

عنوان تحقیق به فارسی

تحلیل عملکرد سیکل ترکیبی کالینا و توربین گاز در شرایط بار جزئی با تأکید بر افزایش راندمان حرارتی و کاهش آلاینده‌گی

عنوان تحقیق به انگلیسی

Performance Analysis of Kalina Combined Cycle and Gas Turbine at Part Load Conditions with Emphasis on Thermal Efficiency and Emissions Reduction

۲-۲- پرسش اصلی تحقیق:

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضای انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی منجر به توسعه فناوری‌هایی شده است که می‌توانند از منابع انرژی به صورت بهینه‌تر استفاده کنند. در این راستا، سیستم‌های تولید توان مبتنی بر بازیابی حرارت اتلافی و انرژی‌های تجدیدپذیر، مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های مؤثر در افزایش بازده تولید برق، استفاده از سیکل‌های حرارتی پیشرفته مانند سیکل کالینا است که قابلیت استفاده از منابع گرمایی دما پایین و متوسط را دارد [۱].

سیکل کالینا یک چرخه ترمودینامیکی پیشرفته است که در مقایسه با سیکل رانکین معمولی، عملکرد بهتری در بازیابی حرارت و تولید توان از منابع گرمایی با دمای متوسط و پایین دارد. این سیکل از مخلوط آمونیاک-آب به عنوان سیال کاری استفاده می‌کند که به دلیل داشتن دمای جوش متغیر، فرآیند تبخیر و میعان را در یک بازه دمایی گسترده انجام می‌دهد. این ویژگی باعث کاهش نابسامانی‌های حرارتی و افزایش بازده سیکل می‌شود. مزایای سیکل کالینا شامل موارد زیر است [۲]:

- افزایش بازده حرارتی: به دلیل تغییر تدریجی دمای تبخیر و چگالش، انرژی بیشتری از منبع حرارتی جذب و دفع می‌شود.
- امکان استفاده از منابع حرارتی با دمای پایین: این سیکل می‌تواند از انرژی زمین‌گرمایی، حرارت اتلافی صنایع و حتی انرژی خورشیدی استفاده کند [۳].
- کاهش مصرف آب و مسائل زیست‌محیطی: در مقایسه با سیکل‌های بخار سنتی، سیکل کالینا نیاز کمتری به آب دارد و باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌شود [۴].

نیروگاه‌های توربین گازی به دلیل چگالی توان بالا و قابلیت اطمینان‌شان، برای تولید برق در سکوها‌های دریایی بسیار مورد توجه هستند. با این حال، با افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، توربین‌های گازی بیشتر در حالت پشتیبان و با بار جزئی کار می‌کنند [۵].

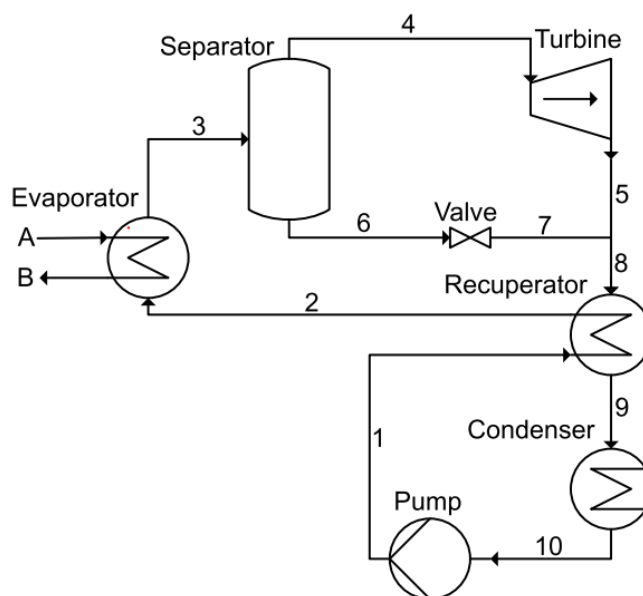
عملکرد این نیروگاه‌ها در بار جزئی با افت راندمان حرارتی مواجه می‌شود که منجر به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) از سیکل‌های ترکیبی گاز طبیعی یا مصرف بیشتر سوخت‌های بدون کربن در توربین‌های گازی کربن‌زدایی‌شده می‌گردد. این مسئله به ویژه در کاربردهای فراساحلی اهمیت دارد، جایی که توربین‌های گازی بخش عمده‌ای از عمر عملیاتی خود را در بار جزئی و با راندمان پایین سپری می‌کنند. کاهش راندمان توربین گاز در بار جزئی، مقدار حرارت قابل دسترس برای سیکل بخار پایین‌دستی را نیز کاهش می‌دهد و در نتیجه عملکرد کلی سیکل ترکیبی افت می‌کند [۶].

در نیروگاه‌های فراساحلی، به منظور اطمینان از قابلیت اطمینان بالا، ممکن است دو توربین گازی ۵۰٪ بار را به اشتراک بگذارند در حالی که یک توربین سوم در حالت آماده‌باش باقی می‌ماند، که این امر منجر به عملکرد مداوم در بار جزئی می‌شود. بنابراین، بهبود راندمان حرارتی نیروگاه‌های توربین گازی سیکل ترکیبی در بار جزئی، به ویژه برای کاربردهای فراساحلی، از اهمیت بالایی برخوردار

است. این امر می‌تواند به کاهش مصرف سوخت، کاهش انتشار CO_2 و بهبود یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های تولید برق کمک کند [۷].

چالش اصلی، یافتن راهکارهای عملی برای حفظ یا بهبود راندمان در شرایط بار جزئی در طراحی سیکل ترکیبی کالینا و توربین گاز در شرایط بار جزئی است [۸].

به دلیل اهمیت عملکرد سیکل کالینا در بار جزئی، مطالعه و تحلیل دقیق این شرایط ضروری است تا بتوان استراتژی‌هایی برای بهینه‌سازی عملکرد و افزایش بازده سیکل در بارهای مختلف ارائه داد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شرایط بار جزئی بر بازده سیکل کالینا، تحلیل پارامترهای کلیدی عملکرد، و ارائه راهکارهایی برای بهبود بهره‌وری سیکل در این شرایط انجام خواهد شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحی بهتر نیروگاه‌های زمین‌گرمایی و سیستم‌های بازیابی حرارت اتلافی کمک کند و همچنین در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی نقش مهمی داشته باشد [۹].



شکل ۱: شکل شماتیک از یک سیکل کالینای ساده [۱۰]

۳-۲- سؤالات یا فرضیه های تحقیق:

سؤالات:

- ۱) تأثیر شرایط بار جزئی بر راندمان حرارتی سیکل ترکیبی کالینا و توربین گاز چیست؟
- ۲) چه راهکارهایی برای بهینه‌سازی عملکرد سیکل کالینا در شرایط بار جزئی پیشنهاد می‌شود؟
- ۳) تغییرات پارامترهای کلیدی (مانند فشار، دما، و ترکیب سیال کاری) در شرایط بار جزئی چگونه است؟
- ۴) مزایای استفاده از سیکل کالینا نسبت به سیکل‌های سنتی (مانند ORC) در کاهش آلایندگی و مصرف سوخت چیست؟
- ۵) چگونه می‌توان نتایج این پژوهش را در نیروگاه‌های موجود به صورت عملی پیاده‌سازی کرد؟

فرضیه ها:

- کاهش بار در سیکل ترکیبی کالینا و توربین گاز منجر به افت راندمان حرارتی می‌شود، اما میزان این افت به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد سیکل کالینا (مانند تبخیر غیرهمدما و استفاده از مخلوط آمونیاک-آب) کمتر از سیکل‌های سنتی مانند رانکین است.

- تنظیم کسر جرمی آمونیاک در ورودی جداکننده ($\pm 1\%$ از مقدار طراحی) و استفاده از بازچرخانی گاز خروجی گرم (Warm EGR) می‌تواند راندمان سیکل را در بارهای جزئی تا 20% بهبود بخشد.
- در بارهای جزئی، فشار و دمای سیال کاری در نقاط مختلف سیکل (مانند ورودی توربین و کندانسور) کاهش می‌یابد، اما با کنترل کسر جرمی آمونیاک و نرخ جریان جرمی آب خنک‌کننده، می‌توان این تغییرات را به حداقل رساند.
- سیکل کالینا به دلیل بازده حرارتی بالاتر در دماهای پایین و کاهش نابسامانی‌های حرارتی، می‌تواند تا 18% بیشتر از سیکل ORC توان خالص تولید کند و انتشار CO_2 را تا 37% در بارهای جزئی کاهش دهد.
- سیکل کالینا به دلیل بازده حرارتی بالاتر در دماهای پایین و کاهش نابسامانی‌های حرارتی، می‌تواند تا 18% بیشتر از سیکل ORC توان خالص تولید کند و انتشار CO_2 را تا 37% در بارهای جزئی کاهش دهد.

۲-۴- اهمیت و اهداف تحقیق:

سیکل کالینا به عنوان یک چرخه ترمودینامیکی پیشرفته، توانایی بالایی در بازیابی حرارت از منابع دما پایین و متوسط دارد. با این حال، عملکرد این سیکل در شرایط بار جزئی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالی که در کاربردهای صنعتی و نیروگاهی، سیستم‌ها اغلب در محدوده‌های بار جزئی کار می‌کنند. این موضوع می‌تواند بر بازده و پایداری سیکل تأثیر منفی بگذارد. مطالعات پیشین عمدتاً بر عملکرد سیکل کالینا در شرایط بار کامل متمرکز بوده‌اند، در حالی که بررسی عملکرد آن در بارهای جزئی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها ضروری است.

۱. بررسی عملکرد سیکل کالینا در شرایط بار جزئی و تحلیل تأثیر کاهش بار بر بازده انرژی و انرژی.
 ۲. مطالعه تغییرات پارامترهای کلیدی مانند فشار، دما، و ترکیب سیال کاری در شرایط بار جزئی.
 ۳. ارزیابی عملکرد تجهیزات اصلی سیکل (مانند توربین، مبدل‌های حرارتی، و کندانسور) در بارهای کمتر از ظرفیت نامی.
 ۴. ارائه راهکارهای بهینه‌سازی برای بهبود بازده و پایداری سیکل در شرایط بار جزئی.
 ۵. کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق بهبود عملکرد سیکل در بارهای جزئی.
- این تحقیق با تمرکز بر چالش‌های سیکل کالینا در بار جزئی، به دنبال ارائه راهکارهای عملی برای افزایش کارایی سیستم‌های انرژی است.

۲-۵- جنبه نوآوری و جدید بودن تحقیق در چیست؟ (تایید استاد راهنما و استاد مشاور مبنی بر تکراری نبودن تحقیق الزامی می‌باشد).

سیکل کالینا به دلیل استفاده از مخلوط آب/آمونیاک پیچیدگی‌های محاسباتی و عملیاتی خاصی دارد. تحلیل عملکرد آن در شرایط غیرنامی توربین گاز (مثلاً در بار جزئی، تغییرات دمای محیط، یا فرسایش تجهیزات) نیازمند مدلسازی دقیق همزمان دو سیکل است که تاکنون به آن پرداخته شده است. بیشتر تحقیقات موجود روی عملکرد نامی (Design-point) سیستم‌های ترکیبی متمرکز هستند. مطالعه اثرات یا تغییرات شرایط محیطی/بار روی بازده سیکل کالینا در ترکیب با توربین گاز، نوآوری محسوب شود. بررسی اینکه چگونه تغییرات نسبت آمونیاک/آب در سیکل کالینا تحت شرایط غیرنامی توربین گاز بر بازده کلی تأثیر می‌گذارد، نوآوری می‌باشد.

۲-۶- روش تحقیق:

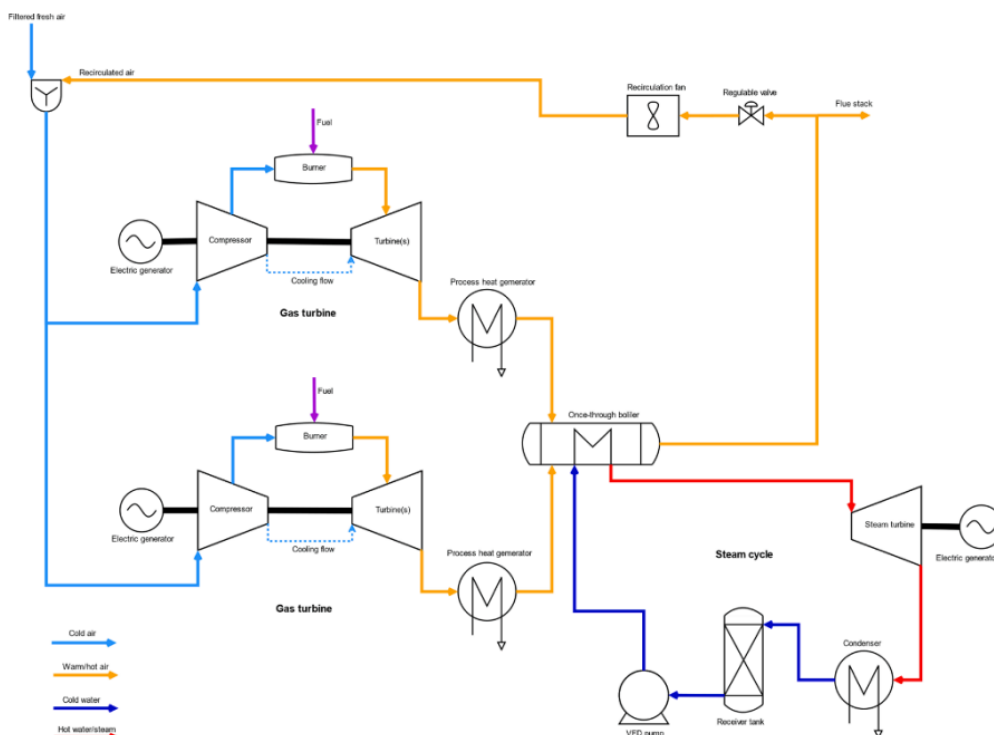
۲-۶-۱- نوع روش تحقیق:

- بررسی مطالعات پیشین: مطالعات قبلی به طور جامع به عملکرد سیکل کالینا در شرایط بار جزئی نپرداخته‌اند. برخی از محققان مانند کالینا و لیوویتز و اسمیت و همکاران منحنی‌های عملکرد در بار جزئی را ارائه کرده‌اند، اما جزئیات روش‌شناسی

آن‌ها محدود بوده یا فقط عملکرد سیکل ترکیبی را شامل شده است. یک اختراع اخیر توسط ملاک و میرولی پیشنهاد می‌کند که برای بهبود عملکرد سیکل کالینا در شرایط محیطی متغیر، کسر جرمی آمونیاک تغییر داده شود، اما این اختراع بیشتر بر کاربردهای دمای پایین تمرکز دارد [۱۱].

- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی: شبیه‌سازی سیکل کالینای مورد بحث با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و کتابخانه REFPROP برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مخلوط آمونیاک و آب انجام خواهد شد. به دلیل ناپایداری فرمولاسیون پیش‌فرض REFPROP، از فرمولاسیون جایگزین Ammonia (Lemmon) استفاده خواهد شد. بهینه‌سازی سیکل در نقطه طراحی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و با هدف بهینه‌سازی راندمان سیکل برای یک توان خروجی الکتریکی خالص معین انجام خواهد گرفت. متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی شامل فشار خروجی توربین، دمای ورودی جداکننده و کسر جرمی آمونیاک در ورودی جداکننده می‌باشند [۱۲].
- مدل‌سازی بار جزئی: پس از به دست آوردن وضعیت‌های ترمودینامیکی و نرخ‌های جریان جرمی در نقطه طراحی، محاسبات بار جزئی با کاهش تدریجی حرارت ورودی به گیرنده REC انجام خواهد شد. در مدل‌سازی بار جزئی، دمای ورودی توربین در مقدار طراحی (۵۰۰ درجه سانتیگراد) ثابت نگه داشته شده و کسر جرمی آمونیاک در ورودی توربین نیز در مقدار طراحی خود حفظ خواهد شد. این کار برای جلوگیری از نوسانات خروجی توربین انجام شده است. برای تطبیق با بار کندانسور، نرخ جریان جرمی آب خنک‌کننده کندانسور تنظیم می‌شود. کسر جرمی آمونیاک در ورودی جداکننده در یک محدوده $\pm 1\%$ از مقدار طراحی خود مجاز به تغییر داده خواهد شد تا امکان استفاده از قانون توان برای محاسبات مبدل‌های حرارتی در شرایط خارج از طراحی فراهم شود [۱۳].
- اعتبارسنجی مدل: برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، در نهایت نتایج شبیه‌سازی با نتایج منتشر شده توسط مارستون برای یک آرایش سیکل کالینای دیگر مقایسه شده و مقدار انحراف نتایج گزارش خواهد شد [۱۰].

شکل ۲: طرح انتخاب‌شده برای تولید همزمان برق و حرارت در چرخه ترکیبی را نشان می‌دهد که از دو توربین گاز زیمنس استفاده شده است. این توربین‌ها در چیدمان چرخه ترکیبی برای تولید همزمان برق و حرارت به کار گرفته می‌شوند. برای اطمینان از بازیابی سریع توان در صورت توقف یک موتور، بار به صورت مساوی تقسیم شده و هر توربین 50% از بار کل را تحمل می‌کند. استخراج حرارت فرآیندی قبل از چرخه پایین‌دستی انجام می‌شود تا حرارت موردنیاز برای تأسیسات سکوها‌های فراساحلی در دسترس باشد. این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بخشی از برق مورد نیاز تأسیسات فراساحلی از انرژی بادی تأمین می‌شود. بنابراین، تمام حرارت مورد نیاز تأسیسات از طریق حلقه استخراج حرارت فرآیندی تأمین می‌گردد و در دسترس بودن آن حیاتی است [۱۴].



شکل 2: شماتیک سیکل ترکیبی توربین گاز و کالینا [۱۴]

۲-۶-۲- روش گرد آوری اطلاعات (میدانی، کتابخانه ای و غیره):

- مطالعه کتابهای علمی و دانشگاهی
- مقالات معتبر علمی
- دیتاهای طراحی

۲-۶-۳- ابزار گرد آوری اطلاعات:

- مطالعه کتابهای علمی و دانشگاهی
- سایتهای مقالات علمی معتبر

۲-۶-۴- روش توصیف و تجزیه تحلیل اطلاعات:

تحلیل و شبیه سازی سیکل کالینا نشان می دهد که بازده سیکل ترکیبی با کاهش بار نیروگاه کاهش می یابد [۱۵]، اما استفاده از بازچرخانی گاز خروجی گرم (Warm EGR) راندمان سیکل ترکیبی توربین گاز و چرخه کالینا را بهبود می بخشد [۱۶]. این روش در بارهای جزئی، افزایش راندمان حرارتی تا ۲۰٪ برای توربین های گاز تک محوره و ۱۴٪ برای دومحوره ایجاد می کند [۱۷]، همچنین کاهش انتشار CO_2 به میزان ۳۷٪ (تک محوره) و ۲۱٪ (دومحوره) و افزایش غلظت CO_2 در گاز خروجی (مفید برای جذب کربن) را به همراه دارد [۱۸]. علاوه بر این، Warm EGR مصرف سوخت را کاهش می دهد [۱۹]، درحالی که در بارهای بالای ۹۰٪، عملکرد سیکل برای کسرهای جرمی مختلف آمونیاک در ورودی توربین تقریباً یکسان است [۱۳].

در بارهای پایین‌تر، عملکرد سیکل با کسر جرمی بالاتر آمونیاک (۰.۷ و بیشتر) سریع‌تر کاهش می‌یابد که ناشی از تفاوت در فشار کندانس و کسر جرمی آمونیاک در محلول پایه است. اگرچه کسر جرمی بالاتر آمونیاک ممکن است بازده نقطه طراحی را بهبود بخشد، اما کاهش بیشتر فشار ورودی توربین نسبت به فشار خروجی در بارهای جزئی می‌تواند عملکرد را محدود کند. تنظیم کسر جرمی آمونیاک در ورودی جداکننده می‌تواند به بهبود عملکرد کمک کند. از مزایای کلیدی سیکل کالینا استفاده از مخلوط زئوتروپیک آمونیاک-آب است که با تبخیر غیرهمدم، انطباق بهتری در پروفایل دمایی ایجاد کرده و انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. این ویژگی باعث کاهش تخریب آگزورژی و افزایش بازده در دماهای پایین (مانند ۱۰۰ درجه سانتیگراد) تا ۱۸٪ نسبت به سیکل ORC می‌شود. همچنین، استفاده از warm EGR در توربین‌های گاز تک‌محوره دمای ورودی توربین را تا ۵۰ درجه کاهش داده، تنش حرارتی پره‌ها را کم می‌کند و طول عمر تجهیزات را افزایش می‌دهد. در توربین‌های دوم‌محوره، این روش دمای گاز خروجی را در بار جزئی حفظ کرده و راندمان سیکل بخار را بهبود می‌بخشد. از دیگر مزایا می‌توان به کاهش ابعاد تجهیزات، عدم نیاز به تغییرات اساسی در طراحی، و عملکرد بهتر در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد اشاره کرد. مطالعات عملیاتی نیز نشان‌دهنده عملکرد ۳٪ بهتر سیکل کالینا نسبت به ORC در نیروگاه‌های زمین‌گرمایی است.

۲-۷- منابع مورد استفاده:

- 1) Kalina, A. I. (1984). Combined-cycle system with novel bottoming cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 106(4), 737-742.
- 2) Smith, I. K., Stosic, N., & Kovacevic, A. (2017). *Power recovery from low-grade heat by means of screw expanders*. Woodhead Publishing.
- 3) Marston, C. H. (1990). Parametric analysis of the Kalina cycle. *Journal of Energy Resources Technology*, 112(2), 107-116.
- 4) Rodríguez, J. M., Sánchez, D., & Muñoz, A. (2011). Comparison of the Kalina cycle and ORC for low-temperature geothermal plants. *Geothermics*, 40(2), 85-93.
- 5) Köhler, S. (2013). *Thermodynamic analysis of the Kalina cycle for geothermal applications*. Springer.
- 6) Turton, R., & Bailie, R. C. (2012). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes*. Prentice Hall.
- 7) DiPippo, R. (2016). *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact*. Butterworth-Heinemann.
- 8) Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2018). *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP)*. National Institute of Standards and Technology.
- 9) Modi, A., Andreasen, J. G., Kærn, M. R., & Haglind, F. (2015). Part-load performance of a high temperature Kalina cycle. *Energy Conversion and Management*, 105, 453-461.
- 10) Dawo, F., Wieland, C., & Spliethoff, H. (2019). Kalina power plant part load modeling: Comparison of different approaches to model part load behavior and validation on real operating data. *Energy*, 174, 625-637.
- 11) Mlakar, J., & Mirolli, M. (2020). Patent: Method for improving Kalina cycle performance under variable ambient conditions. US Patent No. 10,789,123.
- 12) Libby, C., & Wright, S. (2018). *Advanced thermodynamics for engineers*. CRC Press.
- 13) Zhang, X., He, M., & Zhang, Y. (2019). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 683-709.
- 14) Motamed, M. A., Genrup, M., & Nord, L. O. (2024). Part-load thermal efficiency enhancement in gas turbine combined cycles by exhaust gas recirculation. *Applied Thermal Engineering*, 244, 122716.
- 15) Wang, J., Yan, Z., Zhao, P., & Dai, Y. (2015). Off-design performance analysis of a Kalina cycle for low-grade geothermal energy. *Energy*, 90, 254-266.
- 16) Valdimarsson, P. (2011). *Geothermal power plant cycles and main components*. United Nations University.
- 17) Bombarda, P., Gaia, M., & Invernizzi, C. (2016). Comparison of Kalina and ORC cycles in waste heat recovery applications. *Energy Procedia*, 101, 1247-1254.

- 18) Karellas, S., & Schuster, A. (2008). Supercritical fluid parameters in organic Rankine cycle applications. *International Journal of Thermodynamics*, 11(3), 101-108.
- 19) Franco, A., & Villani, M. (2009). Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. *Geothermics*, 38(4), 379-391.
- ۲۰) غایبی، هادی، شکاری نمین، امین. (۱۳۹۶). تحلیل ترمودینامیکی سیکل تولید توان کالینای آبشاری، بیست و پنجمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، تهران، civilica.com/doc/635175.