



پتانسیل‌های تبدیل توربین گازی شرکت پالایش گاز ایلام به تولید هم‌زمان سرما، گرما، توان و فرآیند در مقیاس بزرگ (CCHPP)

مسعود ابراهیمی

استادیار، مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی، دانشگاه کردستان، سنندج
ma.ebrahimi@uok.ac.ir; 6617715175

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 27 خرداد 1395
پذیرش: 24 مرداد 1395
ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:

پالایش گاز ایلام
CCHPP
اقتصادی
ترمودینامیکی
زیست‌محیطی

چکیده

در این مقاله یک واحد توربین گازی با ظرفیت نامی 26.8 MW که در شرکت پالایش گاز ایلام برای تولید پیوسته برق استفاده می‌شود مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده، و پتانسیل تبدیل این واحد به تولید هم‌زمان سرما، گرما، برق و فرآیند از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارزیابی شده است. یک واحد بازیافت گرمای تولید بخار، گرمای محصولات احتراق خروجی توربین را تبدیل به بخار می‌کند و بخار تولیدشده برای سه هدف تولید گرمایش، سرمایش و فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. چرخه ابتدا از نظر ترمودینامیکی بررسی شده و جهت اطمینان از عملکرد درست واحد HRSG از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک، تحلیل پینچ نیز انجام شده است. جهت ارزیابی اقتصادی چرخه هزینه‌های سرمایه‌گذاری، جریان نقدینگی، ارزش حال خالص و نرخ بازگشت داخلی (ریسک سرمایه‌گذاری) نیز محاسبه شده است. همچنین تأثیر ایجاد واحد CCHPP بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی مانند CO₂، CO، و NO_x ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این واحد CCHPP می‌تواند سبب کاهش مصرف انرژی سوخت به اندازه 36% شود. کمترین اختلاف دمای پینچ برای واحد بازیافت گرمای طراحی‌شده 19 C است. نتایج اقتصادی نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه حدود 5.2 سال بوده و در طول عمر مفید پروژه بالغ بر 1.87 میلیون دلار ارزش افزوده اقتصادی ایجاد خواهد شد. همچنین میزان کاهش تولید CO₂، CO، و NO_x بالغ بر 32000، 22 و 27 تن در سال است.

Potentials of the gas turbine of Ilam Gas Refinery Company for large scale combined cooling, heating, power and process (CCHPP)

Masood Ebrahimi

Department of Mechanical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
P.O.B. 6617715175 Sanandaj, Iran, ma.ebrahimi@uok.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 June 2016
Accepted 14 August 2016
Available Online 09 October 2016

Keywords:
Ilam gas Refinery
CCHPP
Thermodynamic
Economic
environment

ABSTRACT

In the present paper, a gas turbine (GT) unit with nominal capacity of 26.8 MWe, which is used for continuous production of electricity in Ilam Gas Refinery Company, has been investigated for combined production of cooling, heating, power and process (CCHPP). Critical parameters are measured and the potentials of transforming the GT unit to CCHPP are investigated from technical, economic, and environmental points of view. A heat recovery steam generator (HRSG) converts the exhaust energy to steam that can be used for three purposes of cooling, heating and process. The cycle is first evaluated thermodynamically, and to be assured regarding HRSG, its operation is studied by using the pinch technology. Economical evaluation is carried out by calculating initial investment, payback period, net present value (NPV) and internal rate of return. In addition, the impact of using CCHPP on reduction of environment pollutant gases such as CO, CO₂, and NO_x is studied. The results reveal that, the fuel energy saving ratio of 36% is achieved for the minimum pinch point temperature of 19 C in the HRSG unit. The payback period is only 5.2 years, and the NPV during the project lifetime is 1.87 M\$. Moreover the CO₂, CO, and NO_x reduction is about 32000, 22 and 27 tons/year respectively.

1- مقدمه

توسعه تکنولوژیکی آن و نیز اقتصادی شدن آن می‌تواند در کاهش تولید گازهای گل‌خانه‌ای و نیز سایر آلاینده‌های سمی بسیار مؤثر باشد، ولی نیاز به انرژی جهت تولید برق، گرما و سرما جهت انواع مصرف‌کننده‌ها به حدی زیاد است که بر اساس گزارش‌های اداره کل اطلاعات انرژی¹ آمریکا (eia) تا سال 2012 منابع انرژی تجدیدپذیر تنها 12% از تولید و مصرف انرژی در جهان را

کاهش منابع انرژی فسیلی از یک سو و افزایش خطرات زیست‌محیطی مصرف این نوع از سوخت از سو دیگر سبب شده است دانشمندان به دنبال راه‌کارهایی اقتصادی باشند که بتوانند با استفاده از آن هم مصرف سوخت‌های فسیلی را بکاهند و نیز آلاینده کمتری وارد محیط‌زیست و جو زمین کنند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر یکی از راه‌کارهایی است که به شرط

¹ Energy information administration

کمتر از 100MW وجود دارد که بیشتر در صنایع نفت و گاز استفاده شده‌اند و بیشتر آن‌ها نیز هنوز فقط برای تولید برق استفاده می‌شوند، این تعداد توربین‌گازی که حدود 2.5% برق تولیدشده توسط نیروگاه‌های حرارتی کشور را به خود اختصاص می‌دهند، حدود 5% سوخت مصرف‌شده توسط نیروگاه‌های حرارتی کشور را مصرف می‌کنند [11]؛ بنابراین این تعداد واحد توربین‌گازی یک پتانسیل بسیار قابل توجه را برای کاهش مصرف سوخت، کاهش تولید آلاینده‌ها و ایجاد ارزش‌افزوده اقتصادی در کشور به‌وجود آورده‌اند. از آنجایی که این واحدهای توربین‌گازی در پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و واحدهای مشابه استفاده شده‌اند، این شرکت‌ها می‌توانند با بازیافت گرمای گازهای اگزوز از آن برای تأمین گرمایش و سرمایش فضاهای اداری و کاری و یا تکمیل فرآیندهای صنعتی خود استفاده کنند. زمانی که مصرف‌کننده گرما و یا سرما در نزدیکی توربین‌گازی موجود نباشد، بخار تولیدشده باید با خطوط لوله به مصرف‌کننده منتقل شود، در چنین شرایطی انتخاب نوع سیستم سرمایش در بحث اقتصادی چرخه CCHP بسیار مهم است. منبع [12] به بررسی اثر فاصله بر نوع سیستم سرمایشی پرداخته و با آنالیز انرژی و اگزرژی به این نتیجه می‌رسد که اگر فاصله ایستگاه توربین و ایستگاه سرمایش (طول خط لوله انتقال بخار) کمتر از 5 km باشد چیلر جذبی انتخاب بهتری است و در صورتی که فاصله بیش از 9.3 km باشد چیلر تراکمی الکتریکی گزینه بهتری است. در فاصله بین 5 تا 9.3 کیلومتر انتخاب نوع چیلر تحت شرایط خاصی انتخاب می‌شود.

م. عامری و همکاران [13] به بررسی و ارزیابی عملکرد 7 واحد تولید هم‌زمان گرما، سرما و برق بر مبنای توربین‌گازی در مجتمع مسکونی شهید بهشتی در شرق تهران پرداخته و اندازه و ظرفیت بهینه هر واحد CCHP نیز برای داشتن کمترین هزینه اولیه و بهره‌برداری محاسبه شده است، همچنین [14] به بررسی سیستم‌های CCHP مختلف بر مبنای توربین‌گازی پرداخته است و آنالیزهای انرژی و اگزرژی را ارائه کرده است. ایشان نتیجه‌گیری کردند که بازدهی اگزرژی و گرمایی چرخه CCHP با افزایش توان خروجی افزایش می‌یابد، همچنین آن‌ها پیشنهاد دادند که جهت کاهش اثرات دمای محیط بر CCHP از فناوری‌های خنک‌کن هوای ورودی به کمپرسور، تزریق بخار به داخل محفظه احتراق و سیستم آتش کمکی در واحد HRSG استفاده شود. اف. هی و همکاران [15] به بررسی یک چرخه جدید CCHP بر مبنای توربین‌گازی پرداختند که در آن سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده نیز استفاده شده بود. با ذخیره و یا آزادسازی انرژی در زمان‌های مناسب بازدهی چرخه بهبود یافته است.

توربین‌گازی مورد نظر این تحقیق ساخت شرکت نوو پیگنونه¹ و مدل آن MS 5001 PA است. این توربین‌گازی در شرایط ایزو دارای ظرفیت 26.8 MW در دور 5100 rpm و کاربری این توربین‌گازی تولید برق به صورت پیوسته است. مشخصه‌های اصلی توربین در شرایط ایزو با دمای 15، رطوبت نسبی 60% و فشار 1atm شامل مقدار گرمای ورودی به توربین ناشی از مصرف گاز طبیعی (LHV) 332.7×10^6 kJ/h نرخ گرمایی² (LHV) 12650 kJ/kWh و دبی اگزاگست معادل 447×10^3 kg/h است [16]. هدف این تحقیق ارزیابی توربین‌گازی پالایشگاه ایلام و ارائه روشی برای ارزیابی سایر توربین‌های گازی موجود در کشور جهت تبدیل آن‌ها به CCHP و یا CCHPP است. روش ارائه‌شده یک روش چند معیاره بوده که جهت ارزیابی از مشخصه‌های ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی

به خود اختصاص داده‌اند و پیش‌بینی می‌شود با روند رشد کنونی این مقدار در سال 2040 به 16% برسد. سهم سوخت‌های فسیلی در سال 2012 و 2040 به ترتیب 88% و 84% است [1]؛ بنابراین با توجه به گزارش eia در سال‌های پیش‌روی سوخت‌های فسیلی کماکان پیش‌تاز تأمین انرژی بشر خواهند بود. به نظر می‌رسد که در کنار نیاز به توسعه تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر، تکنولوژی‌های مرسوم نیز باید به‌گونه‌ای بهبود یابند که با افزایش بازدهی کل، مصرف سوخت کاهش یابد و هم‌آلاینده کمتری تولید شود. نکته مهم‌تر این است که تکنولوژی‌های مرسوم به دلیل این‌که بیشتر تجاری‌سازی شده‌اند از نظر اقتصادی نیز احتمال سودآور بودن آن‌ها بالا خواهد بود. یکی از راه‌هایی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته، تولید هم‌زمان سرما، گرما و برق (CCHP) است [2]. در این روش معمولاً تلفات گرمایی یک سیستم مولد برق مانند یک توربین‌گازی، به‌وسیله یک سیستم بازیافت گرما بازیافت می‌شود. گرمای بازیافت شده می‌تواند به‌صورت آب داغ، بخار آب و یا گاز داغ باشد. گرمای بازیافت شده می‌تواند جهت تأمین گرمایش در فصول سرد سال، تأمین سرمایش به وسیله سیستم‌های سرمایشی گرما محرک مانند چیلرهای جذبی در فصول گرم سال و یا جهت تکمیل و انجام فرآیند صنعتی استفاده شود. سیستم‌های تولید هم‌زمان از تنوع بسیار بالایی از نظر اندازه، ظرفیت و تکنولوژی استفاده شده در آن‌ها برخوردار هستند. این سیستم‌ها از نظر اندازه به مقیاس میکرو (تولید توان کمتر از 20 kW)، مینی (توان کمتر از 500 kW و بیشتر از 20 kW)، کوچک (توان کمتر از 1000 kW و بیشتر از 500 kW)، و بزرگ (توان بیشتر از 1000 kW) تقسیم‌بندی شده‌اند [3].

از نظر تکنولوژی نیز از آنجایی که قلب سیستم‌های تولید هم‌زمان مولد برق آن و کیفیت و مقدار گرمای قابل بازیافت در انواع مولدهای برق بسیار متفاوت است؛ بنابراین این مسئله طراح را با مسایل مختلفی روبه‌رو می‌سازد. برای نمونه اگر مولد بخار یک میکروتوربین‌گازی باشد، دمای گازهای اگزاگست با توجه به استفاده از بازیافت گرما در میکروتوربین‌ها حدود 300 °C است. این در حالی است که در توربین‌های با مقیاس بزرگ بدون بازیافت دمای اگزاگست به حدود 540 °C نیز می‌رسد. در پیل‌های سوختی نوع اکسید جامد دمای گازهای خروجی از پشته پیل حدود 1100 °C است [4] در حالی که در پیل سوختی نوع غشاء تبادل الکترون این دما حدود 80 °C است. در موتورهای رفت و برگشتی که بدنه آن‌ها با آب خنک می‌شود منابع گرمایی قابل بازیافت اگزاگست، آب خنک‌کن و روغن دماهای متفاوتی در حدود 540 °C، حدود 100 °C و حدود 60 °C دارند. با این تنوع در کیفیت گرمای قابل بازیافت و همچنین در سیال حامل گرمای قابل بازیافت (گاز، آب و روغن) طراحی و انتخاب سیستم بازیافت گرما و همچنین سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی یک بحث مهم خواهد بود. انتخاب اجزای سیستم براساس مشخصه‌های مختلف فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی معمولاً به وسیله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند روش منطبق فازی و سیستم‌های خاکستری انجام می‌شود [5-7]، همچنین پس از انتخاب اجزای چرخه تولید هم‌زمان، طراحی اندازه اجزای آن مهم‌ترین بحث است که روش‌های مختلف تک معیاره و چند معیاره جهت تعیین اندازه بهینه مولد برق، سیستم یا سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی استفاده می‌شود. طراحی اندازه اجزای چرخه می‌تواند بر مبنای انرژی، اگزرژی، سودده بودن از نظر اقتصادی و یا میزان کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی باشد [8-10].

در حال حاضر در کشور ایران حدود 120 واحد توربین‌گازی با ظرفیت

¹ Nuovo pignone

² Heat rate

هوای پاک و فیلتر شده ابتدا توسط کمپرسور که با کمک توربین در حال کار است فشرده می‌شود. دما و فشار خروجی و ورودی کمپرسور به شرح روابط (2,1) با هم در ارتباط هستند.

$$\frac{T_{2,s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$P_1 = P_{amb} - \Delta P_{airintake}$$

$$\Delta P_{airintake} = 0.008 P_{atm}$$

$$P_{atm} = c_{altitude} P_{atm}$$

$$\eta_{comp} = \frac{T_{2,s} - T_1}{T_{2,r} - T_1} \quad (1)$$

$$\eta_{comp} = \frac{T_{2,s} - T_1}{T_{2,r} - T_1} \quad (2)$$

در روابط بالا P_{atm} فشار محیط است که باید اثر ارتفاع از سطح دریا بر آن در نظر گرفته شود ($c_{altitude}$). در روابط بالا زیرنویس‌های r و s به ترتیب برای حالت‌های آیزنتروپیک و واقعی گازهای خروجی از کمپرسور در نظر گرفته شده‌اند، همچنین در این معادلات k و η_{comp} به ترتیب نسبت گرمای ویژه هوا و بازدهی آدیاباتیک کمپرسور است.

توان مصرف‌شده توسط کمپرسور هوا را می‌توان از رابطه (3) به‌دست آورد.

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (3)$$

هوای فشرده پس از خروج از کمپرسور با تزریق سوخت در محفظه احتراق دمای آن تا T_3 داغ می‌شود. دبی سوخت مصرفی مورد نیاز جهت انجام این کار از رابطه (4) قابل محاسبه است. توجه شود که محفظه احتراق مانند یک حجم کنترل در نظر گرفته شده که ورودی‌های آن هوای فشرده و سوخت و خروجی آن گازهای داغ محصولات احتراق و وردی به توربین است. جهت در نظر گرفتن تلفات گرمایی و اگرزری بادهی محفظه احتراق و بازدهی احتراق در نظر گرفته شده است.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_F$$

$$\dot{m}_F LHV_F \eta_{cc} \eta_{com} = \dot{m}_3 (h_3 - h_2) \quad (4)$$

در رابطه بالا پانویس F به سوخت اشاره دارد، همچنین فرض اساسی در معادله بالا با توجه به نسبت هوا به سوخت بسیار بالا این است که گاز خواص هوا را دارد. در رابطه بالا η_{cc} و η_{com} بازدهی احتراق و بازدهی محفظه احتراق است.

محصولات خروجی از محفظه احتراق با دما و فشار بالا وارد توربین می‌شود و در آن‌جا با تبدیل فشار و انرژی حرارتی به سرعت و برخورد با

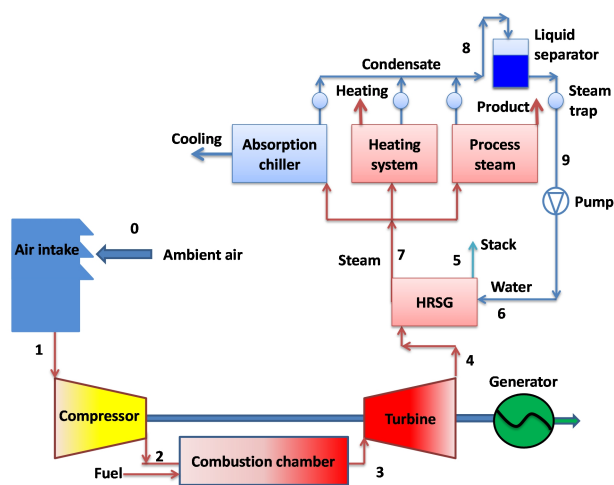


Fig.1 Schematic diagram of the CCHPP proposed for gas turbine of Ilam gas Refinery Company

شکل 1 شماتیک چرخه CCHPP پیشنهادی برای توربین گازی شرکت پالایش گاز ایلام

استفاده می‌کند. جهت انجام آنالیزها در سه حالت مجزا ارزیابی‌ها انجام شده است. حالت اول: ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی توربین گازی موجود به تنهایی که در آنالیزها با زیرنویس GT,ONLY نمایش داده شده است. حالت دوم: فرض شده است یک توربین نو مشابه توربین پالایشگاه ایلام خریداری شود و این توربین به CCHPP تبدیل شود که این حالت در آنالیزها با زیرنویس CCHP نمایش داده شده است. حالت سوم: فرض شده است توربین موجود که همواره در شرایط بار جزئی (حدود 35% ظرفیت نامی) کار می‌کند تبدیل به CCHPP شود، که این حالت در آنالیزها با زیرنویس CCHP,ILAM نمایش داده شده است. پس از مشخص شدن این سه حالت، مدل‌سازی پارامتریک انجام خواهد شد و آنالیز حساسیت به کار در شرایط بار جزئی، تعرفه‌های گاز طبیعی و برق، قیمت دلار و نرخ تورم انجام خواهد شد و شرایطی را که هر کدام از سه حالات بالا تحت آن سودده بود مشخص خواهد شد. نتیجه این آنالیزها مشخص می‌کند که از میان سه حالت مدل‌سازی کدام به صرفه‌تر است. نتایج حاصل از این پژوهش به برنامه‌ریزان و مدیران در تعرفه‌گذاری برق و گاز کمک می‌کند تا جهت کاهش مصرف و مصرف بهینه ثروت‌های ملی قیمت انرژی به گونه‌ای تعیین شود که در حالت‌های مختلف سرمایه‌گذاری در زمینه تولید هم‌زمان مقرون به صرفه باشد.

2- مدل توصیفی چرخه CCHPP

دی‌اگرام شماتیک چرخه CCHP پیشنهادی در شکل 1 نشان داده شده است. براساس این شکل هوا پس از فیلتراسیون و عبور از سیستم مکش هوا¹ وارد کمپرسور می‌شود و فشار آن افزایش می‌یابد. هوای پرفشار وارد محفظه احتراق می‌شود تا دمای آن نیز افزایش یابد. گاز با دما و فشار بالا وارد توربین می‌شود و با چرخاندن شفت توربین توان تولید می‌کند. توان تولیدشده با چرخاندن ژنراتور کوپل‌شده به توربین برق تولید می‌کند. گازهای خروجی محفظه احتراق پس از عبور از توربین وارد اگزاست می‌شود. جهت بازیافت گرمای موجود در اگزاست توربین گازی، ابتدا اگزاست با کیفیت بالا وارد یک واحد مولد بخار بازیافت حرارتی² (HRSG) می‌شود. در آن‌جا بخار با دما و فشار مورد نیاز تهیه خواهد شد. بخار تولیدشده می‌تواند به سه منظور در کل طول سال مورد استفاده قرار گیرد. در فصول گرم سال که سرمایش فضاهای ساختمانی پالایشگاه یک نیاز اساسی است، بخار می‌تواند پس از استفاده در چیلر جذبی، آب سرد با دمای حدود 6 یا 7 °C تولید کند که جهت خنک‌سازی فضاهای مختلف در سیستم هواساز مرکزی یا فن کوپل‌ها قابل استفاده خواهد بود. در صورت عدم نیاز به سرمایش، بخار می‌تواند در فصول سرد سال در سیستم هواساز مرکزی یا فن کوپل‌ها جهت گرمایش فضاهای مختلف استفاده شود. در حالت سوم بخار نیز در صورت عدم‌نیاز به گرمایش یا سرمایش می‌تواند جهت استفاده در فرآیندهای مصرف‌کننده بخار به‌کار گرفته شود.

3- مدل ریاضی چرخه CCHPP

1-3- مدل ترمودینامیکی چرخه

یک مدل ریاضی جهت آنالیز چرخه پیشنهادشده برای چرخه و اجزای آن ارائه شده است. این مدل کمک می‌کند تا چرخه از لحاظ ترمودینامیکی تحلیل شود. در ادامه مفروضات و معادلات حاکم بر اجزای چرخه ارائه شده است.

¹ Air intake

² Heat recovery steam generator

شده است. اگر ΔT_{pp} بزرگ‌تر باشد بازدهی اکسرژی HRSG کمتر و در مقابل ΔT_{pp} کوچک‌تر سبب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری HRSG خواهد شد. نمونه‌ای از منحنی‌های تکنولوژی پینچ در شکل 2 نشان داده شده است. اختلاف دمای پینچ و دمای نقطه پینچ می‌تواند از روابط (13,12) محاسبه شوند.

$$T_{pp} = \frac{\dot{m}_6(h_6 - h_5)}{\dot{m}_6(h_4 - h_5)}(T_4 - T_5) + T_5 \quad (12)$$

$$\Delta T_{pp} = T_{pp} - T_6 \quad (13)$$

بخار خروجی از HRSG می‌تواند در حالت اشباع و یا سوپرهیت باشد. در صورتی که بخواهیم دمای بخار را نسبت به حالت اشباع به مقدار ΔT_{SH} افزایش دهیم دمای بخار خروجی برابر با رابطه (14) خواهد بود.

$$T_7 = T_{sat@P_7} + \Delta T_{SH} \quad (14)$$

بخار تولیدی در واحد HRSG می‌تواند برای سه هدف تولید سرما، گرما و یا بخار فرآیندی مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که از بخار تولیدشده برای تولید سرمایش استفاده شود استفاده از چیلرهای جذبی لیتیم بروماید/آب دو اثره آتش غیرمستقیم که با بخار داغ کار می‌کند در اولویت قرار می‌گیرند، زیرا دمای بخار مورد نیاز و فشار آن برای استفاده در چیلر بسیار نزدیک به دما و فشار بخار تولیدی در بویلر فشار متوسط پالایشگاه است؛ بنابراین رابطه بین مقدار گرمای بازیافت‌شده در HRSG و مقدار سرمای تولیدشده در چیلر به‌صورت رابطه (15) ارائه خواهد شد.

$$Q_{cooling} = COP_{abc}(\eta_{abc,gen}Q_{rec} + E) \quad (15)$$

$$E = \frac{\dot{W}_{pump,abc}}{\eta_{electromotor}}$$

که COP_{abc} ضریب عملکرد چیلر جذبی، $\eta_{abc,gen}$ بازدهی مبدل لوله و پوسته قسمت ژنراتور چیلر، و E مقدار برق مصرفی مربوط به پمپ‌های چیلر است. مقدار برق مصرفی چیلرهای دو اثره برابر با رابطه (16) است [17].

$$E = eQ_{cooling} \quad (16)$$

$$e = (3 \text{ to } 11) \times 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{kW of refrigeration}}$$

به عبارتی مقدار $Q_{cooling}$ از رابطه (17) قابل محاسبه خواهد بود.

$$Q_{cooling} = \frac{\eta_{abc,gen} \cdot COP_{abc} \cdot Q_{rec}}{(1 - e \cdot COP_{abc})} \quad (17)$$

در صورتی که از بخار تولیدشده جهت گرمایش استفاده کنیم بخار تولیدشده به مجموعه‌ای از فن کویل‌ها ارسال خواهد شد که با عبور هوا از روی این کویل‌ها گرما به فضای هدف منتقل خواهد شد. در صورتی که بازدهی مجموعه سیستم گرمایش، فن کویل و خطوط انتقال بخار $\eta_{heating}$ باشد، مقدار گرمایش نهایی دریافت شده برابر با رابطه (18) خواهد شد.

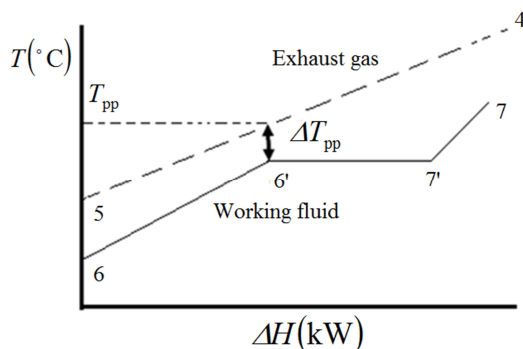


Fig.2 Pinch diagram of the HRSG

شکل 2 نمودار تکنولوژی پینچ برای HRSG

پره‌های توربین، توربین را به چرخش درآورده و تولید توان می‌کند. چرخش توربین نیز سبب چرخش ژنراتور شده و در نهایت برق تولید می‌شود. دما و فشار در ورودی و خروجی توربین به‌صورت روابط (6,5) با هم ارتباط دارند.

$$\frac{T_{4,s}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5)$$

$$P_3 = P_2 - \Delta P_{cc}$$

$$\eta_{tu} = \frac{T_{4,r} - T_3}{T_{4,s} - T_3}$$

$$T_{4,r} = f_1(P_{gen}, T_{amb}) \quad (6)$$

ΔP_{cc} افت فشار در محفظه احتراق که در این تحقیق معادل یک درصد P_2 است. با معلوم بودن دمای ورودی توربین و فشار در ورودی و خروجی آن، دمای حالت بازگشت‌پذیر در خروجی توربین با استفاده از رابطه (5) به‌دست می‌آید. سپس با معلوم بودن دمای اگزاست واقعی، بازدهی آدیاباتیک توربین هم محاسبه خواهد شد. دمای اگزاست توربین با توجه به نمودارهای عملکردی [16] تابعی از دمای محیط و میزان خروجی ژنراتور به‌صورت درصدی از مقدار طراحی است، که $P_{gen} = \frac{E_{produced}(kW)}{E_{designed}(kW)}$ و همچنین توان تولیدی توربین به‌صورت رابطه (7) قابل محاسبه است.

$$\dot{W}_{tu} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad (7)$$

$$\dot{m}_3 = x\dot{m}_{design}$$

$$x = f_2(T_{amb}, P_{gen})$$

مقدار دبی اگزاست در شرایط طراحی مشخص است، اما در صورتی که توربین در بار جزئی کار کند مقدار دبی براساس نمودارهای عملکردی [13] تابع دمای محیط و P_{gen} است که x نسبت دبی جرمی اگزاست در حالت بار جزئی به دبی اگزاست طراحی است $(x = \frac{\dot{m}_{partload}}{\dot{m}_{design}})$.

توان تولیدشده توسط توربین صرف چرخاندن کمپرسور و ژنراتور می‌شود. مقدار توان خالص تولیدی و برق تولیدی به‌صورت رابطه (8) قابل محاسبه است.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{tu} - \dot{W}_{comp} \quad (8)$$

$$E_{produced} = \eta_{gen}\dot{W}_{net}$$

که η_{gen} بازدهی ژنراتور است. گازهای اگزاست در خروجی توربین بلافاصله وارد یک واحد HRSG می‌شود. در واحد HRSG گرمای گازهای اگزاست توسط آب مایع جذب و بخار تولید می‌شود. مقدار گرمای بازیافت شده در واحد HRSG به‌صورت رابطه (9) قابل محاسبه خواهد بود.

$$Q_{rec} = \dot{m}_6(h_7 - h_6) \quad (9)$$

که $\dot{m}_6$ و T_6 دبی و دمای آب در ورودی HRSG و T_7 نیز دمای بخار خروجی از HRSG است. مقدار گرمای از دست داده شده توسط اگزاست نیز برابر با رابطه (10) است.

$$Q_{ex} = \dot{m}_4(h_4 - h_5) \quad (10)$$

اگر بازدهی واحد HRSG اعمال شود (η_{HRSG}) بین گرمای بازیافت شده و گرمای گرفته شده از گازهای اگزاست رابطه (11) برقرار است.

$$Q_{rec} = \eta_{HRSG}Q_{ex} \quad (11)$$

طراحی واحد HRSG از موضوعات بسیار مهم در این مبحث است. طراحی بهینه این واحد قضیه پینچ به واحد HRSG اعمال شده است.

در این روش دیاگرام دمای گازهای اگزاست خروجی آب در مقابل تغییرات آنتالپی دو سیال رسم می‌شود.

شرایطی که در آن اختلاف دمای بین دو سیال به حداقل می‌رسد نقطه پینچ خوانده شده و اختلاف دما نیز اختلاف دمای نقطه پینچ گفته می‌شود (ΔT_{pp}). در شکل 2 به‌عنوان نمونه دیاگرام پینچ یک واحد HRSG آورده

معیارهای اقتصادی که در ادامه یاد می‌شوند می‌توان پیش‌بینی کرد که عملکرد سیستم CCHPP از نظر اقتصادی چگونه خواهد بود.

1-2-3- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (I)

آشکارت‌ترین بعد اقتصادی یک سیستم CCHP میزان سرمایه‌گذاری اولیه است، زیرا سرمایه‌گذار ابتدا با آن روبه‌رو می‌شود. اگرچه قیمت اولیه به تنهایی نمی‌تواند سودآور بودن و یا ریسک سرمایه‌گذاری را مشخص کند، اما در تصمیم‌گیری نقش اساسی دارد. هرچه بتوانیم قیمت اولیه را پایین‌تر آوریم استقبال از محصول بیشتر خواهد بود، اما برای این‌که سودآور بودن و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری نیز تضمین شود، باید معیارهای دیگری نیز لحاظ گردد. این پارامتر معمولاً به صورت مستقیم در انتخاب نوع محرک اصلی تأثیر دارد، اما در طراحی اندازه اجزای چرخه اثر آن به صورت غیرمستقیم بوده و در محاسبات دوره بازگشت سرمایه، ارزش افزوده و ریسک سرمایه‌گذاری وارد می‌شود.

در این پروژه نیز هزینه‌های سرمایه‌گذاری اصلی اولیه شامل هزینه توربین (در صورتی که بخواهیم توربین را نیز از ابتدا خریداری کنیم) و متعلقات آن، هزینه سیستم بازیافت گرما (HRSG) و هزینه چیلر جذبی است. باید دقت شود که از سه حالت سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده در حالت‌های CCHP، ONLY، GT، هزینه توربین را باید در نظر گرفت، ولی در حالت CCHP، ILAM، چون توربین پیشتر خریداری شده است؛ بنابراین توربین به‌عنوان هزینه در نظر گرفته نمی‌شود، البته باید توجه کرد در حالتی که توربین به‌عنوان هزینه سرمایه‌گذاری شده در نظر گرفته نمی‌شود، جریان مالی مثبت ناشی از تولید برق نیز در نظر گرفته نمی‌شود.

آژانس محافظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا¹ در طرح تولید هم‌زمان گرما و برق اطلاعات جامعی را در زمینه انواع مختلف CHP ارائه کرده است.

با عبور یک منحنی از نتایج اقتصادی این پروژه برای هزینه‌های سرمایه‌گذاری تولید یک CHP براساس توربین گازی معادله 25 تخمین زده شده است [18]. مشخصه قیمت واحد CHP برحسب دلار آمریکا برای هر کیلو وات ظرفیت نامی توربین گازی برابر با رابطه (25) خواهد شد.

$$i_{CHP} \left(\frac{\$}{kW} \right) = 59289 E_{nom}^{-0.365} \quad (25)$$

E_{nom} ظرفیت نامی توربین گازی مورد نظر و $3510 \leq E_{nom} (kW) \leq 45607$ است، همچنین مشخصه قیمت واحد چیلر جذبی برحسب دلار آمریکا برای هر کیلو وات ظرفیت سرمایشی عبارت از رابطه (26) است [1].

$$i_{chiller} \left(\frac{\$}{kW} \right) = -35.4 \log(C_{nom}) + 431 \quad (26)$$

C_{nom} ظرفیت نامی چیلر و برحسب kW است.

کل هزینه سرمایه‌گذاری در سه حالت مدل‌سازی به‌صورت رابطه (27) محاسبه خواهد شد.

$$I_{total}(\$) = \begin{cases} I_{CHP} - I_{HRSG}, \text{ for GT, ONLY} \\ I_{CHP} + I_{chiller}, \text{ for CCHP} \\ I_{chiller} + I_{HRSG}, \text{ for CCHP, ILAM} \end{cases} \quad (27)$$

هزینه واحد HRSG به‌صورت تابعی از ظرفیت توربین به‌صورت (28) ارائه شده است.

$$I_{HRSG} = -10^{-4} E_{nom}^2 + 64.23 E_{nom} + 491873 \quad (28)$$

هزینه لحاظ‌شده برای احداث واحد CHP شامل مواردی همچون توربین،

$$Q_{heating} = \eta_{heating} Q_{rec} \quad (18)$$

در نهایت در صورتی که از بخار تولیدشده برای فرآیند و تولید محصول استفاده شود، در صورتی که بازدهی استفاده از گرما در فرآیند مورد نظر و خطوط انتقال بخار $\eta_{process}$ باشد، مقدار گرمای استفاده شده در فرآیند به‌صورت رابطه (19) محاسبه خواهد شد.

$$Q_{process} = \eta_{process} Q_{rec} \quad (19)$$

بخار ضمن عبور از سیستم‌های سرمایشی، گرمایشی و یا فرآیندی کندانس خواهد شد و در حالت اشباع پس از جداسازی از بخار در داخل سپراتور به وسیله پمپ می‌پاش می‌شود.

مشخصات ورودی و خروجی پمپ و همچنین توان مصرفی پمپ آب به صورت رابطه (20) محاسبه می‌شوند.

$$h_6 = h_9 + v_9(P_6 - P_9) \\ \dot{W}_{pump} = \dot{m}_6(h_6 - h_9) \quad (20)$$

در صورتی که y کسری از مدت زمان یکسال باشد که گرمای بازیافت شده صرف گرمایش (y_h)، سرمایش (y_c) و فرآیند (y_p) می‌شود، y_m نیز کسری از سال است که توربین جهت تعمیرات خاموش است.

جهت محاسبه بازدهی کلی سیستم CCHP مورد نظر در طول مدت زمانی که سیستم در حال کار بوده رابطه (21) را خواهیم داشت.

$$\eta_{overall} = \frac{(1 - y_m) E_{produced} + y_c Q_{cooling}}{(1 - y_m) F_{GT} + \frac{y_h Q_{heating} + y_p Q_{process}}{(1 - y_m) F_{GT}}} \quad (21)$$

در رابطه بالا F_{GT} و $E_{produced}$ سوخت مصرفی و برق تولیدی GT و رابطه (22) بین آن‌ها برقرار است.

$$F_{GT} = E_{produced} \eta_{GT} \quad (22)$$

η_{GT} بازدهی الکتریکی GT است. همچنین جهت محاسبه مقدار صرفه‌جویی سالیانه در مصرف سوخت، می‌توان از رابطه (23) استفاده کرد.

$$F_{saving}(kWh) = (y_c Q_{cooling} + y_h Q_{heating} + y_p Q_{process}) Y \quad (23)$$

که Y تعداد ساعات یکسال و برابر 8760 ساعت است.

با توجه به این‌که سوخت مورد استفاده گاز طبیعی است، اگر ارزش حرارتی گاز طبیعی LHV_{NG} برحسب کیلووات ساعت در هر مترمکعب گاز طبیعی معلوم باشد مقدار صرفه‌جویی برحسب مترمکعب گاز طبیعی در طول یکسال به صورت رابطه (24) محاسبه خواهد شد.

$$F_{saving}(m^3) = \frac{F_{saving}}{LHV_{NG}} \quad (24)$$

در صورتی که توربین در حالت بار کامل کار کند، با تغییر دمای محیط دبی اگزاست، مصرف سوخت، توان خروجی و دمای اگزاست تغییر خواهند کرد. ضرایب اصلاح مشخصه‌های طراحی توربین براساس تغییرات دمای محیط با توجه به دیاگرام‌های کارکرد توربین [16] به‌دست خواهند آمد. این ضرایب اصلاح به‌صورت کلی تابعی از دمای محیط است.

همچنین مقدار رطوبت مخصوص ω بر مقدار توان خروجی توربین اثر دارد؛ بنابراین توان تولیدی در شرایط طراحی باید در ضریب اصلاح مربوطه ضرب شود [1].

2-3- مدل اقتصادی چرخه

جهت ایجاد مدل اقتصادی چرخه پیشنهادی باید از یک طرف هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و همچنین بهره‌برداری ارزیابی شود و از سوی دیگر نیز منافع تبدیل توربین گازی به CCHPP از نظر اقتصادی محاسبه شود. با استفاده از اطلاعات مربوط به هزینه و سود و براساس

¹ U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership

3-2-5- ارزش حال خالص (NPV)

این معیار ارزش افزوده ایجاد شده توسط پروژه را بعد از مدت زمان مشخصی که پایان عمر پروژه است محاسبه می‌کند. مزیت این روش این است که ارزش زمانی پول را در نظر می‌گیرد. جهت محاسبه NPV از رابطه (32) استفاده شده است.

$$NPV = -I + \sum_{y=1}^L \frac{CF_y}{(1+r)^y} \quad (32)$$

در رابطه بالا، r نرخ تنزیل و y سال مورد نظر بعد از اجرای پروژه است. زمانی که NPV مثبت باشد، پروژه اقتصادی است و هر چه بیشتر در جهت مثبت از صفر فاصله گیرد سودآوری بیشتر خواهد بود. در صورتی که NPV منفی باشد، پروژه اقتصادی نیست.

3-2-6- نرخ بازگشت داخلی (IRR)

این معیار میزان ریسک سرمایه‌گذاری را مشخص می‌کند. در این روش نرخ تنزیلی محاسبه می‌شود که اگر پروژه براساس آن اجرا شود، مقدار ارزش افزوده صفر خواهد شد. مقدار IRR از رابطه (33) محاسبه می‌شود.

$$NPV|_{IRR} = -I + \sum_{y=1}^L \frac{CF_y}{(1+IRR)^y} = 0 \quad (33)$$

در صورتی که مقدار IRR کمتر از مقدار r باشد به معنی سرمایه‌گذاری پر ریسک و زیان‌آور و در صورتی IRR بزرگ‌تر از r باشد به معنی سرمایه‌گذاری مطمئن است. هر چه IRR بیشتر از r بزرگ‌تر باشد ریسک سرمایه‌گذاری کمتر خواهد بود. در زمانی که احتمال وقوع اقتصادی رکودی و تورمی وجود داشته باشد، IRR باید بسیار بزرگ‌تر از r محاسبه شود تا سودآور بودن سرمایه‌گذاری تضمین شود. سرمایه‌گذاری در شرایط $IRR = r$ توصیه نمی‌شود.

3-3- مدل زیست‌محیطی چرخه

در این تحقیق میزان کاهش تولید CO_2 ، CO ، NO_x به‌عنوان معیارهای سنجش تأثیر سیستم CCHPP استفاده شده است. از آنجایی که معمولاً مشخصه تولید آلودگی هوا i به‌صورت kg/MWh در گزارش‌های مربوطه ارائه می‌شود؛ بنابراین جهت محاسبه میزان تولید سالیانه آلودگی ناشی از تولید $x(MWh)$ انرژی گرمایشی، سرمایشی یا الکتریکی از رابطه (34) استفاده شده است.

$$Em_x = \sum_{t=1}^Y (x \cdot i)_t \quad (34)$$

مشخصه‌های تولید گازهای آلاینده در تولید گرما و سرما برحسب kg/MWh به‌صورت رابطه (35) است [18].

$$i_{CO_2,C} = \frac{0.1274}{COP_{abc}}, i_{CO_2,H} = 0.1274, i_{CO_2,C} = \frac{182.04}{COP_{abc}}, \\ i_{CO_2,H} = 182.04, i_{NO_x,C} = \frac{0.1532}{COP_{abc}}, i_{NO_x,H} = 0.1532 \quad (35)$$

4-3- الگوریتم مدل‌سازی

جهت انجام مدل‌سازی و استخراج نتایج اقدامات زیر باید به ترتیب انجام گیرد:

- 1- استخراج اطلاعات از دفترچه‌های فنی و اندازه‌گیری داده‌های فنی از سایت
- 2- محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی نامعین 3- محاسبه مشخصه‌های انرژی سیستم از جمله برق، گرما و سرمای تولیدی 4- اعتبارسنجی و اطمینان از نتایج محاسبه شده 5- محاسبه مشخصه‌های ترمودینامیکی مانند بازدهی، میزان کاهش مصرف سوخت و... 6- محاسبه میزان هزینه تجهیزات، سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری 7- محاسبه میزان درآمدهای ناشی از

تجهیزات برقی، سیستم سوخت، واحد HRSG، CEMS¹، SCR²، ساختمان‌سازی، نصب، مدیریت پروژه، حمل و نقل، تأمین مالی پروژه و هزینه‌های توسعه و احتمالی است.

3-2-2- هزینه تعمیر و نگهداری ($I_{O\&M}$)

پس از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری آشکارترین بعد اقتصادی یک سیستم CCHP است، زیرا باید گاهی هزینه‌های سرویس و تعمیرات جزئی و کلی را پرداخت کرد. این معیار هم مانند I به تنهایی نمی‌تواند سودآور بودن و یا ریسک سرمایه‌گذاری را مشخص کند. استفاده از محرک اصلی که تعمیرات و نگهداری کمتری داشته باشد، در کاهش این هزینه‌ها نقش مؤثری دارد.

براساس داده‌های موجود در منبع [18] رابطه (29) جهت محاسبه مشخصه هزینه تعمیر و نگهداری تخمین زده شده است.

$$i_{O\&M} \left(\frac{\$}{kWh} \right) = 4 \times 10^{-12} E_{nom}^2 - 3 \times 10^{-7} E_{nom} + 0.014 \quad (29)$$

3-2-3- جریان نقدینگی (CF)

جریان نقدینگی در واقع حاصل جمع هزینه‌ها و سودهای جاری ناشی از عملکرد و بهره‌برداری سیستم CCHP است. در مورد سیستم CCHP مورد نظر این تحقیق هزینه‌های جاری شامل هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه سوخت است. سودهای ناشی از CCHP شامل عدم پرداخت هزینه انرژی جهت تولید گرما و سرما (صرفه‌جویی در مصرف سوخت) و همچنین عدم پرداخت هزینه بابت برق تولیدی که مصرف می‌شود. جریان نقدینگی باید مثبت باشد. در صورت منفی بودن این پارامتر، پروژه تحت هیچ شرایطی سودآور نخواهد بود. مقدار جریان نقدینگی در هر سه حالت مدل‌سازی به‌صورت رابطه (30) تعریف شده است.

$$CF_{GT,ONLY}(\$) = \sum_{t=1}^Y \{E_{produced}(Tariff_E - \alpha \cdot i_{O\&M}) - Tariff_F \cdot F_{GT,t}\} \\ CF_{CCHP}(\$) = \sum_{t=1}^Y \{E_{produced}(Tariff_E - i_{O\&M}) - Tariff_F \cdot (F_{saving,t} - F_{GT,t})\} \\ CF_{CCHP,ILAM}(\$) = \sum_{t=1}^Y \{Tariff_F \cdot F_{saving,t} - (1 - \alpha) E_{produced} \cdot i_{O\&M}\} \quad (30)$$

که α درصدی از هزینه تعمیرات کل که مربوط به توربین گازی به تنهایی است.

4-2-2- دوره بازگشت سرمایه (PB)

این معیار، مدت زمان برگشت اصل سرمایه (بدون در نظر گرفتن ارزش زمانی پول) را به سرمایه‌گذار محاسبه می‌کند. دوره بازگشت سرمایه به‌عنوان یک معیار برای ارزیابی اولیه مناسب بوده، از لحاظ اهمیت قوی‌تر از معیارهای I و $I_{O\&M}$ و ضعیف‌تر از معیارهای ارزش افزوده و ریسک سرمایه‌گذاری است. دوره بازگشت سرمایه با تقسیم I در هر حالت مدل‌سازی بر درآمد خالص سالیانه در همان حالت به‌صورت رابطه (31) قابل محاسبه است.

$$PB = \frac{I}{CF} \quad (31)$$

¹ Continuous Emissions Monitoring Systems

² Selective Catalytic Reduction

Table 1. Magnitude of simulation constant parameters

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
15	$T_{amb}(^{\circ}C)$	85486.4	$E_{produced, yearly}$
2000	$h_{altitude}(m)$	1000	$Tariff_{NG}$
0.95	η_{gen}	10	ir (%)
1	η_c	35000	USD (Rials/\$)
0.97	η_{cc}	20	L (years)
48843.67	$LHV_{NG}(kJ/kg)$	5	$\Delta T_{SH}(^{\circ}C)$
1.25	COP_{abc}	60	ϕ (%)
100	$T_9(^{\circ}C)$	6.32	r_p
0.85	η_{HRSG}	282	$T_2(^{\circ}C)$
0.9	$\eta_{abc, gen}$	0.85	$\eta_{heating}$
505	$P_6(kPa)$	0.85	$\eta_{process}$
320.5	24:00-08:00	کم باری	$Tariff_{E, avg}$
641	8:00-20:00	بار متوسط	
1282	20:00-24:00	پر باری	

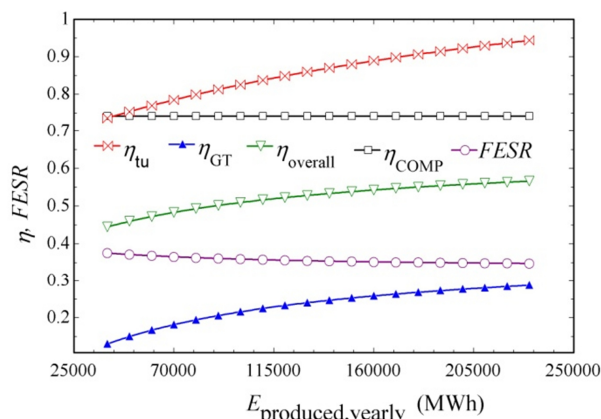


Fig.3 Impact of yearly total electricity production on efficiency and fuel saving

شکل 3 اثر کل برق تولیدی سالیانه بر بازدهی و کاهش مصرف سوخت

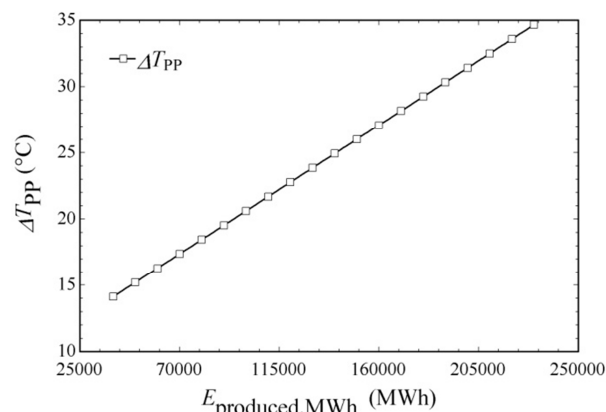


Fig.4 Impact of yearly total electricity production on pinch point temperature difference

شکل 4 اثر کل برق تولیدی سالیانه بر اختلاف دمای پینچ HRSG

یکی از مهم‌ترین اثرات ایجاد CCHPP در شرکت‌های نفت و گاز کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی است. نتایج در شکل 5 نشان می‌دهند که پتانسیل کاهش گاز گلخانه‌ای CO_2 از حدود 25000 تن در سال تا حدود 57000 تن در سال است. مونواکسید کربن از حدود 12 تا 40 تن در سال و همچنین NO_x نیز از حدود 21 تا 48 تن در سال کاهش خواهد یافت.

کاهش مصرف سوخت و یا فروش برق 8- محاسبه مشخصه‌های اقتصادی 9- محاسبه میزان کاهش تولید آلاینده‌ها

4- بحث و بررسی نتایج

1-4- اعتبارسنجی

میزان توان خروجی و سایر پارامترهای ترمودینامیکی که در مدل‌سازی محاسبه شده‌اند با توربین موجود در پالایشگاه یکسان است؛ بنابراین چون چرخه توربین مهم‌ترین قسمت چرخه است از نظر ترمودینامیکی و عملکردی اطمینان کامل حاصل شده است.

2-4- بررسی نتایج

پس از استخراج مدل ریاضی چرخه CCHP در قسمت پیشین و نوشتن کد رایانه‌ای در محیط برنامه EES نتایج مربوط به ارزیابی‌های مختلف به‌دست آمدند. در این ارزیابی‌ها تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف از جمله مقدار ظرفیت توربین گازی و برق تولیدی توربین گاز در طول سال برحسب MWh ($E_{produced, yearly}$)، تعرفه گاز طبیعی ($Tariff_{NG}$)، تعرفه متوسط برق ($Tariff_{E, avg}$)، نرخ بهره (ir) و ارزش دلار به ریال (USD) بر مشخصه‌های ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارزیابی شده است.

در این ارزیابی‌ها ابتدا مقادیر پارامترهای طراحی در حالت واقعی در نظر گرفته شده‌اند، سپس با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، حساسیت مشخصه‌های اصلی نسبت به این تغییرات بررسی شده است. مقادیر واقعی و ثابت پارامترهای مهم طراحی در جدول 1 آمده است.

شکل 3 نشان‌دهنده تأثیر $E_{produced, yearly}$ بر بازدهی کلی چرخه ($\eta_{overall}$)، بازدهی چرخه توربین گازی (η_{GT})، بازدهی آدیاباتیک توربین (η_{tu})، بازدهی آدیاباتیک کمپرسور (η_{comp}) و همچنین میزان کاهش سالیانه مصرف انرژی سوخت ($FESR$) به واسطه استفاده از توربین به‌صورت CCHP است. همان‌گونه که دیده می‌شود، به دلیل کم بودن بازدهی چرخه توربین گازی در بارهای جزئی، پتانسیل بازیافت گرما در این شرایط بیشتر خواهد بود؛ بنابراین در بارهای کم با استفاده از CCHP کاهش مصرف سوخت بیشتر است.

با افزایش $E_{produced, yearly}$ بازدهی چرخه توربین گازی نیز افزایش می‌یابد و پتانسیل کاهش مصرف سوخت نیز اندکی کم می‌شود و مقدار $FESR$ از حدود 38% به حدود 35% کاهش می‌یابد. بازدهی واحد توربین گازی در کمترین بار حدود 13% است که در همین بار با استفاده از CCHPP بازدهی کلی آن به 44% می‌رسد. در حالت بار کامل نیز بازدهی توربین گازی حدود 29% است که پس از استفاده از بازیافت گرما بازدهی کلی به حدود 57% می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که سیستم CCHPP توانایی افزایش بازدهی در حدود 28-31% را در این واحد توربین گازی دارد.

شکل 4 نشان می‌دهد که در شرایط طراحی انجام شده، که بخار با فشار 505 kPa و دمای $157.2^{\circ}C$ تولید می‌شود، محصولات احتراق نیز با دمای $150^{\circ}C$ سیستم HRSG را ترک می‌کند، با افزایش $E_{produced, yearly}$ مینیمم اختلاف دمای پینچ از حدود $14^{\circ}C$ به $34^{\circ}C$ می‌رسد که از نظر عملی محدوده درست و کاربردی است. البته با کاهش بیشتر دمای گازهای اگزاست امکان کاهش اختلاف دمای پینچ هنوز وجود دارد. مثلاً در دمای $140^{\circ}C$ کمترین اختلاف دمای پینچ به حدود $10^{\circ}C$ خواهد رسید. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که محدوده دمای اگزاست در محدوده $135^{\circ}C$ تا $150^{\circ}C$ کمترین اختلاف دمای پینچ قابل قبولی را ارائه می‌کند.

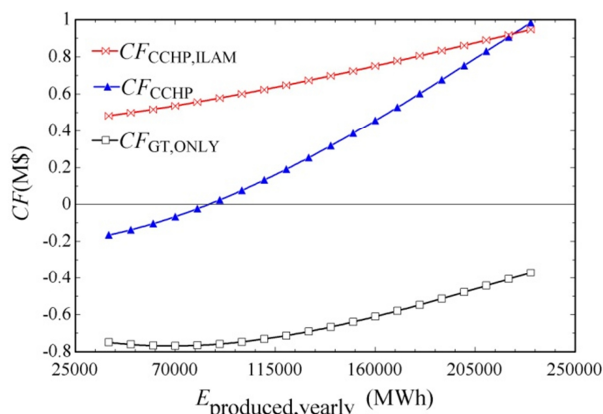


Fig.6 Impact of yearly total electricity production on cash flow

شکل 6 اثر کل برق تولیدی سالیانه بر جریان نقدینگی

جریان مالی مثبت سبب می‌شود که بتوانیم برای یک پروژه دوره بازگشت سرمایه را تعریف کنیم، زیرا دوره بازگشت سرمایه منفی به معنی غیرممکن بودن بازگشت سرمایه است. زمانی که CCHP استفاده نشود، عملاً بازگشت سرمایه قابل تعریف نخواهد بود. چون جریان مالی کلی منفی است. برای یک سیستم CCHP که از فاز صفر احداث شود همان‌گونه که گفته شد جریان مالی کلی در تولید برق بیش از 84000MWh سالیانه مثبت و به تبع آن سرمایه هزینه شده بازگشت‌پذیر خواهد شد. در مورد تبدیل توربین ایلام به CCHP چون جریان مالی همواره مثبت است؛ بنابراین بازگشت سرمایه در این حالت نیز امکان‌پذیر است. دوره بازگشت سرمایه برای یک CCHP که از ابتدا احداث شود و همچنین برای توربین پالایشگاه ایلام که قرار است تبدیل به CCHPP شود در شکل 7 آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در حالت CCHP کمترین دوره بازگشت سرمایه با تعرفه‌های کنونی برق و گاز حدود 41 سال که بیشتر از عمر تجهیزات است، اما در مقایسه به حالت GT, ONLY باز هم بهتر است. توربین گازی ایلام این دوره بازگشت سرمایه با توجه به مقدار توان تولیدی بین 6.6 تا 7.3 سال متغیر است که بسیار قابل قبول است. این معیار نیز تبدیل توربین‌های گازی موجود به CCHPP را با اطمینان توصیه می‌کند.

ارزش افزوده اقتصادی در سه حالت مختلف سرمایه‌گذاری در شکل 8 نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که برای حالت GT, ONLY و CCHP منفی است، اما در حالت GT, ONLY مقدار NPV

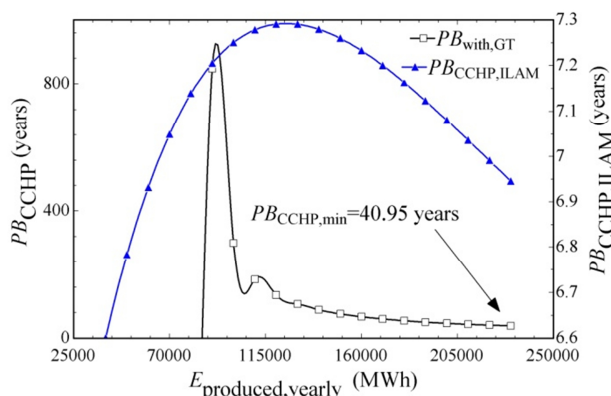


Fig.7 Impact of yearly total electricity production on payback period

شکل 7 اثر کل برق تولیدی سالیانه بر دوره بازگشت سرمایه

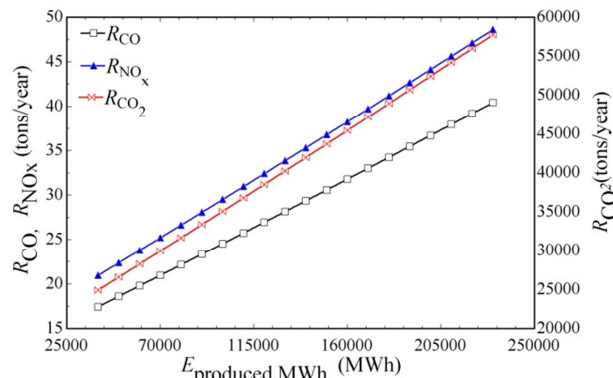


Fig.5 Impact of yearly total electricity production on emission reduction

شکل 5 اثر کل برق تولیدی سالیانه بر میزان کاهش تولید آلاینده

کاهش این آلاینده‌ها باید از سوی دولت مورد حمایت قرار گیرد. در برخی کشورها کاهش تولید آلاینده با امتیازاتی همچون معافیت مالیاتی و وام‌های کم بهره مورد حمایت قرار می‌گیرد. باید جهت تشویق ایجاد CCHP و همچنین کاهش آلاینده‌ها مسئولین به این نکته توجه بیشتری داشته باشند. در بحث‌های اقتصادی باید توجه کرد که قیمت واحد توربین گازی براساس مقدار توان تولیدی آن است. آنالیزها نشان می‌دهد که در تمام ظرفیت‌ها عمده هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به هزینه توربین گازی است؛ بنابراین در جاهایی که از پیش توربین خریداری شده هزینه‌های احداث CCHP نسبت به هزینه توربین بسیار کمتر است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که هزینه توربین بیش از 80% کل هزینه CCHP است.

احداث واحد CCHP سبب می‌شود که جریان‌های مالی دگرگون شود، به‌گونه‌ای که یک جریان مالی همیشه منفی می‌تواند تبدیل به یک جریان مالی مثبت شود. این موضوع در شکل 6 به روشنی نشان داده شده است. این نتیجه اثبات می‌کند که با تعرفه‌های کنونی برق و گاز طبیعی در صورتی که مقدار برق تولیدی سالیانه کمتر از 84000MWh باشد جریان مالی کلی برای حالت CCHP که بخواهیم آن را از فاز صفر آغاز کنیم (CF_{CCHP})، منفی خواهد شد و پروژه در عمل زیان‌ده خواهد بود. با افزایش تولید برق و استفاده از توربین با ظرفیت بالاتر (یا تولید بیشتر برق و استفاده از ظرفیت توربین گازی در بار کامل)، مقدار جریان مالی کلی پروژه می‌تواند تا مثبت یک میلیون دلار در سال افزایش یابد. جریان مالی مثبت برای شروع به احداث یک پروژه بسیار مهم و ضروری است. نکته دیگری که حائز اهمیت است این است که جریان مالی پروژه بدون بازیافت گرما که $CF_{GT,ONLY}$ است همواره منفی است و در زمانی که تولید در حدود 70000MWh در سال باشد کمترین مقدار خود را دارد.

حالت سومی که در شکل 6 بررسی شده است جریان مالی برای حالتی مانند پالایشگاه ایلام است که یک توربین موجود در پالایشگاه با انجام تغییراتی تبدیل به CCHPP شود. در این حالت چون هدف محاسبه مشخصه‌های اقتصادی این تبدیل است؛ بنابراین جریان مالی در این حالت فقط شامل هزینه سوخت صرفه‌جویی شده (جریان مثبت مالی) و هزینه تعمیرات قسمت‌های اضافه شده به توربین (جریان مالی منفی) است ($CF_{CCHP,ILAM}$). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود جریان نقدینگی در این حالت همواره مثبت است. مقایسه CF در حالتی که تبدیل به CCHP شود نسبت به حالتی که تبدیل نشود نشان می‌دهد که در هر مقدار تولید برق جریان مالی کلی CCHP ایلام بهتر از جریان مالی بدون CCHP است.

تعرفه متوسط کمتر از 957 Rials/kWh منفی است، اما در حالت CCHP جریان مالی پروژه در تعرفه متوسط کمتر از 673 Rials/kWh منفی است. حالت CCHP در دامنه وسیع‌تری از تعرفه‌ها سبب ایجاد جریان مالی مثبت می‌شود. در هر دو حالت پیشین تعرفه برق هر چه گران‌تر باشد، مقدار جریان مالی بیشتر خواهد شد. برای نمونه جریان مالی در حالت ONLY, GT و CCHP در صورتی که مقدار تعرفه به 2000 Rials/kWh برسد جریان مالی سالانه پروژه 2.53 و 3.32 میلیون دلار خواهد شد. در صورتی که بخواهیم توربین موجود را به CCHP تبدیل کنیم، چون قیمت برق تأثیری در جریان مالی ندارد (در این حالت تعرفه گاز مهم است چون صرفه‌جویی در مصرف سوخت ایجاد می‌شود)؛ بنابراین جریان مالی حالت CCHP, ILAM با ثابت بودن تعرفه برق ثابت می‌ماند و مقدار آن 0.57 میلیون دلار مثبت در سال است، که این امر خبری خوب جهت سرمایه‌گذاری در این زمینه برای توربین‌های موجود است.

همچنین دوره بازگشت سرمایه‌گذاری برای تبدیل واحد توربین گازی پالایشگاه ایلام به CCHP برابر 5.23 سال است که از نظر سرمایه‌گذاری بسیار مطلوب است. دوره بازگشت سرمایه در شرایط یکسان برای احداث یک واحد CCHP از فاز صفر تحت تأثیر تعرفه برق است و در تعرفه Rials/kWh 2000 به کمترین مقدار خود یعنی 6.32 سال می‌رسد (شکل 11). به عبارت دیگر سرمایه‌گذاری از فاز صفر جهت تأسیس CCHP وابسته به تعرفه برق است.

مقدار ارزش افزوده ایجاد شده در هر سه حال مدل‌سازی GT, ONLY,

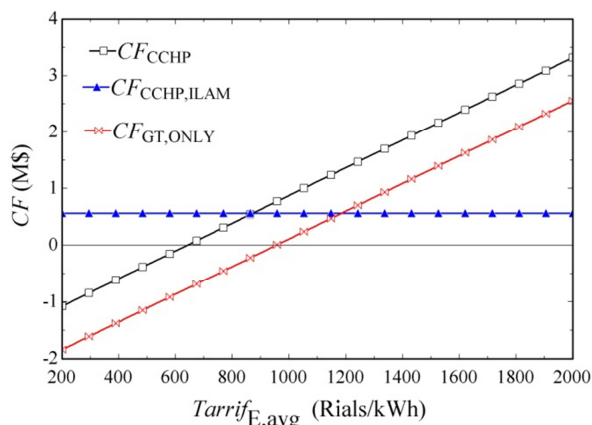


Fig. 10 Impact of mean electricity tariff on the total cash flows

شکل 10 اثر مقدار تعرفه متوسط برق بر جریان‌های مالی کلی

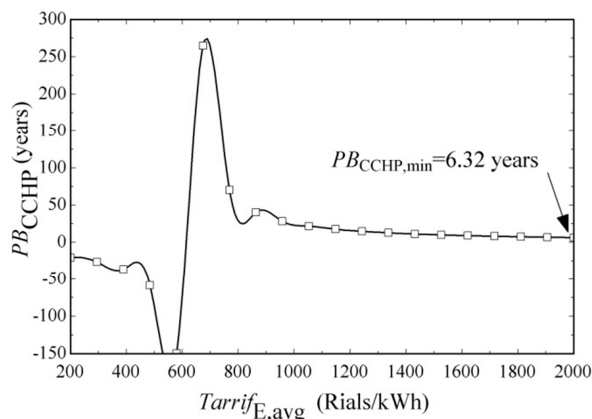


Fig. 11 Impact of mean electricity tariff on the payback period

شکل 11 اثر مقدار تعرفه متوسط برق بر دوره بازگشت سرمایه

منفی‌تر است. از نظر اقتصادی اگرچه تبدیل توربین گازی نو به CCHP سبب نمی‌شود که NPV مثبت شود، اما مقدار آن را افزایش می‌دهد به‌صورتی که مثلاً اختلاف NPV این دو حالت در ظرفیت تولید برق 230000MWh به حدود 15 میلیون دلار در طول 20 سال عمر کاری می‌رسد.

در هر حال تبدیل توربین گازی به CCHP سبب ایجاد ارزش افزوده اقتصادی می‌شود. سرمایه‌گذاری جهت تبدیل توربین گازی موجود در پالایشگاه ایلام به CCHP در هر مقدار تولید توان سبب ایجاد ارزش افزوده می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که ارزش افزوده اقتصادی (NPV) این تبدیل در تولید برق حدود 90000MWh کمترین مقدار (اما مثبت) است و با افزایش تولید برق NPV افزوده می‌شود تا به حدود 1.5 میلیون دلار پس از بیست سال از زمان سرمایه‌گذاری رسد.

ارزیابی مربوط به نرخ بازگشت داخلی CCHP, ILAM نیز نشان می‌دهد (شکل 9) که مقدار IRR در تمام بارهای توربین بیشتر از 10% نرخ تنزیل بازار کنونی ایران است و مقدار آن تا 13% در بار کامل و تا 14% در کمترین بار می‌رسد. کمترین مقدار IRR که ریسک سرمایه‌گذاری در آن بالاتر است در حالتی است که توربین سالانه حدود 125000 MWh برق تولید کند.

از دیگر پارامترهایی که بر شاخص‌های اقتصادی سیستم‌های CCHP تأثیر اساسی دارد تعرفه انرژی الکتریکی و سوخت است.

شکل 10 تأثیر تغییر تعرفه متوسط برق بر جریان مالی پروژه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که جریان مالی پروژه در حالت ONLY, GT در

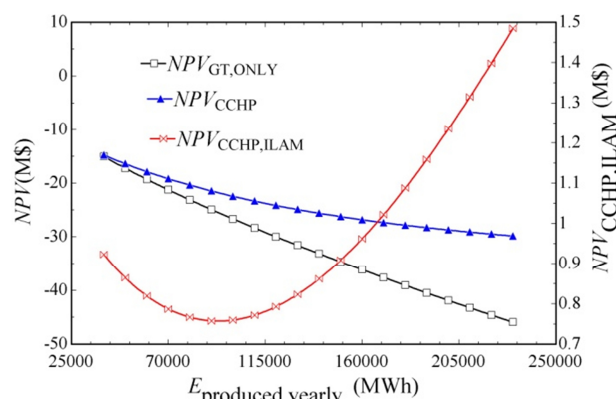


Fig.8 Impact of yearly total electricity production on net present value

شکل 8 اثر کل برق تولیدی سالانه بر ارزش حال خالص

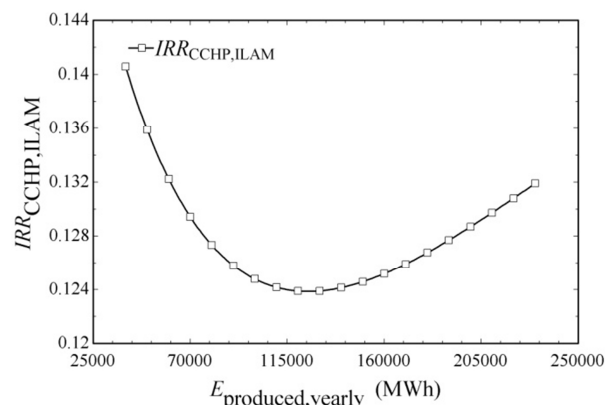


Fig.9 Impact of yearly total electricity production on internal rate of return

شکل 9 اثر کل برق تولیدی سالانه بر نرخ بازگشت داخلی

ILAM, CCHP و CCHP در شکل 12 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تبدیل توربین پالایشگاه ایلام به CCHP در تمام تعرفه‌های برق ارزش افزوده مثبت معادل 1.87 میلیون دلار ایجاد می‌کند، در حالی که ارزش افزوده ONLY, GT همواره منفی بوده و در هیچ تعرفه‌ای مثبت نخواهد شد. در مورد حالت CCHP نیز مقدار ارزش حال خالص مثبت مشروط به قیمت تعرفه برق است و در تعرفه‌های بیشتر از 1621 Rials/kWh مقدار ارزش حال خالص مثبت خواهد شد. نکته مهم‌تر این است که با توجه به این نمودار CCHP را چه از فاز صفر بسازیم، یا آن را با تبدیل یک توربین موجود ایجاد کنیم، در هر حال بهتر از این است که توربین را فقط برای تولید برق استفاده کنیم.

نتایج نشان می‌دهد که نرخ بازگشت داخلی بیش از نرخ تنزیل کنونی (10%) در دو حالت CCHP و ILAM امکان‌پذیر است. در حالت CCHP در تعرفه برق بیشتر از 1716 Rials/kWh نرخ بازگشت داخلی بیشتر از 10% می‌شود. در حالت ILAM, CCHP مقدار نرخ بازگشت داخلی 18% است. در شرایط کنونی که نرخ تنزیل 10% است به اندازه 8% حاشیه اطمینان برای سرمایه‌گذاری سودآور وجود دارد. در مقایسه ریسک سرمایه‌گذاری در شرایط موجود کنونی حالت ILAM, CCHP نسبت دو حالت CCHP و ONLY, GT ریسک بسیار کمتری دارد.

شکل 13 نشان می‌دهد که تأثیر تعرفه گاز بر سرمایه‌گذاری در حالت ILAM, CCHP نسبت به دو حالت دیگر CCHP و ONLY, GT کاملاً متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که در تعرفه‌های بسیار پایین گاز CF برای حالت ILAM, CCHP منفی بوده و در تعرفه‌های بزرگ‌تر از 255 Rials/m^3 مقدار CF مثبت می‌شود.

گران‌تر شدن قیمت سوخت تبدیل توربین گازی به CCHP را توجیه‌پذیرتر می‌کند. در مورد دو حالت ONLY, GT و CCHP گران‌تر شدن هزینه سوخت سبب کاهش CF می‌شود. در مورد حالت CCHP چنانچه تعرفه سوخت بیشتر از 1005 Rials/m^3 شود مقدار CF منفی خواهد شد که اصلاً به سود سرمایه‌گذار نخواهد بود. این نتیجه در مقایسه با نتایج حاصل از شکل 10 نشان می‌دهد که افزایش قیمت برق و گاز تأثیر معکوس بر CF در حالت CCHP دارند.

در حالت CCHP کمترین دوره بازگشت سرمایه در کمترین تعرفه سوخت یعنی 200 Rials/m^3 اتفاق می‌افتد که برابر 47 سال است که از نظر سرمایه‌گذاری در شرایط کنونی منطقی نیست، در حالی که در حالت

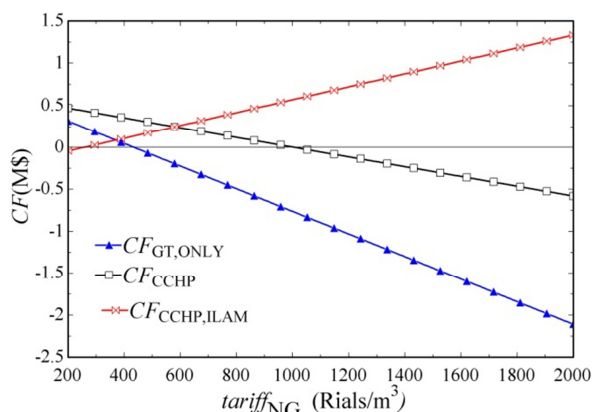


Fig.13 Impact of mean electricity tariff on the cash flow

شکل 13 اثر مقدار تعرفه متوسط برق بر جریان‌های مالی کلی

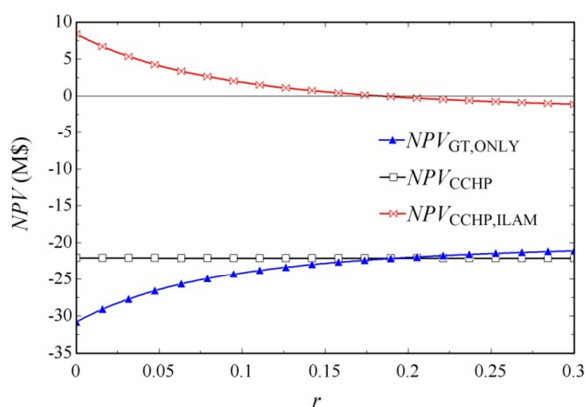


Fig.14 Impact of interest rate on the net present value

شکل 14 اثر نرخ تنزیل بر ارزش حال خالص

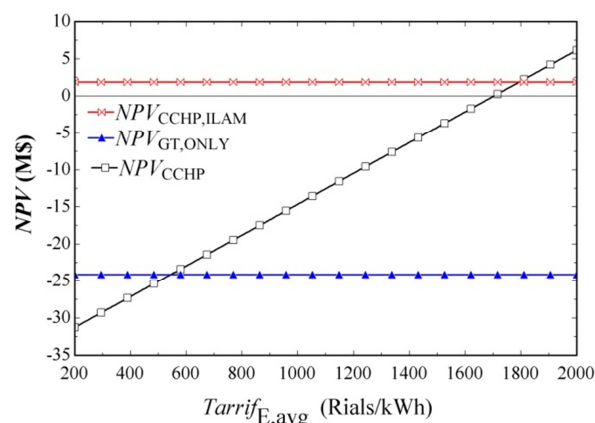


Fig.12 Impact of mean electricity tariff on the net present value

شکل 12 اثر مقدار تعرفه متوسط برق بر ارزش حال خالص

تولید هم زمان سرما، گرما، توان و فرآیند	CCHPP
نسبت صرفه جویی در مصرف سوخت (%)	FESR
الکتریسیته (kW)	E
سوخت (kW)	F
مشخصه اقتصادی تجهیزات (\$/kW)	I
هزینه سرمایه گذاری (M\$)	I
فشار (kPa)	P
دوره بازگشت سرمایه (years)	PB
تعرفه (Rials/m ³) یا (Rials/kWh)	Tariff
دما (°C)	T

علائم یونانی

بازدهی η

زیر نویس ها

چیلر جذبی	abc
محیط	amb
اتمسفر	atm
سرمایش	c
محفظه احتراق	cc
احتراق	com
کمپرسور	comp
اگزاست	ex
ژنراتور	gen
توربین گاز	GT
گرمایش	h
تعمیرات	m
خالص	net
اسمی	nom
باز یافت شده	rec
فوق داغ	SH
توربین	tu

8- مراجع

- [1] International Energy Outlook (IEO) 2016 and EIA, analysis of the impacts of the clean power plan (May 2015). <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=527&t=1>, Accessed on 27 January 2016.
- [2] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Combined cooling, heating and power, decision-making, design and optimization, chapters one and two, first edition, Elsevier, 2014.
- [3] D.W.Wu, R. Z.Wang, Combined cooling, heating and power: A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32, NO. 5-6, pp. 459-495, 2006.
- [4] M. Ebrahimi, I. Moradpoor, Combined solid oxide fuel cell, micro-gas turbine and Organic Rankine Cycle for power generation (SOFC-MGT-ORC), *Energy Conversion and Management*, Vol. 116, pp.120-133, 2016.
- [5] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Prime mover selection for a residential micro-CCHP by using two multi-criteria decision-making methods, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 322-331, 2012.
- [6] Y.-Y. Jing, H. Bai, J.-J. Wang, A fuzzy multi-criteria decision-making model for CCHP systems driven by different energy sources, *Energy Policy*, Vol. 42, pp. 286-296, 2012.
- [7] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, X.-T. Zhang, G.-H. Shi, Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach, *Energy*, Vol. 33, NO.9, pp. 1427-1437, 2008.
- [8] M. Ebrahimi, K. Ahookhosh, Integrated energy-exergy optimization of a novel micro-CCHP Cycle based on MGT-ORC and steam ejector refrigerator,

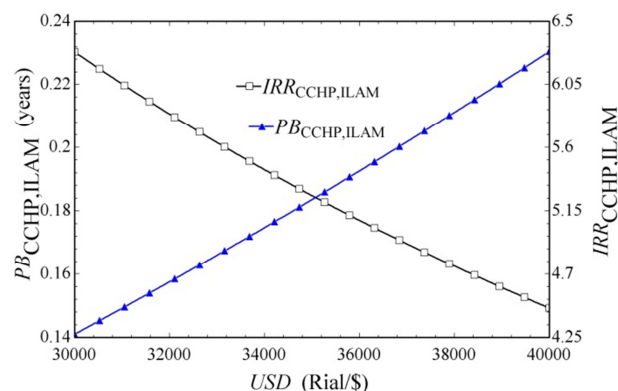


Fig.15 Impact of \$ price on payback period and internal rate of return

شکل 15 اثر ارزش دلار بر دوره بازگشت سرمایه و نرخ بازگشت داخلی

افزایش قیمت دلار بر ارزش حال خالص CCHP, ILAM تأثیر کاهنده دارد، اما خوش بختانه تا قیمت دلار 40000 ریال مقدار NPV کماکان مثبت باقی مانده است. مثبت باقی ماندن NPV سبب کاهش ریسک سرمایه گذاری در نوسانات قیمت دلار می شود، این موضوع در شکل 15 نیز نشان داده شده است؛ به صورتی که در تمام قیمت های دلار در نظر گرفته شده مقدار نرخ بازگشت داخلی همواره بیشتر از 10% است. نتیجه دیگر این موضوع دوره بازگشت سرمایه است که در دلار 40000 ریالی کمتر از 6.5 سال است.

5- نتیجه گیری

مدل سازی ارزیابی ترمودینامیکی، اقتصادی، و زیست محیطی برای بررسی پتانسیل توربین گازی پالایشگاه ایلام در تبدیل به CCHP انجام شده و مهم ترین نتایج حاصل عبارت از تبدیل توربین گازی واحد پالایشگاه ایلام از نظر ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست محیطی به صرفه است.

بازدهی کلی چرخه CCHP پالایشگاه ایلام حدود 50% و کاهش مصرف سوخت حدود 35% است. پتانسیل کاهش گاز گلخانه ای CO_2 از حدود 25000 تن در سال تا حدود 57000 تن در سال است. همچنین گازهای سمی CO و NO نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته اند. مونواکسید کربن از حدود 12 تا 40 تن در سال کاهش می یابد و همچنین NO_x نیز از حدود 21 تا 48 تن در سال کاهش خواهد یافت. با افزایش تولید برق ارزش حال خالص تبدیل توربین پالایشگاه ایلام تا پایان عمر کاری به حدود 1.5 میلیون دلار قابل افزایش است. دوره بازگشت سرمایه گذاری برای تبدیل واحد توربین گازی پالایشگاه ایلام به CCHPP برابر 5.23 سال است که از نظر سرمایه گذاری بسیار مطلوب است. مقدار نرخ بازگشت داخلی 18% است. در شرایط کنونی که نرخ تنزیل 10% است به اندازه 8% حاشیه اطمینان برای سرمایه گذاری سودآور وجود دارد. هرچه تعرفه گاز افزایش یابد ریسک سرمایه گذاری کاهش خواهد یافت، گران تر شدن قیمت سوخت تبدیل توربین گازی به CCHP را توجیه پذیرتر می کند. افزایش قیمت دلار بر ارزش حال خالص تأثیر کاهنده دارد.

6- تقدیر و تشکر

نویسنده مقاله از مسئولین محترم شرکت پالایش گاز ایلام برای حمایت از این تحقیق به عنوان طرح اینترنشیپ کمال سپاس و قدردانی را دارد.

7- فهرست علائم

CCHP تولید هم زمان سرما، گرما و توان

- Buildings*, Vol. 110, pp. 135–148, 2016.
- [14] C. Yang, Z. Huang, Z. Yang, X. Ma, Analytical Off-Design Characteristics Of Gas Turbine-Based CCHP System, *Energy Procedia*, Vol. 75 pp.1126 – 1131, 2015.
- [15] F. He, Y. Xu, X. Zhang, C. Liu, H. Chen, Hybrid CCHP system combined with compressed air energy storage, *Energy Research*, Vol. 39, NO.13, pp. 1807–1818, 2015.
- [16] GEPS oil & Gas, Nuovo Pignone, Gas turbine MS 5001 PA, Instruction, operation and maintenance manual, volume x-TOME 3, Reference drawing and special Tools.
- [17] ASHRAE, 2002, refrigeration, Chapter 41, absorption cooling, heating, and Refrigeration equipment.
- [18] EPA CHP, Catalogue of CHP technologies, U.S. enviromental protection agency combined heat and power partnership, Mrach 2015.
- Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 1206–1218, 2016.
- [9] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover of a residential micro-CCHP system by multi-criteria sizing method for different climates, *Energy*, Vol. 54, pp. 291-301, 2013.
- [10] M. Maerefat, P. Shafie, Multi-criteria evaluation of CCHP system under different operating strategies for an office building in Tehran using AHP method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 37-48, 2014 (in Persian فارسی).
- [11] <http://www.tavanir.org.ir>, Accessed on 27 January 2016.
- [12] Y. Li, R. Hu, Exergy-analysis based comparative study of absorption refrigeration and electric compression refrigeration in CCHP systems, *Applied Thermal engineering*, Vol. 93, pp. 1228–1237, 2016.
- [13] M. Ameri, Z. Besharati, Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex, *Energy and*