



مدل‌سازی ترمودینامیکی سیکل جدید و اصلاح شده رانکین آلی با استفاده همزمان از اجکتور بخار و ریژنراتور

رضا خیری¹، هادی غائبی^{2*}

1- فارغ‌التحصیل کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

* اردبیل، صندوق پستی 179، hgahabi@uma.ac.ir

چکیده

در این تحقیق برای افزایش راندمان و توان تولیدی سیکل ساده ارگانیک رانکین (ORC)، یک آرایش جدید از سیکل ساده ارگانیک رانکین با استفاده همزمان از اجکتور و ریژنراتور ارائه شده است. در سیکل جدید، یک ریژنراتور، اواپراتور دو مرحله‌ای به همراه اجکتور بخار به سیکل ساده ارگانیک رانکین اضافه شده است. بخار از اواپراتور مرحله دوم به عنوان سیال اولیه وارد اجکتور بخار شده و پس از کاهش فشار در آن باعث افزایش مکش سیال ثانویه، یعنی سیال خروجی از توربین می‌شود که به نوبه خود به افزایش توان تولیدی می‌انجامد و همچنین بخار خروجی از توربین قبل از وارد شدن به اجکتور بخار وارد ریژنراتور می‌شود که با این کار بخشی از انرژی مورد نیاز اواپراتور مرحله اول تأمین می‌گردد. برای مدل‌سازی ترمودینامیکی کدی در نرم‌افزار محاسباتی ای ای اس (EES) توسعه داده شده است. به علاوه از سیال‌های عامل مختلفی (سیز2 بوتن، آر600، آر245افای و آر236افای) برای ارزیابی عملکرد سیکل ارگانیک رانکین و همچنین سیکل جدید پیشنهادی استفاده شده است. نتایج گویاست که بازده سیکل جدید ارائه شده در بهترین حالت (بسته به نوع سیال عامل) 17.5% نسبت به سیکل ساده ارگانیک رانکین افزایش یافته است.

کلیدواژگان: سیکل ارگانیک رانکین، ریژنراتور، اجکتور، تحلیل ترمودینامیکی

Thermodynamic modeling of a novel and modified Organic Rankine Cycle (ORC) augmented with ejector and regenerator

Reza Kheiri, Hadi Ghaebi*

Department of Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

* P.O.B. 179, Ardabil, Iran, hgahabi@uma.ac.ir

ABSTRACT

In this research study, a novel ORC cycle is proposed to improve the efficiency and power generation of the basic ORC cycle. In this proposed new cycle, an ejector, a second stage evaporator and a regenerator are integrated in the basic ORC cycle. Steam from the second stage evaporator enters to the ejector as the primary fluid, after decrease in mixture pressure, it tends to increase the suction of the secondary fluid from the turbine outlet (steam from the turbine). Also steam enters to the regenerator, before the ejector, and by this way supplies a part of required energy for the first stage evaporator and increases the efficiency as well. For thermodynamic modeling a code was developed in the Engineering Equation Solver (EES) software. In addition, different working fluids (R600, R245fa, R236fa, Cis-2-Butene) were examined to evaluate the thermodynamic performance of the basic ORC cycle and new proposed cycle. The results show efficiency increase of the new cycle compared with that of the basic ORC cycle, the value of which depends on the working fluid, as the maximum efficiency increase of 17.5% is noticed.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), ejector, regenerator, thermodynamic performance

1- مقدمه

پایین³ می‌باشد. اسکاستر و همکاران [4] تاثیر پارامترهای سیکل ارگانیک رانکین بر روی پارامترهای گرمایی در طراحی مبدل‌های حرارتی را بررسی کردند. سان و همکاران [5] با استفاده از الگوریتم روژن سیکل ارگانیک رانکین را بهینه‌سازی کردند. گو و همکاران [6] به این نتیجه رسیدند که مزیت مهم سیکل‌های ارگانیک رانکین، قابلیت اطمینان بالا و انعطاف پذیری آن‌ها در هنگام ساخت می‌باشد. ورک و همکاران [7] سیکل ارگانیک رانکین را برای استفاده از انرژی زمین گرمایی بهینه‌سازی کردند. بهاء و همکاران [8] تاثیر سیال‌های مختلف را بر روی سیکل ارگانیک رانکین بررسی کردند. روی و همکاران [9] سیکل ارگانیک رانکین را برای استفاده از دود خروجی صنایع در دما و فشار خاص بهینه نمودند. امادا و همکاران [10] بازده گرمایی سیکل

صنعتی‌سازی منجر به گرم شدن کره زمین و آسیب به محیط زیست می‌شود. به منظور تأمین نیاز به انرژی در آینده و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توسعه سیستم‌های انرژی نوین غیرقابل اجتناب می‌باشند. بومبارا و همکاران [1] با مقایسه سیکل‌های کالینا¹ و ارگانیک رانکین² در عملکرد ترمودینامیکی یکسان، نشان دادند که سیکل کالینا به فشار بیشتری نیاز دارد. سانچز [2] و مونچ [3] به این نتیجه رسیدند که در میان بسیاری از فناوری‌ها، سیکل ارگانیک رانکین یک راه حل مناسب برای استفاده از منابع حرارتی دما

¹ Kalina
² ORC

³ LGHS

Please cite this article using:

R.Kheiri, H.Ghaebi, Thermodynamic modeling of a novel and modified Organic Rankine Cycle (ORC) augmented with ejector and regenerator, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations, Vol. 16, No. 13, pp. 23-27, 2016 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

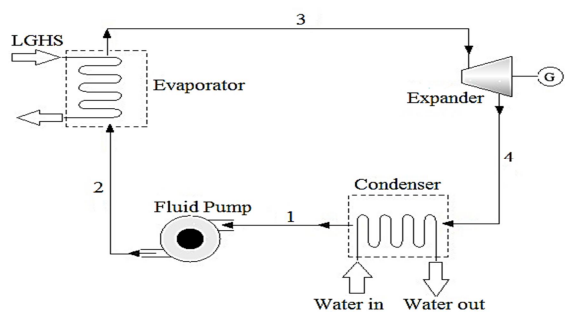


Fig. 1-A. Schematic diagram of simple ORC cycle[16]

شکل 1-الف شماتیک سیکل ساده ارگانیک رانکین[16]

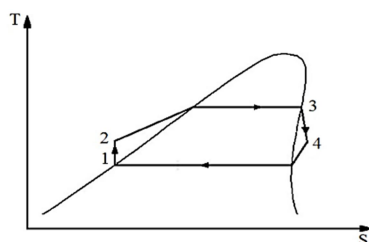


Fig. 1-B. T-S diagram of simple ORC cycle[16]

شکل 1-ب دیاگرام تی-اس سیکل ساده ارگانیک رانکین [16]

اوپراتور مرحله دوم به عنوان سیال اولیه برای ایجکتور می باشد. ایجکتور با مکش بخار خروجی از توربین (سیال ثانویه) باعث کاهش فشار خروجی توربین و افزایش کار توربین می شود. همچنین بخار خروجی از توربین وارد مبدل شده که این مبدل با سیال و انرژی خارج از سیکل کار نمی کند، بلکه این مبدل با دادن گرمای بخار خروجی از توربین به مایع متراکم خروجی از پمپ I باعث کاهش گرمای مورد نیاز اوپراتور شده و از این طریق به افزایش راندمان سیکل منجر می شود.

این سیکل نیز از دو چرخه تشکیل شده است:

چرخه اول (5-8-9-1-2-3-4-5): در این چرخه بخشی از مایع متراکم توسط پمپ از کندانسور به مبدل حرارتی فرستاده می شود (5-8). در آنجا با جذب حرارت به اوپراتور مرحله اول وارد شده و با تبدیل به بخار اشباع (1-9) به توربین فرستاده می شود (1-2). بخار پس از توربین به ریژنراتور وارد شده و گرمای خود را از دست می دهد (2-3). سپس به عنوان سیال ثانویه وارد ایجکتور می شود.

چرخه دوم (5-6-7-3-4-5): در این چرخه بخش دیگری از مایع خروجی از کندانسور توسط پمپ II به اوپراتور مرحله دوم فرستاده شده (5-6) و در اوپراتور به بخار اشباع تبدیل می گردد (6-7). این بخار به عنوان سیال اولیه وارد ایجکتور می شود.

پس از مخلوط شدن بخارهای حالت های 3 و 7 در ایجکتور، مخلوط حاصل به کندانسور فرستاده شده و در آنجا به مایع متراکم تبدیل می گردد (4-5) و به وسیله پمپ ها عمل مکش آغاز می شود.

3- مدل سازی ترمودینامیکی

برای مدل سازی ترمودینامیکی سیکل رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور، کد شبیه سازی در نرم افزار ای ای اس¹⁰ تهیه شده است. فرضیات مدل سازی به صورت زیر هستند:

ارگانیک رانکین را در هنگام استفاده از سیال اچ اف او-123 وای اف¹ بررسی کردند. گنگ پی و همکاران [11] اجزا و سیستم های سیکل ارگانیک رانکین را در مقیاس آزمایشگاهی بهینه نمودند. لی و همکاران [12] با به کار بردن سیال های عامل مختلف، نشان دادند که توان خروجی و بازده سیکل با تغییر سیال عامل تغییر خواهد کرد. گو و همکاران [13] ارزیابی ترمودینامیکی سیکل ارگانیک رانکین را برای پیدا کردن میانگین اتلافات انرژی در دماهای مختلف منبع زمین گرمایی انجام دادند. یالینگ هی و همکاران [14] سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور بخار² را پیشنهاد کردند، که از یک ایجکتور بخار برای افزایش بازده سیکل ارگانیک رانکین پیشنهاد شده بود. جیانگ لی و همکاران [15] پیشنهاد استفاده از ایجکتور و تغذیه جداگانه آن را دادند، که باعث افزایش بازده و توان تولیدی سیکل شد.

در این تحقیق برای افزایش توان خروجی و بازده سیکل ساده ارگانیک رانکین استفاده تلفیقی از ایجکتور، بازیاب حرارتی پیشنهاد شده است. با به کار بردن ایجکتور در سیکل می توان فشار را تعدیل و به فشار مورد نظر رساند. با استفاده از بازیاب حرارتی می توان از اتلافات انرژی جلوگیری و بدون استفاده از منابع خارجی انرژی مورد نیاز اوپراتورها را فراهم نمود. با رویکرد به این مسئله سیکلی جدید با تلفیق اجزاء فوق و سیکل ارگانیک رانکین پیشنهاد می شود. علاوه بر این به جهت این که در سیکل های ارگانیک رانکین سیالات عامل مختلفی استفاده می شوند، تاثیر استفاده از سیالات مختلف (سیز 2 بوتن³، آر⁴، آر⁵، آر⁶، آر⁷، آر⁸، آر⁹، آر¹⁰، آر¹¹، آر¹²، آر¹³، آر¹⁴، آر¹⁵، آر¹⁶، آر¹⁷، آر¹⁸، آر¹⁹، آر²⁰، آر²¹، آر²²، آر²³، آر²⁴، آر²⁵، آر²⁶، آر²⁷، آر²⁸، آر²⁹، آر³⁰، آر³¹، آر³²، آر³³، آر³⁴، آر³⁵، آر³⁶، آر³⁷، آر³⁸، آر³⁹، آر⁴⁰، آر⁴¹، آر⁴²، آر⁴³، آر⁴⁴، آر⁴⁵، آر⁴⁶، آر⁴⁷، آر⁴⁸، آر⁴⁹، آر⁵⁰، آر⁵¹، آر⁵²، آر⁵³، آر⁵⁴، آر⁵⁵، آر⁵⁶، آر⁵⁷، آر⁵⁸، آر⁵⁹، آر⁶⁰، آر⁶¹، آر⁶²، آر⁶³، آر⁶⁴، آر⁶⁵، آر⁶⁶، آر⁶⁷، آر⁶⁸، آر⁶⁹، آر⁷⁰، آر⁷¹، آر⁷²، آر⁷³، آر⁷⁴، آر⁷⁵، آر⁷⁶، آر⁷⁷، آر⁷⁸، آر⁷⁹، آر⁸⁰، آر⁸¹، آر⁸²، آر⁸³، آر⁸⁴، آر⁸⁵، آر⁸⁶، آر⁸⁷، آر⁸⁸، آر⁸⁹، آر⁹⁰، آر⁹¹، آر⁹²، آر⁹³، آر⁹⁴، آر⁹⁵، آر⁹⁶، آر⁹⁷، آر⁹⁸، آر⁹⁹، آر¹⁰⁰، آر¹⁰¹، آر¹⁰²، آر¹⁰³، آر¹⁰⁴، آر¹⁰⁵، آر¹⁰⁶، آر¹⁰⁷، آر¹⁰⁸، آر¹⁰⁹، آر¹¹⁰، آر¹¹¹، آر¹¹²، آر¹¹³، آر¹¹⁴، آر¹¹⁵، آر¹¹⁶، آر¹¹⁷، آر¹¹⁸، آر¹¹⁹، آر¹²⁰، آر¹²¹، آر¹²²، آر¹²³، آر¹²⁴، آر¹²⁵، آر¹²⁶، آر¹²⁷، آر¹²⁸، آر¹²⁹، آر¹³⁰، آر¹³¹، آر¹³²، آر¹³³، آر¹³⁴، آر¹³⁵، آر¹³⁶، آر¹³⁷، آر¹³⁸، آر¹³⁹، آر¹⁴⁰، آر¹⁴¹، آر¹⁴²، آر¹⁴³، آر¹⁴⁴، آر¹⁴⁵، آر¹⁴⁶، آر¹⁴⁷، آر¹⁴⁸، آر¹⁴⁹، آر¹⁵⁰، آر¹⁵¹، آر¹⁵²، آر¹⁵³، آر¹⁵⁴، آر¹⁵⁵، آر¹⁵⁶، آر¹⁵⁷، آر¹⁵⁸، آر¹⁵⁹، آر¹⁶⁰، آر¹⁶¹، آر¹⁶²، آر¹⁶³، آر¹⁶⁴، آر¹⁶⁵، آر¹⁶⁶، آر¹⁶⁷، آر¹⁶⁸، آر¹⁶⁹، آر¹⁷⁰، آر¹⁷¹، آر¹⁷²، آر¹⁷³، آر¹⁷⁴، آر¹⁷⁵، آر¹⁷⁶، آر¹⁷⁷، آر¹⁷⁸، آر¹⁷⁹، آر¹⁸⁰، آر¹⁸¹، آر¹⁸²، آر¹⁸³، آر¹⁸⁴، آر¹⁸⁵، آر¹⁸⁶، آر¹⁸⁷، آر¹⁸⁸، آر¹⁸⁹، آر¹⁹⁰، آر¹⁹¹، آر¹⁹²، آر¹⁹³، آر¹⁹⁴، آر¹⁹⁵، آر¹⁹⁶، آر¹⁹⁷، آر¹⁹⁸، آر¹⁹⁹، آر²⁰⁰، آر²⁰¹، آر²⁰²، آر²⁰³، آر²⁰⁴، آر²⁰⁵، آر²⁰⁶، آر²⁰⁷، آر²⁰⁸، آر²⁰⁹، آر²¹⁰، آر²¹¹، آر²¹²، آر²¹³، آر²¹⁴، آر²¹⁵، آر²¹⁶، آر²¹⁷، آر²¹⁸، آر²¹⁹، آر²²⁰، آر²²¹، آر²²²، آر²²³، آر²²⁴، آر²²⁵، آر²²⁶، آر²²⁷، آر²²⁸، آر²²⁹، آر²³⁰، آر²³¹، آر²³²، آر²³³، آر²³⁴، آر²³⁵، آر²³⁶، آر²³⁷، آر²³⁸، آر²³⁹، آر²⁴⁰، آر²⁴¹، آر²⁴²، آر²⁴³، آر²⁴⁴، آر²⁴⁵، آر²⁴⁶، آر²⁴⁷، آر²⁴⁸، آر²⁴⁹، آر²⁵⁰، آر²⁵¹، آر²⁵²، آر²⁵³، آر²⁵⁴، آر²⁵⁵، آر²⁵⁶، آر²⁵⁷، آر²⁵⁸، آر²⁵⁹، آر²⁶⁰، آر²⁶¹، آر²⁶²، آر²⁶³، آر²⁶⁴، آر²⁶⁵، آر²⁶⁶، آر²⁶⁷، آر²⁶⁸، آر²⁶⁹، آر²⁷⁰، آر²⁷¹، آر²⁷²، آر²⁷³، آر²⁷⁴، آر²⁷⁵، آر²⁷⁶، آر²⁷⁷، آر²⁷⁸، آر²⁷⁹، آر²⁸⁰، آر²⁸¹، آر²⁸²، آر²⁸³، آر²⁸⁴، آر²⁸⁵، آر²⁸⁶، آر²⁸⁷، آر²⁸⁸، آر²⁸⁹، آر²⁹⁰، آر²⁹¹، آر²⁹²، آر²⁹³، آر²⁹⁴، آر²⁹⁵، آر²⁹⁶، آر²⁹⁷، آر²⁹⁸، آر²⁹⁹، آر³⁰⁰، آر³⁰¹، آر³⁰²، آر³⁰³، آر³⁰⁴، آر³⁰⁵، آر³⁰⁶، آر³⁰⁷، آر³⁰⁸، آر³⁰⁹، آر³¹⁰، آر³¹¹، آر³¹²، آر³¹³، آر³¹⁴، آر³¹⁵، آر³¹⁶، آر³¹⁷، آر³¹⁸، آر³¹⁹، آر³²⁰، آر³²¹، آر³²²، آر³²³، آر³²⁴، آر³²⁵، آر³²⁶، آر³²⁷، آر³²⁸، آر³²⁹، آر³³⁰، آر³³¹، آر³³²، آر³³³، آر³³⁴، آر³³⁵، آر³³⁶، آر³³⁷، آر³³⁸، آر³³⁹، آر³⁴⁰، آر³⁴¹، آر³⁴²، آر³⁴³، آر³⁴⁴، آر³⁴⁵، آر³⁴⁶، آر³⁴⁷، آر³⁴⁸، آر³⁴⁹، آر³⁵⁰، آر³⁵¹، آر³⁵²، آر³⁵³، آر³⁵⁴، آر³⁵⁵، آر³⁵⁶، آر³⁵⁷، آر³⁵⁸، آر³⁵⁹، آر³⁶⁰، آر³⁶¹، آر³⁶²، آر³⁶³، آر³⁶⁴، آر³⁶⁵، آر³⁶⁶، آر³⁶⁷، آر³⁶⁸، آر³⁶⁹، آر³⁷⁰، آر³⁷¹، آر³⁷²، آر³⁷³، آر³⁷⁴، آر³⁷⁵، آر³⁷⁶، آر³⁷⁷، آر³⁷⁸، آر³⁷⁹، آر³⁸⁰، آر³⁸¹، آر³⁸²، آر³⁸³، آر³⁸⁴، آر³⁸⁵، آر³⁸⁶، آر³⁸⁷، آر³⁸⁸، آر³⁸⁹، آر³⁹⁰، آر³⁹¹، آر³⁹²، آر³⁹³، آر³⁹⁴، آر³⁹⁵، آر³⁹⁶، آر³⁹⁷، آر³⁹⁸، آر³⁹⁹، آر⁴⁰⁰، آر⁴⁰¹، آر⁴⁰²، آر⁴⁰³، آر⁴⁰⁴، آر⁴⁰⁵، آر⁴⁰⁶، آر⁴⁰⁷، آر⁴⁰⁸، آر⁴⁰⁹، آر⁴¹⁰، آر⁴¹¹، آر⁴¹²، آر⁴¹³، آر⁴¹⁴، آر⁴¹⁵، آر⁴¹⁶، آر⁴¹⁷، آر⁴¹⁸، آر⁴¹⁹، آر⁴²⁰، آر⁴²¹، آر⁴²²، آر⁴²³، آر⁴²⁴، آر⁴²⁵، آر⁴²⁶، آر⁴²⁷، آر⁴²⁸، آر⁴²⁹، آر⁴³⁰، آر⁴³¹، آر⁴³²، آر⁴³³، آر⁴³⁴، آر⁴³⁵، آر⁴³⁶، آر⁴³⁷، آر⁴³⁸، آر⁴³⁹، آر⁴⁴⁰، آر⁴⁴¹، آر⁴⁴²، آر⁴⁴³، آر⁴⁴⁴، آر⁴⁴⁵، آر⁴⁴⁶، آر⁴⁴⁷، آر⁴⁴⁸، آر⁴⁴⁹، آر⁴⁵⁰، آر⁴⁵¹، آر⁴⁵²، آر⁴⁵³، آر⁴⁵⁴، آر⁴⁵⁵، آر⁴⁵⁶، آر⁴⁵⁷، آر⁴⁵⁸، آر⁴⁵⁹، آر⁴⁶⁰، آر⁴⁶¹، آر⁴⁶²، آر⁴⁶³، آر⁴⁶⁴، آر⁴⁶⁵، آر⁴⁶⁶، آر⁴⁶⁷، آر⁴⁶⁸، آر⁴⁶⁹، آر⁴⁷⁰، آر⁴⁷¹، آر⁴⁷²، آر⁴⁷³، آر⁴⁷⁴، آر⁴⁷⁵، آر⁴⁷⁶، آر⁴⁷⁷، آر⁴⁷⁸، آر⁴⁷⁹، آر⁴⁸⁰، آر⁴⁸¹، آر⁴⁸²، آر⁴⁸³، آر⁴⁸⁴، آر⁴⁸⁵، آر⁴⁸⁶، آر⁴⁸⁷، آر⁴⁸⁸، آر⁴⁸⁹، آر⁴⁹⁰، آر⁴⁹¹، آر⁴⁹²، آر⁴⁹³، آر⁴⁹⁴، آر⁴⁹⁵، آر⁴⁹⁶، آر⁴⁹⁷، آر⁴⁹⁸، آر⁴⁹⁹، آر⁵⁰⁰، آر⁵⁰¹، آر⁵⁰²، آر⁵⁰³، آر⁵⁰⁴، آر⁵⁰⁵، آر⁵⁰⁶، آر⁵⁰⁷، آر⁵⁰⁸، آر⁵⁰⁹، آر⁵¹⁰، آر⁵¹¹، آر⁵¹²، آر⁵¹³، آر⁵¹⁴، آر⁵¹⁵، آر⁵¹⁶، آر⁵¹⁷، آر⁵¹⁸، آر⁵¹⁹، آر⁵²⁰، آر⁵²¹، آر⁵²²، آر⁵²³، آر⁵²⁴، آر⁵²⁵، آر⁵²⁶، آر⁵²⁷، آر⁵²⁸، آر⁵²⁹، آر⁵³⁰، آر⁵³¹، آر⁵³²، آر⁵³³، آر⁵³⁴، آر⁵³⁵، آر⁵³⁶، آر⁵³⁷، آر⁵³⁸، آر⁵³⁹، آر⁵⁴⁰، آر⁵⁴¹، آر⁵⁴²، آر⁵⁴³، آر⁵⁴⁴، آر⁵⁴⁵، آر⁵⁴⁶، آر⁵⁴⁷، آر⁵⁴⁸، آر⁵⁴⁹، آر⁵⁵⁰، آر⁵⁵¹، آر⁵⁵²، آر⁵⁵³، آر⁵⁵⁴، آر⁵⁵⁵، آر⁵⁵⁶، آر⁵⁵⁷، آر⁵⁵⁸، آر⁵⁵⁹، آر⁵⁶⁰، آر⁵⁶¹، آر⁵⁶²، آر⁵⁶³، آر⁵⁶⁴، آر⁵⁶⁵، آر⁵⁶⁶، آر⁵⁶⁷، آر⁵⁶⁸، آر⁵⁶⁹، آر⁵⁷⁰، آر⁵⁷¹، آر⁵⁷²، آر⁵⁷³، آر⁵⁷⁴، آر⁵⁷⁵، آر⁵⁷⁶، آر⁵⁷⁷، آر⁵⁷⁸، آر⁵⁷⁹، آر⁵⁸⁰، آر⁵⁸¹، آر⁵⁸²، آر⁵⁸³، آر⁵⁸⁴، آر⁵⁸⁵، آر⁵⁸⁶، آر⁵⁸⁷، آر⁵⁸⁸، آر⁵⁸⁹، آر⁵⁹⁰، آر⁵⁹¹، آر⁵⁹²، آر⁵⁹³، آر⁵⁹⁴، آر⁵⁹⁵، آر⁵⁹⁶، آر⁵⁹⁷، آر⁵⁹⁸، آر⁵⁹⁹، آر⁶⁰⁰، آر⁶⁰¹، آر⁶⁰²، آر⁶⁰³، آر⁶⁰⁴، آر⁶⁰⁵، آر⁶⁰⁶، آر⁶⁰⁷، آر⁶⁰⁸، آر⁶⁰⁹، آر⁶¹⁰، آر⁶¹¹، آر⁶¹²، آر⁶¹³، آر⁶¹⁴، آر⁶¹⁵، آر⁶¹⁶، آر⁶¹⁷، آر⁶¹⁸، آر⁶¹⁹، آر⁶²⁰، آر⁶²¹، آر⁶²²، آر⁶²³، آر⁶²⁴، آر⁶²⁵، آر⁶²⁶، آر⁶²⁷، آر⁶²⁸، آر⁶²⁹، آر⁶³⁰، آر⁶³¹، آر⁶³²، آر⁶³³، آر⁶³⁴، آر⁶³⁵، آر⁶³⁶، آر⁶³⁷، آر⁶³⁸، آر⁶³⁹، آر⁶⁴⁰، آر⁶⁴¹، آر⁶⁴²، آر⁶⁴³، آر⁶⁴⁴، آر⁶⁴⁵، آر⁶⁴⁶، آر⁶⁴⁷، آر⁶⁴⁸، آر⁶⁴⁹، آر⁶⁵⁰، آر⁶⁵¹، آر⁶⁵²، آر⁶⁵³، آر⁶⁵⁴، آر⁶⁵⁵، آر⁶⁵⁶، آر⁶⁵⁷، آر⁶⁵⁸، آر⁶⁵⁹، آر⁶⁶⁰، آر⁶⁶¹، آر⁶⁶²، آر⁶⁶³، آر⁶⁶⁴، آر⁶⁶⁵، آر⁶⁶⁶، آر⁶⁶⁷، آر⁶⁶⁸، آر⁶⁶⁹، آر⁶⁷⁰، آر⁶⁷¹، آر⁶⁷²، آر⁶⁷³، آر⁶⁷⁴، آر⁶⁷⁵، آر⁶⁷⁶، آر⁶⁷⁷، آر⁶⁷⁸، آر⁶⁷⁹، آر⁶⁸⁰، آر⁶⁸¹، آر⁶⁸²، آر⁶⁸³، آر⁶⁸⁴، آر⁶⁸⁵، آر⁶⁸⁶، آر⁶⁸⁷، آر⁶⁸⁸، آر⁶⁸⁹، آر⁶⁹⁰، آر⁶⁹¹، آر⁶⁹²، آر⁶⁹³، آر⁶⁹⁴، آر⁶⁹⁵، آر⁶⁹⁶، آر⁶⁹⁷، آر⁶⁹⁸، آر⁶⁹⁹، آر⁷⁰⁰، آر⁷⁰¹، آر⁷⁰²، آر⁷⁰³، آر⁷⁰⁴، آر⁷⁰⁵، آر⁷⁰⁶، آر⁷⁰⁷، آر⁷⁰⁸، آر⁷⁰⁹، آر⁷¹⁰، آر⁷¹¹، آر⁷¹²، آر⁷¹³، آر⁷¹⁴، آر⁷¹⁵، آر⁷¹⁶، آر⁷¹⁷، آر⁷¹⁸، آر⁷¹⁹، آر⁷²⁰، آر⁷²¹، آر⁷²²، آر⁷²³، آر⁷²⁴، آر⁷²⁵، آر⁷²⁶، آر⁷²⁷، آر⁷²⁸، آر⁷²⁹، آر⁷³⁰، آر⁷³¹، آر⁷³²، آر⁷³³، آر⁷³⁴، آر⁷³⁵، آر⁷³⁶، آر⁷³⁷، آر⁷³⁸، آر⁷³⁹، آر⁷⁴⁰، آر⁷⁴¹، آر⁷⁴²، آر⁷⁴³، آر⁷⁴⁴، آر⁷⁴⁵، آر⁷⁴⁶، آر⁷⁴⁷، آر⁷⁴⁸، آر⁷⁴⁹، آر⁷⁵⁰، آر⁷⁵¹، آر⁷⁵²، آر⁷⁵³، آر⁷⁵⁴، آر⁷⁵⁵، آر⁷⁵⁶، آر⁷⁵⁷، آر⁷⁵⁸، آر⁷⁵⁹، آر⁷⁶⁰، آر⁷⁶¹، آر⁷⁶²، آر⁷⁶³، آر⁷⁶⁴، آر⁷⁶⁵، آر⁷⁶⁶، آر⁷⁶⁷، آر⁷⁶⁸، آر⁷⁶⁹، آر⁷⁷⁰، آر⁷⁷¹، آر⁷⁷²، آر⁷⁷³، آر⁷⁷⁴، آر⁷⁷⁵، آر⁷⁷⁶، آر⁷⁷⁷، آر⁷⁷⁸، آر⁷⁷⁹، آر⁷⁸⁰، آر⁷⁸¹، آر⁷⁸²، آر⁷⁸³، آر⁷⁸⁴، آر⁷⁸⁵، آر⁷⁸⁶، آر⁷⁸⁷، آر⁷⁸⁸، آر⁷⁸⁹، آر⁷⁹⁰، آر⁷⁹¹، آر⁷⁹²، آر⁷⁹³، آر⁷⁹⁴، آر⁷⁹⁵، آر⁷⁹⁶، آر⁷⁹⁷، آر⁷⁹⁸، آر⁷⁹⁹، آر⁸⁰⁰، آر⁸⁰¹، آر⁸⁰²، آر⁸⁰³، آر⁸⁰⁴، آر⁸⁰⁵، آر⁸⁰⁶، آر⁸⁰⁷، آر⁸⁰⁸، آر⁸⁰⁹، آر⁸¹⁰، آر⁸¹¹، آر⁸¹²، آر⁸¹³، آر⁸¹⁴، آر⁸¹⁵، آر⁸¹⁶، آر⁸¹⁷، آر⁸¹⁸، آر⁸¹⁹، آر⁸²⁰، آر⁸²¹، آر⁸²²، آر⁸²³، آر⁸²⁴، آر⁸²⁵، آر⁸²⁶، آر⁸²⁷، آر⁸²⁸، آر⁸²⁹، آر⁸³⁰، آر⁸³¹، آر⁸³²، آر⁸³³، آر⁸³⁴، آر⁸³⁵، آر⁸³⁶، آر⁸³⁷، آر⁸³⁸، آر⁸³⁹، آر⁸⁴⁰، آر⁸⁴¹، آر⁸⁴²، آر⁸⁴³، آر⁸⁴⁴، آر⁸⁴⁵، آر⁸⁴⁶، آر⁸⁴⁷، آر⁸⁴⁸، آر⁸⁴⁹، آر⁸⁵⁰، آر⁸⁵¹، آر⁸⁵²، آر⁸⁵³، آر⁸⁵⁴، آر⁸⁵⁵، آر⁸⁵⁶، آر⁸⁵⁷، آر⁸⁵⁸، آر⁸⁵⁹، آر⁸⁶⁰، آر⁸⁶¹، آر⁸⁶²، آر⁸⁶³، آر⁸⁶⁴، آر⁸⁶⁵، آر⁸⁶⁶، آر⁸⁶⁷، آر⁸⁶⁸، آر⁸⁶⁹، آر⁸⁷⁰، آر⁸⁷¹، آر⁸⁷²، آر⁸⁷³، آر⁸⁷⁴، آر⁸⁷⁵، آر⁸⁷⁶، آر⁸⁷⁷، آر⁸⁷⁸، آر⁸⁷⁹، آر⁸⁸⁰، آر⁸⁸¹، آر⁸⁸²، آر⁸⁸³، آر⁸⁸⁴، آر⁸⁸⁵، آر⁸⁸⁶، آر⁸⁸⁷، آر⁸⁸⁸، آر⁸⁸⁹، آر⁸⁹⁰، آر⁸⁹¹، آر⁸⁹²، آر⁸⁹³، آر⁸⁹⁴، آر⁸⁹⁵، آر⁸⁹⁶، آر⁸⁹⁷، آر⁸⁹⁸، آر⁸⁹⁹، آر⁹⁰⁰، آر⁹⁰¹، آر⁹⁰²، آر⁹⁰³، آر⁹⁰⁴، آر⁹⁰⁵، آر⁹⁰⁶، آر⁹⁰⁷، آر⁹⁰⁸، آر⁹⁰⁹، آر⁹¹⁰، آر⁹¹¹، آر⁹¹²، آر⁹¹³، آر⁹¹⁴، آر⁹¹⁵، آر⁹¹⁶، آر⁹¹⁷، آر⁹¹⁸، آر⁹¹⁹، آر⁹²⁰، آر⁹²¹، آر⁹²²، آر⁹²³، آر⁹²⁴، آر⁹²⁵، آر⁹²⁶، آر⁹²⁷، آر⁹²⁸، آر⁹²⁹، آر⁹³⁰، آر⁹³¹، آر⁹³²، آر⁹³³، آر⁹³⁴، آر⁹³⁵، آر⁹³⁶، آر⁹³⁷، آر⁹³⁸، آر⁹³⁹، آر⁹⁴⁰، آر⁹⁴¹، آر⁹⁴²، آر⁹⁴³، آر⁹⁴⁴، آر⁹⁴⁵، آر⁹⁴⁶، آر⁹⁴⁷، آر⁹⁴⁸، آر⁹⁴⁹، آر⁹⁵⁰، آر⁹⁵¹، آر⁹⁵²، آر⁹⁵³، آر⁹⁵⁴، آر⁹⁵⁵،

2-4- نتایج مدل سازی ترمودینامیکی

با استفاده از کدهای تهیه شده در نرم افزار ای ای اس، پارامترهای ترمودینامیکی برای همه نقاط سیکل رانکین ساده و سیکل پیشنهادی (ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور) به دست آمده است. همچنین برای بررسی تاثیر نوع سیال عامل مورد استفاده بر روی پارامترهای عملکردی سیستم، سیال های عامل مختلفی (آر 600، آر 236 اف ای، آر 245 اف ای و سیز 2 بوتن) به کار گرفته شده اند که نتایج شبیه سازی در جداول 3 و 4 ارائه شده اند. علاوه بر این برای مقایسه کارایی سیکل ها و برای هریک از سیال های عامل مورد بررسی، درصد بهبود راندمان سیکل پیشنهادی نسبت به سیکل ساده ارگانیک رانکین در جدول 5 ارائه شده است.

با مقایسه جداول 3 و 4 در می یابیم که مقدار کار توربین در سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین در میان سیال های عامل مختلف، بیشترین بازده مربوط به سیال آر 245 اف ای به دلیل بالاتر بودن نسبت کار توربین به بار اواپراتور می باشد (11.17٪). ضمناً با توجه به جدول 5 سیال آر 236 اف ای درصد افزایش بازده بیشتری را به دلیل بیشتر بودن نسبت افزایش کار توربین، نشان می دهد (17.5٪). علاوه بر این مقدار بار اواپراتور مرحله اول با توجه به وجود مبدل حرارتی، کاهش و مقدار کار توربین افزایش یافته است که افزایش کار

جدول 1 بالانس انرژی برای اجزاء سیکل های مختلف

Table 1 Energy balance for the component of the different cycles

معادلات	اجزاء
$\dot{W}_p = \dot{m}_1(h_1 - h_2)$	سیکل ساده ارگانیک رانکین
$\dot{Q}_E = \dot{m}_2(h_3 - h_2)$	پمپ (1-2)
$\dot{W}_T = \dot{W}_{T,ideal}\eta_T = \dot{m}_3(h_3 - h_{4s})\eta_T$	اواپراتور (2-3)
$\dot{Q}_C = \dot{m}_4(h_4 - h_1)$	توربین (3-4)
$\eta = \frac{\dot{W}_T + \dot{W}_p - \dot{W}_{net}}{\dot{Q}_E}$	کندانسور (4-1)
	بازده سیکل
$\dot{W}_{p,I} = \dot{m}_8(h_5 - h_8)$	سیکل ساده ارگانیک رانکین
$\dot{W}_{p,II} = \dot{m}_6(h_5 - h_6)$	به همراه ایجکتور و ریژنراتور
$\dot{Q}_{HE(2-3)} = \dot{m}_2(h_2 - h_3)$	پمپ I (5-8)
$\dot{Q}_{HE(8-9)} = \dot{Q}_{HE(2-3)}\eta_{HE}$	پمپ II (5-6)
$\dot{Q}_{E1} = \dot{m}_1(h_1 - h_9)$	مبدل حرارتی (2-3)
$\dot{Q}_{E2} = \dot{m}_6(h_7 - h_6)$	مبدل حرارتی (8-9)
$\dot{W}_T = \dot{W}_{T,ideal}\eta_T = \dot{m}_1(h_1 - h_{2s})\eta_T$	اواپراتور مرحله اول (9-1)
$\dot{Q}_C = \dot{m}_4(h_5 - h_4)$	اواپراتور مرحله دوم (6-7)
$\dot{m}_3h_3 + \dot{m}_7h_7 = \dot{m}_4h_4$	توربین (1-2)
$\eta = \frac{\dot{W}_T + \dot{W}_{p,I} + \dot{W}_{p,II} - \dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{E1} + \dot{Q}_{E2}}$	کندانسور (4-5)
	ایجکتور (7-3-4)
	بازده سیکل

جدول 2 مقایسه نتایج کد تهیه شده در ای ای اس با نتایج مرجع [15]

Table 2 Comparing the results of the EES code with these of the Reference [15]

کد تهیه شده	مرجع [15]	
عملکرد سیکل (آر 600)	6.39	6.47
توان خروجی کل (kW)	0.129	0.13
کار پمپ (kW)	6.26	6.34
توان خالص (kW)	7.27	7.34
بازده سیکل (η)		

تمام فرایندها به صورت پایا بوده و افت فشاری در اجزای سیستم وجود ندارد [17].

دمای سیال خروجی از کندانسور 35 °C می باشد [17].
فشار اواپراتورهای مرحله اول و دوم به ترتیب 599kpa و 420kpa در نظر گرفته شده است [15].

بازده آیزنتروپیک توربین 85٪ و بازده مبدل حرارتی 65٪ است [18].
پمپ ها به صورت آیزن تروپیک می باشند [15].

برای آنالیز ترمودینامیکی سیستم، قوانین بقاء جرم و بقای انرژی برای تک تک اجزاء سیستم ها اعمال می شود (جدول 1 را ببینید) [16]:

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W}_{c.v.} \quad (2)$$

4- بحث و بررسی نتایج

4-1- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل سازی سیکل ارائه شده در این تحقیق از مرجع [15] استفاده شده است. در این مراجع از ایجکتور برای افزایش راندمان سیکل رانکین استفاده کرده اند. کد توسعه داده شده در نرم افزار ای ای اس¹ را برای این سیکل به کار برده شده و مشاهده می شود که کد تهیه شده دارای دقت قابل قبولی می باشد (جدول 2 را ببینید)

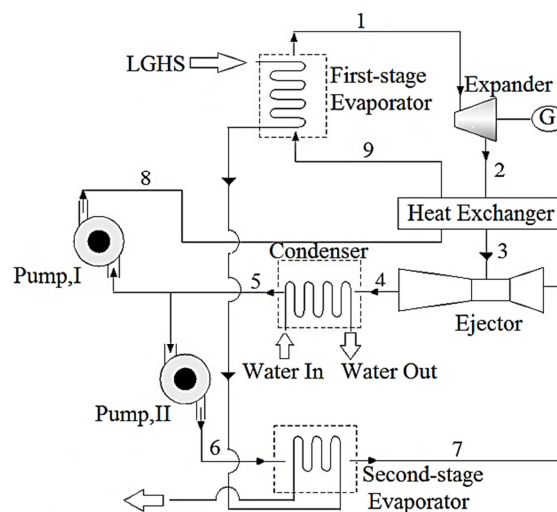


Fig. 2 -A. Schematic diagram of the ORC cycle with Ejector and Regenerator (ERORC)

شکل 2-الف شماتیک سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور

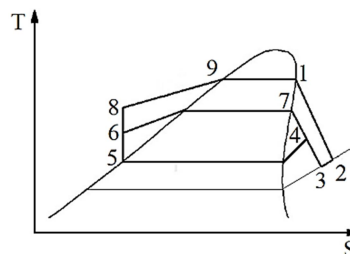


Fig. 2-B. T-S diagram of the ORC cycle with Ejector and Regenerator (ERORC)

شکل 2-ب دیاگرام تی-اس سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور

¹ EES

جدول 3 نتایج شبیه سازی برای سیکل ساده ارگانیک رانکین

Table 3 Simulation results for the simple ORC cycle

سبزیوتن	آر 245 اف ای	آر 236 اف ای	آر 600	
97.46	50.11	36.59	97.71	بار اواپراتور (kW)
89.3	45.32	34.36	84.83	بار کندانسور (kW)
0.0141	0.076	0.0545	0.140	کار پمپ (kW)
8.229	4.869	2.289	7.017	توان کلی توربین (kW)
8.158	4.793	2.235	6.887	توان خالص خروجی (kW)
8.37	9.563	6.108	7.499	بازده (%)

جدول 4 نتایج شبیه سازی برای سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور

Table 4 Simulation results for the ERORC cycle

سبزیوتن	آر 245 اف ای	آر 236 اف ای	آر 600	
96.04	48.83	35.79	89.71	بار اواپراتور مرحله اول (kW)
54.24	27.7	20.05	50.31	بار اواپراتور مرحله دوم (kW)
150.3	76.53	55.85	140	بار کلی اواپراتور (kW)
138.6	69.27	52.64	130.1	بار کندانسور (kW)
0.1415	0.076	0.054	0.140	توان مورد نیاز پمپ 1 (kW)
0.043	0.026	0.014	0.04	توان مورد نیاز پمپ 2 (kW)
13.26	8.651	4.077	12.09	توان کلی توربین (kW)
13.08	8.548	4.009	11.91	توان خالص خروجی (kW)
2.188	1.974	1.232	3.069	بار ریژنراتور (kW)
8.703	11.17	7.178	8.507	بازده (%)

جدول 5 مقایسه عملکرد سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و سیکل جدید پیشنهادی با سیکل ساده ارگانیک رانکین

Table 5 Comparing new proposed cycle with the simple ORC cycle

سبزیوتن	آر 245 اف ای	آر 236 اف ای	آر 600	
3.97	16.8	17.5	13.44	درصد نسبی افزایش بازده سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور (%)

توربین و کاهش مقدار گرمای داده شده به اواپراتور مرحله اول منجر به افزایش راندمان شده است.

5- نتایج

به دلیل پایین بودن بازده سیکل ساده ارگانیک رانکین، برای افزایش بازده و توان خالص خروجی سیکل، سیکل جدیدی ارائه شد که در آن یک ایجکتور و یک باز یاب حرارتی به سیکل ساده ارگانیک رانکین افزوده شده است.

علاوه بر سیکل جدید ارائه شده، برای مقایسه عملکرد سیکل جدید با سیکل ارگانیک ساده رانکین، مدل سازی ترمودینامیکی نیز انجام شد. همچنین برای ارزیابی عملکرد هر یک از سیکل ها از سیالات عامل مختلفی از جمله آر 600، آر 236 اف ای، آر 245 اف ای و سبزیوتن استفاده شدند که اهم نتایج عبارتند از:

- 1- سیکل ارگانیک رانکین به همراه ایجکتور و ریژنراتور، دارای افزایش بازده و توان تولیدی قابل ملاحظه ای نسبت به سیکل ارگانیک رانکین ساده بود.
- 2- بیشترین بازده در بین سیال های عامل مختلف برای سیکل پیشنهادی مربوط به سیال آر 245 اف ای بوده و مقدار آن 11.17% می باشد.
- 3- بهترین سیال های عامل از لحاظ بالابودن راندمان به ترتیب آر 245 اف ای، سبزیوتن، آر 600، آر 236 اف ای می باشند.

6- فهرست علائم

$\dot{h}$	آنتالپی (kJ kg^{-1})
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg s^{-1})
$\dot{Q}$	گرما (kW)
$\dot{W}$	کار (kW)
η	راندمان (%)
C	کندانسور
c.v.	حجم کنترل
E	اواپراتور
e	خروجی
HE	مبدل حرارتی
i	ورودی
Net	نهایی
P	پمپ
S	آیزنتروپیک
T	توربین

7- مراجع

- [1] P. Bombarda, C. Invernizzi, C. Pietra, Heat recovery from diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles, *Applied Thermal Engineering*, No.30, pp.212-219, 2010.
- [2] J. Muñoz Escalona, D. Sánchez, R. Chacartegui, T. Sánchez, Part-load analysis of gas turbine & ORC combined cycles, *Applied Thermal Engineering*, No. 36, pp.63-72, 2012.
- [3] R. Chacartegui, J. Muñoz de Escalona, D. Sánchez, B. Monje, T. Sánchez, Alternative cycles based on carbon dioxide for central receiver solar power plants, *Applied Thermal Engineering*, No. 31, pp.872-879, 2011.
- [4] S. Karellas, A. Schuster, A.D. Leontaritis, Influence of supercritical ORC parameters on plate heat exchanger design, *Applied Thermal Engineering*, No.36, pp. 33-34, 2012.
- [5] J. Sun, W. Li, Operation optimization of an organic rankine cycle (ORC) heat recovery power plant, *Applied Thermal Engineering*, No. 31, pp.2032-2041, 2011.
- [6] D. Wei, X. Lu, Z. Lu, J. Gu, Dynamic modeling and simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, No. 28, pp.1216-1224, 2008.
- [7] H. Hettiarachchi, M. Golubovic, W.M. Worek, Y. Ikegami, Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat source, *Energy*, No.32, pp.1698-1706, 2007.
- [8] S. Bahaa, K. Gerald, Working fluids for low temperature organic Rankine cycles, *Energy*, No.32, pp.1210-1221, 2007.
- [9] J.P. Roy, M.K. Mishra, A. Misra, Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic Rankine cycle, *Energy*, No.35, pp.5049-5062, 2010.
- [10] N. Yamada, M. nor Anuar, K.T. Trung, Study on thermal efficiency of low-to medium-temperature organic Rankine cycles using HFO-123yf, *Energy*, No. 41, pp.368-375, 2012.
- [11] P. Gang, J. Li, Y. Li, D. Wang, J. Ji, Construction and dynamic test of a small-scale organic Rankine cycle, *Energy*, No.36, pp.3215-3223, 2011.
- [12] W. Li, X. Feng, Y. L.J. X. J, Effects of evaporating temperature and internal heat exchanger on organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, No.31, pp.4014-4023, 2011.
- [13] T. Guo, H. Wang, S. Zhang, Comparative analysis of natural and conventional working fluids for use in transcritical Rankine cycle using low-temperature geothermal source, *Energy*, No.35, pp.530-544, 2011.
- [14] X. Rong Ji, Y. Hem, A vapor injector-based novel regenerative

- [17] O. Kaska, Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry, *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 108-117, 2014.
- [18] F. Al-Sulaiman, I. Dincer, F Hamdullahpur, Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle, *Energy*, Vol.45, pp. 975-985, 2012.
- organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, No.31, pp.1238-1243, 2011.
- [15] X. Li, C. Zhao, X. Hu, Thermodynamic analysis of Organic Rankine Cycle with Ejector, *Energy*, No. 42, pp.342-349, 2012.
- [16] V. Wylen, G. John, *Fundamentals of Thermodynamics*, 6th ed, pp.507-511, india, 2002.