



## مدل‌سازی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان از دیدگاه اگزرژیواکونومیک در یک مورد مطالعاتی صد مگاواتی

یاسر شکری<sup>۱\*</sup>، مهرانگیز قاضی<sup>۲</sup> و محمد نیکیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان

<sup>۳</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

### چکیده

در این مقاله، مدل‌سازی و تحلیل چیدمان تجهیزات از دیدگاه اگزرژیواکونومیک برای تأمین نیاز حرارت و توان سایت جامع تعیین می‌گردد. با استفاده از یک مدل اصلاحی به‌عنوان یک روش هدف‌گذاری جدید تولید همزمان که مدل تکرارشونده پایین به بالا است، پتانسیل تولید همزمان حرارت و توان برای طراحی سیستم یوتیلیتی سایت جامع تخمین زده‌شده و متناسب با آن، دمای مافوق گرم سطوح بخار، توان تولیدی توربین‌های بخار بین سطوح، دبی بخار عبوری از توربین‌ها، میزان بار حرارتی دیگ بخار و دبی سوخت موردنیاز دیگ بخار محاسبه می‌شود. در ابتدا سناریوهای مختلفی از چیدمان توربین‌های بخار ارائه می‌گردد که از دیدگاه اگزرژیواکونومیک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در طرح‌های پیشنهادی برای تولید توان اضافی در مورد مطالعاتی نیز، سامانه توربین گاز نسبت به طرح توربین کندانسی دارای بازدهی اگزرژی بالا و تخریب اگزرژی پایین و مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی پایینی بود. از این‌رو، سناریوی منتخب چیدمان توربین‌های بخار فشار برگشتی در کنار سامانه توربین گازی به‌عنوان چیدمان بهینه سامانه تولید همزمان حرارت و توان در سایت جامع از دیدگاه اگزرژیواکونومیک برای این مورد مطالعاتی معرفی شدند.

**کلمات کلیدی:** اگزرژیواکونومیک؛ سایت جامع؛ یوتیلیتی سایت جامع؛ تولید همزمان حرارت و توان.

## Modeling and Analysis of Total Site Cogeneration of Heat and Power from an Exergoeconomic Approach in a 100MW Case Study

Y. shokri<sup>1\*</sup>, M. ghazi<sup>2</sup>, M. nikiyan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.sc. Mech. Eng., Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

<sup>2</sup> Prof., Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

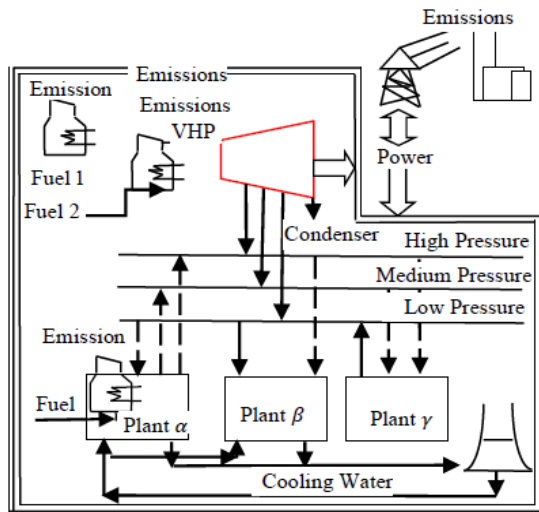
<sup>3</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

### Abstract

In this paper, modeling and analysis of equipment arrangement from an exergoeconomic approach to produce required heat and power of a total site is determined. By using a modified Iterative Bottom-to-Top Model (IBTM) as a new cogeneration targeting method, cogeneration of heat and power potential to design utility system of a total site is estimated and fit to it, superheated temperature of steam levels, power generation of steam turbines between levels, flow rate of passing steam through turbines, amount of boiler heat load and boiler required fuel flow rate are calculated. First, different scenarios of steam turbines arrangements are introduced that are investigated from exergoeconomic approach. Also in suggested plans to produce extra power in case study, gas turbine system has maximum exergy efficiency, minimum exergy destruction, minimum total capital cost rate and exergy destruction cost rate rather than condensing turbine plan. Hence, the selected scenario of back pressure steam turbines arrangement beside the gas turbine system were introduced as the optimum system of heat and power cogeneration system in total site for this case study from an exergoeconomic approach.

**Keywords:** Exergoeconomic; Total Site; Total Site Utility; Cogeneration Heat and Power.

### ۱- مقدمه



شکل ۱- نمونه‌ای از سیستم یوتیلیتی سایت جامع [۴]

یوتیلیتی سایت جامع<sup>۱</sup> به‌عنوان یک سیستم همزمان تولید توان و حرارت صنعتی، وظیفه سرویس‌دهی به تعداد مشخصی از فرآیندها را برای تأمین حرارت و قدرت در ترازهای مختلف انرژی در فرآیندهای صنعتی عهده‌دار است. سیستم یوتیلیتی فرآیندی براساس نیاز بخش‌های داخلی مجموعه و یک سری متغیرهای عملیاتی چیده می‌شوند؛ این تغییر در تقاضا نیازمند یک روش مناسب جهت ایجاد یک سامانه مدیریتی می‌باشد که بتواند بهترین حالت را که دارای بازدهی بالا، قابلیت تطبیق با شرایط مختلف و همچنین هزینه کمینه با توجه به هدف‌گذاری اقتصادی حاصل از بهینه‌سازی را داشته باشد. با در نظر گرفتن تقاضای متغیر سیستم خدمات جانبی با زمان، بالا نگه داشتن بازده با تغییر پارامترها در یک بازه مشخص، امری مطلوب نظر می‌باشد [۲ و ۱]. در بسیاری از صنایع از جمله صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و شیمیایی، از بخار آب در فرآیندهای گوناگون استفاده می‌شود. از طرفی می‌توان تمامی یا بخش عمده‌ای از این فرآیندهای گوناگون صنعتی را به صورت یک سیستم یکپارچه که به یک سیستم خدمات جانبی مشترک، به عنوان مثال، سیستم تولید بخار، متصل باشند، تبدیل نمود، به این سیستم یکپارچه اصطلاحاً سایت جامع اطلاق می‌گردد.

شکل ۱ نمونه‌ای از سیستم یوتیلیتی در سایت جامع را نمایش می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، فرآیندهای مختلف در سایت جامع درحالی‌که به یک سیستم یوتیلیتی مرکزی مشترک متصل هستند، کار می‌کنند. در شکل ۱ بخار با فشار بسیار بالا (VHP) در مولدهای بخار تولید می‌شود سپس این بخار با عبور از توربین‌ها و منبسط شدن، به بخار در فشارهای بالا (HP)، متوسط (MP) و پایین (LP) تبدیل می‌شود، درنهایت بخار توسط آب سردکننده، چگالیده می‌شود. توربین‌های بخار توان تولید می‌کنند، همچنین ممکن است میزانی توان برای جبران کمبود، از شبکه وارد و یا توان اضافه به شبکه صادر شود [۳].

در سه دهه اخیر پس از افزایش عمده بهای سوخت، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش کارایی انرژی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی، تمایل به استفاده از فن‌آوری‌های جدید از جمله تولید همزمان برق و حرارت افزایش یافته است [۵]. خوشگفتارمنش و همکاران [۶-۸] روش‌های نوینی در زمینه روش هدف‌گذاری تولید همزمان، بررسی انرژی و اکونومیک و انرژی زیست‌محیطی یک سیستم تولید همزمان را ارائه دادند. قاضی [۹] مدل‌سازی و اصلاح سیستم های تولید همزمان در کل سایت را با استفاده از تئوری ساختاری و با رویکرد صنعتی تحلیل و همچنین بهترین چیدمان را از نظر اقتصادی معرفی کرد. ماوروماتیس و کوکوسیس [۱۰] یک مدل سخت افزاری برای توربین ارائه نمودند که در آن تغییرات راندمان با اندازه توربین، بار توربین و شرایط کارکرد به صورت ساده و دقیق در نظر گرفته شده بود، آنها نشان دادند که می‌توان از این مدل برای هدف‌گذاری توان تولیدی در مراحل طراحی یک سایت جامع استفاده نمود. کلمس و همکاران [۱۱] نشان دادند که با استفاده از منحنی‌های ترکیبی می‌توان یک سایت جامع را از نقطه نظر ترمودینامیکی برای مشخص کردن میزان نیاز به سوخت، بازیافت حرارت و تولید همزمان حرارت و توان هدف‌گذاری نمود. قنادزاده و همکاران [۱۲] روش جدید هدف‌گذاری تولید همزمان برای سیستم‌های یوتیلیتی سایت جامع را ارائه دادند. در این مقاله مدل تکرار شونده پایین به بالا را به منظور هدف‌گذاری سایت جامع تولید همزمان

<sup>۱</sup> Total site utility

اهمیت ویژه‌ای دارند. طراحی مناسب این چیدمان‌ها می‌تواند باعث صرفه جویی یا در مقابل آن باعث ایجاد هزینه‌های اضافی غیر قابل توجه گردد. در ابتدا یک مدل اصلاحی به‌عنوان یک روش هدف‌گذاری جدید تولید همزمان ارائه می‌گردد، به علت اینکه روش تکرارشونده مدل جدید، توان محوری را از پایین به بالا محاسبه می‌کند، به آن مدل تکرارشونده پایین به بالا<sup>۳</sup> گفته می‌شود. با توجه به داده‌های طراحی یک سیستم تولید همزمان در سایت جامع، ابتدا پتانسیل توان در سایت جامع محاسبه خواهد شد و با توجه به توان تولیدی محاسبه‌شده و همچنین میزان بخار تولیدی در هر سطح بخار که نشانگر پتانسیل تولید همزمان می‌باشند، مناسب‌ترین چیدمان توربین‌های بخار فشار برگشتی، توربین‌های کندانسی و توربین‌های گازی که کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب انرژی را داشته باشند پیشنهاد خواهند شد.

## ۲- تحلیل انرژی‌اقتصادی

در یک واحد صنعتی، انرژی سوخت به توان و حرارت تبدیل‌شده و بخشی از انرژی در طی این انتقال به هدر می‌رود، راندمان تولید همزمان قدرت و حرارت ( $\eta_{\text{cogen}}$ ) که همان راندمان استفاده مفید از سوخت است به‌صورت نسبت بخش مفید و قابل‌استفاده انرژی به مصرف سوخت تعریف می‌گردد (رابطه (۱))، و نسبت توان به حرارت نیز در رابطه (۲) تعریف شده است که معرف شرایط عملکردی یک سایت است [۳].

$$\eta_{\text{cogen}} = \frac{W + Q_{\text{heat}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

$$R = \frac{W}{Q_{\text{heat}}} \quad (2)$$

برخلاف انرژی، انرژی از قانون بقا تبعیت نمی‌کند و از طریق بازگشت ناپذیری‌های سیستم تخریب می‌گردد. انرژی نیز مانند انرژی، دارای مؤلفه‌های مختلفی است. در غیاب اثرات میدان‌های هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی و کشش سطحی، می‌توان رابطه (۳) را برای انرژی جریانی از مواد نوشت [۱۵].

حرارت و توان ارائه نمودند. در این مدل با استفاده از منحنی جامع ترکیبی مربوط به سیستم تولید بخار، دماهای ورودی به هر توربین در هر سطح فشار در شبکه بخار به ترتیب از پایین‌ترین سطح فشار به بالاترین سطح و به روش سعی و خطا محاسبه می‌شود. احمدی، دینسر<sup>۱</sup> و رزن<sup>۲</sup> [۱۳]، تحلیل انرژی و انرژی‌اقتصادی و زیست محیطی و بهینه‌سازی چند منظوره نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را با الگوریتم تکاملی بررسی کردند. در این مقاله سه تابع هدف، متشکل از مینیمم نرخ قیمت کل، صدور مینیمم دی اکسید کربن و بازده ماکزیمم انرژی برای بهینه‌سازی سیستم بررسی شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد با انتخاب بهترین تجهیزات و با استفاده از کمترین نرخ سوخت به محفظه احتراق می‌توان کمترین صدور آلاینده‌های زیست محیطی را به دست آورد. یاسر و همکاران [۱۴]، مدلسازی و تحلیل انرژی‌اقتصادی یک سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان، در یک مورد مطالعاتی چهار مگاواتی را مورد بررسی قرار داده‌اند، و بهترین چیدمان تجهیزات تولید حرارت و توان را معرفی نمودند.

روش الگوریتم اصلاحی یک روش مفهومی جدید است که در جهت اصلاح یک سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان گسترش داده شده است. در واقع هدف از این روش، پیدا کردن مقدار توان تولیدی بین هر دو سطح بخار، پتانسیل تولید همزمان، دبی گذرنده از توربین‌ها، بار حرارتی بویلر و میزان مصرف سوخت می‌باشد. استفاده از روش الگوریتم اصلاحی می‌تواند پیچیدگی‌های یک مساله را کاهش دهد به نحوی که می‌توان از آن به منظور بهینه‌سازی مسائل پیچیده و دارای پارامترهای زیاد استفاده نمود. در این پژوهش، مدلسازی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان از دیدگاه انرژی‌اقتصادی در یک مورد مطالعاتی صد مگاواتی مورد بررسی قرار گرفته است. به علت هزینه‌های بالای راه‌اندازی توربین‌ها و تقاضای سوخت مصرفی نیروگاه‌ها که بخار مورد نیاز توربین‌ها را تولید می‌کند، نحوه‌ی چیدمان تجهیزات در فرآیند تولید، در طراحی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان،

<sup>1</sup> Dincer

<sup>2</sup> Rosen

<sup>3</sup> Iterative Bottom-to-Top Model (IBTM)

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_{out}}{\sum Ex_{in}} \quad (11)$$

در تحلیل انرژی نیروگاه، انرژی جریان در تمام نقاط محاسبه شده و تغییرات در انرژی برای هر جزء سیستم بدست می‌آید. منبع انرژی تخریبی در دیگ بخار و توربین بخار به طور عمده در فرآیند احتراق و انرژی اتلافی در مسیر جریان اتفاق می‌افتد. ترکیب قانون دوم ترمودینامیک با نگرش‌های اقتصادی ابزاری قدرتمند را برای مطالعه و بهینه سازی سیستم‌های انرژی ارائه می‌دهد. در تحلیل انرژی اقتصادی بالانس هزینه برای هر جزء محاسبه می‌گردد. اعمال یک بالانس هزینه برای اجزاء سیستم K نشان دهنده این امر است که جمع نرخ هزینه‌های مرتبط با کل جریان انرژی موجود مساوی است با مجموع نرخ هزینه‌های جریان‌های انرژی ورودی به علاوه هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری تجهیزات، این بالانس بصورت زیر فرمول بندی می‌گردد [۱۷].

$$\dot{C}_{q,K} + \sum_i \dot{C}_{i,K} + \dot{Z}_K = \sum_e \dot{C}_{e,K} + \dot{C}_{w,K} \quad (12)$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}x_j \quad (13)$$

در اینجا برای توضیحات بیشتر مفهوم انرژی نیاز به توضیح عبارات سوخت و محصول می‌باشد. تولید انرژی در رابطه با اجزاء سیستم معرفی می‌گردد و سوخت (خوراک) معرف منبعی است که جهت تولید محصول مصرف می‌گردد. هر دو عامل محصول و سوخت در رابطه با انرژی بیان می‌شوند. هزینه مربوط به سوخت ( $\dot{C}_F$ ) و محصول ( $\dot{C}_P$ ) در یک جزء با جایجایی نرخ‌های انرژی ( $\dot{E}x$ ) به دست می‌آیند. با ترکیب بالانس انرژی و بالانس اقتصادی می‌توان به رابطه زیر رسید [۱۷].

$$\dot{E}x_{F,K} = \dot{E}x_{P,K} + \dot{E}x_{L,K} + \dot{E}x_{D,K} \quad (14)$$

که  $\dot{E}x_{F,K}$  معرف نرخ انرژی سوخت (خوراک) جزء K،  $\dot{E}x_{P,K}$  معرف نرخ انرژی محصول جزء K است. همچنین  $\dot{E}x_{D,K}$  و  $\dot{E}x_{L,K}$  به ترتیب نرخ انرژی اتلافی و تخریبی جزء K سیستم می‌باشند.

هزینه‌ی نرخ تخریب انرژی که بر واحد دلار بر ساعت می‌باشد از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود که مقدار  $C_{f,K}$  در این پژوهش  $0.05 \text{ \$/MJ}$  در نظر گرفته شده است [۱۳ و ۲۰].

$$Ex = Ex_K + Ex_P + Ex_{PH} + Ex_{CH} \quad (3)$$

نرخ انرژی فیزیکی یک جریان جرم با چشم‌پوشی از مولفه‌های پتانسیل و جنبشی انرژی به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۶].

$$ex_{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4)$$

انرژی شیمیایی یکی از مهم‌ترین بخش‌های انرژی در فرآیند احتراق است، که مقدار آن برحسب مول گاز (K) برای مخلوط گازها از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\overline{ex}_{mix}^{CH} = \sum_{i=1}^n x_i e_x^{CH_i} + \bar{R}T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $x_i$  جزء مولی k ام در مخلوط،  $e_x^{CH_i}$  مقدار انرژی شیمیایی استاندارد آن ماده،  $\bar{R}$  ثابت گازها و  $T_0$  دمای محیط است. و جهت محاسبه توان توربین‌های بخار می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۷-۱۹].

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i (h_i - h_{i+1}) \quad (6)$$

جهت انجام تحلیل انرژی نیازمند بالانس جرمی و بالانس انرژی سیستم برای بدست آوردن نرخ دی‌ها و نرخ انتقال حرارت در سطح کنترل هستیم. با اعمال یکی از این بالانس‌ها به قوانین اول و دوم ترمودینامیک، فرمولی برای بالانس انرژی بدست خواهد آمد. رابطه (۷) معادله انرژی و رابطه (۸) معادله بالانس انرژی را نشان می‌دهد.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (7)$$

$$\dot{E}Q + \sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_e \dot{m}_e h_e + \dot{E}W + \dot{E}D + \dot{E}L \quad (8)$$

که پانویس‌های i و e به ترتیب، معرف جریان‌های ورودی و خروجی حجم کنترل می‌باشند.

انرژی سوخت به طور تقریبی با استفاده از فرمول (۹) قابل محاسبه می‌باشد، و همچنین برای یک سوخت گازی با ترکیب  $C_xH_y$ ، رابطه تجربی (۱۰) جهت تخمین  $\xi$  استفاده می‌شود [۱۳].

$$\xi = \frac{eX_f^{CH}}{LHV_f} \quad (9)$$

$$\xi = 1.033 + 0.0169 \frac{y}{x} - \frac{0.0698}{x} \quad (10)$$

و همچنین بازده انرژی، از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۹].

در رابطه (۲۱) پارامتر  $i$  نرخ بهره و  $n$  عمر تعیین شده تجهیزات می‌باشد [۱۹].

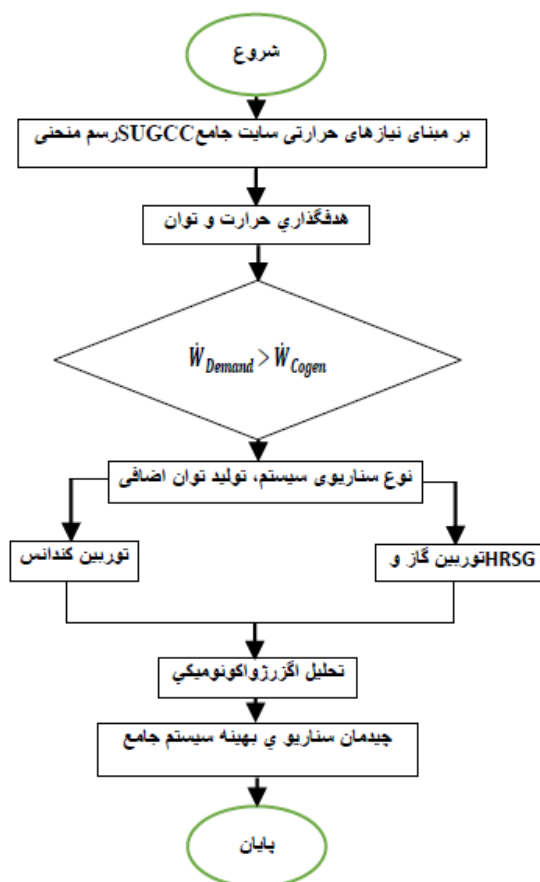
مجموع  $\dot{Z}_k$  و  $\dot{C}_{D,K}$  معیاری برای بهینه کردن تجهیزات در محاسبات اگزروزاکونومیک می‌باشد و کمینه کردن این مقدار به عنوان تابع هدف بهینه سازی اگزروزاکونومیک مطرح می‌گردد. در نهایت تابع هدف، رابطه (۲۲) به عنوان فرمول کلی جهت تعیین چیدمان بهینه از دیدگاه اگزروزاکونومیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\text{Objective Function: Min}(\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,K}) \quad (22)$$

الگوریتم روش کار در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۳- تجزیه و تحلیل

جهت بررسی قابلیت کاربردی روش تحلیل اگزروزاکونومیک در سایت جامع سامانه تولید همزمان حرارت و توان، یک مورد مطالعاتی صد مگاواتی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۲- الگوریتم روش کار

$$\dot{C}_{D,K} = c_{f,K} \times \dot{E}x_{D,K} \quad (15)$$

که  $\dot{E}x_{D,K}$  طبق رابطه (۱۶) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\dot{E}x_{D,K} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \quad (16)$$

برای محاسبه نرخ هزینه سرمایه‌گذاری از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود، در این رابطه،  $\varphi$  ضریب نگهداری تجهیزات که عموماً ۱/۰۶ فرض می‌شود و CRF، فاکتور بازگشت سرمایه،  $N$  تعداد ساعات کارکرد تجهیزات و  $Z_k$  تابع قیمت هر یک از تجهیزات می‌باشد [۲۱].

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N \cdot 3600} \quad (17)$$

تجهیزات مورد استفاده در این مقاله مانند دیگ بخار، توربین بخار و توربین گاز هرکدام دارای هزینه خاصی هستند که این هزینه‌ها بر اساس پارامترهای خاصی تعیین می‌شوند و معمولاً به صورت یک تابع ارائه می‌گردند، در ادامه هرکدام از این توابع بررسی می‌شوند.

تابع هزینه خرید دیگ بخار بصورت رابطه (۱۸) بیان می‌شود،  $Z_{BOILER}$  هزینه خرید دیگ بخار برحسب دلار و  $m_B$  دبی بخار برحسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد [۲۲].

$$Z_{BOILER} = 30337.015 m_B^{1.5} + 1407058.4 \quad (18)$$

تابع قیمت خرید توربین بخار بصورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود، که  $Z_{ST}$  برحسب دلار و  $\dot{W}_{ST}$  توان برحسب کیلووات می‌باشد [۲۲].

$$Z_{ST} = 151.13 \times \dot{W}_{ST} + 356250 \quad (19)$$

تابع قیمت خرید توربین گاز از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۲۳].

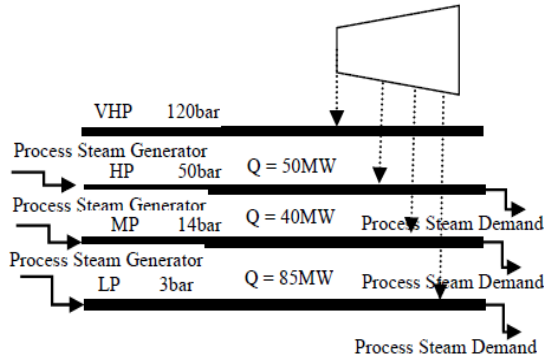
$$PC_{GT} = 0.3082 W_{D,GT} + 611.4 \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)  $PC_{GT}$  قیمت خرید توربین گاز و  $W_{D,GT}$  توان خروجی طراحی توربین گاز برحسب کیلووات می‌باشد. و همچنین فاکتور بازگشت سرمایه<sup>۱</sup> از رابطه (۲۱) بدست می‌آید:

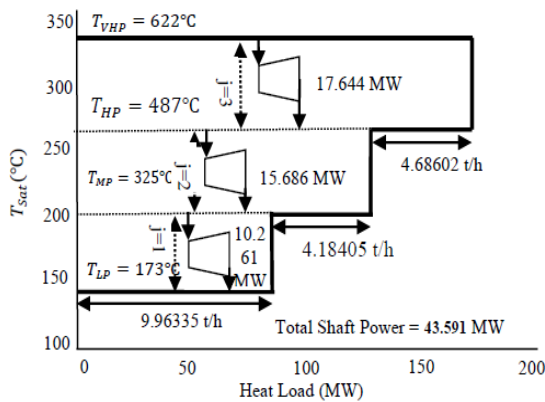
$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (21)$$

<sup>۱</sup> Capital Recovery Factor (CRF)

### ۳-۱- مورد مطالعاتی



شکل ۳- واحد یوتیلیتی سایت جامع مورد مطالعاتی [۱۲]



شکل ۴- نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع پس از هدف گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM

پتانسیل تولید توان در حالت همزمان کامل در این مورد مطالعاتی (MW) ۴۳/۵۹۱ به دست می آید. اگر ارزش حرارتی سوخت (MWh/t) ۱۲/۸۱۹ در نظر گرفته شود، بار حرارتی دیگ بخار ودبی سوخت به ترتیب برابر (MW) ۲۱۸/۵۹۱ و (t/h) ۱۷/۰۵۲ محاسبه می شود [۱۲].

### ۳-۳- انتخاب بهترین چیدمان تجهیزات سامانه تولید همزمان جهت تأمین حرارت و توان مورد نیاز پالایشگاه از دیدگاه انرژی و اکونومی

مطابق الگوریتم روش کار در ابتدا به پیکربندی چیدمان توربین های بخار پرداخته و با تحلیل عملکرد انرژی و اکونومی آنها چیدمان مناسب معرفی می شوند. در ادامه به جزء دوم این پژوهش یعنی اضافه شدن دو طرح از یک سامانه توربین میعانی (کندانسی) با بازدهی ۸۰٪ و یا یک سامانه توربین گازی با بازدهی ۸۵٪ می پردازیم. در نهایت مجموع بهترین

در ابتدا برای نشان دادن قابلیت روش اصلاحی IBTM در تحلیل سایت جامع به عنوان مطالعه موردی، واحد سرویس- های جانبی یک پالایشگاه انتخاب می شود. این پالایشگاه، پالایشگاه کلتکس<sup>۱</sup> در آفریقای جنوبی است که به عنوان مطالعه موردی در روش IBTM نیز انتخاب شده است، این پالایشگاه شامل یک برج تقطیر اتمسفریک نفت خام، یک برج تقطیر خلاء، واحد شکافت هیدروژن، واحد شکافت کاتالیستی، واحد کاهش گرانبوی، واحد تصفیه هیدروژنی نفت، دیزل و کروم، واحد پلاتنوم می باشد [۱۲]. شکل ۳ داده های ورودی لازم برای هدف گذاری تولید همزمان در سامانه یوتیلیتی سایت در تعامل باهفت واحد پالایشگاه را نشان می دهد.

در این مورد مطالعاتی، سامانه یوتیلیتی دارای چهار سطح شامل سطح بخار با فشار بسیار بالا در فشار ۱۲۰ بار، فشار بالا در ۵۰ بار، فشار متوسط در ۱۴ بار و فشار پایین در ۳ بار می باشد [۱۲]. در این مورد فرض بر این است که آب ورودی به دیگ بخار و کندانس برگشتی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد هستند.

### ۳-۲- هدف گذاری حرارت و توان

پس از تهیه اطلاعات مورد نیاز سایت جامع، شکل ۳، مدل اولیه نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ترسیم می گردد. در نمودار اولیه یوتیلیتی سایت جامع، میزان بار حرارتی تولید شده و مورد نیاز در هر سطح، فشار و دمای بخار اشباع در هر سطح نشان داده می شود. دمای واقعی بخار فشار پایین (۱۷۳) درجه سانتی گراد، با اضافه کردن یک مقدار فرضی درجه سوپرهیت ۴۰ درجه سانتی گراد به دمای اشباع آن (۱۳۳) درجه سانتی گراد) مشخص می شود [۱۲]. سپس با شروع از سطح فشار پایین، دمای همه سطوح از روش اصلاح شده به دست می آید [۹]. شکل ۴ نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع را پس از هدف گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM برای نمونه مطالعاتی را نشان می دهد.

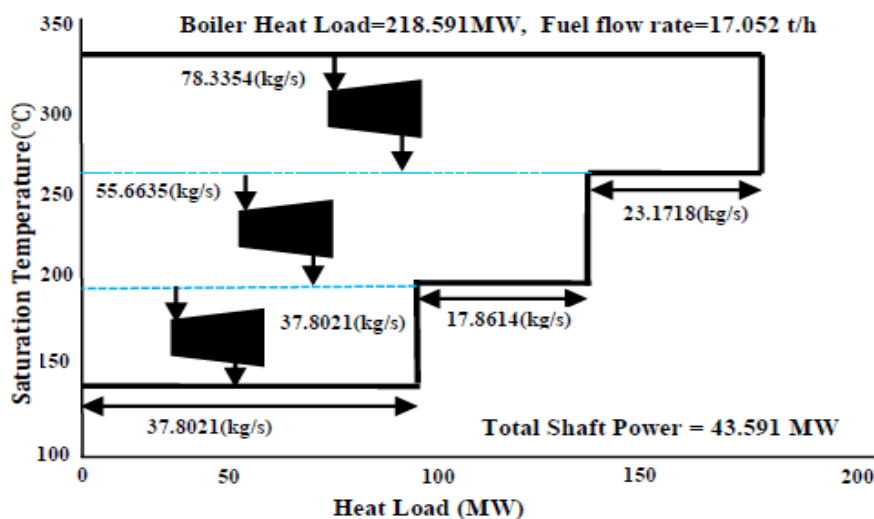
<sup>۱</sup> Caltex

توان، بین این دو سطح بخار، توربین بخار قرار می‌گیرد، شکل ۴ چیدمانی که بین هر دو سطح متوالی یک توربین بخار فشار برگشتی موجود است را نشان می‌دهد. اگر قرار بر تولید همین میزان توان باشد، می‌توان چیدمان‌های متنوعی از توربین‌های بخار با همین میزان توان تولیدی را پیشنهاد نمود و چیدمان بهینه را کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب آگرزژی انتخاب نمود. در شکل‌های ۵ تا ۸ سناریوهای مختلفی از چیدمان‌های مختلف توربین‌های بخار مطرح می‌شود. در تمامی این چیدمان‌ها نسبت توان به بار حرارتی برابر  $R=0/2$  می‌باشد [۹].

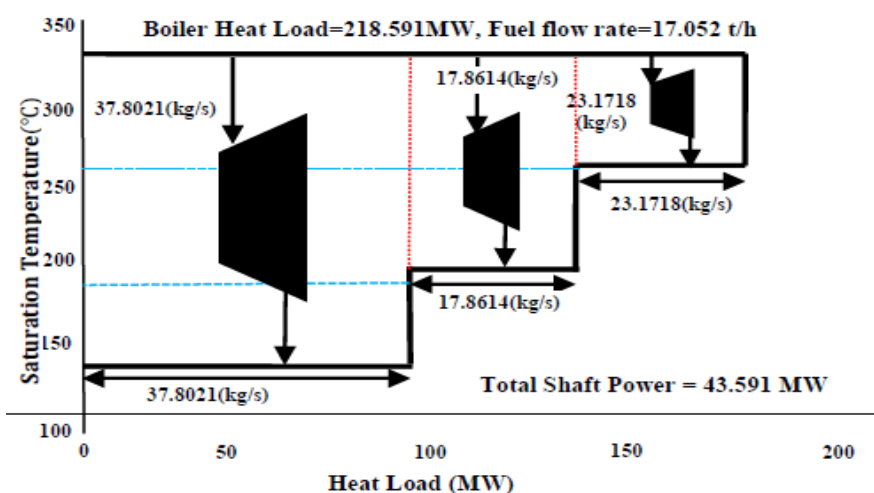
طرح شامل چیدمان کارآمد توربین‌های بخار فشار برگشتی به‌اضافه‌ی بهترین طرح جانبی از بین سامانه توربین گازی یا میعانی به‌عنوان طرح منتخب ارائه خواهد شد.

### ۳-۴- نحوه چیدمان توربین بخار بین سطوح بخار در حالت تولید همزمان کامل

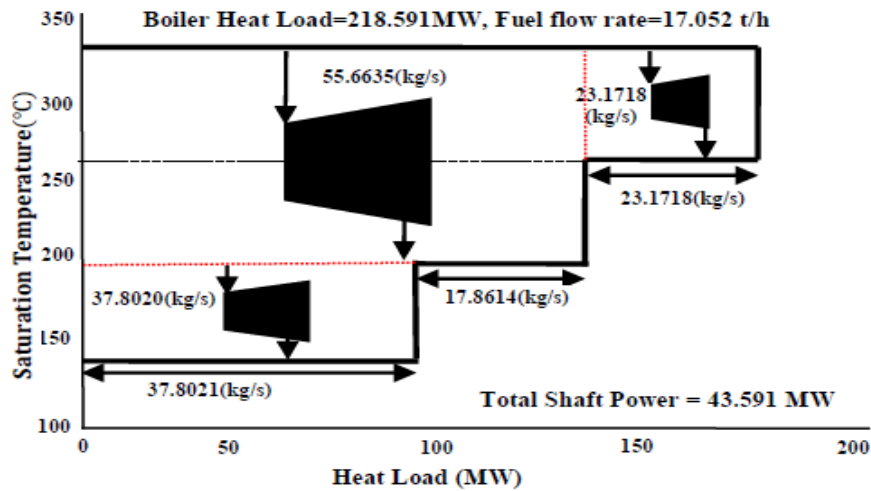
همان‌طور که در نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع پس از هدف‌گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM، شکل ۴ مشخص گردید، سه ناحیه بین هر دو سطح بخار وجود دارد که با اندیس  $z=3$  نشان داده می‌شود. برای به دست آوردن



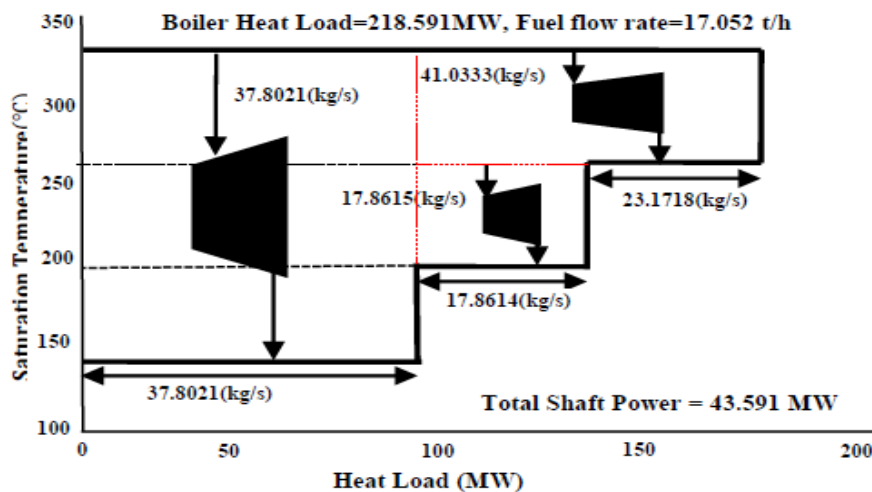
شکل ۵- نحوه چیدمان توربین‌ها در سناریوی اول



شکل ۶- نحوه چیدمان توربین‌ها در سناریوی دوم



شکل ۷- نحوه چیدمان توربین ها در سناریوی سوم

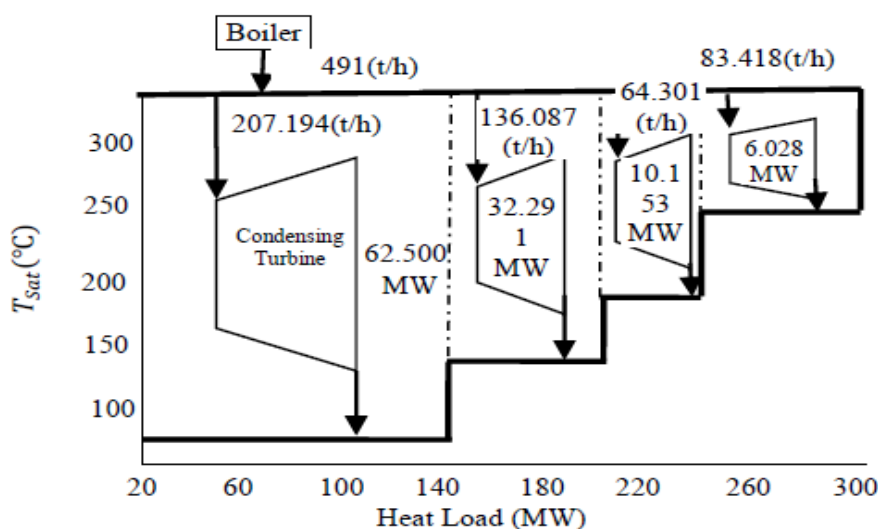


شکل ۸- نحوه چیدمان توربین ها در سناریوی چهارم

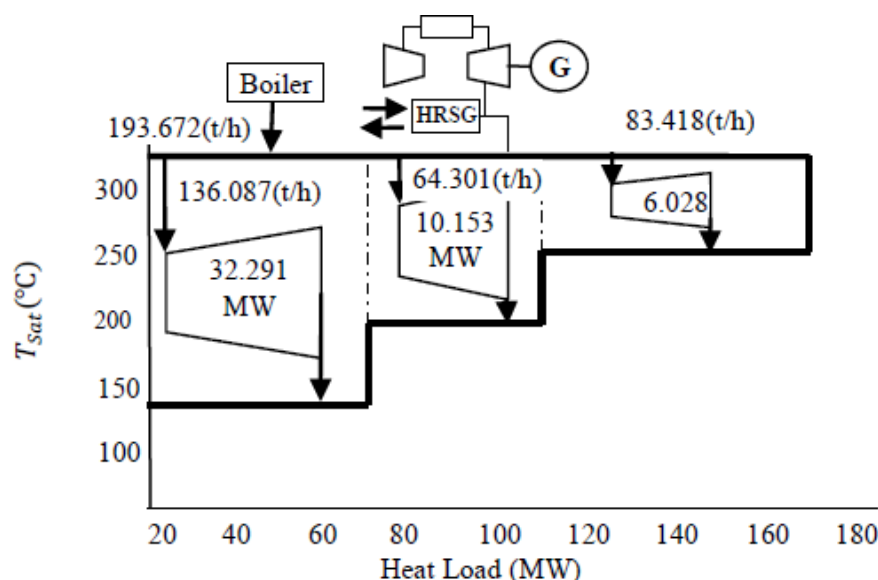
توربین گازی، شکل ۱۰ مطرح کرد و تحلیل اگزورژواکونومیک را در این دو حالت بررسی کرد. در نهایت سناریوی که کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزورژی را داشته باشد به عنوان بهترین سناریو انتخاب می شود. در شرایط مساوی برای هر دو سناریو، یعنی در توان تولیدی و حرارت تولیدی یکسان که نسبت R برای هر دو سناریو ۰/۵۳۴ می باشد. نتایج حاصل از بررسی این دو طرح کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزورژی را برای سناریوی دوم، شکل ۱۰، یعنی استفاده از سامانه توربین گازی را نشان می دهد.

۳-۵- انتخاب بهترین چیدمان تجهیزات جهت تأمین توان اضافی بر توان تولید همزمان کامل پالایشگاه اگر تقاضای توان پالایشگاه به فرض مقدار ۱۰۰ MW باشد، این مقدار توان با توان تولیدی توربین های بخار بین سطوح یعنی توان تولید همزمان کامل تأمین نمی گردد. از این رو، طرح استفاده از توربین کندانسی یا طرح بهره برداری از سامانه توربین گازی و یا حتی ترکیبی از این دو برای تأمین توان اضافی واحد بررسی می گردد. همانطور که مشاهده می شود، می توان یک سناریو با در نظر گرفتن توربین میعانی (کندانسی) شکل ۹ و سناریوی دیگری با در نظر گرفتن





شکل ۹- سناریوی اول برای تولید توان اضافی موردنیاز پالایشگاه برای مورد مطالعاتی



شکل ۱۰- سناریوی دوم برای تولید توان اضافی موردنیاز پالایشگاه برای مورد مطالعاتی

طراحی بهینه سیستم‌های انرژی از نقطه نظر اقتصادی است، از اینرو اهمیت داشتن نگاه اقتصادی در این تحلیل از آنجا مشخص می‌شود که قیمت سرمایه‌گذاری تجهیزات و نیز هزینه سوخت مصرفی جهت تولید بخار مورد نیاز در سیستم در بازه‌های زمانی طولانی به میلیون‌ها دلار می‌رسد. کاستن از این هزینه‌ها علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی نتایجی همچون کاهش صدور آلاینده‌های جوی را در برخواهد داشت.

برای این دو طرح، در تحقیقی که توسط قاضی و همکاران [۹] از دیدگاه تئوری ساختاری صورت گرفت، نتایجی مشابه، یعنی سناریوی دوم را چیدمان مناسب‌تری برای سامانه تولید همزمان پالایشگاه نشان داد.

#### ۴- نتایج و بحث

از آنجایی که هدف از تحلیل اگزروزاکونومیکی استفاده از ملاحظات اقتصادی در کنار تحلیل‌های اگزرژی به منظور

جهت تولید ۵۰ مگاوات توان اضافی، دو طرح استفاده از یک توربین میعانی و سامانه توربین گازی با نسبت R یکسان پیشنهاد شد. به این ترتیب که بازدهی انرژی و تخریب توربین کندانسی به ترتیب برابر با ۵۳ درصد و ۴۳۱۸۵ کیلووات و در سامانه توربین گازی برابر با ۸۵ درصد و ۳۵۶۹۵ کیلووات برآورد شد. در جدول ۲ مشخصات توربین کندانسی و در جدول ۳، مشخصات سامانه توربین گازی برای مورد مطالعاتی به همراه تحلیل انرژی نشان داده شده است.

مقایسه بازدهی ها و انرژی تخریبی طرح های پیشنهادی کلی برای مورد مطالعاتی در جدول ۴ آمده است. طبق نتایج به دست آمده در جدول ۴ ترکیب سیستم توربین گازی با چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی بهترین بازدهی انرژی را در بردارد. همچنین، میزان تخریب انرژی در طرح توربین گازی نسبت به نوع کندانسی مقدار پایین تری می باشد.

در جدول ۵ نیز محاسبات مربوط به، تابع قیمت، هزینه نرخ تخریب انرژی، هزینه نرخ سرمایه گذاری و همچنین مجموع هزینه نرخ سرمایه گذاری و هزینه نرخ تخریب انرژی برای تجهیزات به کار رفته در طرح نشان داده شده است. نتایج محاسبه مجموع هزینه نرخ سرمایه گذاری و هزینه

نتایج حاصل از تحلیل توربین های بخار فشار برگشتی برای مورد مطالعاتی نشان داد که هر چهار سناریو دارای بازدهی انرژی به میزان ۹۳ درصد و تخریب انرژی به میزان ۵۱۲۵/۲ کیلووات می باشند. دلیل این اتفاق، ثابت بودن ورودی بار حرارتی به خطوط فشار، تولید توان ثابت در هر چهار سناریو و همچنین ثابت بودن دما و فشار خطوط فشار می باشد. از اینرو می توان از هر یک از سناریو ها برای استفاده ترکیبی در کنار طرح های جانبی جهت تولید توان اضافی استفاده کرد. جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل انرژی سناریو های چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی را نشان می دهد.

جدول ۱- نتایج تحلیل انرژی سناریو های چیدمان توربین های بخار

مشخصه	واحد	مقدار
$\dot{W}_1$	kW	۶۱۰۲۸
$\dot{W}_2$	kW	۱۰/۱۵۳
$\dot{W}_3$	kW	۳۲/۲۹۱
$\dot{W}_4$	kW	-
$\Sigma \dot{W}$	kW	۴۳۵۹۱
$\dot{m}_{st.VHP}$	kg/s	۷۸/۸۳۵۴
$\dot{m}_{fuel}$	kg/s	۴/۷۳۶۶
$\dot{Q}_{Boiler}$	kW	۲۵۴۱۶۰
$\dot{Q}_{VHP}$	kW	۱۷۱۳۰۰
$\dot{Q}_{net.HP}$	kW	۵۲۴۶۰
$\dot{Q}_{net.MP2}$	kW	-
$\dot{Q}_{net.MP}$	kW	۴۰۷۲۴
$\dot{Q}_{net.LP}$	kW	۸۵۵۳۰
$\Sigma \dot{Q}_{net}$	kW	۱۷۸۷۱۰
$\dot{E}x_{fuel}$	kW	۲۴۳۳۸۰
$\Sigma \dot{E}x_{Dest}$	kW	۵۱۲۵/۲
$\eta_{ex.total}$	%	۹۳

جدول ۲- نتایج تحلیل انرژی توربین کندانسی

مشخصه	واحد	مقدار
توان تولیدی واقعی	kW	۶۲۵۰۰
بار حرارتی بویلر	kg/sec	۱۹۵۶۹۲/۸
دبی بخار	kg/sec	۵۷/۵۵۴
دبی سوخت بویلر	kg/sec	۹/۵۲۳۸
انرژی ورودی	kW	۹۳۲۹۶/۲
انرژی خروجی	kW	۱۱۰/۵۰
انرژی سوخت	kW	۵۰۴۷۹۷/۹
تخریب انرژی	kW	۴۳۱۸۵
بازدهی انرژی	%	۵۳

جدول ۶- محاسبه مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی برای تأمین توان اضافی

نام تجهیزات	$(\dot{Z}_K + \dot{C}_{D,K}) (\frac{\$}{hr})$
توربین کندانس + توربین‌های بخار	۱۸۳۴/۱
توربین گازی + توربین‌های بخار	۱۳۸۶/۵

توربین گازی با چیدمان توربین‌های بخار، دارای کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی نسبت به نوع کندانسی می‌باشند، که همین امر لزوم استفاده از این سیستم از لحاظ اگزرژیواکونومیکی را نشان می‌دهد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی یک مورد مطالعاتی پرداخته شد، که مورد مطالعاتی شامل چهار سناریو که هر کدام شامل سه توربین با چیدمان متفاوت با مجموع توان تولیدی ۴۳۵۹۱ کیلو وات و توربین میعانی و توربین گازی، هر کدام با توان تولیدی ۵۰ مگاوات بود. همچنین، بار حرارتی مورد نیاز سامانه‌های یوتیلیتی جانبی سایت به میزان ۱۷۸۷۱۰ کیلو وات در خروجی توربین‌های بخار فشار برگشتی تولید شد. محاسبات برای سیستم تولید همزمان حرارت و توان برای چیدمان تجهیزات در سناریوهای مختلف انجام شد و با توجه به نتایج بدست آمده، تفاوت‌ها در میزان مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی و نیز بازدهی اگزرژیکی سیستم کاملاً محسوس می‌باشد. درنهایت، استفاده ترکیبی از چیدمان منتخب توربین‌های بخار فشار برگشتی در کنار سامانه توربین گازی، از دیدگاه اگزرژیواکونومیکی به عنوان بهترین چیدمان پیشنهاد شدند.

### ۶- فهرست علائم

هزینه نرخ تخریب اگزرژی، (KW)	$\dot{C}_{D,K}$
هزینه سوخت در واحد اگزرژی، (\$/MJ)	$C_{f,K}$
نرخ تخریب اگزرژی، (KW)	$\dot{E}_{x,DEST}$
نرخ اگزرژی، (KW)	$\dot{E}_x$

نرخ تخریب اگزرژی برای تأمین توان اضافی، برای مورد مطالعاتی، در جدول ۶ نشان داده شده است.

طبق نتایج به دست آمده در جدول ۶، جهت تعیین چیدمان بهینه از دیدگاه اگزرژیواکونومیکی، ترکیب سیستم

جدول ۳- مشخصات نقاط مختلف توربین گازی

نقاط	نوع جریان	$m [kg/s]$	T[k]	P[bar]	$\dot{E}_x [kW]$
۱	هوا	۷۲/۶۵۴	۳۰۰	۱/۰۱۳	۶۲۴۱/۹۴
۲	هوا	۷۲/۶۵۴	۵۴۰	۸/۱۰۴	۵۶۵۰/۸۳
۳	محصولات	۷۴/۲۰۷	۱۳۰۰	۸/۵۲	۱۲۰۹۹۰
۴	محصولات	۷۴/۲۰۷	۷۷۰	۴/۱۱	۴۵۷۴۵
۵	محصولات	۷۶/۲۶۷	۱۰۹۸/۱۵	۱/۰۶۶	۴۷۱۳۱/۴
۶	محصولات	۷۶/۲۶۷	۴۴۸/۱۵	۱/۰۱۳	۹۲۷۱/۷
۷	آب	۲۵/۰۳۷	۴۰۳/۱۵	۲۰/۰۰	۱۰۰۹
۸	بخار	۲۵/۰۳۷	۹۲۰/۱۵	۲۰/۰۰	۳۵۸۲۶
۹	متان	۲/۰۶۰۰	۳۰۰	۹/۰۰۰	۱۰۷۹۴۸
۱۰	متان	۱/۵۵۰۶	۳۰۰	۹/۰۰۰	۸۱۲۵۱/۴

جدول ۴- مقایسه بازدهی‌ها و اگزرژی تخریبی طرح‌های پیشنهادی کلی

طرح‌های پیشنهادی	$\eta_{ex} [\%]$	$\dot{E}_{Dest, total} [kW]$
توربین گازی + توربین‌های بخار	۷۲	۴۰۸۲۰/۲
توربین کندانسی + توربین‌های بخار	۴۱	۴۸۳۱۰/۲

جدول ۵- نتایج محاسبات اگزرژیواکونومیکی

نام تجهیزات	توربین گازی + توربین مبدل حرارتی	توربین کندانس + بویلر	توربین‌های بخار + بویلر
$Z_K (1000\$)$	۱۶۰۲/۲	۲۲۵۶/۶	۳۰۳۲/۴
$\dot{C}_{D,K} (\frac{\$}{hr})$	۱۶۳/۵	۴۵۶/۹	۱۳۱/۳
$\dot{Z}_K (\frac{\$}{hr})$	۳۷۷/۴	۵۳۱/۵	۷۱۴/۲
$(\dot{Z}_K + \dot{C}_{D,K}) (\frac{\$}{hr})$	۵۴۰/۹	۹۸۸/۴	۸۴۵/۵

- the total site cogeneration heat and power retrofit. Int J Exergy 17(2): 171-191.
- [10] Ren XY, Jia XX, Varbanov PS, Klemeš J (2018) Targeting the cogeneration potential for Total Site utility systems. J Clean Prod 170: 625-635.
- [11] Walmsley TG, Varbanova PS, Philipp M, Klemeš J (2018) Total site utility systems structural design considering electricity price fluctuations. Comput. Aided Chem Eng 44: 1159-1164.
- [12] Ghannadzadeh A, Perry S, Smith R (2012) Cogeneration targeting for site utility systems. Appl Therm Eng 43: 60-66.
- [13] Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA (2011) Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants. Energy 36(10): 5886-5898.
- [14] Shokri Y, Ghazi M, Nikiyan M (2021) Modeling and analysis of total site cogeneration of heat and power from an exergoeconomic approach in a 4 MW case study. IJMEP 22(4): 131-153.
- [15] Çolpan CÖ (2005) Exergy analysis of combined cycle cogeneration systems. M.Sc.Thesis, Middle East Technical University, Turkey.
- [16] Balli O, Aras H, Hepbasli A (2007) Exergetic performance evaluation of a combined heat and power (CHP) system in turkey. Int J Energy Res 31: 849-866.
- [17] Ameri M, Ahmadi P, Hamidi A (2009) Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study. Int J Energy Res 33: 499-512.
- [18] Khoshgoftar Manesh MH, Navid P, Baghestani M, Abadi SK, Rosen MA, Blanco AM, Amidpour M (2014) Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation of the coupling of a gas fired steam power plant with a total site utility system. Energy Convers Manag 77: 469-483.
- [19] Valencia Ochoa G, Piero Rojas J, Duarte Forero J (2020) Advance exergo-economic analysis of a waste heat recovery system using orc for a bottoming natural gas engine. Energies 13(1): 267.
- [20] Bejan A, Tsatsaronis G (1996) Thermal design and optimization. John Wiley & Sons, New York.
- [21] Mitrović DM, Stojanović BV, Janevski JN, Ignjatović MG, Vučković GD (2018) Exergy and exergoeconomic analysis of a steam boiler. Therm Sci 22(5): 1601-1612.
- [22] Shamsi S, Omidkhan MR (2012) Optimization of steam pressure levels in a total site using a thermoeconomic method. Energies 5(3): 702-717.
- [23] Marles OA (2005) Design and optimization of flexible utility system. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Manchester, Manchester UK.
- دبی جرمی سوخت، (kg/s)  $\dot{m}_{Fuel}$
- بار حرارتی دیگ بخار، (kW)  $\dot{Q}_{Boiler}$
- توان تولیدی توربین، (kW)  $\dot{W}$
- تابع قیمت، (\$)  $Z_K$
- هزینه نرخ سرمایه گذاری، ( $\frac{\$}{hr}$ )  $\dot{Z}_k$
- تابع هدف، ( $\frac{\$}{hr}$ )  $\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$
- علایم یونانی
- بازده انرژی، (%)  $\eta_{ex}$
- نسبت انرژی و انرژی شیمیایی  $\zeta$
- ضریب نگهداری تجهیزات  $\phi$
- ۷- مراجع**
- [1] Dhole VR, Linnhoff B (1993) Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling. Comput Chem Eng 17: 101-109.
- [2] Raissi K (1994) Total site integration. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Manchester, Manchester UK.
- [3] Smith R (2005) Chemical process: Design and integration. John Wiley & Sons, West Sussex.
- [4] Klemeš J, Dhole VR, Raissi K, Perry SJ, Puigjaner L (1997) Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO2 on total sites. Appl Therm Eng 17(8-10): 993-1003.
- [5] Wang R, Wu DW (2006) Combined cooling, heating and power. PECS 32(5-6): 459-495.
- [6] Manesh MK, Abadi SK, Amidpour M, Hamedi MH (2013) A new targeting method for estimation of cogeneration potential and total annualized cost in process industries, Chem Eng Res Des 91(6): 1039-1049.
- [7] Manesh MK, Navid P, Baghestani M, Abadi SK, Rosen MA, Blanco AM, Amidpour M (2014) Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation of the coupling of a gas fired steam power plant with a total site utility system. Energy Convers Manag 77: 469-483.
- [8] Manesh MK, Amidpour M, Abadi SK, Hamedi MH (2013) A new cogeneration targeting procedure for total site utility system. Appl Therm Eng 54(1): 272-280.
- [9] Ghazi M, Amidpour M, Abbaspour M, Farzaneh H (2015) Developing of constructal theory concept to