safety and Environment Performance Indicators, A Sustainable Approach to Establishing the HSE_MS Management System in Asaluyeh Refinery A, The First Conference of Environmental Supporters with an HSE Approach, Tehran University of Science and Technology, Volume 1, pp. 10-18.
3. Sarkhil. Hamid et al., 2014, Studying the Effect of Environmental Performance Indicators on the Integrated HSE Management System in South Pars, The First HSE Conference in Construction, Mining, Oil and Gas Projects, Tehran, Shahid Beheshti University of Science and Technology, Volume 1, pp. 79-87.4.
4. Sarkheil, H., Alghasi, S. and Sadeghy Nejad, A., 2025. Modeling Offshore Environmental Risk Assessment: a Case Study of Installing Tripod Bases in a Deep Sea Mining Structure. *Journal of Mining and Environment*, 16(2), 705-719. doi: 10.22044/jme.2024.14304.2673
5. Sarkheil, H., Sadeghian, M., Talebi, A. and Partovi Hajidehi, A., 2025. Environmental Risk Modeling of Maintenance Processes in Zanjan's Transmission and High-Voltage Electrical Substations Using Innovative Integrated FMEA and ETBA Methods. *Environmental Sciences*, doi: 10.48308/envs.2025.1469
6. Sarkheil H., Torabi P., Hassani H., 2023. Environmental Risk Modeling of Hydrocarbon Exploration and Exploitation using Energy Trace Barrier Assessment Method, the case study of Tabnak Hydrocarbon Field, *Journal of oil and gas exploration and production*, No. 206, pp. 41-48.
7. Liu, S.Y., Wanga, H.Q., Li, Y.L., 2012. Current Progress of Environmental Risk Assessment Research, *Procedia Environmental Sciences*, No. 13, pp. 1477 - 1483.
8. Stapleton, P.J., Glover, M.A., Davis S.P., 2001. Environmental management systems: an implementation guide for small and medium sized organizations, Ann Arbor, NSF International.

- comprehensive system for measuring the performance of the HSE system in MAPNA Group, First National Conference on Thermal Power Plants Industry.
22. Mohammadfam. Iraj and Kianfar. Mohammad, 2009, Application of the HAZOP Operation and Hazard Study Technique in Assessing Safety, Health and Environmental Risks - Case Study (National Petroleum Products Distribution Company Oil Storage Tank), Environmental Science and Technology, 12th Volume, Issue 1.
23. Bahmannia. Gholamreza, 2005, Change Management and Its Role in Continuous Improvement of HSE Management Systems, HSE Strategy Journal, 1, Issue 4.
24. Karami. Mostafa, 2009, Practical Guide to Establishing, Planning, Implementing and Developing a Management System, Omid Mehr Publications, First Edition, HSE-MS Health, Safety and Environment.