تحلیل اگزرژی و بهینه سازی سیکل رانکین در نیروگاه های بخار با استفاده از الگوریتم زنبورها

صمد الهی فر[۱]، احسان اله عصاره*[۲]، عباس تقی پور[۲]، افشین قنبرزاده[۳]، طاهره پیرهوشیاران[۴]

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: بهار ۹۸ پذیرش: بهار ۹۸

چکیده

در این مطالعه، آنالیز اگزرژی[۱] یک نیروگاه بخار تولید برق که با سیکل ترمودینامیکی رانکین[۲] کار می کند مورد بررسی قرار گرفته است. نیروگاه زرند واقع در استان کرمان یک نیروگاه بخار است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. بازده اگزرژی معیاری بسیار مناسب برای تحلیل یک سیـــکل ترمودینامیکی می باشد. برای بهینه کردن فرآیند و حصول بازده اگزرژی بالاتر ، پارامتر هایی به عنوان متغیرهای تصمیم گیری در نظر گرفته شده اند و با تغییر این پارامترها سعی در بالابردن بازده اگزرژی شده است. با آگاهی از اینکه امکان تغییر در بازه ای معین در برخی از پارامتر های پروسه تولید برق در نیروگاه وجود دارد، متغیرهای تصمیم گیری انتخاب شده اند. دما و فشار خروجی از بویلر و فشارهای خروجی از چهار مرحله زیرکش توربین، به عنوان شش متغیر تصمیم گیری انتخاب شده اند. الگوریتم بهینه سازی به کمک رفتار زنبور های عسل[۳] یکی از الگوریتم های هوشمند[۴] نسبتا جدید در بهینه سازی مسائل بوده که با الگو گرفتن از رفتار و عمل زنبور های عسل برای یافتن غذا، فرایند بهینه سازی را انجام می دهد. در این مطالعه ابتدا بهینه سازی تابع بازده اگزرژی نیروگاه بخار انجام می شود سپس با نتایج الگوریتم های بهینه سازی ژنتیک[۵] و تجمیع ذرات[۶] مقایسه می شود. نتایج این بررسی نشان می دهد که در صورت تغییر مناسب در متغیرهای تصمیم گیری و بکارگیری الگوریتم زنبورهای عسل، می توان بازده اگزرژی نیروگاه حرارتی مورد بررسی را از ۳۰/۱ درصد به ۳۰/۶۶۷۵ درصد رساند. این افزایش معادل ۰/۵۶۷۵ درصد برای سیکل خواهد بود که نسبت به بکار گیری الگوریتم ژنتیک ۰/۰۰۳۸ درصد و نسبت به بکارگیری الگوریتم تجمع ذرات ۰/۰۰۳۶ درصد بهتر خواهد بود .

***عهده دار مکاتبات: assareh@iaud.ac.ir**

کلمات کلیدی: بازده اگزرژی ، الگوریتم زنبور عسل، سیکل رانکین ، نیروگاه حرارتی.

Exergy analysis and optimization of Rankine cycle in steam power plants using Bees Algorithm

Abstract

In this study, the exergy analysis of a steam power plant generating electricity with Rankine thermodynamic cycle is studied. Exergy efficiency is a suitable criterion for the analysis of a thermodynamic cycle. To optimize the processes

[1] Exergy Analysis
[2] Rankine Cycle
[3] Bees Algorithm
[4] Intelligent Algorithm
[5] Genetic Algorithm (GA)
[6] Particle Swarm Optimization (PSO)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

and obtaining higher exergy efficiency, some parameters were considered as decision variables, and by changing these parameters, it was tried to improve the exergy efficiencyOutput temperature and pressure of the boiler, and the output pressures of the four stages of turbine extraction, were selected as six decision variables. In other words, the exergy efficiency function was considered as the objective function, and the six aforementioned variables were considered as decision variables. Optimization algorithm using the behavior of bees, which is one of the relatively new intelligent algorithms for optimization problems, performs the optimization by inspiring from the behavior and action of bees to find food. In this study, firstly, the optimization of exergy efficiency function was done for the steam power plant, and then the results were compared with the results obtained using the genetic and particle swarm optimization algorithms. Results showed that by appropriate changes in decision variables and using bees algorithm, exergy efficiency of the thermal power plant increased from 30.1% to 30.6675%. This increase was equivalent to 0.6675% for the cycle, and compared to the use of genetic and swarm particle optimization algorithms it was 0.0038% and 0.0036% higher, respectively.

Keywords: Exergy efficiency; Bees algorithm; Rankine cycle; thermal power plant

۱- مقدمه

تولید انرژی الکتریسیته در تمام دنیا با روشهای گوناگون و از منابع مختلف در حال گسترش است. تولید برق در دنیا سالانه حدود ۴/۲ درصد افزایش می یابد. پیش بینی می شود که در سال ۲۰۳۰ تولید برق در سراسر دنیا به رقم سی میلیارد و سیصد میلیون کیلووات ساعت برسد. هرچند تولید برق از منابع نو و بازگشت پذیر در حال گسترش است ولی هنوز نیز سهم عمده ای از تولید انرژی به سوخت های فسیلی اختصاص دارد. بطوریکه هنوز حدود ۶۶ درصد از انرژی تولیدی در دنیا از منابع فسیلی تامین می شود. این عدد برای انرژ ی های تجدید پذیر حدود ۵/۶ درصد می باشد.
هم اکنون نیز حدود ۷۱/۵ درصد برق ایالات متحده از منابع و سوخت های فسیلی تامین می شود در صورتی که این عدد برای سوخت های غیر فسیلی حدود ۲/۹ درصد می باشد. در یک نیروگاه حرارتی، انرژی مکانیکی مورد نیاز برای به حرکت درآوردن مولد ها بوسیله حرارتی که معمولا از سوختن مواد نفتی بدست می آید، تامین می شود. حدود ۸۶ درصد از نیرو گاه ها از بخار برای ایجاد انرژی مکانیکی استفاده می کنند. به این نیروگاه ها نیروگاه های حرارتی[۷] گفته می شود که غالبا از سیکل رانکین برای تولید برق در آن استفاده می شود. به همین دلیل است که متخصصان همواره سعی در افزایش راندمان سیکل داشته اند.

محمودی خوشکار و همکاران[۱] تحقیقاتی را در زمینه تاثیر بازیاب حرارت بلودان بویلر روی راندمان کلی سیکل رانکین نیروگاه انجام دادند و به کمک الگوریتم های GA و PSO پارامترهای بهینه برای هر المان از چرخه را بدست آوردند. تاجیک و همکاران[۲] اختلاف بین مولد بخار بازیاب حرارت با دو سطح فشار را با همین مولد با سه سطح فشار بدست آورده و همزمان اگزرژی در هر مدل را محاسبه کرده و با هم مقایسه کردند.کویری و همکاران[۳] ، کارپاپلوچی و گیوردانو[۴] و ناعمی و همکاران[۵] هر کدام بطور جداگانه با توابع هدف[۸] مختلف سعی در بهینه کردن پارامتر های مختلف بویلر بخار بازیاب حرارت[۹] در نیروگاه های سیکل ترکیبی[۱۰] کردند. بید و باندیوپادهیای[۶] با بکار بردن آنالیز پینچ، اضافه کردن یک تقویت کننده به توربین گازی را پیشنهاد دادند. یوروسویچ و همکاران[۷] کاهش توان یک توربین بخار در یک نیروگاه تولید همزمان (گرما و الکتریسیته) را محاسبه کردند. کان و همکاران[۸] انرژی و اگزرژی در یک نیروگاه تولید همزمان در ترکیه را آنالیز کردند. تانتساکونواتانا و کوپیرانوف [۹] تاثیر کیفیت سوخت و نسبت هوا در بازدهی یک بویلر را بررسی کردند. آنها راندمان بویلر را در شرایط مختلف محاسبه کرده و مقدار تشعشع تولید شده را ارزیابی کردند. لیو و بانسال[۱۰] الگوریتم ژنتیک را با دینامیک سیالات محاسباتی در هم آمیخته و پدیده اسلگینگ در کوره را کاهش دادند و به تبع آن موفق به بالابردن بازده احتراق شدند. راوال و پاتل[۱۱] روش هایی را برای کاهش توان راه اندازی در نیروگاه ها مخصوصا برای پمپ ها و کمپرسور ها پیشنهاد دادند. صادقی و همکاران [۲۰] یک سیکل میکروتوربین با بازیاب حرارت را به روش انرژی و اگزرژی تحلیل کردند. آنها در این تحلیل عواملی مانند نسبت فشار کمپرسور، نسبت بای پاس و بازدهی رکوپریتور را بررسی کردند. بافکرپور و همکاران[۲۱] آنالیز اگزرژی یک نیروگاه بخار را انجام داده و دو عامل تلفات و بازده اگزرژی که معیارهای عینی برای ارزیابی سیستم ها می‌باشند را برای اجزاء سیکل بخار محاسبه کردند. نصر آزادانی و احمدی دانش [۲۲] تحلیل اگزرژی و انرژی نیروگاه بخار پالایشگاه اصفهان را انجام داده و با استفاده از معادلات بالانس جرم، اگزرژی و انرژی، برای هر یک از اجزاء سیکل، بازده اگزرژی و بازگشت ناپذیری برای آن اجزاء را محاسبه کرده اند. لی [۱۲] مطالعاتی در مورد بازده یک سیکل رانکین ایده ال با سیال های متفاوت را انجام داده و خواص ترموفیزیکی سیال سیکل را با استفاده از معادله حالت wai-Margerum-Lu محاسبه نموده است. نتایج این بررسی ها مشخص می کند که ظرفیت حرارتی سیستم بطور مستقیم به دمای جوش در فشار اتمسفر، فشار بحرانی و وزن مولکولی سیال بستگی دارد. حبیب[۱۳] مطالعات متفاوتی انجام داده و نتیجه گرفته است که نیرو گاه های سیکل ترکیبی ۲۵ درصد بازده بالاتر و ۳۵ درصد بازگشت ناپذیری کمتری نسبت به نیروگاه های سنتی دارند. تاملینسون[۱۴] اثبات می کند که با دوبرابر کردن فشار بخار در سیکل، حدود ۴ درصد راندمان افزایش می یابد ولی با تغییر فشار بخار از دو برابر تا سه برابر تنها یک درصد راندمان افزایش خواهد داشت. محمدی نائینی[۲۳] با ترکیب سیکل های مختلف ترمودینامیکی سعی در بدست آوردن یک سیکل بهینه کرده است.نتایج آن نشان می دهد که سیکل سه گانه از نوع سری تفاوت چندانی در مقایسه با سیکل ترکیبی ندارد وبازده سیکل سه گانه موازی خصوصا درمورد بازیافت حرارت اتلافی در انتالپی‌های کم را می‌توان افزایش داد. بیگلر کونیگخ[۱۵] از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه سازی یک سری دیتاهای استخراج شده از نیروگاه های حرارتی

[7] Power Plant
[8] Objective Function
[9] West Heat Boiler
[10] Combined Cycle Power Plant

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

استفاده کرد. دنجار و کاسوامی[۱۶] یک آنالیز مقایسه ای بین روشهای مدرن بهینه سازی برای کاهش هزینه های تولید در نیروگاه های حرارتی انجام دادند. آنها این کار را با مقایسه نتایج بدست آمده ازالگوریتم‌های زنبورهای عسل و الگوریتم جهش قورباغه[11] و الگوریتم IABC انجام دادند.

۲- تعریف اگزرژی

قانون اول ترمودینامیک بیان کننده اصل بقای انرژی می باشد. در قانون اول با اشکال مختلف انرژی سروکار داریم. تاثیرات و عکس العمل های کار و گرما در یک سیکل یا سیستم ترمودینامیکی باعث بوجود آمدن تغییرات در آن سیستم می‌شود. می دانیم که تاثیرات کار در تغییر حالت یک سیستم بیشتر از تاثیرات گرما در آن سیستم می باشد به همین دلیل است که قانون دوم ترمودینامیک ارزش بیشتری را برای کار در مقابل گرما قائل است. یعنی تاثیرات و عکس العمل های کار از درجه مفید بودن بیشتری نسبت به تاثیرات و عکس العمل های گرما برخوردار هستند.

در یک سیکل ترمودینامیکی واقعی می توان بطور کامل کار را به گرما تبدیل کرد ولی تبدیل مقداری از گرما به کار بسیار محدود و در برخی مواقع بسیار مشکل می باشد. پس هرگاه در مورد کیفیت انرژی صحبت می شود در حقیقت در مورد ظرفیت و استعداد انرژی برای تولید کار صحبت می شود[۱۷]. پس می‌توان گفت که در واقع کیفیت انرژی، پتانسیل، توانایی و استعداد انرژی برای تولید کار مفید می باشد. و یا به عبارت دیگر، پتانسیل کار یک مقدار معینی از انرژی به صورت ماکزیمم کار مفید ممکن تعریف می شود که می تواند از آن انرژی در محیط معینی بدست آید. محیط را به عنوان مبنای اندازه گیری پتانسیل کار در نظر می گیرند[۱۹]. در متون ترمودینامیک گاه به این عبارت بر می خوریم که گفته می شود انرژی کاهش درجه داده است. این بدان معنی است که پتانسیل یک مقدار معینی از انرژی در طول آن فرایند کاهش یافته است. پس قانون اول و دوم ترمودینامیک را می توان بصورت زیر تعریف کرد[۱۷]:

قانون اول: مقدار کل انرژی همواره ثابت است.

قانون دوم: پتانسیل تولید کار مفید همواره کاهش می یابد.

مفهوم دو قانون اول و دوم که در ترم های انرژی بیان شده اند بیانگر جمله مهم زیر است:

انرژی در طول یک سیکل ترمودینامیکی ثابت است ولی همواره کیفیت آن کاهش می یابد[۱۷].

درست است که قانون اول ترمودینامیک شامل ترم کار است ولی اثر بازگشت ناپذیری ها که همانند تولید انتروپی است در آن نیامده است. در اینجاست که قانون دوم به کمک آن می آید و تولید انتروپی را نیز محاسبه می کند. وقتی یک سیستم و محیطش (محیط در شرایط استاندارد) با هم در تعادل هستند می گویند که سیستم در تعادل مکانیکی و حرارتی قرار دارد. برای حالت مرده باید از شرایط محیطی استاندارد با دمای و فشار استفاده کرد. پتانسیل کار یک سیستم که فقط با محیط تبادل حرارت دارد نسبت به حالت مرده اش، اگزرژی آن حالت یا دسترسی ترمودینامیکی نامیده می شود. با توجه به این تعریف، اگزرژی ماکزیمم کار مفیدی است که از یک جزیان ماده یا انرژی قابل حصول است. پس کار مفید وقتی ماکزیمم خواهد شد که فرایند بازگشت ناپذیر باشد[۱۹].

قانون اول ترمودینامیک برای یک حجم کنترل در شرایط پایدار بصورت زیر نوشته می شود[۱۷]:

$$\dot{Q_{in}} + \sum \dot{m_{in}} h_{in} = \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_{out}\, h_{out} \qquad (۱)$$

در یک حجم کنترل سه نوع انتقال انرژی ممکن است انتقال یابد، انتقال کار، انتقال حرارت، انتقال اگزرژی[۱۸]. ولی برخلاف انرژی که همواره ثابت است، اگزرژی نابود شده و یا تحلیل می‌رود. بالانس اگزرژی در یک سیکل ترمودینامیکی بصورت زیر است:

$$\dot{E}x^{Q} + \sum \dot{m}_{in}\, ex_{in} = \dot{E}x^{w} + \sum \dot{m}_{out}\, ex_{out} + \dot{E}x^{D} \qquad (۲)$$

در این معادله $\dot{E}x^{D}$ اگزرژی نابود شده[12] و $\dot{E}x^{Q}$ و $\dot{E}x^{w}$ به ترتیب اگزرژی مربوط به گرما و کار می باشند. مطابق تعریف [۱۹] داریم:

$$\dot{E}x^{Q} = \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right)\dot{Q} \qquad (۳)$$

$$(\dot{E}x^{w} = \dot{W}_{c.v.} \qquad (۴)$$

که در اینجا T_0 دمای محیط و T_r دمایی است که انتقال حرارت در آن اتفاق افتاده است. $\dot{E}x^{w}$ اگزرژی مربوط به حجم کنترل می باشد. اگزرژی کل تشکیل شده است از اگزرژی جنبشی، پتانسیلی، فیزیکی و شیمیایی:

$$ex = ex_{ke} + ex_{po} + ex_{ph} + ex_{ch} \qquad (۵)$$

[11] Shuffled Frog Leaping Algorithm

[12] Wasted Exergy

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

می توان از اگزرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر کرد [۱۹]. اگزرژی فیزیکی از فرمول زیر بدست می آید:

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \qquad (۶)$$

که در اینجا T_0 دمای مطلق محیط می باشد. h آنتالپی و h_0 آنتالپی در دمای مطلق محیط می باشد. s انتروپی و s_0 انتروپی در دمای مطلق محیط می باشد. اگزرژی پتانسیل که معمولا به سوخت مصرفی ارتباط دارد از فرمول زیر محاسبه می گردد[۱۹]:

$$ex_{ch} = \sum_{i=1}^{n} y_i \, ex_i^{ch} + RT_0 \left(\sum_{i=1}^{n} y_i \, ln(y_i) \right) \qquad (۷)$$

$$ex_{ch} = ex_{fuel} \qquad (۸)$$

$$ex_{fuel} = \xi \times LHV_{fuel} \qquad (۹)$$

که در اینجا ξ ضریب نرخ اگزرژی شیمیایی و LHV پایین ترین ارزش حرارتی سوخت می باشد. ξ برای گازهای مختلف، مقادیر مختلفی دارد[۱۹]. به عنوان مثال برای متان برابر با ۱/۰۶ و برای هیدروژن برابر با ۰/۰۹۸۵ می باشد.از معادلات ۳ تا ۹ می توان برای همه اجزاء یک سیکل ترمودینامیکی، معادله اگزرژی را بدست آورد.جدول ۱ رابطه اگزرژی تلف شده برای اجزاء مختلف نیروگاه نشان داده شده است. اگزرژی کلی یک نیروگاه بخار از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\psi = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{m}_{fuel} \times LHV} \qquad (۱۰)$$

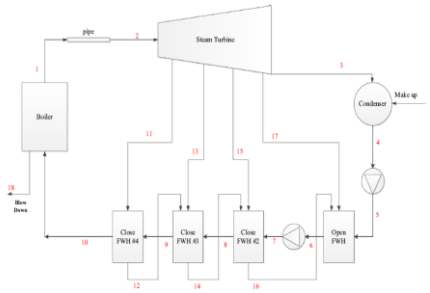
که در اینجا $\dot{w}_{net}$ کار خالص تولید شده در نیروگاه و $\dot{m}_{fuel}$ دبی جرمی سوخت می باشد.

جدول ۱: رابطه اگزرژی تلف شده برای اجزاء مختلف نیروگاه

اجزاء	رابطه اگزرژی
بازیاب حرارتی آب	$\dot{E}x^D_{FWH} = \sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out}$
توربین بخار	$\dot{E}x^D_{ST} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - \dot{W}_{ST}$
کندانسور	$\dot{E}x^D_{FWH} = \sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out}$
پمپ	$\dot{E}x^D_{Pump} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - \dot{W}_{Pump}$
بویلر	$\dot{E}x^D_{Boiler} = \sum \dot{E}x_{in} + \dot{E}x_{fuel} - \sum \dot{E}x_{out}$

۳- شرح سیستم

برای بررسی اگزرژی و انجام فرایند بهینه سازی، یک نیروگاه دراستان کرمان با نام نیروگاه زرند[۱۳] انتخاب شده است. نیروگاه زرند از نوع بخار با سیکل رانکین می باشد که از دو واحد مشابه هر کدام با ظرفیت ۳۰ مگاوات بهره می برد. فلو دیاگرام نیروگاه در شکل ۱ آورده شده است. آب ورودی به بویلر پس از عبور از لوله های داغ بویلر به صورت بخار مافوق گرم با فشار بالا درآمده و وارد توربین می شود. توربین نیروگاه زرند از نوع زیرکش دار[۱۴]



شکل ۱: فلو دیاگرام نیروگاه زرند

بوده و راندمانی بالغ بر ۹۳ درصد دارد. در توربین های زیرکش دار بخار از مراحل مختلف توربین خارج می شود و برای ارسال به هیترهای آب تغذیه[۱۵] برای بهبود راندمان کلی سیستم بکار می رود. دو نوع هیتر آب تغذیه در نیروگاه زرند وجود دارد که یکی از نوع باز و دیگری بسته می باشد. بررسی ترمودینامیکی سیکل بخار نشان می دهد که گرم کردن آب تغذیه پیش از ورود به بویلر منجر به افزایش بازده این سیکل می گردد. این گرمایش با استخراج مقدار کوچکی از بخار گذرنده از توربین در همان مبدلهای حرارتی که با نام بازیاب آب تغذیه هم شناخته می شوند انجام می شود. بالا بردن دمای آب ورودی به بویلر موجب کاهش انرژی حرارتی مورد نیاز برای تولید بخار در بویلر و همچنین کاهش میزان بازگشت ناپذیری در این فرآیند می شود. از سوی دیگر به دلیل حجم مخصوص بالای بخار در انتهای توربین استخراج، بخشی از این بخار به جلوگیری از افزایش رطوبت در قسمتهای کم فشار توربین و بهبود کارایی آن کمک خواهد کرد بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که در یک سیکل دارای بازیاب یا هیتر، بخشی از حرارت در سیکل بازیابی شده و میزان حرارت دفع شده به محیط از طریق کندانسور کاهش و در نتیجه راندمان آن افزایش می یابد. وجود هیتر و عملکرد مناسب آن در افزایش دمای آب ورودی به بویلر وکاهش میزان سوخت مصرفی در بویلر و کاهش حجم هوای

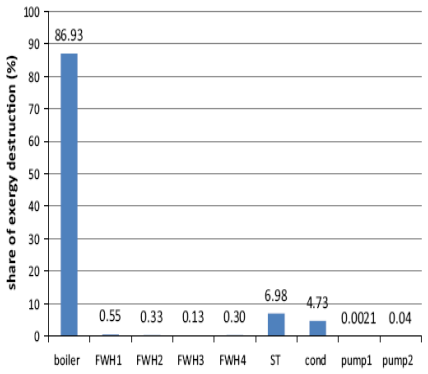
درخواستی و در نتیجه کاهش سرعت محصولات احتراق در کـــــــــوره را باعث شده و آسیب‌های وارده به کوره کمتر خواهد شد. هر واحد نیروگاه زرند از چهار هیتر آب تغذیه بهره می برد. بخار آب پس از تولید نیرو در توربین در آخرین زیرکش از توربین وارد کندانسور می‌شود. و در آنجا تبدیل به مایع می شود. پس از آن به وسیله پمپ وارد هیتر های آب تغذیه شده و در نهایت دوباره وارد بویلر می‌شود.

[13] Zarand Power Plant
[14] Extraction
[15] Feed Water Heater

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

۴- نتایج و بحث

برای محاسبه و سپس بهینه سازی اگزرژی در نیروگاه باید تک تک اجزاء آن مورد بررسی گیرد. مطابق IAPWS IF-97[16] فشار، دما، آنتالپی و



شکل ۲: مقایسه اتلاف اگزرژی در اجزاء مختلف نیروگاه

انتروپی آن در نرم افزار متلب محاسبه شده و با رعایت بالانس جرم و انرژی[17] ، اگزرژی در همه اجزاء محاسبه شده است. جدول شماره۲ مقادیر اندازه گیری شده در هر المان قبل از بهینه سازی را نشان می دهد[۱]. همانطور که در شکل۲ مشاهده می شود بیشترین اتلاف اگزرژی[18] مربوط به بویلر است. پس برای بهینه سازی و یا اصلاح فرایند باید بیشترین تمرکز روی بویلرمی شود. با توجه به رابطه ۱۰ بازده اگزرژی معادل ۳۰/۱۰ درصد بدست می آید.

۴-۱- فرایند بهینه سازی

در اینجا و برای فرایند بهینه سازی نیاز است که روی المان هایی که بیشترین تاثیر را در بازده اگزرژی دارند تمرکز شود. با توجه به عدم امکان تغییر در جریان جرمی نیروگاه، دبی جرمی هر مرحله ثابت در نظر گرفته می شود. با توجه به مشخصات بویلر و امکان تغییر در دما و فشار آن در بازه ای معین، دما و فشار به عنوان دو متغیر طراحی انتخاب می شوند. همانطوریکه گفته شد، توربین نیروگاه از نوع زیرکش دار می باشد که می توان فشار و دمای خروجی از آن در هر مرحله را کنترل کرد. کلا در چهار مرحله بخار از توربین خارج می شود و برای گرم کردن آب خروجی از کندانسور بکار می رود.

دمای هر چهار مرحله ثابت در نظر گرفته شده و فشار هر چهار مرحله به عنوان که
انرژی آن گرفته شده است وارد کندانسور شده و فشار و دمای آن پایین می آید. ولی دبی جرمی آن ثابت است. آب خروجی از کندانسور توسط پمپ به هیتر بازیاب حرارت نوع باز منتقل شده و از آنجا به هیترهای بازیاب نوع بسته هدایت شده ودما و فشار آن قدری بالاتر می رود. پس از آن مجددا وارد بویلر شده و سیکل بسته می شود. پس در نتیجه دراین مسئله شش متغیر بهینه سازی شامل فشار و دمار خروجی از بویلر و فشارهای خروجی از توربین در چهار مرحله زیرکش انتخاب شدند.

کار خالص تولید شده توسط نیروگاه از رابطه ۱۱ بدست می آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 (h_5 - h_4) - \dot{m}_6 (h_7 - h_6) \quad (۱۱)$$

با بسط رابطه ۱۱ تابع هدف بدست می آید. رابطه ۱۲ تابع هدف را نشان می دهد که به دبی جرمی سیال، آنتالپی و ارزش حرارتی سوخت مرتبط است.

$$\psi = (\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{17} h_{17} - \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 (h_5 - h_4) - \dot{m}_6 (h_7 - h_6))/(\dot{m}_{fuel} \times LHV) \quad (۱۲)$$

۴-۱-۱- شرایط مرزی اولیه

شرایط اولیه با توجه به خصوصیات طراحی اجزاء مختلف سیکل تعریف می شوند. باید توجه داشت که بهینه سازی در صورتی قابل قبول است که تمامی شرایط اولیه را ارضاء نماید. یعنی متغیر های طراحی فقط در محدوده ای قابل انتخاب هستند که نیروگاه بتواند در شرایطی مطلوب و بدون آسیب به المان های آن کارکند. برای بخار ورودی به توربین همواره باید در نظر داشت که همیشه در حالت مافوق گرم بوده و فشار و دمای آن همواره با ارضاء شرط مافوق گرم بودن تغییر کنند. با توجه به محدودیت های طراحی بویلر، فشار خروجی از بویلر باید همواره بین 40.68 bar و 49.72 bar و دمای آن بین 480 و 500 درجه سانتیگراد باشد.

فشار های زیرکش خروجی از توربین نیز در هر مرحله نسبت به مرحله قبلش کاهش می یابد و در نهایت فشار خروجی از آخرین مرحله زیرکش توربین

[16] International Association For The Properties Of Water and Steam

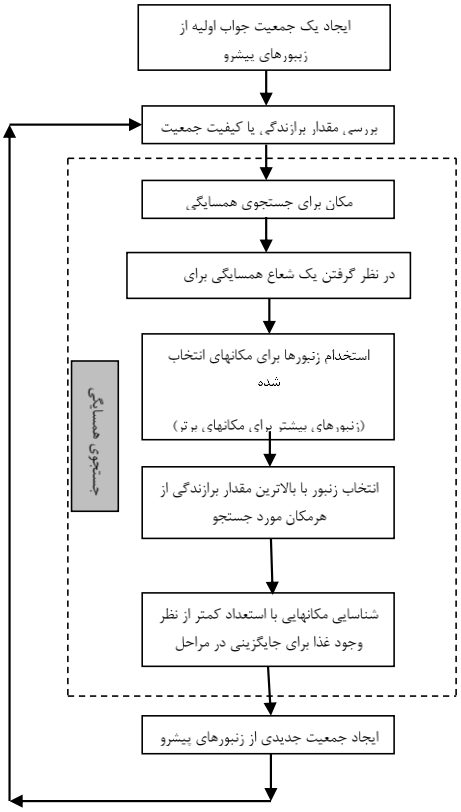
[17] Balance Of Mass And Energy

[18] Wasted Exergy

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

باید بیشتر از فشار کاری کندانسور باشد. فشار کاری کندانسور جزء متغیرهای طراحی نبوده و همواره ثابت و برابر 0.077 bar می باشد. باتوجه



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم زنبور عسل

به طراحی توربین، علاوه بر شرط گفته شده ، فشار هر مرحله نیز فقط در بازه معینی می تواند تغییر کند. دمای بخارآب در هر مرحله از توربین جزء متغیرهای تصمیم گیری نبوده و همواره ثابت است. پس خواهیم داشت:

$$480^oC < T_2 < 500^oC$$

الگوریتم زنبور عسل یک الگوریتم جستجوی نسبتا جدید بر مبنای هوش جمعی می‌باشد. این الگوریتم از رفتار کلونی زنبورهای عسل و رفتار آنها هنگامی که در جستجوی غذا می باشند الهام گرفته شده است. الگوریتم زنبور عسل برای اولین بار در سال ۲۰۰۵(و نسخه تکمیل شده آن در سال ۲۰۰۶) توسط محققینی از دانشگاه کاردیف انگلستان ارائه شد. در طبیعت زنبورها روش خاصی برای پیدا کردن منابع غذایی دارند. دسته ای از زنبورها با نام زنبور های پیشاهنگ به جستجوی غذا پرداخته و بر حسب منبع غذایی که یافته اند و با توجه به اندازه، فاصله آن تا کندو و مرغوبیت آن به کمک رقص مخصوصی به دیگر زنبورهای کندو اطلاع رسانی می کنند. در مرحله بعد تعداد زنبور بیشتری به منابع غذایی بهتر ارسال می شود و به جاهایی

که غذای مناسب و کافی وجود ندارد، زنبوری ارسال نمی شود و زنبورهای پیشرو جدیدی به تصادف به مکان های دیگر ارسال می شود. بدین ترتیب در هر مرحله مکان های بهتر با غنای غذایی بهتری کشف می گردد. زنبور های عسل این کار را آنقدر ادامه می دهند تا بهترین منبع غذایی را کشف نمایند. این روش یک روش غریزی برای زنبورهای عسل بر مبنای هوش جمعی می باشد. که بسیار کارامد می باشد. شکل ۳ فلوچارت الگوریتم زنبور عسل را نشان می دهد.

۲-۴- نتایج

با تنظیمات جدول ۳ برنامه بهینه سازی در نرم افزار متلب اجرا شده است.

جدول۳: پارامترهای تنظیم شده در بهینه سازی نرم افزار متلب

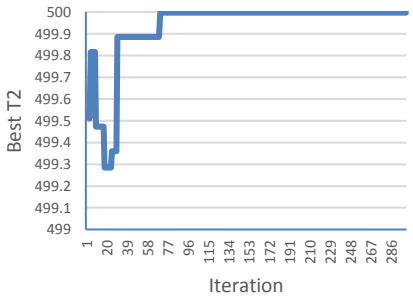
تعداد حلقه های تکرار[19]	**300**
تعداد زنبور های پیشرو	**100**
تعداد سایت های منتخب برای جستجو[20]	**0.5*nScoutBee**
تعداد سایت های نخبه برای جستجو[21]	**0.4*nSelectedSite**
تعداد زنبور های اختصاص داده شده به سایت های منتخب	**0.5*nScoutBee**
تعداد زنبور های اختصاص داده شده به سایت های نخبه	**2*nSelectedSiteBee**
شعاع همسایگی(r)	**0.000001**

[19] Iteration
[20] Selected Sites
[21] Elite Sites

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

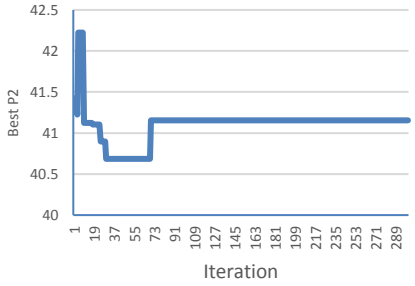
بازده اگزرژی بر حسب حلقه های تکرار در الگوریتم زنبور عسل در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود نرم‌افزار متلب با انجام محاسبات در هر تکرار به جواب بهینه نزدیک تر شده و در نهایت کاملا همگرا شده است.

شکل ۵ تغییرات دمای خروجی از بویلر با در طول روند بهینه سازی را نشان می دهد. با توجه به کران بالای دمای بویلر که ۵۰۰ درجه سانتیگراد بود، دمای بدست آمده در نتیجه بهینه سازی، نزدیک به ۵۰۰ درجه بدست آمد که نسبت به دمای کنونی حدود ۱۰ درجه بیشتر است. با افزایش دمای خروجی بویلر، آنتالپی بخار مافوق گرم افزایش یافته و مطابق رابطه ۱۲ ، کار خالص تولید شده توسط توربین بیشتر شده و در نتیجه آن بازده اگزرژی



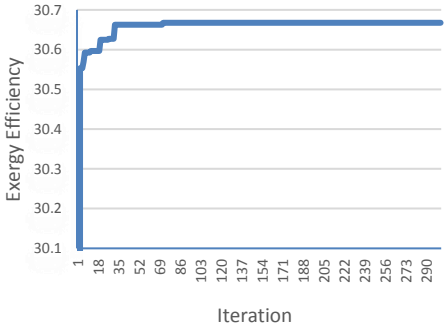
شکل ۵: روند بهینه شدن دمای خروجی از بویلر

شکل شماره ۶ تغییرات فشار خروجی از بویلر در طول فرایند بهینه سازی را نشان می دهد. با توجه به ویژگی های بویلر نصب شده در نیروگاه زرند، و محدوده عملکرد آن، امکان کم کردن فشار از حد معینی وجود ندارد. با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین فشار خروجی از بویلر، ۴۱/۱۵ می باشد که نسبت به حالت کنونی حدود ۴ بار کمتر است. با توجه به رابطه ۱۲ و همچنین جداول IAPWS IF-97 هر چه این فشار کمتر و دمای خروجی از بویلر بیشتر باشد، آنتالپی منتج شده بیشتر و به تبع آن بازده اگزرژی بیشتر خواهد بود.



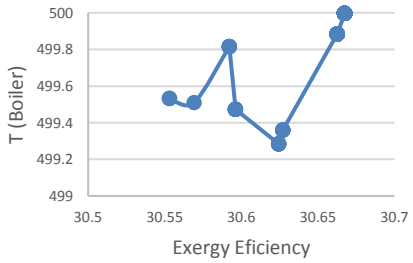
شکل ۶: روند بهینه شدن فشار خروجی از بویلر

شکل های ۷ تا ۹ تاثیر تغییرات متغیرهای تصمیم روی بازده اگزرژی را نشان می دهند. شکل های ۷ و ۸ نشان می دهند که برای بدست آوردن بیشترین آنتالپی در ورودی توربین، بیشترین دمای قابل تولید توسط بویلر در کمترین فشار مورد نیاز می باشد. بیشترین آنتالپی قابل استحصال در بویلر، با دقت در جداول IAPWS IF-97 و همچنین روابط ۱۰ و ۱۲

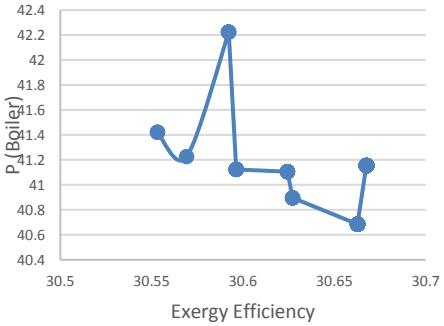


شکل ۴: بازده اگزرژی حاصل از بهینه سازی

نتایج بدست آمده قابل اثبات است.



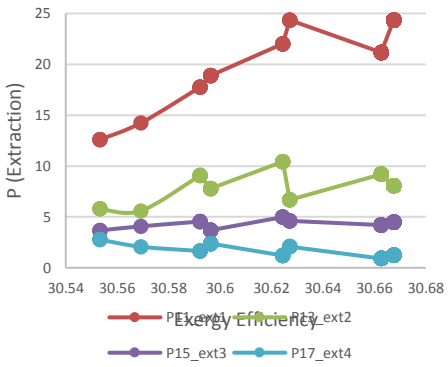
شکل ۷: روند تغییرات دمای خروجی از بویلر روی بازده اگزرژی



شکل۸: تاثیر تغییرات فشار خروجی از بویلر بر بازده اگزرژی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]



شکل۹: تاثیر تغییرات فشارهای زیرکش توربین بر بازده اگزرژی

شکل ۹ تاثیر تغییرات فشارهای زیرکش توربین بر بازده اگزرژی را نشان می دهد. همانطور که در شکل امده است فشار در هر مرحله کاهش یافته است و شرایط مسئله کاملا ارضاء شده است. فشارهای بهینه شده در مراحل اول تا سوم افزایش یافته اند. فقط فشار مرحله آخر که همان فشار ورودی به کندانسور می باشد نسبت به قبل کاهش یافته است. همانطوری که انتظار می رفت در مرحله ورود به کندانسور، سیال به صورت مایع اشباع می‌باشد.مقادیر بهینه سازی شده در جدول ٤ آورده شده اند:

جدول ٤: نتایج بهینه سازی

متغیر تصمیم	مقدار بهینه شده در الگوریتم زنبور عسل
بازده اگزرژی	30.6675
دمای خروجی از بویلر (C) (°T2)	499.9972
فشار خروجی از بویلر(bar)(P2)	41.1538
فشار خروجی از توربین در زیرکش اول (bar)	24.34211
فشار خروجی از توربین در زیرکش دوم (bar)	8.056071
فشار خروجی از توربین در زیرکش سوم (bar)	4.496188
فشار خروجی از توربین در زیرکش چهارم (bar)	1.2296

از مهمترین پارامترها در مقایسه روش های مختلف بهینه سازی، محاسبه و مقایسه دقت پاسخ و همچنین سرعت رسیدن به پاسخ می باشد که در جدول۶ مقادیر بدست آمده با روش زنبور عسل با روش های GA و PSO مقایسه شده است.همانطوریکه که مشاهده می شود روش زنبور عسل از روش های دیگر هم دقیق تر و هم سریعتر می باشد.

۳-۴- اعتبارسنجی[۲۲]

برای اعتبارسنجی نتایج بهینه سازی با کمک الگوریتم زنبورهای عسل، می توان نتایج حاصله را با مقادیراندازه گیری شده مقایسه کرد و روند بهبود را دید. همچنین می توان آنها را با نتایج حاصل از بهینه سازی به روش های دیگر مقایسه کرد. در اینجا نتایج حاصل از الگوریتم زنبورهای عسل با مقادیر اندازه گیری شده و نتایج حاصل از بهینه سازی به روش های الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم تجمیع ذرات (PSO) مقایسه می شود[۱]. الگوریتم ژنتیک، روش بهینه سازی بر پایه تکامل بیولوژیک است که در سال ۱۹۷۰ توسط John Holland معرفی گردید. این الگوریتم برای حل یک مسئله ، مجموعه بسیار بزرگی از راه حل های ممکن را ارائه می دهد. هر یک از این راه حل ها توسط یک تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می گیرد و تعدادی از بهترین جواب ها انتخاب می شوند. این جواب ها در مرحله بعدی خود جواب های جدیدی را تولید می کنند. بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می کند که به راه حل مطلوب برسد.

روش تجمیع ذرات یا PSO اولین بار توسط kennedy و Eberhart در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. این الگوریتم یک روش بهینه سازی محاسبه ای تکاملی است که الهام گرفته از طبیعت و رفتار اجتماعی حیواناتی مانند پرندگان و ماهی ها و بر اساس تکرار می باشد.در این روش تعداد مشخصی از ذرات بطور تصادفی، مقادیر اولیه می گیرند. برای هر ذره دو پارامتر وضعیت و سرعت تعریف می شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می شوند. این ذرات بصورت تکرار شونده ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه های ممکن موجود را جستجو کند. ذرات با توجه به حافظه قبلی فضای جدیدی را جستجو می کنند تا به جواب بهینه برسند.

جدول ۵ مقادیر بازده اگزرژی محاسبه شده بصورت تجربی و الگوریتم های مختلف را نشان می دهد.

جدول ۵: بازده اگزرژی حاصل از الگوریتم های گوناگون بهینه‌سازی

قبل از بهینه سازی	GA	PSO	BA
30.1	30.6637	30.6639	30.6675

با توجه به جدیدتر و کامل تر بودن روش الگوریتم زنبورهای عسل، بدست آمدن نتایج فوق پیش بینی می شد.

[22] Validation

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

۵- نتیجه گیری

نیروگاه های بخار بطور گسترده در سراسر دنیا برای تولید برق مورد استفاده قرار می گیرند. بسیاری از آنها دارای تکنولوژی قدیمی می باشند و امکان ارتقاء و بهینه سازی برای اجزاء آنها وجود دارد. همه بهینه سازی ها مربوط به خرید و نصب تجهیزات جدید و بروز نیست. خیلی از اوقات با ایجاد تغییراتی در پروسه تولید نیروگاه ها می توان راندمان نهایی آنها را بالا برد. تحلیل بازده انرژی و اگزرژی روش بسیار مناسبی برای تحلیل یک سیکل یا سیتم ترمودینامیکی می باشد. می توان بازده اگزرژی را محاسبه کرد و بهینه

جدول ۲: پارامترهای محاسبه شده در نیروگاه زرند قبل از انجام بهینه سازی

Stream	P (bar)	T (C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	m° (kg/s)	ex (kJ/kg)
1	45.2	490	3416.816	6.9996	33.194	1390.67
2	43	482.0056	3400.963	7.0009	33.194	1374.438
3	0.0077	40.7871	2367.971	7.5816	25.4339	173.1972
4	0.0077	40.8027	170.8307	0.5829	27.9323	3.9239
5	0.78	40.8028	170.894	0.5831	27.9323	3.9349
6	0.78	92.8064	388.7757	1.225	35.6928	35.8192
7	56.7	93.4037	395.6039	1.2277	35.6928	41.8507
8	52.87	128.8063	544.7169	1.6171	35.6928	78.1345
9	49.04	148.0364	626.5643	1.817	35.6928	102.0624
10	45.21	178.5006	758.3955	2.1202	35.6928	146.0624
11	11.72	314.6094	3078.733	7.0998	1.9448	1023.532
12	11.72	156.1706	659.3151	7.9036	1.9448	109.7232
13	5.285	232.5196	2923.566	7.1744	1.1469	846.7699
14	5.285	131.8363	554.3964	1.6538	3.0918	77.2115
15	3.09	184.8363	2834.156	7.2314	2.0282	740.829
16	3.09	99.7063	418.0167	1.3035	5.12	42.3125
17	0.78	92.8054	2637.278	7.3692	2.6409	504.0494
18	45.21	275.7234	23.546	2.8639	2.4985	295.7191

سازی را روی آن انجام داد. استفاده از هوش جمعی روشی نسبتا نوین در بهینه سازی سیستم ها می‌باشد. الگوریتم زنبور عسل نیز یکی از همین روشهاست. در این مطالعه نتیجه گرفته شد که با کمک همین الگوریتم و نرم افزار متلب و با تغییر در برخی از پارامترهای قابل تغییر در نیروگاه بخار، بازده اگزرژی آن را از ۳۰/۱ درصد به ۳۰/۶۶۷۵ درصد ارتقاء داد.یعنی به میزان ۰/۵۶۷۵ درصد بازده اگزرژی را افزایش داد. این مقدار افزایش، اثر بسزایی روی توان خروجی نیروگاه خواهد داشت. یا به عبارت دیگر با مصرف سوخت کمتر، نیروگاه همان خروجی قبلی را خواهد داشت. در این مطالعه همچنین نشان داده شد که چگونه الگوریتم های تکاملی نسبت به هم برتری و ضعف دارند. نشان داده شد که الگوریتم جدیدتر زنبور عسل هم همگرایی

جدول ۶: مقایسه دقت و سرعت در روش های مختلف بهینه سازی

الگوریتم بهینه سازی	GA	PSO	BA
جمعیت اولیه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد تکرار تنظیم شده اولیه	۹۰	۹۰	۹۰
زمان رسیدن به جواب(ثانیه)	۵۱۰,۳۴	۱۲۰,۲۲	۴۷,۹۹
تعداد تکرار تا رسدن به جواب	۵۱	۴۰	۳۲
بازده اگزرژی (دقت)	۳۰,۶۶۳۷	۳۰,۶۶۳۹	۳۰,۶۶۷۵

بیشتری دارد و هم سرعت رسیدن آن به جواب بهینه بیشتر است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

نمادها

$\dot{E}_x$	نرخ اگزرژی(kW)
$\dot{E}x^D$	اگزرژی تلف شده
$\dot{E}x^Q$	اگزرژی منتج شده از گزما
$\dot{E}x^W$	اگزرژی منتج شده از کار
ex	اگزرژی مخصوص(kJ/kg)
h	آنتالپی(kJ/kg)
LHV	کمترین ارزش حرارتی سوخت(kJ/kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی(kg/s)
P	فشار(bar)
$\dot{Q}$	گرمای منتقل شده(kW)
r	شعاع همسایگی در الگوریتم زنبور عسل
R	ثابت گازها(kJ/kg K)
s	انتروپی(kJ/kg K)
T	دما(_C)
$\dot{W}$	نرخ کار- توان(kW)
y	کسر مولی
GA	الگوریتم ژنتیک
BA	الگوریتم زنبورهای عسل
PSO	الگوریتم تجمیع ذرات

علائم یونانی

ψ	بازده اگزرژی
ξ	نرخ اگزرژی شیمیایی
η	بازده انرژی

زیر علامت ها

0	رجوع می دهد به شرایط محیطی
ch	شیمیایی
cond	کندانسور
c. v.	حجم کنترل
f	مایع اشباع
FWH	بازیاب (هیتر) آب تغذیه
g	بخار اشباع
in	بخار ورودی
ke	جنبشی
ph	فیزیکی
po	پتانسیل
out	بخار خروجی
ST	توربین بخار

مراجع

[1] Mohammadi Khoshkar Vandani A, Bidi M, Ahmadi F, Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants, Energy Conversion and Management,2015;106, 1-9

[2] Tajik Mansouri M et al. Exergetic and economic evaluation of the effect of HRSG configurations on the performance of combined cycle power plants. Energy Convers Manage 2012;58(0):47–58.

[3] Kaviri AG et al. Exergoenvironmental optimization of heat recovery steam generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis. Energy Convers Manage 2013;67:27–33.

[4] Carapellucci R, Giordano L. A comparison between exergetic and economic criteria for optimizing the heat recovery steam generators of gas–steam power plants. Energy 2013;58:458–72.

[5] Naemi S et al. Optimum design of dual pressure heat recovery steam generator using non-dimensional parameters based on thermodynamic and thermoeconomic approaches. Appl Therm Eng 2013;52(2):371–84.

[6] Bade MH, Bandyopadhyay S. Analysis of gas turbine integrated cogeneration plant: process integration approach. Appl Therm Eng 2015;78:118–28.

[7] Uroševic´ D, Gvozdenac D, Grkovic´ V. Calculation of the power loss coefficient of steam turbine as a part of the cogeneration plant. Energy 2013;59:642–51.

[8] Can OF, Celik N, Dagtekin I. Energetic–exergetic–economic analyses of a cogeneration thermic power plant in Turkey. Int Commun Heat Mass Transfer 2009;36(10):1044–9.

[9] Tanetsakunvatana V, Kuprianov VI. Experimental study on effects of operating conditions and fuel quality on thermal efficiency and emission performance of a 300-MW boiler unit firing Thai lignite. Fuel Process Technol 2007;88 (2):199–206.

[10] Liu X, Bansal RC. Integrating multi-objective optimization with computational fluid dynamics to optimize boiler combustion process of a coal fired power plant. Appl Energy 2014;130:658–69.

[11] Raval TN, Patel RN. Optimization of auxiliary power consumption of combined cycle power plant. Proc Eng 2013;51:751–7.

[12] Lee. M .J. Tien. D. L and Shao. C T. 1993."Thermophysical Capability of Ozone-Safe

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]

Working Fluids for an Organic Rankine Cycle System."J. Heat Recovery Syst.13,pp.409-418.

[13] Habib,M.A.1994,:First-and Second-Law analysis of Steam-Turbine Cogeneration Systems."ASME J .Eng.Gas Turbines Power.116, pp. 15-19.

[14] Tomlinson. L O.. Chase. D L..Davidson. T. L.. and Smith .R W.. 1993."GE Combined Cycle Product Line and Performance. " GE Power GenerationGER-3574D.

[15] Friedrich Biegler-König, 2009, Artificial Bee Colony Algorithm For Power Plant Optimization, Department of Applied Mathematics, University of Applied Sciences, D-33615 Bielefeld.

[16] Ram Kumar Denjare[1], Amit Goswami, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science , Volume No.02, Issue No. 06, June 2014

[17] A . Bejan "Advanced Engineering Thermodynamics" Wiley, New work , 1988.

[18] D. E. Winter bone "Advanced Thermodynamics For Engineers" 1997.

[19] Thermodyamics, an Engineering Approach, Y. Cengel, 5th Edition, 2006, Wiley, USA

[۲۰] صادقی، احسان و همکاران، ۱۳۸۵، تحلیل سیکل میکروتوربین با بازیافت حرارت به روش انرژی و اگزرژی، کنفرانس بین المللی برق، دوره بیستم، شماره ۶۵۴، صفحه ۵-۱۱

[۲۱] بافکرپور، احسان و همکاران، ۱۳۸۷، آنالیز اکسرژی اجزای سیکل نیروگاه بخار، نشریه انرژی ایران، دوره یازدهم، شماره ۲۸، صفحه ۴۷-۵۵

[۲۲] نصر آزادانی، حسین، احودی دانش، حسین، تحلیل انرژی و اگزرژی نیروگاه بخار پالایشگاه اصفهان، نشریه علمی - پژوهشی مدیریت انرژی، دوره دوم، شماره ۲، صفحه ۲۷ تا ۳۹

[۲۳] محمدی نائینی، محمدرضا،۱۳۸۳، ترکیب سیکل ها به منظور بدست آوردن حالت بهینه تبدیل انرژی، دوره نهم، شماره ۲۰، صفحه ۵۴-۷۴

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.5.5]