

# ایجاد روابط کاربردی جهت تحلیل انرژی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرمای شرکت پالایش نفت بندرعباس

**محمد مزیدی شرف‌آبادی\*** استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران، mazidim@ripi.ir  
**حسین قرایی** کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، پردیس فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ariangharaei@yahoo.com  
**شهرام غنی زاده** رئیس واحد پژوهش و فناوری، شرکت پالایش نفت بندرعباس، بندرعباس، ایران، ghanizadeh@baorco.ir  
**محسن کارگر بیده** رئیس واحد انرژی، شرکت پالایش نفت بندرعباس، بندرعباس، ایران، kargarbideh@baorco.ir

## چکیده

در این مقاله به تحلیل انرژی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرمای شرکت پالایش نفت بندرعباس پرداخته شده است. به منظور بررسی اهمیت متغیرهای مؤثر بر عملکرد این واحدها، تحلیل حساسیت برای هر یک از متغیرها انجام شده است. در این تحقیق، جهت سهولت در نمایش لحظه‌ای بازده انرژی در سامانه پایش توزیع شده موجود در اتاق‌های کنترل روابط محاسبه این متغیر ساده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در حالت طراحی، واحدهای تولید هم‌زمان A، B، C، D و E به ترتیب دارای بازده انرژی ۸۷/۳، ۸۷/۳، ۸۳، ۷۵/۷ و ۸۳ درصد می‌باشند. همچنین، در حالت عملیاتی بازده انرژی این واحدها به ترتیب ۴۳/۶۷، ۵۷/۳، ۵۷/۱۷، ۶۸/۹۴ و ۷۰/۲۷ درصد است. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد که انرژی حرارتی سوخت ورودی با ۹/۷۴ درصد، دبی بخار خروجی از سامانه با زیاده حرارتی با ۶/۰۷ درصد و دمای آب ورودی با ۴/۳ درصد بیشترین تأثیر را بر روی بازده دارند.

**واژه‌های کلیدی:** سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما، تحلیل حساسیت، بازده حرارتی، ساده‌سازی روابط، بازیابی انرژی، پالایشگاه نفت.

## Developing of Practical Relations for Energy Analysis of Combined Heat and Power Generation Systems in Bandar-Abbas Oil Refinery Company

**M. Mazidi Sharfabadi**

**H. Gharaei**

**Sh. Ghanizadeh**

**M. Kargarbideh**

Development and Optimization of Energy Technologies Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Bandar-Abbas Oil Refinery Company, Bandar-Abbas, Iran

Bandar-Abbas Oil Refinery Company, Bandar-Abbas, Iran

### Abstract

In this paper, the energy analysis of Combined Heat and Power (CHP) generation systems of Bandar Abbas Oil Refining Company is performed. In order to investigate the importance of variables affecting the performance of CHP units, sensitivity analysis has been carried out for each of the variables. In this study, in order to facilitate the display of real-time energy efficiency on Distributed Control System (DCS) in the control rooms, the equations for calculation of efficiency have been simplified. The results show that in the case of using design data, the CHP units A, B, C, D and E have energy efficiency of 87.3, 87.3, 87.3, 83 and 75.7%, respectively. Furthermore, when operational data is used, the energy efficiency of these units is calculated as 43.67, 57.3, 57.17, 68.94 and 70.27%, respectively. The results of sensitivity analysis also show that the lower heating value of fuel with 9.74%, the steam flow of the heat recovery steam generator with 6.07% and the inlet water temperature with 4.3% have the greatest effect on efficiency.

**Keywords:** Combined Heat and Power Generation, Sensitivity Analysis, Thermal Efficiency, Simplification of Equations, Energy Recovery, Oil Refinery.

### ۱- مقدمه

انرژی مفید تبدیل می‌شود [۱]. این میزان در نیروگاه‌های چرخه ترکیبی به ۶۰-۸۰ درصد می‌رسد [۲]. البته نباید تلفات زیاد انرژی در خطوط انتقال نیرو و مصارف داخلی نیروگاه‌ها را نادیده گرفت. در ایران سامانه‌های نو تأسیس تولید هم‌زمان توان و گرما حدود ۵۸-۶۰ درصد از انرژی ورودی به انرژی مفید تبدیل می‌شود، درحالی‌که بازدهی سامانه‌های حرارتی موجود در کشور تنها ۲۸ درصد است. در نیروگاه‌ها در صورت استفاده از پیل سوختی، بازده تا نزدیکی ۹۰ درصد هم می‌رسد [۲].

سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما<sup>۱</sup> سامانه‌هایی هستند که در آن‌ها به‌منظور افزایش بازده و استفاده بهینه از انرژی، تلاش می‌شود تا توان و گرمای موردنیاز فرآیند، به‌طور هم‌زمان تولید گردند و از خروجی سامانه تولید توان / گرما جهت تولید گرما / توان استفاده گردد که باعث افزایش بازده می‌شود.

در این سامانه‌ها، بازده انرژی افزایش قابل‌توجهی می‌یابد. به‌طور کلی در نیروگاه‌های حرارتی، ۳۵-۴۰ درصد از انرژی ورودی به

همچنین از نظر فناوری محرک تولیدکننده انرژی الکتریکی می-

توان به فناوری‌هایی شامل توربین بخار، توربین گاز، میکرو توربین، موتورهای رفت و برگشتی پیستونی و پیل سوختی و ... اشاره کرد.

<sup>۱</sup> Combined Heat and Power (CHP) generation systems

همچنین، در بین رویکردهای دستیابی به اهداف اولیه مرتبط با بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای، تولید ترکیبی توان و گرما استرژژی عملی است که توسط اتحادیه اروپا تأیید و حمایت شده است [۳]. همچنین، در سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما، کارایی واقعی به شدت وابسته به شرایط اقتصادی-عملیاتی است که سامانه در آن در حال کار است [۴]. تاکنون مطالعات متعددی پیرامون ارزیابی مزایا و معایب این سامانه‌ها از نقطه نظر انرژی، محیط زیست، اقتصاد و کاربردهای مختلف انجام گرفته‌اند [۵]-[۶]. در همه این مطالعات، بررسی تجربی، مهم‌ترین راه برای بررسی عوامل تأثیرگذار روی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما است. یکی از اولین مطالعات آزمایشی روی سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما در دانشگاه مرلند صورت گرفت. پوپوویچ و همکاران [۷] یک سامانه یکپارچه شامل چیلر جذبی و یک رطوبت‌گیر خشک‌کن مایع را با دو سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما که توسط یک میکرو توربین و یک موتور گازسوز کار می‌کنند را بررسی کردند. سان [۸] نیز سامانه‌ای یکپارچه متشکل از یک چیلر جذبی و یک میدل گرمایی را مطالعه کرد.

به منظور بهبود عملکرد، بسیاری از مطالعات [۹]-[۱۱] به بررسی استفاده از چیلر جذبی به همراه یک سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما که توسط یک موتور استرلینگ، موتور گازسوز یا میکرو توربین به حرکت درمی‌آید پرداخته‌اند. در تمامی این مطالعات، نتایج نشان می‌دهند که عملکرد سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما می‌تواند با بازیابی حرارت بهبود یابد. در چین، فناوری هم‌زمان توان و گرما هنوز هم یک فن‌آوری تبدیل انرژی در حال توسعه است. نمونه‌های اجرا شده آن را می‌توان در بیمارستان مرکزی شانگهای، هوانگپو<sup>۱</sup>، فرودگاه بین‌المللی پودونگ<sup>۲</sup>، ساختمان شرکت گاز پکن و دانشگاه سینگهوا<sup>۳</sup> یافت. در مطالعه‌ای گام‌بینی و همکاران [۱۲] راه‌حل‌های مختلف برای به‌کارگیری تولید هم‌زمان توان و گرما در صنعت کاغذ را مقایسه می‌کنند. در بین تمام فرآیندهای صنعتی، به نظر می‌رسد این صنعت بهترین گزینه برای کاربرد تولید هم‌زمان توان و گرما باشد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر [۱۳]، ارزیابی کیفی کاربردهای مختلف تولید هم‌زمان توان و گرما جهت گرمایش منطقه‌ای و صنعتی بررسی شده است. در این کار، یکپارچه‌سازی سامانه‌های زباله‌سوز و تولید هم‌زمان توان و گرما با توجه به بازارهای هدف مطالعه شده است.

در مطالعات جدیدتر مربوط به سامانه‌های تولید هم‌زمان، امکان‌سنجی استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر جایگزین و یا سوخت‌های گازی جایگزین بررسی شده‌اند. در مطالعه‌ای، پوستارو و همکاران [۱۴] نشان دادند کاهش چشمگیر هزینه سوخت الکتریکی تجدیدپذیر موجب جایگزینی این نوع سوخت با گاز طبیعی می‌شود. همچنین کاهش هزینه برق تولیدی و به‌صرفه نبودن سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما از دیگر نتایج این مطالعه است. لیو و همکاران [۱۵]، فعالیت یک سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما با تولید دو سطح فشار بخار را امکان‌سنجی کرده‌اند. در این مطالعه، روشی برای نشان

دادن دامنه عملیاتی این واحد تولید هم‌زمان با یک حوزه عملیاتی سه‌بعدی و با شش سطح مرزی پیشنهاد و محدودیت‌های مرزی عملیات واحد استحصال بخار با دو سطح فشار شرح داده شده است. در مطالعه‌ای عملیاتی توسط میشر و تریمباکه [۱۶]، یک سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما میکرو برای گرمایش فضای پناهگاه‌های نظامی در مناطق با ارتفاع بالا از دیدگاه انرژی، آگزرژی، محیط زیستی و اقتصادی، بررسی شده است. این مطالعه در مورد طراحی سامانه گرمایش تابشی برای پناهگاه‌های نظامی بحث می‌کند. در تحقیقی دیگر که توسط آراکلیان و همکاران [۱۷] صورت گرفته، موضوع کنترل بهینه فعالیت سامانه‌های تولید هم‌زمان بررسی شده است. در این مطالعه امکان به‌کارگیری روش‌های مختلف بهینه‌سازی چندمعیاره برای حل مسأله در حضور تعداد زیادی قیود و شرایط داخلی و خارجی در قالب نابرابری‌ها و معادلات تعادل مطالعه شده است.

سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما شرکت پالایش نفت بندرعباس متشکل از توربین گاز متصل شده به ژنراتور و واحد تولید بخار با بازیابی گرما<sup>۴</sup> می‌باشند؛ یعنی نوع سامانه محرک توربین گاز است. به منظور بررسی عملکرد واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما در این مقاله از استانداردهایی از جمله ASME PTC 22 و ASME PTC 4.4 استفاده شده است. در این استانداردها به بررسی شاخص عملکرد توربین گاز و واحد تولید بخار با بازیابی گرما به صورت مجزا پرداخته شده است؛ در حالی که در سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما، تمرکز بر کارکرد مجموع این دو سامانه (به‌عنوان یک سامانه یکپارچه) است. بررسی منابع مختلف از جمله استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۳۷۵ با عنوان معیار بازده خالص حرارتی در نیروگاه‌های حرارتی سوخت فسیلی تولید برق و تولید هم‌زمان توان و گرما (CHP)، گزارش سابا در خصوص تولید هم‌زمان توان و گرما و همین‌طور منابع دیگری مانند گزارش آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده<sup>۵</sup>، نشان‌دهنده این موضوع است که شاخص عملکرد انرژی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما، بازده کلی این سامانه است. همان‌طور که در پیوست A گزارش فنی آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده با عنوان کاتالوگ فناوری‌های تولید هم‌زمان توان و گرما<sup>۶</sup> آمده است، برای محاسبه بازده کلی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما لازم است مجموع خالص برق تولیدی و خالص انرژی حرارتی خروجی بر انرژی سوخت مصرفی تقسیم گردد. در این مقاله پس از تعیین شاخص عملکرد انرژی منتخب به بررسی بازده پنج واحد تولید توان و حرارت هم‌زمان در دو حالت طراحی و عملیاتی پرداخته می‌شود.

در این مطالعه، ابتدا به محاسبه و مقایسه بازدهی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما پالایشگاه در دو حالت طراحی و عملیاتی پرداخته می‌شود. سپس، با توجه به نیاز عملیاتی کردن این محاسبات، امکانی برای محاسبه بازدهی لحظه‌ای واحدها در سامانه پایش توزیع شده موجود در اتاق‌های کنترل فراهم خواهد شد. این نوآوری، لزوم استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری مجزا و اتصال آن‌ها به سامانه پایش توزیع شده را از بین برده و با ساده‌سازی روابط و وارد نمودن مستقیم

<sup>4</sup> Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

<sup>5</sup> United States Environmental Protection Agency

<sup>6</sup> Catalog of CHP Technologies

<sup>1</sup> Huangpu

<sup>2</sup> Pudong

<sup>3</sup> Tsinghua

در این مطالعه با توجه در دسترس بودن خروجی ژنراتور و قرائت لحظه‌ای آن توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود، دیگر نیازی به دانستن و وارد کردن مقادیر بازدهی کوپلینگ و ژنراتور نیست. همچنین انرژی گرمایی منتقل شده به آب سامانه بازیاب حرارتی،  $Q$ ، به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$Q = \dot{m} \times (h_{out} - h_{in}) \quad (4)$$

در این رابطه  $\dot{m}$  دبی بخار آب خروجی از فراگرمن بر حسب کیلوگرم بر ثانیه است و توسط دبی سنج موجود در سایت مقادیر این متغیر ثبت و استفاده می‌شود.  $h_{out}$  آنتالپی بخار آب خروجی فراگرمن و  $h_{in}$  آنتالپی آب ورودی به سامانه بازیاب انرژی است. این مقادیر با توجه به دما و فشار سیال کاری و به کمک جداول ترمودینامیکی محاسبه و در معادلات جایگزین شده است.

انرژی حرارتی سوخت ورودی به سامانه بازیاب انرژی، از حاصل ضرب میزان سوخت مصرفی گاز طبیعی،  $\dot{m}_{Natural\ gas}$ ، در ارزش حرارتی پایین سوخت،  $LHV$ ، به علاوه انرژی سوخت مصرفی بویلر کمکی به کمک رابطه (۵) که حاصل ضرب دبی سوخت بویلر کمکی،  $\dot{m}_{burner}$  در ارزش حرارتی پایین سوخت مربوطه (سوخت گاز) است، به دست می‌آید:

$$F = \dot{m}_{Natural\ gas} \times LHV_{Natural\ gas} + \dot{m}_{burner} \times LHV_{Fuel\ gas} \quad (5)$$

مقادیر ارزش حرارتی پایین سوخت گاز طبیعی به کمک مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه‌های پالایشگاه و میانگین گرفتن از مقادیر ماهانه به دست می‌آید. ارزش حرارتی پایین سوخت بویلر نیز توسط مقادیر گزارش شده توسط تأمین کننده سوخت به دست می‌آید.

### ۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

#### ۳-۱- محاسبه بازده واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما با استفاده از داده‌های طراحی

تصویر واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما موجود در پالایشگاه بندرعباس در شکل ۲ آورده شده است.

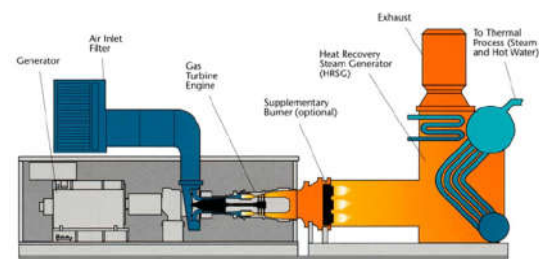
به منظور انجام محاسبات بازدهی واحدها لازم است تا به معرفی اطلاعات طراحی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما پرداخت. این اطلاعات ورودی در

جدول ۱ آورده شده است که شامل دبی آب ورودی، دما و فشار ورودی و خروجی سامانه تولید هم‌زمان و در نهایت میزان تغییرات آنتالپی سیال کاری هر یک از ۵ سامانه تولید هم‌زمان است. بازده محاسبه شده برای هر واحد تولید هم‌زمان توان و گرما بر اساس اطلاعات طراحی در جدول ۲ آورده شده است.

آن‌ها به سامانه پایش توزیع شده، مواجهه با مخاطرات امنیتی را از منظر پدافند غیرعامل کاهش می‌دهد. در این مقاله، به منظور دستیابی به هدف محاسبه بازدهی سامانه‌های تولید هم‌زمان به صورت لحظه‌ای با کمترین هزینه محاسباتی، روشی برای تخمین تغییرات آنتالپی سیال کاری با استفاده از دو متغیر مستقل ارائه خواهد شد که در آن وابستگی محاسبات به جداول ترمودینامیکی با بی‌بعدسازی متغیرها و کاهش تعداد آن‌ها و همچنین بهره‌گیری از امکانات نرم‌افزاری و توسعه کد کامپیوتری از بین خواهد رفت. از این طریق می‌توان بر محدودیت‌های محاسباتی موجود در سامانه‌های پایش توزیع شده پالایشگاه‌ها فائق آمد. با توجه به تعداد کاراکترهای کم این معادلات، سامانه‌های پایش توزیع شده پالایشگاه‌ها می‌توانند بدون مجهز شدن به سامانه کامپیوتری مجزا، از این معادلات برای محاسبه لحظه‌ای بازدهی و پایش عملکرد بر خط بهره ببرند.

#### ۲- محاسبه بازده انرژی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

طرحواره یک واحد تولید هم‌زمان توان و گرما در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره یک واحد تولید هم‌زمان توان و گرما

برای برآورد بازدهی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما، تمرکز بر کارکرد مجموع این دو سامانه (به عنوان یک سامانه یکپارچه) است. به منظور انجام محاسبات مربوطه از شاخص عملکرد گزارش شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده استفاده شده است. در این گزارش آمده است که برای محاسبه بازده کلی سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما، لازم است مجموع برق تولیدی و انرژی حرارتی خالص منتقل شده به سیال (آب مایع) بر انرژی سوخت مصرفی هر واحد تقسیم گردد. این شاخص بازده کلی سامانه را محاسبه می‌نماید و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

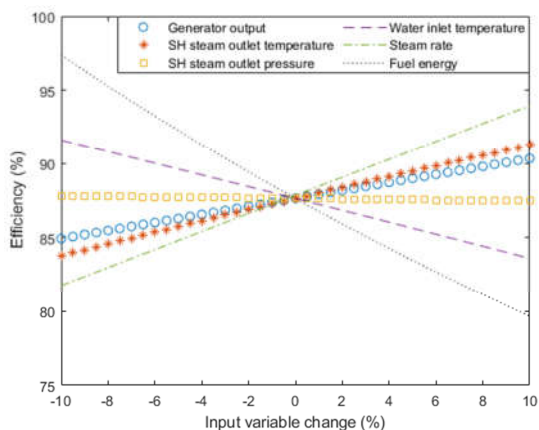
$$\eta_{Total} = \frac{P + Q}{F} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $P$  خالص برق تولیدی ژنراتور بر حسب کیلووات،  $Q$ ، تغییرات انرژی حرارتی بخار تولید شده بر حسب کیلووات و  $F$ ، انرژی سوخت مصرفی توربین و سوخت مصرفی دیگ بخار بازیافتی است.

در رابطه (۱) خالص برق تولیدی به صورت لحظه‌ای و از خروجی ژنراتور،  $P_{gen,output}$ ، و یا به صورت حاصل ضرب توان خروجی توربین گاز،  $P_{gas\ turbine}$ ، در ضریب عملکرد کوپلینگ،  $\eta_{coupling}$ ، و ژنراتور،  $\eta_{generator}$  به شکل معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$P = P_{gen,output} \quad (2)$$

$$P = P_{gas\ turbine} \times \eta_{coupling} \times \eta_{generator} \quad (3)$$



شکل ۳- تحلیل حساسیت متغیرهای طراحی

بررسی تأثیر تمامی پارامترها و نحوه تغییر بازدهی سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما با هریک از متغیرها در زیر آمده است:

### ۳-۲-۱- توان خروجی ژنراتور

با در نظر گرفتن خروجی ژنراتور به‌صورت متغیر مستقل و با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تغییرات مثبت و منفی حول نقطه طراحی، بازده کلی سامانه به‌طور تقریبی ۵/۵ درصد تغییر می‌کند.

### ۳-۲-۲- انرژی سوخت ورودی

انرژی سوخت ورودی به‌صورت حاصل‌ضرب دبی سوخت ورودی در ارزش گرمایی پائین سوخت در نظر گرفته می‌شود. بازدهی با این متغیر رابطه معکوس دارد و با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تغییرات مثبت و منفی، بازده در بازه‌ای ۱۸ درصدی تغییر می‌کند.

### ۳-۲-۳- میزان بخار تولیدشده در فراگرما

میزان بخار خروجی از فراگرما همانند توان خروجی ژنراتور رابطه‌ای خطی با بازدهی انرژی دارد و در بررسی انجام‌شده نشان داده شده است که با تغییر ۲۰ درصدی دبی جریان آب ورودی به سامانه بازیاب گرما، بازدهی دچار ۱۲ درصد تغییر می‌گردد.

### ۳-۲-۴- دمای بخار خروجی فراگرما

با توجه به وابستگی آنتالپی به دما، انتظار می‌رود بازدهی سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما با تغییر دمای بخار خروجی فراگرما به‌صورت خطی تغییر نکند. بررسی این متغیر نشان می‌دهد که با افزایش دمای خروجی فراگرما از منفی ۱۰ درصد تا مثبت ۱۰ درصد، بازدهی ۸ درصد افزایش می‌یابد.

### ۳-۲-۵- فشار بخار خروجی فراگرما

فشار بخار خروجی فراگرما همانند دما، متغیر تعیین‌کننده آنتالپی بخار است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است تأثیر این متغیر روی بازدهی بسیار کمتر و زیر ۰/۴ درصد است.



شکل ۲- تصویر واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما A-E

جدول ۱- اطلاعات طراحی فرآیندی واحد تولید بخار با بازیابی گرما (HRSG)

تغییرات آنتالپی واحد بازیابی گرما (kJ/kg)	دبی آب ورودی (kg/h)	خروجی		ورودی		تگ تجهیز
		فشار (bar)	دما (oC)	فشار (bar)	دما (oC)	
۲۶۵۳/۷	۸۸۰۰۰	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰	CHP A
۲۶۵۳/۷	۸۸۰۰۰	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰	CHP B
۲۶۵۳/۷	۸۸۰۰۰	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰	CHP C
۲۶۲۰/۲۲	۸۴۷۱۰	۴۴/۸	۳۸۵	۴۵/۸۳	۱۳۰	CHP D
۲۶۰۷/۷۶	۸۸۰۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۴۵/۸۳	۱۳۰	CHP E

جدول ۲- بازده محاسبه‌شده برای هر واحد تولید هم‌زمان توان و گرما بر اساس اطلاعات طراحی

تگ تجهیز	دبی سوخت مصرفی (kg/s)	ارزش حرارتی سوخت (kJ/kg)	توان الکتریکی خروجی (kW)	راندمان انرژی کلی (%)
CHP A	۲/۵۸	۴۱۳۱۷	۲۸۱۸۶	۸۷/۳
CHP B	۲/۵۸	۴۱۳۱۷	۲۸۱۸۶	۸۷/۳
CHP C	۲/۵۸	۴۱۳۱۷	۲۸۱۸۶	۸۷/۳
CHP D	۲/۹۲	۴۱۳۱۵	۳۸۴۵۰	۸۳
CHP E	۳/۰۲	۴۴۲۸۴	۳۷۵۰۰	۷۵/۷

### ۳-۲- تعیین، اولویت‌بندی و ارائه متغیرهای مؤثر بر بازده واحد تولید هم‌زمان توان و گرما

در این مطالعه، تغییرات بازدهی این نوع سامانه‌ها نسبت به تغییرات تمامی متغیرهای مؤثر نظیر توان خروجی ژنراتور، انرژی سوخت ورودی، میزان بخار تولیدشده در فراگرما، دما و فشار بخار خروجی فراگرما، دمای آب ورودی به‌منظور تحلیل پارامتری عوامل مؤثر بر بازدهی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما بررسی شد که نتایج این بررسی و میزان تأثیر هرکدام از این عوامل بر بازدهی سامانه در شکل ۳ آمده است.

### ۲-۲-۶- دمای آب ورودی اکونومایزر

همان‌طور که انتظار می‌رفت دمای آب ورودی اکونومایزر معکوس دمای خروجی فراگرگمکن عمل می‌کند و با افزایش ۲۰ درصدی دما، بازدهی ۸ درصد کاهش می‌یابد. تحلیل حساسیت متغیرهای مؤثر بر بازده کلی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تغییر بازدهی کل نسبت به نوسانات هر متغیر

متغیر-درصد تغییر	۱۰٪	۵٪	۰٪	۵٪	۱۰٪
توان خروجی ژنراتور	۸۴/۹۴	۸۶/۲۹	۸۷/۶۴	۸۸/۹۹	۹۰/۳۴
انرژی سوخت	۹۷/۳۸	۹۲/۲۵	۸۷/۶۴	۸۳/۴۷	۷۹/۶۷
دمای آب ورودی	۹۱/۶	۸۹/۶۳	۸۷/۶۴	۸۵/۶۴	۸۳/۶۱
دمای بخار خروجی	۸۳/۷۸	۸۵/۷۵	۸۷/۶۴	۸۹/۴۸	۹۱/۲۸
فشار بخار خروجی	۸۷/۸۱	۸۷/۷۳	۸۷/۶۴	۸۷/۵۵	۸۷/۴۶
دبی بخار خروجی	۸۱/۵۸	۸۴/۶۱	۸۷/۶۴	۹۰/۶۷	۹۳/۷۱

مطابق محاسبات انجام‌شده در مورد تحلیل حساسیت بازدهی سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما به تغییرات متغیرها، مؤثرترین پارامترها بر بازدهی این سامانه به ترتیب انرژی ورودی سوخت توربین، دبی بخار خروجی فراگرگمکن، دمای خروجی فراگرگمکن، دمای ورودی اکونومایزر، توان خروجی ژنراتور و فشار بخار خروجی فراگرگمکن است. مقادیر بیشینه تغییرات بازدهی برای هر متغیر در بازه  $\pm 10\%$  در جدول ۴ آمده است. این جدول بر اساس بیشینه وابستگی بازده واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما به هر متغیر ترتیب‌بندی شده است. به‌عنوان مثال، همان‌طور که این جدول مشخص است، به ترتیب تغییرات انرژی حرارتی سوخت ورودی با  $9.74\%$  و فشار بخار خروجی با  $0.18\%$  به ترتیب بیشترین و کمترین اثرگذاری روی بازدهی کل هر واحد را دارند.

جدول ۴- اولویت‌بندی متغیرهای مؤثر بر بازده واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

اولویت	متغیر	بیشینه درصد تأثیر بر راندمان در بازه تغییرات $\pm 10\%$ حول نقطه طراحی
۱	انرژی حرارتی سوخت ورودی	۹/۷۴٪
۲	دبی بخار خروجی	۶/۰۷٪
۳	دمای آب ورودی	۴/۳٪
۴	دمای بخار خروجی	۳/۸۶٪
۵	توان خروجی ژنراتور	۲/۷٪
۶	فشار بخار خروجی	۰/۱۸٪

### ۲-۳- محاسبه بازده واقعی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما با استفاده از داده‌های عملیاتی

داده‌های جمع‌آوری‌شده در تاریخ ۳۱ فروردین‌ماه ۱۴۰۰ در جدول ۵ آورده شده‌اند. این داده‌ها از سامانه پایش توزیع‌شده موجود در اتاق‌های کنترل پالایشگاه بندرعباس قرائت شده‌اند. کالیبراسیون دوره‌ای اندازه‌گیرها توسط کارشناسان ابزار دقیق پالایشگاه در فواصل از پیش تعیین شده انجام می‌شود. همچنین، آنالیز ترکیبات سوخت مطابق با استاندارد ASTM D-1945 در آزمایشگاه‌های پالایشگاه انجام

شده و ارزش حرارتی سوخت بر اساس آن به دست آمده و در محاسبات استفاده شده است. بازده عملیاتی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما با استفاده از رابطه استاندارد ارائه شده در بخش ۲ محاسبه شده است.

جدول ۵- اطلاعات عملیاتی واحد تولید بخار با بازیابی گرما (HRSG)

تگ تجهیز	ورودی		دبی آب ورودی (kg/h)	توان خروجی ژنراتور (kW)	دبی سوخت بویلر کمکی (Nm <sup>3</sup> /hr)	دبی سوخت ورودی (kg/s)
	دما (°C)	فشار (bar)				
CHP A	۱۳۰	۶۰	۳۸۰	۴۲/۵	۳۵۰۰۰	۱/۸۸
CHP B	۱۳۰	۶۰	۳۸۰	۴۲/۵	۷۳۰۰۰	۱/۸۲
CHP C	۱۳۱٫۳	۶۰	۳۸۰	۴۲/۵	۷۰۰۰۰	۱/۸۳
CHP D	۱۳۱٫۳	۶۰	۳۸۰	۴۲/۵	۵۹۰۰۰	۱/۵
CHP E	۱۳۱	۶۰	۳۸۰	۴۲/۵	۷۰۰۰۰	۱/۷۵

بازده محاسبه شده هر واحد تولید هم‌زمان توان و گرما با استفاده از داده‌های واقعی با راندمان به‌دست‌آمده به کمک داده‌های طراحی در جدول ۶ مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است ارزش حرارتی سوخت مصرفی توربین گاز (گاز طبیعی) و سوخت گاز مورد استفاده در بویلرهای کمکی، مطابق گزارش سالانه سوخت شرکت پالایش نفت بندرعباس، به ترتیب برابر با  $8700 \text{ (kcal/m}^3\text{)}$  و  $7900 \text{ (kcal/m}^3\text{)}$  نظر گرفته شده است.

جدول ۶- بازده محاسبه‌شده برای هر واحد تولید هم‌زمان توان و گرما بر اساس داده‌های عملیاتی

تگ تجهیز	بازده انرژی طراحی (%)	بازده انرژی عملیاتی (%)
CHP A	۸۷/۳۲	۴۳/۶۷
CHP B	۸۷/۳۲	۵۷/۳۰
CHP C	۸۷/۳۲	۵۷/۱۷
CHP D	۸۲/۹۵	۶۸/۹۴
CHP E	۷۵/۶۸	۷۰/۲۷

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تفاوت مقادیر بازده عملیاتی با بازده طراحی، چشم‌گیر است؛ به صورتی که بازده عملیاتی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما A، B و C کمتر از حالت طراحی است و بیشینه تفاوت برابر با  $43/65\%$  مربوط به واحد A می‌باشد. همچنین، اختلاف بازده عملیاتی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما D و E نسبت به حالت طراحی کمتر و به ترتیب برابر با  $14/01\%$  و  $5/41\%$  می‌باشند. علت این تفاوت در مقادیر بازدهی را باید در شرایط کاری هر واحد، ارزش حرارتی سوخت ورودی، فرسودگی هر تجهیز در اثر کارکرد بلندمدت و نیاز تجهیزات به سرویس جستجو کرد. این در حالی است که سامانه E با توجه به به‌روزر بودن تجهیزات و شرایط بهتر کارکرد بازدهی بهتری نسبت به حالت طراحی خود داشته و تنها  $5/4\%$  درصد اختلاف میان مقادیر طراحی و عملیاتی وجود دارد.

### ۳-۴- استخراج روابط ریاضی ساده‌سازی شده برای محاسبه شاخص عملکرد واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

به منظور نمایش برخط بازده تجهیزات در سامانه کنترلی توزیع شده<sup>۱</sup> (DCS) در اتاق‌های کنترل پالایشگاه لازم است تا با استفاده از امکانات در دسترس به ساده‌سازی فرمول‌های محاسبه بازده پرداخت. این فرمول‌ها باید ضمن برخورداری از دقت کافی، با توجه به محدودیت‌های موجود در DCS تا جای ممکن دارای کمترین تعداد کاراکتر و عملگر محاسباتی باشند. برای نیل به این هدف و درک هرچه بهتر نحوه تولید و استفاده از این فرمول‌های ساده‌سازی شده، توضیحات در مورد نحوه ایجاد این معادلات برای سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما در این بخش ارائه شده است. شرایط کاری واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما برای حالت طراحی در جدول ۷ آمده است

به منظور ساده‌سازی، ابتدا به بی‌بعد سازی متغیرها پرداخته شده است. این بی‌بعد سازی به کمک معادلات (۶) و (۷) انجام شده است:

$$T^* = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{HP}} \quad (6)$$

$$P^* = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{HP}} \quad (7)$$

جدول ۷- شرایط کاری واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

نام واحد	دمای آب ورودی (°C)	فشار آب ورودی (bara)	دمای آب خروجی (°C)	فشار آب خروجی (bara)
CHP A	۱۳۰	۴۵/۸۳	۳۹۸	۴۳/۱۳
CHP B	۱۳۰	۴۵/۸۳	۳۹۸	۴۳/۱۳
CHP C	۱۳۰	۴۵/۸۳	۳۹۸	۴۳/۱۳
CHP D	۱۳۰	۴۵/۸۳	۳۸۵	۴۴/۸
CHP E	۱۳۰	۴۵/۸۳	۳۸۰	۴۴/۹

که در آن زیرنویس HP مربوطه شرایط ترمودینامیکی بخار پرفشار است. مزیت این نوع بی‌بعد سازی متغیرها، کاهش تعداد متغیرها از ۴ متغیر به ۲ متغیر است. به طوری که متغیرهای بی‌بعد شده، حاصل تقسیم تغییرات متغیر بر مقدار بیشینه آن متغیر است.

تابع هدف موردنظر در این ساده‌سازی، تغییرات آنتالپی سیال کاری است که تابع دو متغیر بی‌بعد سازی شده  $T^*$  و  $P^*$  است. در معادله اصلی، تغییرات آنتالپی تابعی از ۴ متغیر دما و فشار ورودی و دما و فشار خروجی است. لازم است تا معادله ساده‌سازی شده، توانایی انطباق با تغییرات متغیرها در دما و شرایط کاری را داشته باشد. بدین منظور، تغییرات ده‌درصدی هر متغیر حول نقطه کاری آن متغیر در نظر گرفته شده است (پنج درصد مثبت و پنج درصد منفی).

با رسم نمودار سه‌بعدی مربوط به ۱۹۴۴۸۱ نقطه تابع هدف، یک صفحه در فضا به وجود می‌آید و لازم است تا با ارائه معادلات انطباقی بر صفحه موردنظر، به معادله‌ای با کمترین میزان خطا در محاسبه تغییرات آنتالپی رسید. برای بررسی میزان دقت معادلات، خطای جذر

میانگین مربعات نتایج محاسبه می‌شود. در این بخش برای ارائه فرمول انطباقی و ساده‌سازی شده از یکی از معادلات چندجمله‌ای، به شکل جدول ۸ استفاده می‌شود.

جدول ۸- معادلات چندجمله‌ای مورد استفاده برای تخمین تابع تغییرات آنتالپی

درجه معادله	معادله چند جمله‌ای
۱-۱	$\Delta h = P_{00} + P_{10} \times T^* + P_{01} \times P^*$
۲-۱	$\Delta h = P_{00} + P_{10} \times T^* + P_{01} \times P^* + P_{20} \times T^{*2} + P_{11} \times T^* \times P^*$
۲-۲	$\Delta h = P_{00} + P_{10} \times T^* + P_{01} \times P^* + P_{20} \times T^{*2} + P_{02} \times P^{*2} + P_{11} \times T^* \times P^*$
⋮	⋮
۵-۵	$\Delta h = P_{00} + P_{10} \times T^* + P_{01} \times P^* + P_{20} \times T^{*2} + P_{02} \times P^{*2} + P_{11} \times T^* \times P^* + \dots + P_{50} \times T^{*5} + P_{05} \times P^{*5} + P_{44} \times T^{*4} \times P^{*4}$

بدین منظور، با استفاده از امکان برازش در نرم‌افزار MATLAB برای تمامی معادلات، ضرایب پیشنهادی به دست آمده و خطای جذر میانگین مربعات محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- خطای جذر میانگین برای چندجمله‌ای‌های منتخب

معادله	RMS (kJ/kg)	معادله	RMS (kJ/kg)	معادله	RMS (kJ/kg)
۱-۱	۷/۰۷۱	۴-۲	۷/۰۶۰	۲-۴	۶/۸۳۷
۲-۱	۷/۰۷۰	۵-۲	۷/۰۵۷	۳-۴	۶/۸۲۸
۳-۱	۷/۰۶۱	۱-۳	۶/۸۳۷	۴-۴	۶/۸۲۸
۴-۱	۷/۰۶۱	۲-۳	۶/۸۳۷	۵-۴	۶/۸۲۵
۵-۱	۷/۰۵۹	۳-۳	۶/۸۲۸	۱-۵	۶/۸۳۷
۱-۲	۷/۰۶۹	۴-۳	۶/۸۲۸	۲-۵	۶/۸۳۷
۲-۲	۷/۰۶۹	۵-۳	۶/۸۲۵	۳-۵	۶/۸۲۷
۳-۲	۷/۰۶۰	۱-۴	۶/۸۳۷	۴-۵	۶/۸۲۴

با توجه به عدم تغییر چشمگیر نتایج با افزایش درجه چندجمله‌ای‌ها، از معادله درجه یک استفاده شد. ضرایب این چندجمله‌ای برای نقاط کاری هر سامانه تولید هم‌زمان توان و گرما در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰- ضرایب و فرمول ساده‌سازی شده برای تخمین تغییرات آنتالپی

معادله ساده‌سازی شده برای تخمین اختلاف آنتالپی	$P_{01}$	$P_{10}$	$P_{00}$	واحد
$\Delta h = 1962 + 1026 \times \frac{T_{out} - T_{in}}{398} - 34.75 \times \frac{P_{out} - P_{in}}{43.13}$	-۳۴/۷۵	۱۰۲۶	۱۹۶۲	CHP A, B, C

<sup>1</sup> Distributed Control System

حالت عملیاتی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما در جدول ۱۴ آمده است.

جدول ۱۴- مقایسه بازده حاصل از معادلات استاندارد با ساده‌شده در

شرایط عملیاتی برای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

خط نسبی (%)	بازده عملیاتی ساده‌سازی شده (%)	بازدهی عملیاتی استاندارد (%)	تگ تجهیز
۰/۸	۴۴/۰۲	۴۳/۶۷	CHP A
۱/۰۴	۵۷/۹۰	۵۷/۳۰	CHP B
۱/۱۲	۵۷/۸۱	۵۷/۱۷	CHP C
۰/۰۳	۶۸/۹۲	۶۸/۹۴	CHP D
۰/۰۴	۷۰/۲۴	۷۰/۲۷	CHP E

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بازده انرژی واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما پالایشگاه بندرعباس در دو حالت طراحی و عملیاتی محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حالت طراحی، واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما A، B، C، D و E به ترتیب دارای بازده‌های انرژی ۸۷/۳، ۸۷/۳، ۸۷/۳، ۸۳ و ۷۵/۷ درصد می‌باشند. همچنین در حالت عملیاتی نیز محاسبات مربوط به واحدهای تولید هم‌زمان به ترتیب بازده‌های انرژی ۴۳/۶۷، ۵۷/۳، ۵۷/۱۷، ۶۸/۹۴ و ۷۰/۲۷ درصد را نشان دادند. به‌منظور بررسی بیشتر اهمیت هر کدام از پارامترهای مؤثر بر عملکرد این سامانه‌ها، تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای طراحی انجام شد. تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که ارزش حرارتی سوخت ورودی با ۹/۷۴ درصد، دبی بخار خروجی از سامانه بازیاب حرارتی با ۶/۰۷ درصد، دمای آب ورودی با ۴/۳ درصد بیشترین تأثیر را روی بازده حرارتی یک سامانه تولید هم‌زمان دارا می‌باشند. سایر متغیرها از جمله دمای بخار خروجی، توان خروجی ژنراتور و فشار بخار خروجی در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در بخش دیگر این تحقیق به ساده‌سازی فرمول‌های محاسبه بازده انرژی به کمک امکان ایجاد معادلات چند متغیری با استفاده از دسته داده‌ها در نرم‌افزار MATLAB و افزونه COOLprop پرداخته شد.

نتایج به دست آمده به کمک این معادلات ساده‌سازی شده نیز در حالت‌های طراحی و عملیاتی محاسبه و با نتایج واقعی مقایسه شد. بیشینه میزان خطای ساده‌سازی با استفاده از داده‌های طراحی ۰/۸۱ درصد و برای داده‌های عملیاتی ۱/۱۲ درصد به دست آمد که نتایج قابل قبولی می‌باشند. از این معادلات می‌توان به‌منظور محاسبه بازده لحظه‌ای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما با استفاده از سامانه‌های کنترل توزیع‌شده موجود در اتاق‌های کنترل و با خطای زیر ۱ درصد استفاده کرد.

$\Delta h = 1934 + 1010 \times \frac{T_{out} - T_{in}}{382.5} - 25.7 \times \frac{P_{out} - P_{in}}{44.85}$	-۲۵/۷	۱۰۱۰	۱۹۳۴	CHP D, E
---	-------	------	------	----------

بنابراین با استفاده از چندجمله‌ای درجه یک برای محاسبه تغییرات آنتالپی، بازدهی ساده‌سازی شده توسط فرمول (۸) معرفی می‌شود:

$$\eta_{CHP} = \frac{P + \dot{m}_{steam} \times (P_{00} + P_{10} \times T^* + P_{01} \times P^*)}{\dot{m}_{Natural\ gas} \times LHV_{Natural\ gas} + \dot{m}_{Burner} \times LHV_{Fuel\ gas}} \quad (8)$$

#### ۳-۵- محاسبه و صحت‌گذاری شاخص عملکرد انرژی

##### واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما

همان‌گونه که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد، متغیرهای اصلی، شامل دما و فشار آب ورودی، دما و فشار بخار خروجی، توان ژنراتور و انرژی ورودی سوخت به واحد تولید هم‌زمان می‌باشند. در این بخش، تغییرات آنتالپی سیال به کمک معادله ساده‌سازی شده تخمین زده می‌شود. بازده حاصل از تغییرات این مجموعه متغیرها با در نظر گرفتن یک بازه تغییرات حول نقطه طراحی برای متغیرهای اصلی محاسبه و با نتایج حاصل از معادله استاندارد مقایسه شده است. در این بررسی برای متغیرهای ساده‌سازی شده بازه پنج‌درصدی کمتر و بیشتر از نقطه طراحی در نظر گرفته شده است و برای سایر متغیرها همانند دبی سوخت ورودی، توان خروجی ژنراتور و آنتالپی سوخت با توجه به عدم ساده‌سازی این متغیرها، انتظار داریم تا تغییرات آن در فرمول ساده‌سازی شده حائز اهمیت نباشد؛ با این وجود به‌منظور اثبات فراگیری و صحت فرمول‌های ارائه‌شده برای این پارامترها نیز بازه تغییرات پنج‌درصدی در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۵-۱- محاسبه و صحت‌گذاری شاخص عملکرد در

##### شرایط طراحی

مقایسه بازده محاسبه‌شده بر اساس روابط ارائه‌شده در استاندارد و راندمان ساده‌سازی شده برای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما در حدود بالا و پایین شرایط کاری در جدول تا جدول آورده شده است. در این مطالعه، محاسبه بازدهی سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما و ایجاد معادلات ساده‌سازی شده تخمین تغییرات آنتالپی به‌وسیله توسعه کد کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

#### ۳-۵-۲- محاسبه و صحت‌گذاری شاخص عملکرد در

##### شرایط عملیاتی

با توجه به عدم تغییر چشم‌گیر شرایط کاری سامانه‌های تولید هم‌زمان توان و گرما در شرایط عملیاتی در مقایسه با حالت طراحی این واحدها، از فرمول ساده‌سازی شده مشابه بخش طراحی استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از فرمول‌های استاندارد و ساده‌سازی شده برای

جدول ۱۱- صحه‌گذاری معادلات ساده‌سازی شده برای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما A,B,C حول نقطه طراحی

خطا نسبی (%)	بازده ساده‌سازی شده (%)	بازده واقعی (%)	دبی سوخت ورودی (kg/s)	توان ژنراتور (kW)	فشار خروجی (bara)	دمای خروجی (°C)	فشار ورودی (bara)	دمای ورودی (°C)
۰/۰۱	۸۷/۳۳	۸۷/۳۲	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۲۷	۸۷/۷۱	۸۷/۹۵	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۲۳/۵
۰/۲۹	۸۶/۹۴	۸۶/۶۸	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۶/۵
۰/۱	۸۷/۳۳	۸۷/۴۲	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۳/۵۳	۱۳۰
۰/۱۳	۸۷/۳۳	۸۷/۲۲	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۸/۱۲	۱۳۰
۰/۸۱	۸۶/۹۲	۸۶/۲۲	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۷۸/۱	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۸۱	۸۷/۶۹	۸۸/۴۱	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۴۱۷/۹	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۰۵	۸۷/۳۷	۸۷/۴۱	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۰/۹۷	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۰۷	۸۷/۳۹	۸۷/۲۳	۲/۵۸	۲۸۱۸۶/۵	۴۵/۲۹	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰	۸۶/۰۰	۸۶/۰۰	۲/۵۸	۲۶۷۷۷/۱۸	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۰۱	۸۸/۶۵	۸۸/۶۴	۲/۵۸	۲۹۵۹۵/۸۳	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰	۹۱/۹۲	۹۱/۹۲	۲/۴۵	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰
۰/۰۱	۸۳/۱۷	۸۳/۱۶	۲/۷۲	۲۸۱۸۶/۵	۴۳/۱۳	۳۹۸	۴۵/۸۳	۱۳۰

جدول ۱۲- صحه‌گذاری معادلات ساده‌سازی شده برای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما D حول نقطه طراحی

خطا نسبی (%)	بازده ساده‌سازی شده (%)	بازده واقعی (%)	دبی سوخت ورودی (kg/s)	توان ژنراتور (kW)	فشار خروجی (bara)	دمای خروجی (°C)	فشار ورودی (bara)	دمای ورودی (°C)
۰/۰۸	۸۲/۸۸	۸۲/۹۵	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۳۳	۸۳/۲۱	۸۳/۴۹	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۲۳/۵
۰/۱۷	۸۲/۵۵	۸۲/۴۱	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۶/۵
۰/۱۴	۸۲/۸۴	۸۲/۹۶	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۲/۸۹	۱۳۰
۰/۰۴	۸۲/۹۲	۸۲/۹۵	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۹/۵۱	۱۳۰
۰/۶۲	۸۲/۵۳	۸۲/۰۲	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۶۵/۷۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۷۹	۸۳/۲۰	۸۳/۸۶	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۴۰۴/۲۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۱۶	۸۲/۹۱	۸۳/۰۴	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۲/۶۵	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۰۱	۸۲/۸۶	۸۲/۸۷	۲/۹۲	۳۸۴۵۰	۴۷/۰۴	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۰۹	۸۱/۲۹	۸۱/۳۶	۲/۹۲	۳۶۵۲۷/۵	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۰۹	۸۴/۴۷	۸۴/۵۵	۲/۹۲	۴۰۳۲۷/۵	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۰۷	۸۷/۲۴	۸۷/۳۲	۲/۷۷	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰
۰/۰۹	۷۸/۹۳	۷۹/۰۰	۳/۰۷	۳۸۴۵۰	۴۴/۸	۳۸۵	۶۶/۲	۱۳۰

جدول ۱۳- صحه‌گذاری معادلات ساده‌سازی شده برای واحدهای تولید هم‌زمان توان و گرما E حول نقطه طراحی

خطا نسبی (%)	بازده ساده‌سازی شده (%)	بازده واقعی (%)	دبی سوخت ورودی (kg/s)	توان ژنراتور (kW)	فشار خروجی (bara)	دمای خروجی (°C)	فشار ورودی (bara)	دمای ورودی (°C)
۰/۱۱	۷۵/۷۶	۷۵/۶۸	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۴	۷۶/۰۷	۷۶/۱۸	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۲۳/۵
۰/۳۶	۷۵/۴۴	۷۵/۱۷	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۶/۵
۰/۰۵	۷۵/۷۲	۷۵/۶۸	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۲/۷	۱۳۰
۰/۱۶	۷۵/۸۰	۷۵/۶۸	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۹/۳	۱۳۰
۰/۸۱	۷۵/۴۲	۷۴/۸۱	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۶۱	۶۶	۱۳۰
۰/۶۰	۷۶/۰۶	۷۶/۵۲	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۹۹	۶۶	۱۳۰
۰/۰۳	۷۵/۷۸	۷۵/۷۶	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۲/۶۶	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۷	۷۵/۷۳	۷۵/۶۰	۳/۰۲	۳۷۵۰۰	۴۷/۱۵	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۰	۷۴/۳۵	۷۴/۲۸	۳/۰۲	۳۵۶۲۵	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۰	۷۷/۱۶	۷۷/۰۸	۳/۰۲	۳۹۳۷۵	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۰	۷۹/۷۴	۷۹/۶۶	۲/۸۷	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۰
۰/۱۰	۷۲/۱۵	۷۲/۰۸	۳/۱۷	۳۷۵۰۰	۴۴/۹	۳۸۰	۶۶	۱۳۰



Pashchenko F. F., Kosoy A. A., Yagupova Y. Y., Problems of optimizing the modes of CHP with a complex composition of equipment, taking into account the peculiarities of the CCGT and steam power units operation, in *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 54, No. 13, 2021.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی شرکت پالایش نفت بندرعباس در انجام این تحقیق در قالب اجرای پروژه پژوهشی به شماره قرارداد پ.ن.ب.ع/۱۶۴۰/۹۸/۸۴/ کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## ۶- منابع

- [1] رشد-صفر-درصدی-ظرفیت-<https://www.dw.com/fa-ir/a-60397101>/تولید-برق-ایران-در-آذرماه
- [2] Holmberg H., Tuomaala M., Haikonen T., Ahtila P., Allocation of fuel costs and CO<sub>2</sub>-emissions to heat and power in an industrial CHP plant: Case integrated pulp and paper mill, *Appl. Energy*, Vol. 93, pp. 614-623, 2012. <https://www.isna.ir/news/98041708450>.
- [3] Bertani A., Borghetti A., Alberto Nucci C., Management of low voltage grids with high penetration of distributed generation: Concepts, implementations and experiments, Cigré 2006 Session, Paris, France, 2006.
- [4] Meybodi M. A., Behnia M., Impact of carbon tax on internal combustion engine size selection in a medium scale CHP system, *Appl. Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 5153-5163, 2011.
- [5] Mago P. J., Chamra L. M., Moran A., Modeling of micro-cooling, heating, and power (micro-CHP) for residential or small commercial building applications, ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, Illinois, 2006.
- [6] Peacock A. D., Newborough M., Impact of micro-CHP systems on domestic sector CO<sub>2</sub> emissions, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 17-18, pp. 2653-2676, 2005.
- [7] Popovic P., Marantan A., Radermacher R., Garland P., Integration of microturbine with single-effect exhaust-driven absorption chiller and solid wheel desiccant system, in *ASHRAE Transactions*, 2002.
- [8] Sun Z. G., A combined heat and cold system driven by a gas industrial engine, *Energy Conversion Management*, Vol. 48, No. 2, pp. 366-369, 2007.
- [9] Kong X. Q., Wang R. Z., Li Y., Huang X. H., Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine, *Energy Conversion. Management*, Vol. 50, No. 3, pp. 530-538, 2009.
- [10] Kong X. Q., Wang R. Z., Huang X. H., Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine, *Energy Conversion Management*, Vol. 45, No. 9-10, pp. 1433-1442, 2004.
- [11] Maidment G. G., Zhao X., Riffat S. B., Combined cooling and heating using a gas engine in a supermarket, *Applied Energy*, Vol. 68, No. 4, PP. 321-335, 2001.
- [12] Gambini M., Vellini M., Stilo T., Manno M., Bellocchi S., High-efficiency cogeneration systems: The case of the paper industry in Italy, *Energies*, Vol. 12, No. 3, 2019.
- [13] Skvorčinskienė R., Striūgas N., Kurkela E., Bakas R., Radinas M., Integration of waste heat streams into industrial chps or district heating units , 27<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 2019.
- [14] Pastore L. M., lo Basso G., de Santoli L., Can the renewable energy share increase in electricity and gas grids takes out the competitiveness of gas-driven CHP plants for distributed generation, *Energy*, Vol. 256, No. 124659, 2022.
- [15] Liu M., Liu M., Chen W., Yan J., Operational flexibility and operation optimization of CHP units supplying electricity and two-pressure steam, *Energy*, Vol. 263, No. 125988, 2023.
- [16] Mishra V., Trimbake S., 4E analysis of DG set based micro combined heat and power (CHP) system and its employment for shelter heating in high altitude areas, *Materials Today Proceedings*, Vol. 72, pp. 1803-1810, 2023.
- [17] Arakelyan E. K., Andryushin A. V., Mezin S. V.,