DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.1.13.0

سال هفتم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۹، ص ص ۱۰۹- ۱۱۷

فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۰۴

بررسی پتانسیل بازیافت حرارت و بهینه سازی سیکل رانکین آلی در واحدهای Fpso شرکت های نفتی

شبنم منصوری[۱]، علی آبکتی[۲]، مصطفی سفیدگر[۳*]

۱- کارشناس مهندسی مکانیک، گروه سیکل و مبدل های حرارتی، پژوهشگاه نیرو، تهران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، تهران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، تهران

* پردیس، ۱۶۵۸۱۷۴۵۸۳، msefidgar@pardisiau.ac.ir

چکیده

پلتفرم های FPSO یا شناور تولید، ذخیره و فراورش به طور فزاینده ای برای اکتشاف نفت در آب های عمیق و دور از ساحل مورد استفاده قرار می گیرند. برای تحقق بهبود و پیشرفت در فرآیند تولید و همچنین تولید الکتریسیته در فازهای تولیدی آن، ضروری است بر تکنولوژی‌های کارآمد که هزینه ها و انتشار کربن دی اکسید به اتمسفر را کاهش می‌دهند، سرمایه‌گذاری شود. از این دیدگاه، ORC دارای پتانسیل بالایی در بازیابی انرژی از منابع حرارتی دارای خصوصیات مختلف موجود در پلتفرم FPSO، می‌باشد. در این مقاله، علاوه بر حالت پایه، چهار سناریوی مختلف جهت استفاده از گرمای خروجی اگزاست توربین هایی که در سرویس هستند مورد بررسی قرار گرفته شد. پیشنهادی دارای جذابیت بیشتری است که در تمامی زمان‌های تولیدی، تولید توان با دو توربین از سه توربین موجود انجام گیرد و از گازهای خروجی آن و گازهای خروجی از توربین تراکم CO_2 به عنوان یک منبع حرارتی در ORC استفاده گردد. از این طریق می‌توان از گرمای اگزاست توربین‌ها، نیاز به حرارت را تامین کرده و از تامین تقاضا برای انرژی الکتریسیته سهیم بود و با استفاده از ORC (با بازیابی کننده‌ی حرارت) در بازیابی حرارت، میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید را کاهش داد. بازده کل سیستم نیز به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد، زیرا توربین گازی، نزدیک به نقطه اسمی عمل می‌کند، که در این حالت بازده حرارتی آنها افزایش می‌یابد. این مطالعه، نتایج امیدبخشی را در استفاده از ORC برای بازیابی حرارت نشان داده، که یک متوسط ۲۲/۵ درصدی در کاهش مصرف سوخت و انتشار کربن دی اکسید در طول عمر FPSO را ارائه می‌کند.

کلیدواژگان: پلتفرم شناور تولید ذخیره و فراورش، سیکل رانکین ارگانیک، بازیابی حرارت

Study of waste heat recovery potential and optimization of the power production by an organic Rankine cycle in FPSO units

Shabnam Mansouri [1], Ali Abcoti [2], Mostafa Sefidgar[2*]

1- Department of Thermal Cycles and Heat Exchangers, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran

* P.O.B. 1658174583 Pardis, Iran, msefidgar@pardisiau.ac.ir

Received: 20 May 2019 Accepted: 26 August 2019

Abstract

FPSO or Floating Production Storage and Offloading platforms are increasingly used to explore deep-seated and offshore waters. In order to realize the improvement and progress in the production process, as well as the generation of electricity in its production phases, it is essential to invest in efficient technologies that reduce the cost and release of carbon dioxide into the atmosphere. From this perspective, ORC has a high potential for energy recovery from the thermal resources of the various FPSO platforms. In this paper, in addition to the baseline, four different scenarios were used to use the exhaust heat output of turbines in the service. The suggestion is more attractive, that two turbines

generate power in all production intervals, and exhaust gases from the CO2 turbine as a heating source in the ORC is used. In this way, the heat of exhaust turbines can be used to supply heat and supply of the demand for electricity, and using ORC (with heat recovery) in heat recovery, emissions reduced carbon dioxide. This study showed promising results in using ORC for heat recovery, an average of 22.5% for reducing fuel consumption and carbon dioxide emissions Lifetime FPSO provides.

Keywords: Floating Production Storage and Offloading (FPSO), Organic Rankin, Heat Recovery Cycle

۱- مقدمه

تولید توان به‌وسیله انرژیهای اتلافی امروزه بسیار متداول شده است. بازیافت گرمای اتلافی نقش مهمی در مدیریت منابع انرژی ایفا می کند. از سیکل ارگانیک رانکین[1] می‌توان برای بازیابی حرارت اتلافی دما پایین استفاده نمود. این سیکل مشابه سیکل رانکین بوده و فقط از سیالات ارگانیک به عنوان سیال کاری در آن استفاده می شود.

دمای خروجی بسیاری از واحدهای صنعتی کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد می باشد و اگر این حرارت به صورت مستقیم و بدون بازیافت حرارت وارد محیط شود موجب گرمایش محیط زیست و همچنین اتلاف اگزرژی خواهد شد. سیکل های رانکین ارگانیک قابلیت های بالایی در بازیافت چنین حرارت هایی دارند. ضمن این که این سیکل‌ها دارای ایمنی بالایی بوده و از نیازهای تعمیراتی پایینی برخوردار می باشند. ترکیب سیکل های رانکین ارگانیک با سیستم های انرژی دیگر همچون سیکل توربین گازی باعث افزایش بازدهی کلی سیکل خواهد شد. از آنجایی که سیکل های رانکین ارگانیک به صورت طبیعی و بدون مصرف سوخت (استفاده از حرارت هدر رفته سیکل های دیگر) کار می‌کنند آلودگی زیست محیطی کمتری در مقایسه با سیکل های دیگر خواهند داشت.

بکارگیری سیکل رانکین سنتی نیاز به دمای بسیار بالا (حدود ۵۰۰ الی ۷۰۰ درجه سلسیوس) در مرحله گرمایش دارد، بنابراین از منابع انرژی دما پایین به تنهایی نمی‌توان برای این گونه سیکل‌ها استفاده نمود و نیازمند بکارگیری مشعل‌های کمکی و مصرف سوخت فسیلی است، ازسوی دیگر بازده سیکل رانکین آب بخار با محرک انرژی دما پایین ،کم است.

یکی از مزیتهای اصلی سیکل رانکین آلی، استفاده از انرژی دماپایین اتلافی است. اکثر معایب سیکل بخار رانکین سنتی با بکارگیری این سیکل برطرف می‌گردد. سیکل رانکین آلی یکی از بهترین تکنولوژی های تبدیل این انرژی دماپایین به انرژی الکتریکی است، بنابراین توجه بسیاری از محققان به این تکنولوژی جلب شده و تحقیقات جدیدی درباره انتخاب سیال آلی و بهینه‌سازی پارامتری آن در حال انجام است[۱-۳].

در این مطالعه پتانسیل به کارگیری سیکل رانکین آلی بمنظور بازیابی حرارت تلفشده در یک سکوی شناور تولید، ذخیره و انتقال نفت[2]مورد بررسی قرار می‌گیرد . هدف از بکارگیری سیکل ORC جلوگیری از اتلاف حرارتی و به حداکثر رسانی تولید توان الکتریکی، صرفه جویی اقتصادی از طریق چرخه‌ی آلی رانکین با هدف افزایش بازده حرارتی کل فرآیند و کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید است.

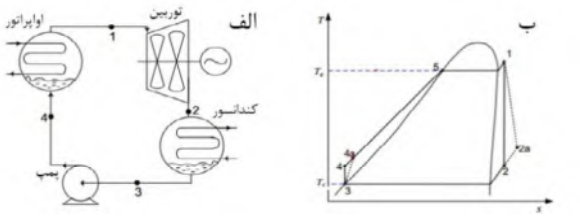
۱-۱- سیکل رانکین ارگانیک

شیوه کارکرد سیکل رانکین آلی شبیه سیکل رانکین است[۱-۲]: سیال عامل به یک دیگ بخار جایی که تبخیر می‌شود پمپاژ می‌گردد، از یک دستگاه منبسط کننده (توربین، پیچ، اسکرول، یا منبسط کننده ای دیگر) عبور کرده و سپس از طریق یک چگالنده مایع شده و به پمپ بازمی‌گردد. شکل ۱ شماتیکی از این سیکل و فرآیندهای آن را نشان می‌دهد.

در سیکل ایده‌آل که با مدل تئوری موتورها تشریح شد، فرایندهای انبساطایزوتروپیک و فرایندهای تبخیر و تراکم هم فشار فرض می‌شوند. در هر سیکل واقعی، حضور بازگشت‌ناپذیری‌ها باعث کاهش کارایی سیکل می‌شود. این برگشت‌ناپذیری‌ها اساساً طی فرایندهای زیر رخ می‌دهند.

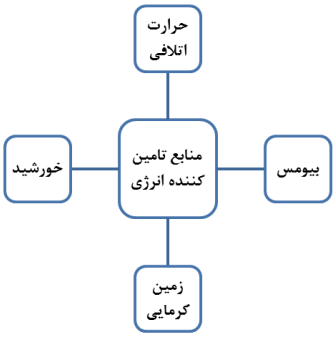
در طول انبساط: تنها بخشی از انرژی ناشی از احتلاف فشار قابل تبدیل به کار مفید است. بخش دیگر به گرما تبدیل می‌شود و از بین می‌رود. راندمان منبسط کننده با مقایسه کار واقعی و کار ایزنتروپیک حاصل می‌گردد.

در مبدل‌های حرارتی: سیال عامل یک مسیر طولانی و مارپیچ را طی می‌کند تا تبادل حرارتی خوبی را سبب شود اما باعث افت فشار می‌گردد که میزان توان قابل بازیافت را از چرخه کاهش می‌دهد. به همین ترتیب، تفاوت دما بین منبع گرما / سرما و سیال عامل باعث تخریب اگزرژی می شود و عملکرد چرخه را کاهش می‌دهد.



شکل ۱ سیکل ORC، الف شماتیک سیکل ساده؛ ب سیکل ترمودینامیکی در نمودار T-s

تفاوت سیکل ارگانیک رانکین با سیکل رانکین سنتی (بخارآب) در نوع سیال‌کاری به کار رفته در سیکل است. سیال‌های ارگانیک به سیال هایی می گویند که در فرمول شیمیایی خود دارای کربن هستند. همین تفاوت اندک، در رفتار و کاربرد سیکل تغییرات مهمی ایجاد می‌کند. تبدیل سیال ارگانیک به بخار اشباع جهت استفاده در توربین، در دمای بسیار پایین تری نسبت به آب رخ می دهد، بدین ترتیب بازه دمایی سیکل ارگانیک رانکین پایین تر از سیکل رانکین بخار می باشد و می توان از سیکل ارگانیک رانکین در بازیابی حرارتی استفاده نمود. منابع تامین کننده انرژی سیکل ارگانیک رانکین در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲ منابع تامین کننده انرژی برای سیکل رانکین ارگانیک

۱-۲- شناور تولید، ذخیره و فراورش (FPSO)

شناور FPSO نوعی کشتی مخصوص است (شکل ۳) که به منظور فرآوری ترکیبات هیدروکربنی، ذخیره سازی و نیز انتقال آن به تانکرهای نفت‌کش به کار می‌رود. این کشتی طوری طراحی شده که قادر است هیدروکربن تولید شده را از تجهیزات زیر آب و سکوهایی که در نزدیکی آنها کناره می‌گیرد و یا چاه‌های نفت حفاری شده در کف دریا، دریافت، پالایش و ذخیره سازد.

[1] Organic Rankine Cycle (ORC)
[2] Floating Production Storage and Offloading (FPSO)

شکل ۳ شناور FPSO (سکوی شناور تولید ذخیره و فراورش)

شناورهایFPSO به دلیل سهولت در انجام فرآیند سه گانه فوق، در صنایع فراساحلی ارجحیت دارند زیرا با استفاده از آنها دیگر نیازی به ساخت تاسیسات زیر بنایی نظیر سکو، جکت و خطوط لوله برای بهره‌برداری از میادینی که ذخیره چندانی ندارند، نخواهد بود و همین عامل سبب می‌شود تا بهره‌برداری از میادین کوچک که در فواصل بسیار دوری از خشکی قرار گرفته‌اند برای شرکت‌های نفتی مقرون به صرفه باشد. البته ابعاد این شناور به حدی بزرگ است که تمام تجهیزات فرآوری، تولید، ذخیره سازی و انتقال نفت را به راحتی در خود جای می‌دهد و هم در سطح عرشه و هم در زیر بدنه این شناورها، انواع گوناگونی از تاسیسات جا سازی شده‌اند.

۱-۳- گرمای اتلافی

یکی از منابع قابل بازیافت، انرژی گرمای اتلافی فعالیت های صنعتی است. امروزه، مقادیر قابل توجهی گرمای اتلافی، با دمای کم، زیر۴۰۰ درجه سانتیگراد، در صنعت وجود دارد که به خاطر دما و فشار کم، فرآیند بازیافت آن ها با سیکل های رانکین آب – بخار معمولی امکان پذیر نیست. از این رو باید با سیکل های جایگزین و کارایی بالا از این گرمای اتلافی برای تولید انرژی استفاده کرد. در حال حاضر با پیشرفت و توسعه فعالیت های علمی در این زمینه سیستم های بسیاری قادر به استفاده از گرمای اتلافی هستند، در این میان می توان از سیکل رانکین ارگانیک، سیستم های تبرید جذبی، پمپ حرارتی جذبی ، مبدل حرارتی جذبی، سیکل توان جذبی و... نام برد که هر کدام برای گستره ی خاصی از دما کارایی دارند. استفاده از گرمای اتلافی مزایای فراوانی دارد، اصلی ترین مزیت آن کاهش تقاضای انرژی در یک فرآیند است. افزایش بازده انرژی در این روش شامل مزیت هایی مانند کاهش مصرف انرژی اصلی ، کاهش انتشار کربن دی اکسید و سایر آلاینده ها و کاهش هزینه‌های عملیاتی می شود.

۲- مروری بر آثار پیشین

بازیابی حرارت باقیمانده از فرآیندهای دور از ساحل با چرخه آلی رانکین (ORC) به وسیلهٔ چندین محقق در سرتاسر جهان، به هدف تولید توان بدون نیاز به سوزاندن سوخت‌های فسیلی بیشتر، مورد مطالعه قرار گرفته است. موندجار و همکارانش[۳] مطالعه‌ای را بر روی یک چرخه آلی رانکین یکپارچه موجود در یک کشتی مسافربری (از نوع کروز) انجام دادند. این مطالعه بر اساس یک مدل Off-design (مدلی که هندسه و شرایط مرزی مساله را مشخص می‌کند) و در شرایط طراحی بهینه صورت گرفت. با استفاده از ORC، ۲۲درصد انرژی حاصل شد.

سوارز و همکارانش[۴] یک کاربرد عملی بازیابی حرارت تلف شدهٔ گاز خروجی از موتورهای تانکر Aframax را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، یک چرخهٔ رانکین سنتی مورد مقایسه با سیستم ORC که از بنزن، هپتان، هگزامتی دی سیلوگزان، تولوئن، و R245fa استفاده می‌کند، قرار گرفت. نتایج نشان داد نصب رکوپراتور (نوعی از مبدل حرارتی) برای جذب حرارت تلف شده، باعث صرفه‌جویی در مصرف سوخت سالانه به میزان ۱۵۴هزار یورو و کاهش در دی اکسید کربن به مقدار ۷۰۵ تن می‌شود. در مقایسه با چرخه رانکین مرسوم، زمانی که از ORC استفاده می‌شود، مصرف سوخت و انتشار دی اکسید کربن به میزان ۱۷درصد کاهش می‌یابد.

سونگ و همکارانش [۵] بازیابی حرارت تلف شده از یک موتور دیزل دریایی را مورد مطالعه قرار دادند. یک افزایش ۱۰/۲ درصدی در بازده موتور دیزل مشاهده شد، و همچنین جذابیت اقتصادی سیستم نیز به اثبات رسید.

لارسن و همکارانش [۶] 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 ۲۵ORC درصد بود، که این مقدار برای سیکل‌های Kalina و رانکین به ترتیب، برابر با ۵۱ و ۵۱/۱ درصد محاسبه شد، که نتیجتا منجر به یک افزایش احتمالی ۲/۶ درصدی در بازده کل واحد شد.

پیربن و همکارانش[۷] مطالعه‌ای را برای تعیین مناسب‌ترین تکنولوژی بازیابی حرارت در تجهیزات دور از ساحل انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که ORC، به نسبت بخار رانکین که در آن واحدهای چرخه هوا از نظر اقتصادی و محیط زیستی دارای جذابیت خاصی نیستند، عملکرد بهتری دارند. با وجود هزینه زیاد تجهیزات ORC، راه حل کاهش انتشار دی اکسید کربن از تجهیزات دور از ساحل، استفاده از توربوژنراتورهای ORC می‌باشد.

گیرگین و ازگی [۸] 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 کربن‌دی‌اکسید، 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 [۹] 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 تقریبا دو برابر قدرت تولید شده به وسیله‌ی ORC ساده و با قابلیت بازتولید است.

ایمران و همکارانش[۱۰]، یک مطالعه در مورد بهینه‌سازی حرارتی اقتصادی یک ORC ساده و با قابلیت بازتولید برای بازیابی حرارت تلفشده از یک منبع حرارتی ثابت انجام دادند. بازده حرارتی و هزینه سرمایه‌گذاری ویژه، برای سیالات مختلف مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که R245fa بهترین سیال مورد استفاده بوده و ORC ساده کم‌ترین هزینه ویژه را نمایش می‌دهد.

سونگ و گو[۱۱] یک ORC دو مسیره (دو حلقه‌ای) برای بازیابی حرارت تلفشده 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 در حالی 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 اضافه‌ی تولید شده به ۱۱/۲ درصد از توان اصلی خروجی از موتور ربط دارد.

چائو و همکارانش [۱۲] استفاده از ORC به عنوان چرخه پایین دستی، برای بازیابی گازهای خروجی از توربین گازی را پیشنهاد دادند. سیالات آروماتیکی برای استفاده در ORC انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد که بازده حرارتی و توان خالص با فشار ورودی توربین ORC افزایش می‌یابد. علاوه براین، تولوئن برای توربین گازی ترکیب شده با ORC، سیال بهتری به نظر می‌آید.

اسرینیواسان و ماگو [۱۳] بررسی ترکیب یک موتور احتراق داخلی و سیکل رانکین ارگانیک جهت کاهش آلایندگی ها و افزایش بازده سیکل پرداختند. در مطالعه انجام شده شاخصه‌های ترمودینامیکی و اگزرژتیکی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت به افزایش ۷ درصدی بازدهی راندمان سیکل و کاهش ۱۸ درصدی آلاینده ها در سیکل ترکیبی دست یافتند.

نیشیت و سانتاتو [۱۴] 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 فرآیندها بیان نمودند.

موهانتی و پالوسو[۱۵] معیار طراحی بهینه مقرون به صرفه برای چرخه های قدرت رانکین با استفاده از منابع حرارتی زمین گرمایی دما پایین ارائه کردند. نسبت مساحت مبدل حرارتی به توان خالص خروجی به عنوان تابع هدف استفاده شده و توسط روش نزولی بهینه سازی شد. عملکرد چرخه در مقایسه با سیالات کاریPf505 پنتان و HCFC123موردبررسی قرار گرفت. روش بهینه سازی به یک روش یکتا برای مقادیر ویژه دماهای کندانس و تبخیر و سرعت های آب خنک کننده و دمای زمین منتهی شد. انتخاب سیال کاری میتواند تا حد زیادی بر روی تابع هدف که معیار اندازه گیری هزینه نیروگاهاست تاثیر بگذارد و در برخی موارد تفاوت می تواند بیش از دو برابرباشد. آمونیاک حداکثر بهره برداری آبهای زمین گرمایی را دارد اما لزوما ماکزیمم کارایی چرخه را ندارد. تجزیه تحلیل اگزژری نشان میدهد که کارایی سیکل آمونیاک تا حد زیادی در فرآیند بهینه سازی 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 زمین گرمایی دما پایین محدود می کند.

گانگولی جینگ[۱۶] به تجزیه تحلیل تولید الکتریسیته حرارتی خورشیدی دما پایین با استفاده از چرخه احیا کننده آلی رانکین پرداخته اند. پیکر بندی تولید الکتریسیته حرارتی خورشیدی دما پایین با استفاده از چرخه احیا کننده آلی رانکین صورت گرفت. سیکل رانکین ارگانیک و احیا کننده طراحی شده در پژوهش آنها به طور عمده متشکل از نسبت ترکیب کوچکی از کاهش انتقال حرارت برگشت ناپذیر و استفاده از مخازن حرارتی با مواد تغییردهنده از مزایای این پیکر بندی خلاقانه می باشد. شبیه سازی عددی انتقال حرارت و فرایندهای تبدیل قدرت (نیرو) بر اساس پارامترهای توزیع انجام شده است و به طور کلی کارایی الکتریسیته تولیدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت است. سپس تاثیرات سیکل احیا بر روی کالکتور بررسی شده نتایج نشان داد سیکل احیا دارای اثرات مثبت بر روی کارایی سیکل ترکیبی دارد. همچنین تحقیقات نشان میدهد که کارایی حداکثر هم برای توان الکتریکی در شرایط تابش ثابت، و هم دمای تبخیر و دمای محیط ثابت زمانی به وجود می آید که دمای احیا کننده در بین دمای ۲۰-۱۲ درجه سانتی گراد باشد. در ضمن کارایی الکتریسیته سیکل رانگین ارگانیک و احیا کننده در حدود ۸/۶ درصداست. این مقدار در سیکل رانکین ارگانیک بدون احیاء ۴/۹ درصد می‌باشد. در رنج دمایی (از دمای کندانس به دمای تبخیر) یک دمای احیا کننده مطلوب وجود دارد که سیکل رانگین ارگانیک به حداکثر مقدار خود می رسد. بیشترین مقدار بازدهی۹/۲ درصدبه دست آمده است. همچنین یک دمای بهینه وجود دارد که در آن کارایی الکتریسیته سیستم به مقدار ماکزیمم خود میرسد (۱۲ تا ۲۱ درجه سانتی گراد).

ORC مشابه چرخه رانکین مرسوم بوده، به جز آنکه سیال عامل در آن آب نیست. در ORC، از یک ترکیب آلی با جرم ویژه‌ی زیاد استفاده می‌شود. یک اشکال استفاده از چرخه رانکین، نیاز به تولید بخار فوق‌گرم (سوپرهیت) برای به حداقل رساندن بخار مرطوب، و کاهش خوردگی در پره‌های مراحل پایانی توربین می‌باشد. در ORCها، برای بسیاری از مواد نیاز به فوق‌گرمادهی نبوده، که با توجه به کار گاناپاتی [۱۷]، این امر منجر به چرخه کارآمدتر (پر بازده‌تر) می‌شود.

بر اساس کار چن و همکارانش [۱۸]، 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 [۱۹]، سیالات آلی باید علاوه بر ملزومات مربوط به ظرفیت انتقال انرژی، ملزومات دیگری، مثل پارامترهای مربوط به اثر بر محیط‌زیست، که از جمله‌ی 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[۲۰]، 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[۲۱]، 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 سانتی‌گراد، باشد، نرمال-دودکان و تولوئن، سیالات مطلوبی هستند. در تحقیق آنها، گازهای خروجی از توربین گازی، دارای دمای بیش از ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد هستند؛ بنابراین، در آنالیزها، تولوئن سیال عامل مورد استفاده خواهد بود.

در تحقیق دیگری که توسط بنیدیکت [۲۲] و همکارانش انجام گرفت سه مایع آلی مختلف به عنوان سیال عامل در یک سیکل رانکین آلی مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد متانول، تولوئن و Solkatherm SES36 در ORC طراحی شده توسط یک موتور فاضلاب دیزل مدلسازی شد. مدل ORC شامل بویلر، اواپراتور، سوپرهیتر، توربین، پمپ و دو مخزن است. با دمای متغیر حداکثر سیکل و فشار چرخه بالا، راندمان حرارتی، خروجی قدرت خالص و مساحت سطح انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفت. در میان این سیال ها، متانول به عنوان بهترین عملکرد حرارتی شناخته شد، اما همچنین به بزرگترین مساحت سطح انتقال حرارت نیاز داشت. در حالیکه تولوئن راندمان حرارتی پایین تر را به دست آورد، بهترین مصالحه بین اندازه مساحت سطح مبدل حرارتی و عملکرد ترمودینامیکی برای متانول ORC در دمای متوسط و فشار بالا به دست آمد. با این وجود، اشتعال پذیری و سمیت، مانع اجرای

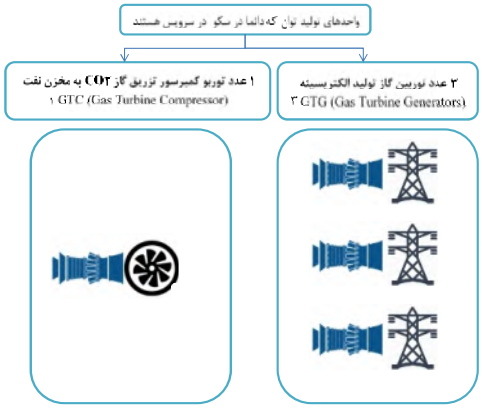
ایمن این سیالات در سیستم هایORC می شوند. شاکر و همکاران[۲۳] بازیافت حرارت تلف شده در یک ایستگاه تقویت فشار گاز با استفاده از چرخه، مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله هدف بررسی و مدلسازی یک سکوی FPSO و بازیابی انرژی حرارتی آن توسط سیکل ORC است. به همین دلیل چندین سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و آنالیزهای انرژی و صرفه اقتصادی هرکدام مورد بررسی انجام شده است.

۳- بررسی به‌کارگیری ORC در یک نمونه سکوی واقعی

در این مقاله یک نمونه سکوی واقعی در نظر گرفته شده و سناریوهای مختلف بکارگیری ORC در آن مورد بررسی قرار گرفته است. واحدهای تولید قدرت (توربین های گاز) که در حالتِ نرمال در سکوی FPSO همیشه در سرویس هستند ۴ عدد می‌باشند که شامل موارد زیر است. (شکل ۴)

- ۳ عدد توربین گاز که توان الکتریکی مورد نیاز سکو را تامین می‌کنند (شکل ۳)
- ۱ عدد توربوکمپرسور که گاز کربنیک را به داخل مخازن تزریق می‌کنند. (شکل ۳)

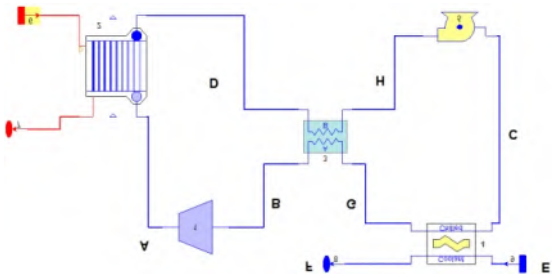


شکل ۴ واحدهای توربین گاز که در حالت طراحیِ پایه مدام در سرویس هستند (۳ عدد GTG و ۱ عدد GTC)

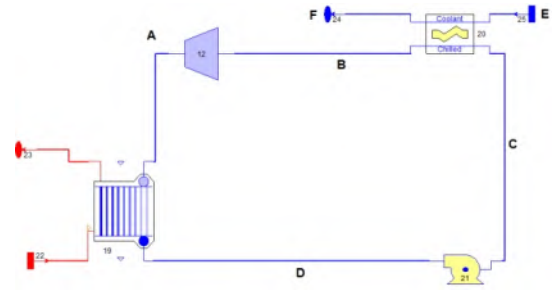
در مجموع در حالت پایه همواره نیاز است ۴ عدد توربین درسرویس باشد تا بطور پیوسته نیازهای الکتریکی و حرارتی سکوی FPSO و همچنین فرآیند تزریق گاز کربنیک به مخزن انجام گیرد. مقادیر زیادی از انرژی گرمایی همواره از طریق این ۴ اگزاست اتلاف می‌گردد که نیاز است جهت افزایش بهره وری و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. لازم بذکر است با بازیابی حرارت از اگزاست و بکارگیری سیکل های ORC با مبدل بازیاب امکان از سرویس خارج کردن یکی از توربین‌های تولید توان الکتریکی (GTG) وجود دارد.

۳-۱- انواع پیکره بندی‌های مورداستفاده در این مقاله

در این مقاله از دو پیکره‌بندی متفاوت (چرخه ساده و با قابلیت بازتولید)، استفاده شده است (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵ چرخه ORC دارای بازیاب حرارتی



شکل ۶ چرخه ORC ساده بدون بازیاب

شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب پیکربندی مربوط به چرخه ORC با بازیاب حرارت و بدون بازیاب حرارت (ساده) را نشان میدهدکه در آن‌ها حروف بیانگر خصوصیات ورودی و خروجی تجهیزات ORC است. در پیکره‌بندی ساده، سیال عامل به وسیله‌ی پمپ فشاردهی شده و حرارت را از طریق بویلر، از منبع حرارتی جذب می‌کند. سیال از بویلر به شکل بخار اشباع یا سیال مافوق‌گرم خارج شده و برای انبساط به توربین وارد می‌شود. سپس، سیال به وسیله‌ی آب، در یک کندانسور، تا دمای مایع اشباع سرد می‌شود. در پیکره-بندی بازیاب حرارتی، سیال از یک بازیاب حرارتی (گرمکن) عبور کرده که در آن‌جا پیش از ورود به بویلر، پیش‌گرمایش می‌شود. به طور خلاصه سناریوهای مختلف مطابق فرمت زیر تعریف می‌گردد:

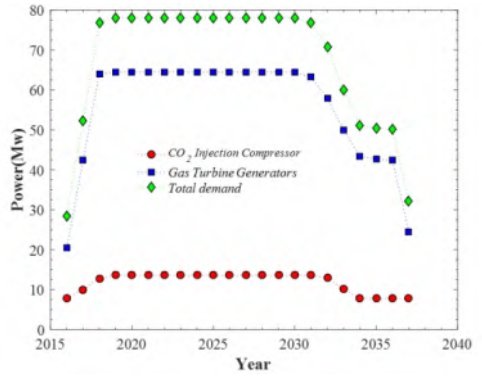
- اندیسA : با بازیاب حرارت
- اندیسB : بدون بازیاب حرارت (ساده)
- اندیس ۱ : اگزاست توربوکمپرسور به اتمسفر تخلیه می‌گردد و ۳ GTG در سرویس است.
- اندیس ۲: از حرارت اگزاست توربو کمپرسور استفاده میشود و۲ GTG در سرویس است.

لازم به ذکر است تمامی سناریوهای مورد بررسی در این مقاله، قادر به تامین کل تقاضای توان الکتریکی و نیاز حرارتی سکو هستند.

۳-۲- توان مورد نیاز شناور FPSO

از آنجایی که بازه تولید نفت و گاز در طول زمان تغییر می‌کند، میزان مصرف الکتریسیته نیز متغیر خواهد بود. بنابراین، سیستم تولید، باید طوری طراحی شود که تمامی مراحل تولید را ارضاء کند. همانطور که مشاهده می‌کنید شکل ۷ میزان توان مورد نیاز FPSO که توسط توربین‌های اصلی سیستم (GTG ها) و توربین محرک سیستم تراکم کربن دی‌اکسید (GTC) تامین می‌شود را نشان میدهد در واقع این نمودار میزان توان مورد نیاز شناور را در طول دور عمر مفید آن نشان می‌دهد.

انرژی تولیدی توربین‌های گازی در پلتفرم FPSO باید دقیقا برابر با انرژی مورد نیاز پلتفرم باشد؛ بدین طریق، برای پیاده‌سازی سیستم های بازیاب حرارت، بایست بین میزان عرضه و تقاضای توان الکتریکی یک هماهنگی و توزان وجود داشته باشد و فرآیند تولید نفت متوقف نگردد. بر اساس محدودیت‌های موجود، ORC با خروجی توربین‌های گازی کوپل شده، تا انرژی تلف‌شده را بازیابی کرده، که بدین طریق در تولید توان و کاهش مصرف سوخت در توربین‌های گازی مشارکت می‌کند. همچنین تامین حرارت فرآیندهایِ تولیدیِ FPSO، به کمک بازیابی حرارت تلف‌شده نیز در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷ میزان توان مورد نیاز شناور FPSO در طول دوره عمر مفید آن

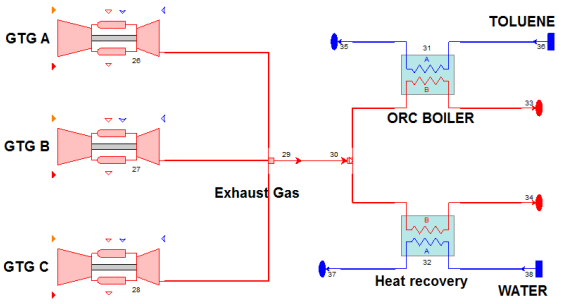
۴- تعریف سناریوهای مختلف یک نمونه سکوی واقعی

۴-۱- بررسی حالت پایه – توربوژنراتورهایی که نیاز به الکتریسته و آب گرم را تامین می‌کنند

در حالت پایه، توان مورد نیاز FPSO، توسط توربوژنراتورها تامین شده و از گازهای خروجی از آن برای تامین حرارت مورد نیاز در فرآیندهای فرآوری استفاده می‌شود. در یک واحد FPSO واقعی، سه توربین عملیاتی برای سال-های سوم، دوازدهم و پانزدهم و یک توربین در حالت آماده‌باش وجود دارد. برای سال‌های هجدهم و بیست و یکم، تعداد توربین‌های عملیاتی در حالت موازی، به دلیل تقاضای انرژی کم، به دو توربین کاهش می‌یابد (چنانکه در شکل ۶ نشان داده شده است).

۴-۲- پیشنهاد اول- استفاده از گازهای خروجی از توربین‌های گازی GTG

در این حالت، پیشنهاد مطرح شده آن است که سیستم FPSO واقعی (حالت پایه) را حفظ کرده و از یک ORC نیز برای بازیابی حرارت تلف‌شده استفاده شود. مدل‌سازی به مقصود بازیابی گازهای خروجی برای ارضاء تقاضای حرارت، با استفاده از آب گرم، و تولید توان با استفاده از ORC، پیاده‌سازی می‌شود. ترکیب شکل ۵ با ۸ سناریو ۱ را نتیجه میدهد و ترکیب شکل ۶ با شکل ۸ سناریو ۱ را نتیجه می‌دهد.



شکل ۸ پیشنهاد اول (سناریو ۱ و ۱) طرح شماتیک ORC ترکیب شده با GT های اصلی

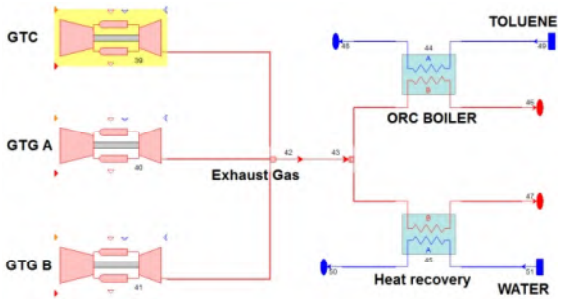
داده‌های عملیاتی اسمی توربین های مورد استفاده در بخش تولید توان الکتریکی (GTG ها) در جدول ۱ آورده شده است. (توربین‌های گازی سیستم تولید توان الکتریکی که در پلتفرم استفاده شده‌اند).

جدول ۱ خصوصیات توربین گازی مورد استفاده در بخش تولید توان الکتریکی (GTG)

Nominal ISO speci ication	GTG A-B-C	Units
Nominal power	۳۰۳۴۰	[Kw]
Nominal ef iciency	۳۹.۹	[%].
Pressure ratio	۲۱.۵	[ ]
Exhaust temperature	۵۱۰	[°C]
Nominal air low	۸۳	[kg/s]
Rotation	۶۱۰۰	[rpm]

۴-۳- پیشنهاد دوم استفاده از گازهای خروجی از توربین گازی GTGو GTC

در این حالت، پیشنهاد می‌شود که از دو توربین GTGبرای تولید الکتریسیته در تمامی فازهای تولید FPSOو همچنین از گازهای داغ خروجی توربین GTC (توربوکمپرسور تزریق گاز کربنیک CO_2) استفاده شود. در پیشنهاد اول (شکل ۸)) گرمای اگزاست GTC بازیابی نمی‌شد و به محیط اتمسفر تخلیه می‌گردید. در پیشنهاد دوم از گرمای اگزاست GTC استفاده می‌شود و یک توربین GTG نیز از سرویس خارج می‌گردد.



شکل ۹ پیشنهاد دوم (سناریو ۲ و ۲) طرح شماتیک ORC ترکیب شده با GTC و GTG

از ترکیب شکل ۹ با شکل ۵سناریو ۲ و از ترکیب شکل ۹ با شکل ۶ سناریو ۲ حاصل می‌شود. مشخصات کامل این دو سناریو در قالب پیشنهاد دوم در جدول زیر ارائه می‌گردد.

لازم به ذکر است واحد تراکم کربن دی‌اکسید یک واحد فرآیندی موجود در پلتفرم (سکو) بوده که مورد مطالعه قرار گرفته شده و تکنولوژی‌ای است که با تزریق کربن دی‌اکسید منجر به افزایش سطح نفت استخراجی از چاه-های فعلی می‌شود (تکنولوژی CCS-EOR) .

مشخصات فرآیندی توربین GTC با مشخصات توربین هایGTG A-B-C متفاوت بوده و در ۲۰ مشخصات GTC (توربین کوپل شده به کمپرسور تزریق گاز CO_2) آورده شده است. همانطور که در ۰جدول ۲ مشاهده می‌کنید توربین GTC از نظر مقدارِ توان تولیدی، دبی و دمای اگزاست محصولات خروجی مقدار پایین تری نسبت به توربین های GTG A-B-C (جدول ۱) دارد.

جدول ۲ خصوصیات توربین گازی مورد استفاده در بخش تزریق CO2 (GTC)

Nominal ISO speci ication	GTG A-B-C	Units
Nominal power	۱۷۵۵۸	[Kw]
Nominal ef iciency	۳۵.۵	[%].
Pressure ratio	۱۵.۶	[ ]
Exhaust temperature	۴۷۴	[°C]
Nominal air low	۶۲	[kg/s]
Rotation	۲۳۰۰	[rpm]

۵- نتایج و جمع بندی

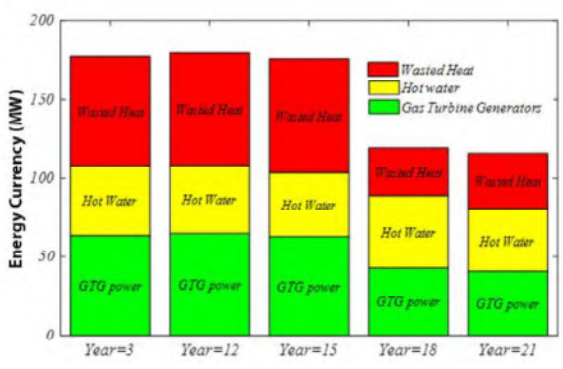
پلتفرم‌های FPSO به طور فزاینده‌ای برای اکتشاف نفت در آب‌های عمیق و دور از ساحل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تحقق بهبود و پیشرفت در فرآیند تولید و هم‌چنین تولید الکتریسیته در فازهای تولیدی آن، ضروری است که بر تکنولوژی‌های کارآمد که هزینه‌ها و انتشار کربن دی‌اکسید به اتمسفر را کاهش می‌دهند، سرمایه‌گذاری شود.

از این دیدگاه، ORC دارای پتانسیل بالایی در بازیابی انرژی از منابع حرارتی دارای خصوصیات مختلف موجود در پلتفرم FPSO، می‌باشد. این موضوع یک مزیت اضافی در فرآیند تولید بوده، و هم‌چنین در استفاده از انرژی سوختن سوخت‌های فسیلی برای تامین انرژی الکتریسیته و آب گرم از پلتفرم، یک پیشرفت محسوب می‌شود. از نقطه نظر مدل ترمودینامیکی، ثابت شده است که روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک، کارآمد است.

در این مقاله، علاوه بر حالت پایه چهار سناریوی مختلف جهت استفاده از گرمای خروجی اگزاست توربین هایی که در سرویس هستند مورد بررسی قرار گرفته شد. ابتدا یک تحلیل از سکوی FPSO درحالت پایه (حالت طراحی اصلی) انجام گرفت، که از آن برای مقایسه با دیگر سناریوهای پیشنهادی استفاده شد. پیشنهاد اول آن است که حالت پایه (base case) را حفظ کرده و در بیشتر زمان‌های عملیاتی، سیکل آلی رانکین برای بازیابی حرارتی گازهای خروجی از سیستم تولید اصلی، که متشکل از سه توربین گازی GTG است، در داخل سیستم قرار گیرد(سناریو ۱ و سناریو ۱)

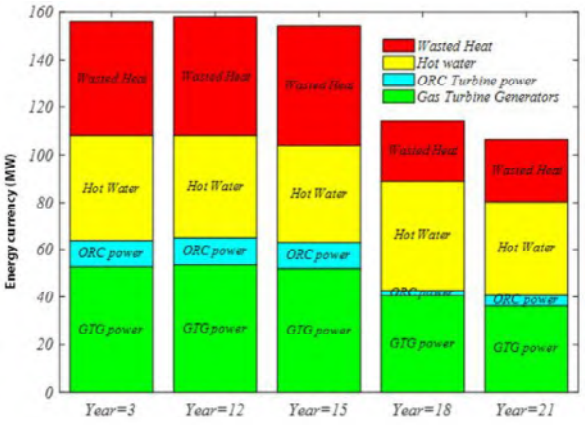
پیشنهاد دوم آن است که تنها از دو توربین گازیGTG در سیستم تولید اصلی در تمام زمان‌های عملیاتی استفاده کرده و برای بازیابی حرارت تلف شده علاوه بر دو توربین GTG از گازهای خروجی توربو کمپرسور GTC نیز استفاده کرد. (سناریو ۲ و ۲)

به منظور بررسی اثرات پیشنهادات انجام شده در زمینه بهره‌وری از سیستم، ابتدا حالت مبنای FPSO از نظر تولید برق و مصرف انرژی و اتلاف آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ بیلان انرژی فرآیند – حالت مبنا –FPSO پس از طراحی

شکل ۱۱ بیلان انرژی را برای فرآیند بهینه‌سازی در هر بازه تولیدی نشان می‌دهد. انرژی ورودی به توربین ها (ورودی سوخت) به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. بخش مفید آن از طریق توربین‌های گازی به توان الکتریکی تبدیل شده (انرژی توربوژنراتورGTG) 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 نهایتا مقداری از آن بصورت حرارت اتلافی به اتمسفر تخلیه می شود.

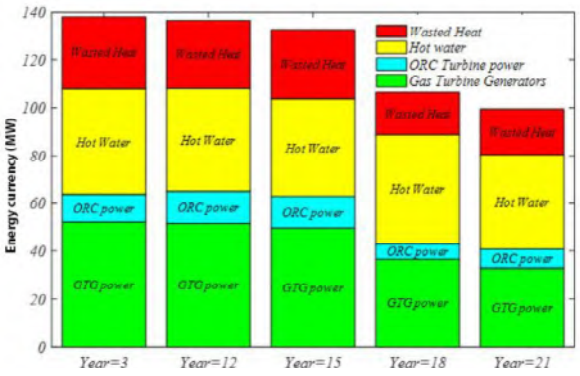


شکل ۱۱ بیلان انرژی فرآیند (ORC دارای بازیابی‌کننده‌ی حرارت (سناریوی اول)

با مقایسه‌ی شکل ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد به نسبت حالت پایه، به دلیل نصب ORC، یک کاهش چشم‌گیر در ورودی سوخت و حرارت اتلافی مشاهده می‌شود. علاوه بر این، تقاضای انرژی تامینی توسط توربین‌های گازی کاهش یافته و توسط ORC به انجام می‌رسد.

شکل ۱۲ بیلان انرژی را برای سناریوی دوم نشان می‌دهد. مقایسه بین بیلان انرژی موجود در شکل ۱۰ و ۱۲ نشان می‌دهد که در این حالت، برای حصول اثرات مشابه، به نسبت حالت مبنا، سیستم نیاز به سوخت ورودی کم‌تری دارد. این موضوع منجر به سوختن سوخت (گاز طبیعی) بسیار کم‌تری شده، که متعاقبا منجر به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید و هزینه‌های عملیاتی می‌شود. علاوه بر این، یک توربوژنراتور کنار گذاشته شده، و بخش عظیمی از تقاضای انرژی، توسط ORC تامین می‌شود (انرژی ORC)، که این موضوع منتج به تنها یک جریان کوچک از انرژی اتلافی می‌شود.

مقایسه بین ۰شکل‌های ۱۱ و ۱۲ روند مشابهی را در مقایسه با حالت اول نشان می‌دهد، که برتری حالت دوم به حالت اول را تایید می‌کند.



شکل ۱۲ بیلان انرژی برای فرآیند (ORC دارای بازیابی‌کننده‌ی حرارت) (سناریوی دوم)

بنابراین پیشنهاد دوم در بین دو حالت مورد بررسی، دارای مزیت و جذابیت بیشتری است. در این حالت پیشنهاد شد که در تمامی بازه‌های تولیدی، تولید توان باید با دو توربین انجام گرفته و از گازهای خروجی آن و گازهای خروجی از توربین تراکم CO_2 باید به عنوان یک منبع حرارتی در ORC استفاده شود.

همچنین بازده کل سیستم، به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد، زیرا توربین گازی، نزدیک به نقطه اسمی عمل کرده، که در این حالت بازده حرارتی آن‌ها افزایش می‌یابد. نتایج، اختلاف زیادی را بین ORC دارای بازیابی‌کننده‌ی حرارت و ORC ساده نشان نمی‌دهد .

کاهش در انتشار کربن دی‌اکسید به دلیل این واقعیت است که GTها، در نزدیکی بار اسمی خود عمل کرده که در آن حالت، بازده حرارتی در حداکثر مقدار خود است، بطوریکه سوخت به شکل بهتری توسط توربین گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بدین طریق منتج به مصرف سوخت پایین می‌شود. در تمامی بازه‌های مورد تحلیل، سهم ORC در تولید انرژی، با توجه به حالت اول، افزایش می‌یابد.

این مطالعه، نتایج امیدبخشی را در استفاده از ORC برای بازیابی حرارت نشان داده که یک متوسط ۲۲/۵ درصدی در کاهش مصرف سوخت و انتشار کربن دی‌اکسید در طول عمر FPSO را ارائه می‌کند.

تحلیل اقتصادی اجازه می‌دهد که با درایت بیشتری ارزش بکارگیری و اصلاح پروژه فعلی بررسی گردد. ارزش خالص فعلی معادل با ۱۲/۶ میلیون دلار، تنها با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و انتشار کربن دی‌اکسید، در طول عمر FPSO حاصل می‌شود. علاوه بر این، به دلیل عدم استفاده از یک توربین گازی در پروژه، یک کاهش در سرمایه‌گذاری اولیه به میزان ۱۴/۲میلیون دلار اتفاق می‌افتد، که این موضوع به دیدگاه ارزش اقتصادی سیستم پیشنهادی اعتبار می‌بخشد.

۵- مراجع

[۱] م. چهارطاقی و م. بابایی، تحلیل انرژی و اگزرژی سیکل ارگانیک رانکین با به کارگیری سیالکاری دو جزیی در شرایط مشخص منبع حرارتی، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*،خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴،شماره ۳

[۲] ه. غائبی، ر. خیری، مدلسازی ترمودینامیکی و ارزیابی عملکرد سیکل جدید و اصلاح شده رانکین آلی با استفاده همزمان از اجکتور بخار و ریژنراتور، *نشریه مباحث برگزیده در انرژی*، ، سال دوم، شماره دوم ،زمستان۱۳۹۵

[3] Mondejar ME, Ahlgren F, Thern M, Genrup M. Quasi-steady state simulation of an organic Rankine cycle for waste heat recovery in a passenger vessel. *Appl Energy*;185, pp. 1324–35, 2017.

[4] Suarez de la Fuente S, Roberge D, Greig AR. Safety and CO2 emissions: implications of using organic fluids in a ship's waste heat recovery system. *Mar Policy*;75, pp. 191–203, 2017.

[5] Song J, Song Y, Gu C. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. *Energy*;82, pp. 976–85,2015.

[6] Larsen U, Sigthorsson O, Haglind F. A comparison of advanced heat recovery power cycles in a combined cycle for large ships. Energy,74, pp. 260–8, 2014.

[7] Pierobon L, Benato A, Scolari E, Haglind F, Stoppato A. Waste heat recovery tech- nologies for o ff shore platforms. *Appl Energy*;136, pp. 228–41, 2014

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

[9] 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,* 92, pp. 523–34, 2015.

[10] Imran M, Park BS, Kim HJ, Lee DH, Usman M, Heo M. Thermo-economic optimization of Regenerative organic Rankine cycle for waste heat recovery applications. *Energy Convers Manage*;87, pp. 107–18, 2014.

[11] Song J, Gu C. Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery. *Energy Convers Manage*;105, pp. 995–1005, 2015.

[12] Cao Y, Gao Y, Zheng Y, Dai Y. Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators. *Energy Convers Manage*;116, pp. 32–41, 2016.

[13] Srinivasan, K.K., Mago, P.J. and Krishnan, S.R.,. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle.Energy, 35(6), pp.2387-2399, 2010.

[14] Desai, N.B. and Bandyopadhyay, S., 2009. Process integration of organic Rankine cycle.Energy, 34(10), pp.1674-1686.

[15] Mohanty, B. and Paloso Jr, G.,. 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, 1992.

[16] Pei, G., Li, J. and Ji, J., 2010. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), pp. 998-1004.

[17] Ganapathy V. *Industrial boilers and heat recovery steam generators: design, ap- plications, and calculations*. 1st ed. New York: CRC Press; 2002

[18] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fl uids for the conversion of low-grade heat. Renew Sustain Energy Rev 2010;14, pp. 3059–67.

[19] 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].

[20] Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical, eco- nomical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low- grade heat for power generation. *Renew Sustain Energy Rev*;16 ,pp. 4175–89, 2012.

[21] Siddiqi MA, Atakan B. Alkanes as fl uids in Rankine cycles in comparison to water, benzene and toluene. *Energy*;45, pp. 256–63, 2012

[22] Kölsch, B. and Radulovic, J., 2015. Utilisation of diesel engine waste heat by Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 78, pp.437-448.

[۲۳] و.شاکر، م. جعفری نصر، م.مقدم، کاربرد چرخه آلی رانکین در بازیافت و بهینه سازی انرژی در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، پژوهش *نفت*، شماره ۱-۸۵ زمستان ۹۵