

## تأثیر انتخاب متغیرهای تصمیم در بخش بخار در تحلیل اکسرژی اکونومیک یک نیروگاه حرارتی سیکل ترکیبی (مطالعه موردی نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند)

اشکان عبدالی سوسن<sup>\*۱</sup>

[a.abdali@iau-astara.ac.ir](mailto:a.abdali@iau-astara.ac.ir)

مریم فانی<sup>۲</sup>

بیژن فرهانی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۲۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** اکسرژی اکونومیک یکی از راه‌های بهینه‌سازی سیستم‌های ترمودینامیکی می‌باشد. در مسائل بهینه‌سازی اکسرژی اکونومیک نیروگاه، تأکید عمده انتخاب متغیرهایی در قسمت سیکل گازی جهت نیل به هدف اصلی می‌باشد. هدف اصلی این مقاله تأثیر انتخاب متغیرهای جدید تصمیم، در قسمت مدار بخار نیروگاه، علاوه بر انتخاب متغیرهای سیکل گازی در تعیین عملکرد بهینه یک نیروگاه حرارتی سیکل ترکیبی است. اطلاعات طراحی مربوط به نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند در نزدیکی تهران می‌باشد.

**روش بررسی:** روش بهینه‌سازی بر اساس بهینه‌سازی اکسرژی اکونومیک تکراری انجام شده است. اساس این روش بر پایه سه مفهوم (اختلاف قیمت نسبی، ضریب اکسرژی اکونومیک و بازدهی اکسرتیک) و کمترین قیمت تولید هر جزء و کل سیستم می‌باشد، که از چهار قسمت اصلی محاسبه قیمت اکسرژی اکونومیک، تحلیل محاسبات اکسرژی اکونومیک، تعیین تعداد شباهت های اکسرژی اکونومیک و تحلیل دیاگرام های بازدهی قیمت / تولید تشکیل شده است.

**یافته ها:** یافته ها شامل مقادیر اصلی قبل و بعد از بهینه سازی برای هر حجم کنترل و کل سیستم می باشند که عبارتند از بازدهی اکسرژی اکونومیک، نرخ اکسرژی سوخت، نرخ اکسرژی تولید، نرخ اتلاف اکسرژی، نسبت اتلاف اکسرژی، قیمت متوسط بر واحد اکسرژی سوخت، قیمت متوسط بر واحد اکسرژی تولید، نرخ قیمت اتلاف اکسرژی، نرخ قیمت سرمایه گذاری و عملکرد و نگره داری، اختلاف نسبی هزینه، ضریب اکسرژی اکونومیک و داده های هر واحد در حالت اولیه و بهینه نیروگاه است.

**بحث و نتیجه گیری:** تابع هدف به صورت دستیابی همزمان به دو پارامتر بهینه انتخاب گردیده که عبارتند از: افزایش بازدهی اکسرتیک و کاهش قیمت محصول (برق تولیدی). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با انتخاب برخی متغیرها در قسمت بخار در غیاب انتخاب بعضی از متغیرهای معمول

۱- استادیار گروه فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا (مسوول مکاتبات)

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی شهید عباسپور

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

سیستم گازی، نیز می توان به عملکرد مطلوب دست یافت. به طوری که بازدهی اکسرژتیک ۴٪ بالاتر و قیمت تولید ۲٪ پایین تر از حالت اولیه به دست می آید.

**واژه های کلیدی:** نیروگاه سیکل ترکیبی، بازدهی اکسرژی، قیمت اکسرژی، بهینه سازی اکسرژی اکونومیک، متغیر تصمیم.

## مقدمه

در یک نیروگاه سیکل ترکیبی انرژی حرارتی ناشی از گازهای خروجی توربین گاز به یک بویلر بازیافت (HRSG) با چرخه آب / بخار منتقل می شود. بخار داغ فشار بالا، خروجی از بویلر بازیافت به توربین بخار رفته و با چرخش پره های توربین سبب تولید برق می شود (۱). تا ۵۰ سال اخیر تحقیقات مناسبی برای طراحی بهینه نیروگاه برق وجود نداشت که علل مختلفی سبب این عامل بود از جمله: فراوانی منابع سوخت با قیمت پایین، پیچیدگی اجزاء نیروگاه و نقصان روش های ریاضی جهت بهینه سازی آن و در نهایت عدم پیشرفت تکنولوژی از لحاظ سخت افزاری و نرم افزاری به خصوص در حوزه محاسبات و رایانه (۲). در بین سال های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ میلادی کوشش های فراوانی در حوزه افزایش بازدهی، توسعه سیستم های تبدیل انرژی و استفاده از منابع انرژی جایگزین بجای استفاده از سوخت های فسیلی صورت گرفت. ترمو اکونومیک (thermo economic) و اکسرژی اکونومیک (exergoeconomic) و موارد مشابه آن از جمله روش هایی است که با ترکیب ترمودینامیک و اقتصاد کمک به افزایش بازدهی نیروگاه با در نظر گرفتن قابلیت های اقتصادی می کند. ال سید (Sayed)، تیساتس سارونیس (Tsatsaronis) و گاگیولی (Gaggioli) از اولین زمره کسانی بودند که عنوان اکسرژی اکونومیک را در اوایل دهه ۱۹۸۰ پیشنهاد دادند (۳). گستره کاربرد اکسرژی اکونومیک تعیین قیمت تولید (Product) هر واحد نیروگاه (تولید از قبیل برق، بخار داغ، هوای خروجی با فشار بالا) و تعیین قیمت سوخت (Fuel) هر واحد (سوخت مانند سوخت فسیلی، آب ورودی یا هوای ورودی) و همچنین تعیین قیمت انرژی میان فرایند و عملکرد یک سیستم تبدیل انرژی می باشد (۴). کاربرد تعیین این قیمت ها در قابل قبول بودن نتیجه مطالعات، تصمیمات سرمایه گذاری، انجام روش های بهینه جایگزین و انتخاب مناسب نصب تجهیزات یا بکارگیری تجهیزات جایگزین یا گسترش آن ها در یک سیستم انرژی، نقش بسزایی دارد. یک تحلیل اکسرژی اکونومیک باید اهداف زیر را برآورده کند (۵):

۲. فهم فرایند تشکیل قیمت و تعیین قیمت های جریان ها، مانند جریان های هوا، آب، بخار یا گازهای داغ مبادله شده میان حجم کنترل ها
۳. بهینه سازی متغیرهای مهم در هر یک از اجزاء
۴. و در نهایت بهینه سازی کل سیستم

روش بهینه سازی اکسرژی اکونومیک تکراری (iterative exergoeconomic optimization) یکی از مناسب ترین روش ها برای کاهش قیمت های نهایی تولیدات در یک سیستم حرارتی پیچیده می باشد. در سال ۱۹۸۷ تیساتس سارونیس (Tsatsaronis) چهار قسمت اصلی این تحلیل را به شکل زیر تعریف نمود (۱):

۱. محاسبه قیمت اکسرژی اکونومیک
۲. تحلیل محاسبات اکسرژی اکونومیک
۳. تعیین تعداد شباهت های اکسرژی اکونومیک
۴. تحلیل دیاگرام های بازدهی قیمت / تولید

اساس این روش بر پایه سه مفهوم (اختلاف قیمت نسبی، ضریب اکسرژی اکونومیک و بازدهی اکسرژتیک) و کمترین قیمت تولید هر جزء (Component) و کل سیستم می باشد.

در سال های اخیر بسیاری از تحقیقات از منظر اکسرژی اکونومیک انجام گردیده است که از جمله می توان به فرانکوپولوس (Frangopoulos, ۱۹۹۴) زیسلا (Cziesla, ۲۰۰۶) والرو (۲۰۰۶-Valero, ۱۹۹۳) و ساوو (sahoo, ۲۰۰۸) اشاره نمود (۶).

هدف اصلی این مقاله تأثیر انتخاب متغیرهای جدید در قسمت مدار بخار نیروگاه، علاوه انتخاب متغیرهای سیکل گازی، در تعیین عملکرد بهینه یک نیروگاه حرارتی سیکل ترکیبی با استفاده از روش بهینه سازی اکسرژی اکونومیک تکراری می باشد.

## روش تحقیق

### ۱ تحلیل اکسرژی

تحلیل اکسرژی ۱ ترکیبی از قانون ۱ و ۲ ترمودینامیک می باشد (۱۱). در حالت پایا، موازنه اکسرژی حجم کنترل برابر است با (۴):

$$0 = \sum_j \dot{E}x_{Q,j} + \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_{cv} - \dot{E}x_D$$

(۱)

۱. محاسبه قیمت هر یک از تولیدات بطور جداگانه در صورتی که تولیدات یک سیستم بیشتر از یکی باشد. مانند سیستم های کوجنریشن (cogeneration) که تولید همزمان برق و حرارت می کنند

$$ex = ex^{PH} + ex^{CH} \quad (۲)$$

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (۳)$$

$$ex^{CH} = \sum_{i=1}^j y_i ex_i^{CH} + RT_0 \sum_{i=1}^j y_i \ln y_i \quad (۴)$$

## ۲ تحلیل اکسرژی اکونومیک

رابطه عمومی موازنه قیمت برای یک حجم کنترل با  $k$  جزء (component) به صورت زیر می باشد:

$$0 = \sum_k c_{Q,k} \dot{E}x_{Q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k - \sum_e (c_e \dot{E}x_e)_k + \dot{Z}_k - c_{w,k} \dot{W}_k \quad (۵)$$

وجود دارد. بنابراین برای حل مسأله نیاز به وجود معادلات کمکی داریم (۸).

برای تحلیل مجموعه نیروگاه، معادلات اصلی و کمکی تعیین شده برای هر زیر مجموعه، در حالت پایدار در جدول ۳ ارائه شده است.

## ۳- روش بهینه سازی اکسرژی اکونومیک تکراری

روش اکسرژی اکونومیک تکراری برای طراحی بهینه یک سیستم گرمایی است. در این تحقیق هدف کاهش قیمت نهایی تولید (برق تولیدی) و افزایش بازدهی اکسرژی تیک برای سیستم است. در تحلیل اقتصادی یک سیستم حرارتی، مقادیر سالانه قیمت های سوخت، هزینه های عملکرد و نگر داری کل سیستم به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته می شوند. توابع زیر موارد ذکر شده را نمایش می دهند:

$$\text{Minimize } \dot{E}x_{P,tot} \cdot c_{P,tot} = \dot{E}x_{F,tot} \cdot c_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (۸)$$

$$\text{Maximum } \varepsilon_{tot} = \frac{\dot{E}x_{P,tot}}{\dot{E}x_{F,tot}} \quad (۹)$$

معادلات هزینه سرمایه گذاری ( $\dot{Z}_{tot}^{CI}$ ) و هزینه راه اندازی و تعمیرات ( $\dot{Z}_{tot}^{OM}$ ) بر اساس روابط منابع (۹ و ۱۲) محاسبه شده است.

دو رابطه ضریب اکسرژی اکونومیک ( $f_k$ ) و اختلاف نسبی هزینه برای دستیابی به دودف بالا توسط تیساتسارونیس و بیژن پیشنهاد شده است:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (۱۱)$$

$$r_k = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}{c_{F,k} \dot{E}x_{P,k}} \quad (۱۲)$$

که عبارت  $\sum_j \dot{E}x_{Q,j} + \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e - \dot{W}_{cv}$  دلالت

بر آهنگ انتقال کسرژی و  $\dot{E}x_D$  نمایانگر اتلاف اکسرژی (exergy destruction) می باشد. زیر نویس  $i$  و  $e$  اکسرژی مخصوص جریان ورودی و خروجی حجم کنترل را مشخص می کند. اکسرژی خود به چهار جزء تقسیم می شود که در این مطالعه از اکسرژی پتانسیل و شیمیایی صرف نظر شده است. مهم ترین بخش اکسرژی، اکسرژی فیزیکی ( $ex^{PH}$ ) و شیمیایی ( $ex^{CH}$ ) می باشد که عبارت اند از (۷):

گام بعدی مشخص کردن تولید و سوخت برای هر جزء از حجم کنترل است. تولید به عنوان محصول و هدف عملکرد هر جزء و سوخت به عنوان ورودی و منبع مصرف شده برای تولید محصول تعریف می شود. تولید و سوخت دارای رابطه زیر می باشند:

$$\dot{E}x_{F,k} = \dot{E}x_{P,k} + \dot{E}x_{D,k} \quad (۶)$$

و در ادامه تعریف قیمت اتلاف اکسرژی عبارتست از:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}x_{D,k} \quad (۷)$$

برای محاسبه قیمت اتلاف اکسرژی در هر واحد مجزا در نیروگاه در ابتدا باید معادله تعادل (معادله ۵) را برای هر واحد بطور جداگانه محاسبه کرد. همیشه برای هر یک از اجزاء چندین ورودی و خروجی

معادله ۸ نشانگر برابر بودن نرخ قیمت تولید در طرف چپ تساوی با مجموع قیمت خرج شده برای سوخت و هزینه سرمایه گذاری، راه اندازی و نگر داری تجهیزات در طرف راست تساوی است. در این کاربرد،  $C_p$  (هزینه بر واحد اکسرژی محصول) بجای  $C_{P,tot}$  (کل نرخ هزینه متناظر با محصول) مینیمم می شود زیرا  $\dot{E}_p$  ثابت است (۹).

صورت دیگر نمایش معادله ۸ به صورت زیر است:

$$\text{Minimize } \dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{OM} + \dot{Z}_{tot}^{CI} \quad (۱۰)$$

برسند. با به دست آوردن مقادیر جدید تابع هدف اندازه گیری می شود چنانچه در مقایسه با مراحل قبل بهبود یافته باشد می توان تکرار دیگری انجام داد. در غیر این صورت باید با به مقادیر ابتدایی بازگشت و یا دوباره مراحل فوق را تکرار نمود (۸).

#### مطالعه موردی

در این تحقیق نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۱ به برخی از مقادیر اصلی طراحی آن اشاره گردیده است.

با به دست آوردن انحراف نسبی مقادیر واقعی بازدهی اکسژتیک و اختلاف نسبی هزینه از مقادیر بهینه از طریق روابط زیر گام بعدی در تعیین فرایند بهینه سازی انجام می شود.

$$\Delta \varepsilon_k = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_k^{OPT}}{\varepsilon_k^{OPT}} \times 100 \quad (13)$$

$$\Delta r_k = \frac{r_k - r_k^{OPT}}{r_k^{OPT}} \times 100 \quad (14)$$

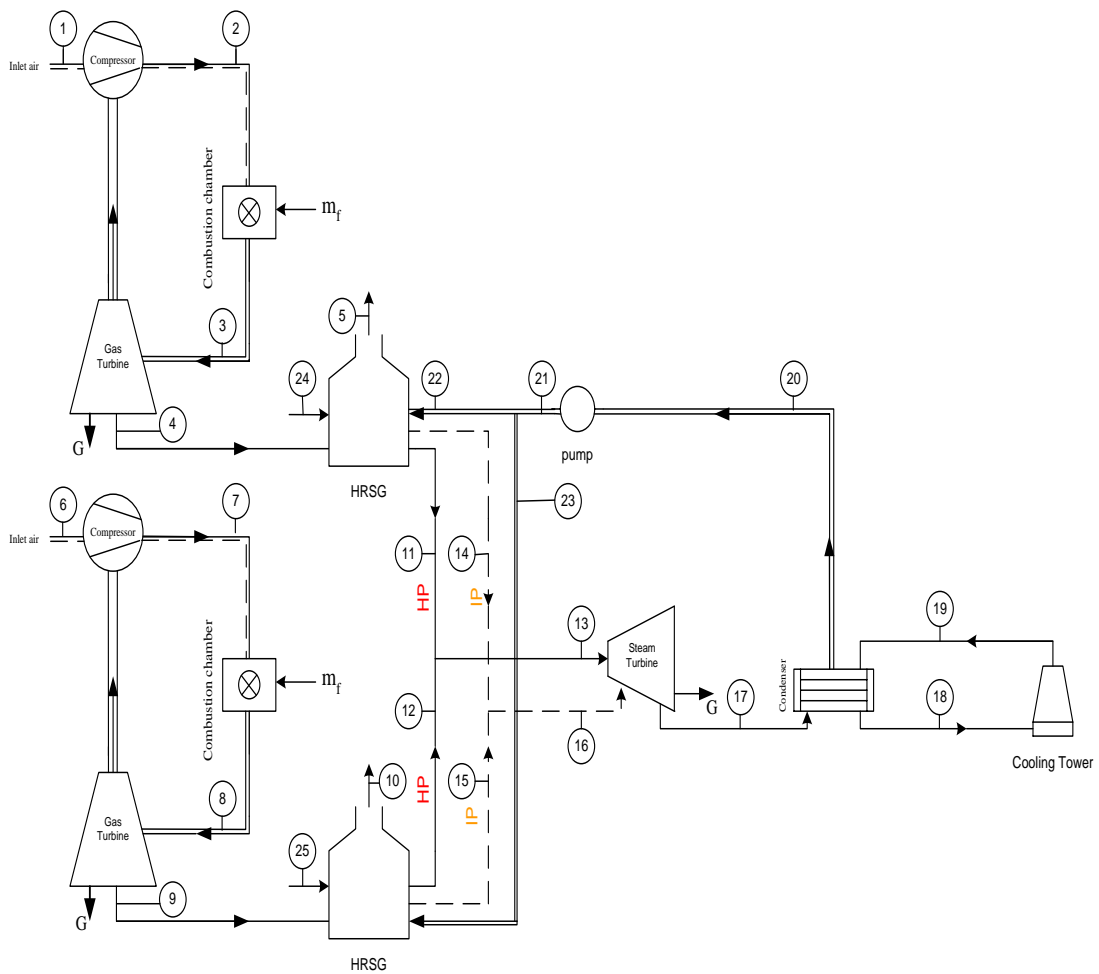
برای واحدهایی که جمع هزینه  $\dot{Z}_D + \Delta$  آن ها بالاست و برای کل سیستم می بایست مقادیر  $\Delta \varepsilon_k$  و  $\Delta r_k$  به حداقل مقدار خود

جدول ۱- داده های طراحی نیروگاه دماوند

فشار $P(\text{bar})$	دما $T(K)$	آهنگ (دبی) جریان جرم $\dot{m} \text{ (kg/s)}$
(هوای خروجی از کمپرسور هوا) ۱۰/۶۹	(آب مایع اصلی) ۳۱۹	Supplementary Firing (سوخت مصرف) ۰/۶۴
(گاز ورودی به توربین گاز) ۱۰/۶۹	(دمای گاز خروجی) ۸۱۹	(دبی جریان گاز خروجی از توربین گاز) ۴۳۶/۸
(بخار HP ورودی به توربین بخار) ۹۰	(بخار HP) ۷۹۳	(بخار HP ورودی به توربین بخار) ۱۳۴
(بخار LP ورودی به توربین بخار) ۸/۵	(بخار LP) ۵۰۳	(بخار LP ورودی به توربین بخار) ۱۸

- سوخت ورودی به محفظه احتراق،  $\dot{m}_{fuel}$
- سوخت ورودی به بویلر بازیافت،  $\dot{m}_{24}$  و  $\dot{m}_{25}$
- بازدهی ایزنتروپیک کمپرسور،  $\eta_{scomp}$
- دمای بخار جریان فشار بالا ورودی به توربین بخار،  $T_{13}$
- فشار بخار جریان فشار بالا ورودی به توربین بخار،  $P_{13}$
- دبی جرمی جریان فشار بالا ورودی به توربین بخار،  $\dot{m}_{13}$
- دمای گاز خروجی از توربین گاز،  $T_3$  و  $T_8$
- نسبت فشار کمپرسور،  $r_{pcomp}$
- بازدهی ایزنتروپیک توربین بخار،  $\eta_{st}$

شکل ۱ دیاگرام جریان ها در سیکل ترکیبی ۳۲۰ MW دماوند را نشان می دهد. که شامل بخش های زیر است: ۲ دستگاه کمپرسور مشابه، ۲ دستگاه محفظه احتراق مشابه، ۲ دستگاه توربین گاز مشابه، ۲ دستگاه بویلر بازیافت مشابه، ۱ دستگاه توربین بخار، کندانسور و پمپ. سوخت گازی عمدتاً متان می باشد که در بخش سیستم گازی نیروگاه با هوای فشرده خروجی از کمپرسور با نسبت فشار ۱۱/۸ و دمای ۱۴۳۲ K ترکیب و سوزانده می شود. گازهای داغ خروجی از توربین گاز از طریق بویلر بازیافت، بخار فشار بالا (HP) و فشار پایین (LP) بترتیب با فشار ۹۵/۵۱ و ۹/۶ بار، تولید می کند. در قسمت سیستم بخار نیز در نهایت ۱۶۰/۷۳ MW برق تولید می شود. ۹ متغیر تصمیم در این سیکل جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده که عبارتند از:

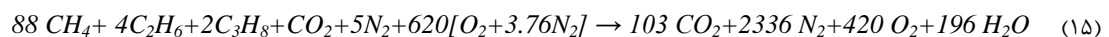


شکل ۱ - مدار سیستم نیروگاه سیکل ترکیبی

- اکسرژی جنبشی و پتانسیل بعلت کم بودن مقادیر در محاسبات در نظر گرفته نشده است.
  - تحلیل اکسرژتیک بر اساس ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی انجام شده است.
  - خواص ترمودینامیکی هوا و بخار با استفاده از نرم افزار EES انجام شده است.
  - شرایط محیطی (Dead State) در دمای ۲۹۰k و فشار ۰/۹ bar با نسبت جرمی هوا به سوخت ۴۲۷/۸ در نظر گرفته شده است.
- معادله عمومی احتراق سیستم در حالت اولیه مطابق زیر است:

متغیرهای تصمیم می بایست در یک محدوده منطقی انتخاب شوند که این قیود در جدول ۲ نمایش داده شده اند. در تحلیل سیستم چندین فرض در نظر گرفته شده که به شرح زیر می باشند:

- همه فرایندها به صورت حالت پایا جریان پایا (Steady State-Steady Flow) در نظر گرفته شده است.
- از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- هوا و گازهای حاصل از احتراق، تابع قوانین گاز کامل (ایده آل) می باشند.
- واکنش احتراق کامل است.
- از اتلاف حرارتی در محفظه احتراق صرف نظر شده است.
- افت فشار هوا و آب در هنگام ورود به بویلر بازیافت بترتیب ۳٪ و ۵٪ بوده و از افت فشار ناشی از اصطکاک درون لوله ها صرف نظر شده است.



جدول ۲ - متغیرهای تصمیم و قیود بر اساس اطلاعات نیروگاه و منابع (۷ و ۱۰).

حد بالا	حد پایین	واحد	متغیرهای تصمیم
۱۵	۵	kg/s	$\dot{m}_{fuel}$
۲	۰	kg/s	$\dot{m}_{24}$ و $\dot{m}_{25}$
۹۰	۷۵	%	$\eta_{s,comp}$
۱۵	۰	Kelvin	$T_{13}$
۵	-۵	Bar	$P_{13}$
۱۵	۰	Kg/s	$\dot{m}_{13}$
۲	-۲	Kelvin	$T_3$ & $T_8$
۱۵	۹	-	$r_{p,comp.}$
۹۲	۷۵	%	$\eta_{st}$

جدول ۳ - روابط اکسرژی اکونومیک اصلی و کمکی واحد های نیروگاه دماوند

معادلات اصلی مربوط به موازنه قیمت	معادلات کمکی
Air compressor 1& 2 $\dot{C}_1 + \dot{C}_{W,comp.1} + \dot{Z}_{comp.1}^{TOTAL} = \dot{C}_2$ $\dot{C}_6 + \dot{C}_{W,comp.2} + \dot{Z}_{comp.2}^{TOTAL} = \dot{C}_7$	Air compressor 1& 2 $c_1 = 0$ $c_6 = 0$ $c_2 = c_7$ $= c_{W,st} = c_{W,p} c_{W,comp} = c_{W,gt}$
Combustion Chamber 1& 2 $\dot{C}_2 + \dot{C}_{fuel} + \dot{Z}_{cb1}^{TOTAL} = \dot{C}_3$ $\dot{C}_7 + \dot{C}_{fuel} + \dot{Z}_{cb2}^{TOTAL} = \dot{C}_8$	Combustion Chamber 1& 2 $c_3 = c_8$
Gas turbine 1& 2 $\dot{C}_3 + \dot{Z}_{gt1}^{TOTAL} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{W,gt1} + \dot{C}_{W,comp.1}$ $\dot{C}_8 + \dot{Z}_{gt2}^{TOTAL} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{W,gt2} + \dot{C}_{W,comp.2}$	Gas turbine 1& 2 $c_3 = c_4$ $c_8 = c_9$
HRSG 1& 2 $\dot{C}_4 + \dot{C}_{24} + \dot{C}_{22} + \dot{Z}_{HRSG1}^{TOTAL} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{11} + \dot{C}_{14}$ $\dot{C}_9 + \dot{C}_{23} + \dot{C}_{25} + \dot{Z}_{HRSG2}^{TOTAL} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{12} + \dot{C}_{15}$	HRSG 1& 2 $c_{24} = c_{25} = c_{fuel}$ $= c_{10} c_5$ $c_{11} = c_{14}$
Steam turbine $\dot{C}_{13} + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{st}^{TOTAL} = \dot{C}_{W,st} + \dot{C}_{17}$	Steam turbine $c_{11} = c_{12} = c_{13}$

$\dot{C}_{13} = \dot{C}_{11} + \dot{C}_{12}$	$c_{14} = c_{15} = c_{16}$ $\dot{C}_{16} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{15}$ $\frac{\dot{C}_{17}}{\dot{E}x_{17}} = \frac{\dot{C}_{13} + \dot{C}_{16}}{\dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{16}}$
Condenser $\dot{C}_{17} + \dot{C}_{19} + \dot{Z}_{cond}^{TOTAL} = \dot{C}_{18} + \dot{C}_{20}$	Condenser $c_{18} = c_{19}$
Pump $\dot{C}_{20} + \dot{C}_{W,pump} + \dot{Z}_p^{TOTAL} = \dot{C}_{21}$	Pump $c_{22} = c_{23}$ $\dot{C}_{21} = \dot{C}_{22} + \dot{C}_{23}$

## یافته ها

سوخت  $\dot{E}x_F$ ، نرخ اکسرژی تولید  $\dot{E}x_P$ ، نرخ اتلاف اکسرژی  $\dot{E}x_D$ ، نسبت اتلاف اکسرژی  $y_D$ ، قیمت متوسط بر واحد اکسرژی سوخت  $C_F$ ، قیمت متوسط بر واحد اکسرژی تولید  $C_P$ ، نرخ قیمت اتلاف اکسرژی  $\dot{C}_D$ ، نرخ قیمت سرمایه گذاری و عملکرد و نگه داری  $\dot{Z}$ ، اختلاف نسبی هزینه  $r$ ، ضریب اکسرژی اکونومیک  $f$  و داده های هر واحد در حالت اولیه و بهینه نیروگاه است.

جدول ۱ مقادیر اصلی عملکرد یک نیروگاه حرارتی سیکل ترکیبی را نمایش می دهد. بعد از مدل سازی و شبیه سازی سیستم اثرات پارامترهای اصلی روی عملکرد سیستم مطالعه گردید. جدول ۴ خلاصه ای از محاسبات مقادیر اکسرژی اکونومیک برای هر واحد را در حالت اولیه نمایش می دهد. در جدول ۵ مقایسه بین متغیرهای تصمیم در حالت اولیه و بهینه انجام شده است. در جدول ۶ محاسبات انجام شده جهت مقادیر اکسرژی اکونومیک در حالت بهینه جمع بندی شده است. مقادیر جدول شامل بازدهی اکسرژی اکونومیک  $\epsilon$ ، نرخ اکسرژی

جدول ۴- طراحی اولیه

واحد	$\epsilon$ (%)	$E_{XF}$	$E_{XG}$	$E_{XD}$	$\gamma_D^*$ (%)	$C_F$ (S/GJ)	$C_P$ (S/GJ)	$\dot{C}_D$ (S/h)	$\dot{Z}$ (S/h)	$1+\dot{Z}\dot{C}_D$ (S/h)	$r$ (%)	$f$ (%)
کمپرسور	۹۲/۶۳	۱۵۱/۴۴	۱۴۰/۲۸	۱۱/۱۶	۲/۸	۱۹/۸۴	۲۲/۰۹	۷۹۸	۱۴۶۹/۶۳	۲۲۶۸	۲۲/۶۲	۶۴/۸۲
محفله احتراق	۷۷/۹۸	۳۹۴/۲۲	۳۰۵/۶	۸۶/۷۹	۲/۱۷۹	۸۵۶	۱۵/۲۸	۲۶۷۵	۸۲/۴	۲۷۵۷	۲۸/۳۳	۲/۹۸
توربین گاز	۸۵/۰۲	۳۳۱/۰۴	۲۸۱/۴۴	۴۹/۶	۱۲/۴۵	۱۵/۲۸	۱۹/۸۴	۲۷۲۸	۱۵۵۶/۳۵	۴۲۸۴	۲۷/۶۸	۳۶/۳۲
HRSG	۶۵/۰۹	۱۲۱/۷۸	۷۹/۲۶	۴۲/۵۲	۱۰/۶۷	۱۲/۷۳	۲۲/۴۵	۲۱۰۲	۱۵۸۸/۶۹	۳۶۹۱	۹۴/۱۸	۴۲/۰۴
توربین بخار	۹۲/۶۶	۱۷۳/۴۵	۱۶۰/۷۳	۱۲/۷۲	۳/۱۹	۱۶/۶۹	۱۹/۸۴	۷۶۶	۳۷۴/۰۹	۱۱۲۸	۱۱/۷۹	۳۲/۸۶
چگالنده	۸۲/۱۶	۲۹/۲۱	۲۴/۳۹	۲/۹۲	۱/۳۳	۰/۱۵	۱/۷۹۲	۲/۷۳	۷/۳۴	۱۰	۷۳/۹۸	۷۲/۶۲
پمپ	۴۲/۸۴	۰/۹۵	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۱۳	۱۹/۸۴	۲۲/۸۲	۳۸	۲۲/۸۲	۶۱	۲۰/۴۱۸	۳۷/۴۵
کل سیستم	۳۵/۷	۱۱۷۸/۵	۴۲۰/۷۳	۳۹۸/۲۷	۱۰۰	۸۵۶	۳۰/۴۶	۱۲۳۷۹	۹۷۹۸/۱	۲۲۰۷۸	۲۵۵/۶۶	۴۴/۳۸

\* در جدول بالا برای یک کمپرسور، محفله احتراق، توربین گاز و HRSG ذکر شده است.



جدول ۵- مقایسه بین متغیرهای تصمیم اکسرژی اکونومیک در حالت اولیه و بهینه

متغیرهای تصمیم	واحد	اولیه	بهینه	تفاوت میان اولیه و بهینه
$\dot{m}_{fuel}$	Kg/s	۹	۸/۵۴	-۰/۰۵
$\dot{m}_{24}$ $\dot{m}_{25}$	Kg/s	۰/۶۴	۰/۷	۰/۰۹
$\eta_{Scomp}$	%	۸۶	۸۵	-۰/۰۱
$r_{Pcomp.}$	-	۱۱/۸	۱۴/۲	۰/۲۰
$T_{33}T_8$	Kelvin	۸۱۹	۸۱۹	۰
$T_{13}$	Kelvin	۷۹۳	۸۰۲	۰/۰۱
$P_{13}$	bar	۹۰	۹۱/۶۹	۰/۰۲
$\dot{m}_{13}$	Kg/s	۱۳۴	۱۴۰/۵	۰/۰۵
$\eta_{st}$	%	۸۸	۸۵	-۰/۰۳

جدول ۶- محاسبات حالت بهینه‌سازی شده

واحد	$\varepsilon$ (%)	$Ex_F$	$Ex_P$	$Ex_D$	$Y_D$ (%)	$C_F$ (\$/GJ)	$C_P$ (\$/GJ)	$\dot{C}_D$ (\$/h)	$\dot{Z}_I$ (\$/h)	$I+\dot{Z}\dot{C}_D$ (\$/h)	$r$ (%)	$f$ (%)
کمپرسور	۹۲/۸۱	۱۶۹/۶۷	۱۵۷/۴۵	۱۲/۲۲	۳/۳۲	۱۹/۱۳	۲۳/۴۴	۸۴۱	۱۷۱۱/۰۸	۲۵۵۲	۲۳/۵۴	۶۷/۰۴
محفظه احتراق	۸۴/۲۷	۳۷۴/۰۷	۳۱۳/۴۲	۵۸/۸۲	۱۶	۸/۵۶	۱۴/۷۸	۱۸۱۳	۱۱۵/۵۶	۱۹۲۹	۱۸/۶۶	۵/۹۹
توربین گاز	۸۴/۲	۳۵۶/۰۵	۲۹۹/۶۷	۵۶/۳۷	۱۵/۳۴	۱۴/۷۸	۱۹/۱۳	۳۰۰۰	۱۳۱۵/۸	۴۳۱۶	۲۷/۰۶	۳۰/۴۹
HRS	۶۶/۶۸	۱۲۳/۷۹	۸۲/۵۴	۴۱/۲۵	۱۱/۲۲	۱۳/۲۴	۲۱/۳۳	۱۹۶۶	۱۸۱۲/۹۶	۳۷۷۹	۹۶/۰۴	۴۷/۹۷
توربین بخار	۸۷/۲	۱۸۴/۳۲	۱۶۰/۷۳	۲۳/۵۹	۶/۴۲	۱۵/۳	۱۹/۱۳	۱۲۹۹	۳۶۳/۹۶	۱۶۶۳	۱۸/۷۹	۲۱/۸۸
چگالنده	۷۹/۷۵	۳۰/۴۶	۲۴/۲۹	۶/۱۷	۱/۶۸	-/۱۵	۱۷/۵۵	۳/۴۲	۷/۵۶	۱۱	۸۰/۶۴	۶۸/۵۱
پمپ	۴۵/۷۲	۰/۹۵	۰/۴۳	۰/۵۲	-/۱۴	۱۹/۱۳	۱۹/۱۷	۳۵/۵۱	۲۳/۴	۵۹	۱۹/۳۷	۳۹/۸۳
کل سیستم	۳۷/۲۵	۱۱۲۹/۶	۴۲۰/۷۳	۳۶۷/۵۸	۱۰۰	۸/۵۶	۲۹/۸	۱۱۳۳۱	۱۰۳۰۶	۲۱۶۳۷	۳۴۴/۹۵	۴۷/۶۳

بحث و نتیجه گیری

با فرض این که تولید نیروگاه را ثابت و به مقدار ۴۲۰ MW در نظر بگیریم، با تحلیل داده های ارایه شده در جداول، نتایج زیر به دست می آید:

در جدول ۴ که مقادیر محاسباتی در حالت اولیه را بیان می کند واحد های محفظه احتراق، توربین گاز و HRS دارای بیشترین

مقدار مجموع  $\dot{Z}\dot{C}_D +$  می باشند. بنابراین از دیدگاه اکسرژی اکونومیک مهم ترین واحد ها جهت بررسی و بهینه سازی می باشند.

• محفظه احتراق

مقدار کم ضریب اکسرژی اکونومیک در محفظه احتراق نشانگر اینست که تغییر هزینه در محفظه احتراق منحصراً وابسته به تغییر در اتلاف اکسرژی می باشد. با افزایش نسبت فشار در کمپرسور دمای هوای

سرمایه گذاری و نگه داری را در پی دارد. جدول ۷ اثر نسبت فشار بر اتلاف اکسرژی در حالت اولیه و بهینه را در محفظه احتراق نمایش می دهد.

خروجی از آن ( $T_2$  و  $T_7$ ) افزایش یافته و باعث کاهش اتلاف اکسرژی در محفظه احتراق می شود. البته این امر افزایش هزینه

جدول ۷- اثر نسبت فشار بر اتلاف اکسرژی در حالت اولیه و بهینه در محفظه احتراق

واحد	$P_2/P_1$		$\dot{C}_D$	
	اولیه	بهینه	اولیه	بهینه
محفظة احتراق	۱۱/۸	۱۴/۲	۲۶۷۵	۱۸۱۳

وجود افزایش هزینه سرمایه گذاری و تجهیز و نگه داری، می توان به حالت بهینه نزدیک شد. جدول ۸ مقایسه میان بازدهی اکسرژتیک و هزینه اتلاف اکسرژی در HRSG در حالت اولیه و بهینه نشان می دهد.

• **HRSG**  
دومین واحدی که مجموع  $\dot{Z}_{CD} + \dot{Z}_{CD}$  بیشترین مقدار است HRSG می باشد. در این واحد بازدهی اکسرژتیک پایین و اختلاف نسبی هزینه بالاست. از طرفی ارزش ضریب اکسرژی اکونومیک نمایانگر اینست که مقدار اختلاف نسبی هزینه تقریباً ۴۶٪ مسبب تعیین مقدار سرمایه گذاری است. و ۵۴٪ باقی مانده سبب اتلاف اکسرژی است و با کاهش اتلاف اکسرژی و یا افزایش بازدهی اکسرژتیک در HRSG حتی با

جدول ۸ - مقایسه بین بازدهی اکسرژتیک و هزینه اتلاف اکسرژی در HRSG در حالت اولیه و بهینه

واحد	$\epsilon$		$\dot{C}_D$	
	اولیه	بهینه	اولیه	بهینه
HRSG	۶۵/۰۹	۶۶/۶۸	۲۱۰۲	۱۹۶۶

باعث کاهش قیمت بر واحد اکسرژی تولیدی در توربین گاز می شود که از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_{Pgt} (16) = \frac{\dot{C}_8 - \dot{C}_4 + \dot{Z}_{gt1}^{TOTAL}}{\dot{W}_{gt1}} = \frac{\dot{C}_8 - \dot{C}_9 + \dot{Z}_{gt2}^{TOTAL}}{\dot{W}_{gt2}}$$

در جدول ۹ مقایسه بین تغییر هزینه سرمایه گذاری و قیمت متوسط بر واحد اکسرژی تولید در توربین گاز را در حالت اولیه و بهینه نشان می دهد.

• **توربین گاز**  
در حالت اولیه  $f_{gt} = 1.3 r_{gt}$  است. در نتیجه باید نسبت به کاهش هزینه سرمایه گذاری و نگه داری در توربین گاز اقدام کنیم. با توجه به رابطه ذکر شده در منابع ۹ و ۱۲ مربوط به هزینه سرمایه گذاری در توربین گاز، این رابطه وابسته به دبی جریان هوای ورودی به توربین ( $\dot{m}_3$  و  $\dot{m}_8$ ) می باشد. بنابراین کاهش دبی جریان هوای ورودی

جدول ۹- مقایسه بین تغییر هزینه سرمایه گذاری و قیمت متوسط بر واحد اکسرژی تولید

در توربین گاز در حالت اولیه و بهینه

واحد	$\dot{Z}_{gt}^{TOTAL}$		$C_p$	
	اولیه	بهینه	اولیه	بهینه
توربین گاز	۱۵۵۶/۳۵	۱۳۱۵/۸	۱۹/۸۴	۱۹/۱۳

## جدول ۱۲- مقایسه نتایج برای قیمت تولید بر واحد اکسرژی

برای حالت اولیه و بهینه

تفاوت	بهینه	اولیه	قیمت تولید بر واحد اکسرژی (\$/GJ)	واحد
-۰/۰۳	۲۳/۴۴	۲۴/۰۹		کمپرسور
-۰/۰۳	۱۴/۷۸	۱۵/۲۸		محفظه احتراق
-۰/۰۴	۱۹/۱۳	۱۹/۸۴		توربین گاز
-۰/۰۵	۲۱/۳۳	۲۲/۴۵		HRSG
-۰/۰۴	۱۹/۱۳	۱۹/۸۴		توربین بخار
-۰/۰۲	۱۷/۵۵	۱۷/۹۲		چگالنده
-۰/۱۶	۱۹/۱۷	۲۲/۸۲		پمپ
-۰/۰۲	۲۹/۸	۳۰/۴۶		کل سیستم

## جدول ۱۳ - مقایسه نتایج جهت بازدهی اکسرژی تیک برای

حالت اولیه و بهینه

تفاوت	بهینه	اولیه	بازدهی اکسرژی تیک	واحد
۰	۹۲/۸	۹۲/۶۳		کمپرسور
-۰/۰۸	۸۴/۲۸	۷۷/۹۸		محفظه احتراق
-۰/۰۱	۸۴/۲	۸۵/۰۲		توربین گاز
-۰/۰۲	۶۶/۶۸	۶۵/۰۹		HRSG
-۰/۰۶	۸۷/۲	۹۲/۶۶		توربین بخار
-۰/۰۴	۷۹/۷۵	۸۳/۱۶		چگالنده
-۰/۰۴	۴۵/۷۱	۴۳/۸۴		پمپ
-۰/۰۴	۳۷/۲۵	۳۵/۷		کل سیستم

در نیروگاه های سیکل ترکیبی پیشرفته برای افزایش عملکرد ترمودینامیکی نیروگاه، به طور عمده تمرکز و توسعه در بخش سیستم توربین گاز می باشد. در این تحقیق نیمی از برق خالص تولیدی در بخش سیستم بخار می باشد. بنابراین طراحی بهینه در بخش سیکل آب/بخار نیز بر بازدهی کلی نیروگاه مؤثر بوده و با بخش گازی برابر است. در نتیجه علاوه بر متغیرهای بخش گازی برخی متغیرهای مهم در بخش بخار نیز انتخاب گردید. نتایج به دست آمده نشانگر رسیدن به عملکرد بهینه در این روش بوده و می توان در مواقعی که بنا به شرایط محیطی، ترمودینامیکی و اقتصادی تغییر در برخی بخش های سیستم گازی نیروگاه غیر ممکن است با انتخاب متغیرهای تصمیم (در نظر گرفته شده در این پژوهش) در بخش سیستم بخار نیروگاه، به عملکرد بهینه دست یافت.

✓ بر اساس نتایج گفته شده می توان با تغییر مقدار برخی پارامترهای طراحی که بر عملکرد هزینه سهم بسزایی دارند به نتیجه مطلوب رسید. تغییرات به دست آمده بشرح زیر می باشند:

مقادیر  $T_2$  و  $T_7$  در حالت اولیه و بهینه و مقایسه نتایج آن در جدول ۱۰ نمایش داده شده است. پیشنهاد این افزایش دما در محفظه احتراق و بویلر بازیافت، سبب بهبود عملکرد سیستم از لحاظ بازدهی ترمودینامیکی و اقتصادی می گردد.

جدول ۱۰ - مقادیر  $T_2$  و  $T_7$  در حالت اولیه و بهینه و مقایسه

نتایج آن

تفاوت	بهینه	اولیه	متغیر
-۰/۰۷	۶۷۸	۶۳۵	$T_2, T_7 (k)$

✓ اقدام به افزایش نسبت فشار در کمپرسور، توربین گاز و کاهش بازدهی ایزوتروپیک در کمپرسور، توربین گاز و توربین بخار نیز، در عملکرد بهینه کل سیستم مناسب است. در جدول ۱۱ مقایسه ای بین حالت اولیه و بهینه در کاهش بازدهی ایزوتروپیک کمپرسور، توربین گاز و توربین بخار و درصد تغییرات آن ها نسبت بهم نمایش داده شده است.

## جدول ۱۱ - مقایسه بین بازدهی ایزوتروپیک کمپرسور، توربین

گاز و توربین بخار در حالت اولیه و بهینه

تفاوت	بهینه	اولیه	متغیرها
-۰/۰۱	۸۵	۸۶	بازدهی ایزوتروپیک کمپرسور
-۰/۰۲	۹۰/۴	۹۱/۸	بازدهی ایزوتروپیک توربین گاز
-۰/۰۳	۸۵	۸۸	بازدهی ایزوتروپیک توربین بخار

✓ و در آخر، بر اساس اطلاعات نیروگاه و ارزیابی سیستم، دمای هوای خروجی از توربین گاز تقریباً ثابت است.

مقادیر تابع هدف در حالت اولیه و بهینه و مقدار تغییرات آن ها نسبت بهم در جداول ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده اینست که بازدهی اکسرژی تیک نیروگاه از ۳۵/۷٪ به ۳۷/۲۵٪ افزایش می یابد. همچنین قیمت تولید نیز حدود ۲٪ کاهش می یابد.

- منابع
8. Khorasani Nejad E., Hadi Choopan, S.Morteza Javadpour. (2012).” Exergoeconomic Multiobjective Optimization of a Cogeneration Plant System Using Evolutionary Algorithm”, *American Journal of Advanced Scientific Research*, Vol. 1, Issue. 5, pp. 222-231.
  9. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., (1996). “*Thermal Design and Optimization*”, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.
  10. Shakib S.E., amid pour M., Aghanajafi C., (2012).” Simulation and optimization of multi effect desalination coupled to a gas-turbine plant with HRSG consideration”, *Desalination* 285.
  11. Abedin A., McIlveen-Wright. (2013).” A Feasibility Study of Co-Firing Biomass in the Thermal Power Plant at Soma in order to Reduce Emissions: an Exergy Approach”, *Int. J. Environ. Res.* 7(1), 139-154.
  12. Uhlenbruck F., Lucas K., (2004).” Exergoeconomically aided evolution strategy applied to a combined cycle power plant”, *International Journal of Thermal Sciences* 43, 289–296, Elsevier.
  1. Christos A. Frangopoulos. (2009).” Exergy, Energy System Analysis and Optimization”, Volume I, page21, EOLSS Publishers.
  2. Groniewsky A., (2013).” Exergoeconomic optimization of a thermal power plant using Particle swarm optimization”, *Thermal Science*: Vol. 17, No. 2, pp. 509-524.
  3. Yantovski E., (2000).” Exergonomics in education”, *Energy* 25, 1021–1031.
  4. Balli O., Haydar Aras and Arif Hepbasli. (2008).” Exergoeconomic analysis of a combined heat and power (CHP) system”, *Int. J. Energy Res.*32, 273–289.
  5. Kreith F., (2000).” *The CRC Handbook of Thermal Engineering*”, Boca Raton: by CRC Press LLC.
  6. Fani M., Mozafari A., Farhanieh B., (2008). “Exergoeconomic Optimization of Black Liquor Gasification Combined Cycle by use of Evolutionary and Conventional Iterative Exergoeconomic Optimization Method”, *Accepted* to be appeared in International journal of Chemical Reactor Engineering.
  7. Ahmadi P., Ibrahim Dincer. (2010).”Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)”, *Energy* 35, 5161-5172, Elsevier.