



بهینه‌سازی و تحلیل انرژی پیشرفته سیکل کلاسیوس-رانکین با پیش‌گرم‌کن آب تغذیه برای استفاده در نیروگاه‌های خورشیدی

نوزر اکبری^{1*}، سهیل شیخی²

1- استادیار، مهندسی هوا فضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

2- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1384673411، nozar@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 فروردین 1396
پذیرش: 28 خرداد 1396
ارائه در سایت: 06 مرداد 1396

کلید واژگان:

اسپن هایسیس
انرژی خورشیدی
آنالیز انرژی پیشرفته
بهینه‌سازی

چکیده

با توجه به قیمت رو به رشد انرژی، کمبود منابع و مسایل محیط زیستی، اهمیت کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی صنایع مرتبط با انرژی بیش از پیش آشکار شده است. انرژی خورشیدی نیز از جمله راه‌حل‌های مناسب برای به‌دست آوردن انرژی پاک و ارزان هستند. در مرحله‌ی اول از اسپن هایسیس برای شبیه‌سازی سیکل موردنظر استفاده شده است. در ادامه آنالیز انرژی روی سیکل انجام گرفته است که براساس نتایج، سه جزء LPT2، LPT3 و HEX2 بیشترین میزان تخریب انرژی سیستم را شامل می‌شوند و از این منظر در اولویت بازنگری قرار دارند. سپس با انجام آنالیز انرژی پیشرفته سعی در تحلیل دقیق‌تر نتایج آنالیز انرژی شده است. در این بخش با جداسازی تخریب انرژی اجزای سیستم به چهار بخش درونزا/برونزا و قابل اجتناب/غیرقابل اجتناب، به بررسی عامل اصلی بروز تخریب انرژی در اجزا پرداخته شده است. بر طبق نتایج، سه جزئی که دارای بیشترین میزان تخریب انرژی هستند، عامل اکثر تخریب انرژی برون‌زای سیستم نیز می‌باشند که در واقع می‌توان با بهبود عملکرد این اجزاء، تخریب انرژی در اجزای دیگر را نیز کاهش داد. در نهایت با انتخاب متغیرها و توان خروجی سیکل به عنوان تابع هدف و به‌کارگیری نرم‌افزار اسپن هایسیس برای بهینه‌سازی، سیستم بهینه‌سازی و پارامترهای بهبود یافته‌ی آن با حالت پایه مقایسه شده است که براساس آن توان استحصال سیستم افزایش و تخریب انرژی و هزینه محصولات کاهش یافته است.

Optimization and advanced exergy evaluation of a Clausius-Rankine cycle to be used in solar power systems

Nozar Akbari^{1*}, Soheil Sheikhi²

1- Department of aerospace engineering, Shahid sattari aeronautical university of science and technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1384673411, Tehran, Iran, nozar@ssau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 March 2017
Accepted 18 June 2017
Available Online 28 July 2017

Keywords:
Aspen HYSYS
Solar energy
Advanced exergy analysis
Optimization

ABSTRACT

Regarding the growing cost of energy, shortage of resources, and environmental issues, the importance of reducing energy consumption and optimization of related industries is more evident than ever before. Solar energy is one of the suitable solutions to acquire clean and cheap energy. The first step is to design the cycle using Aspen HYSYS simulator. After that exergy analysis is carried out on the proposed system. Results show that LPT2, LPT3 and HEX2 have the highest exergy destruction and should be considered for revision. Results of exergy analysis are then examined more deeply with the help of advanced exergy analysis. In this section exergy destruction is divided into four parts, endogenous/exogenous and avoidable/unavoidable to investigate the precise reason of the components' exergy destruction. Results show that the three components which had the most exergy destruction are the real reason behind exogenous exergy destruction of the system, so by optimizing these components we can also decrease the total exergy destruction of the system too. At last, by choosing the right variables and total produced work as the primary function, the optimization is done using the Aspen HYSYS optimizer and the optimized parameters are compared to the basic parameters which resulted in more power production and less exergy destruction and production cost.

1- مقدمه

و کاهش آلودگی به تدریج افزایش یافته است [1]. نیروگاه خورشیدی وظیفه‌ی جمع‌آوری انرژی خورشیدی، به وسیله‌ی متمرکز نمودن آن و ایجاد دمای بالا را برعهده دارد. این نیروگاه‌ها براساس نوع متمرکز کننده‌ی استفاده شده به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند که شامل نیروگاه‌های با کلکتور سهموی خطی و نیروگاه‌های دیش استرلینگ می‌باشد. از برترین روش‌های تولید برق از انرژی خورشیدی، استفاده از

مسئله تأمین انرژی مورد نیاز، همواره از مشکلات پیش روی بشر بوده و پیشرفت صنایع و تکنولوژی باعث افزایش توجه به این مساله شده است. با توجه به محدودیت منابع تأمین کننده انرژی و مسایل زیست محیطی، توجه به منابع جایگزین انرژی طی دو دهه گذشته بیشتر شده است. در این راستا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌منظور جایگزین نمودن سوخت‌های فسیلی

Please cite this article using:

N. Akbari, S. Sheikhi, Optimization and advanced exergy evaluation of a Clausius-Rankine cycle to be used in solar power systems, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 333-342, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بویاچی و سباقیان [9] عملکرد سیکل کالینا را به‌منظور یافتن پتانسیل‌های ارتقا سیستم و برهم کنش اجزا، توسط تحلیل انرژی اقتصادی و پیشرفته بررسی کرده‌اند. مهرپویا و شقایب [10] دو فرایند بازیابی هلیوم از گاز طبیعی را تحلیل کرده‌اند و سپس با استفاده از آنالیز انرژی پیشرفته به بررسی نقاط ضعف فرایندها پرداخته‌اند.

هدف از این مقاله مدل‌سازی سیکل به‌کار رفته در نیروگاه 30 مگاواتی سگز-6، برای رسیدن به توان بهینه‌ی 10 مگاواتی و انجام تحلیل انرژی، انرژی اقتصادی و انرژی پیشرفته برای شناسایی پتانسیل‌های ارتقای آن می‌باشد. این نیروگاه در صحرای موجوه در جنوب کالیفرنیا واقع شده است. در خود نیروگاه سگز-6، از یک بویلر جهت حرارت‌دهی به سیال عامل در هنگام عدم وجود انرژی خورشیدی کافی استفاده می‌شود که در این کار به دلیل کاهش هزینه‌ها از آن صرف‌نظر شده است.

قابل ذکر است سیکل به‌کار رفته در این کار، سیکل خاص استفاده شده در نیروگاه سگز-6 است و با سیکل‌های استفاده شده در مراجع متفاوت است. همچنین علاوه بر انرژی و انرژی اقتصادی از منظر انرژی پیشرفته نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

2- تشریح فرایند، مدل‌سازی و اعتبارسنجی

2-1- تشریح فرایند

سیکل مدل‌سازی شده در این مقاله براساس سیکل ارائه شده توسط اشتوتزل و همکاران [11] می‌باشد و در "شکل 1" قابل مشاهده است. این سیکل در واقع سیکل کلاسیوس-رانکین با پیش‌گرم‌کن آب تغذیه می‌باشد. سیال عامل که همان آب یا بخار است، از کندانسور به‌صورت آب اشباع خارج شده و توسط پمپ به فشار موردنیاز برای عبور از پیش‌گرم‌کن‌های تغذیه‌ی فشار پایین و دی اریترور رسانده می‌شود. سپس آب در پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه و توسط بخار گرفته شده از توربین‌های فشار پایین حرارت داده می‌شود. بعد از آن آب وارد دی اریترور شده و در آنجا با بخار داغ گرفته شده از اولین توربین فشار پایین ترکیب می‌گردد. از آنجا که فشار خروجی از دی اریترور نمی‌تواند از فشار جریان گرفته شده از توربین فشار پایین بیشتر باشد، یک پمپ فشار موردنیاز برای عبور آب از پیش‌گرم‌کن آب تغذیه‌ی فشار بالا و ورود به مبدل را تأمین می‌کند. سپس آب وارد مبدل شده و پس از تبادل حرارت با سیال داغ شده توسط انرژی خورشیدی، در حالت بخار سوپرهیت از مبدل خارج و وارد توربین فشار بالا می‌شود. پس از توربین، بخار توسط سیال داغ تا حدود همان دمای بخار سوپرهیت قبل از توربین فشار بالا حرارت دیده و وارد توربین فشار پایین می‌شوند. در نهایت بخار وارد کندانسور شده و تا رسیدن به حالت آب اشباع خنک می‌شود.

همان‌طور که از چرخه‌ی کارنو برآمده است، در دمای کندانسه‌ی ثابت، انتقال حرارت در دمای بالاتر باعث افزایش راندمان سیکل می‌شود. حرارت انتقال یافته در مبدل سوپرهیت، عمده‌ی حرارت انتقال یافته‌ی این چرخه را شامل می‌شود. پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه دمای آب ورودی به مبدل‌ها را افزایش می‌دهند، بنابراین میانگین دمایی که در آن انتقال حرارت صورت می‌گیرد بالا می‌رود و در نتیجه راندمان سیکل افزایش می‌یابد.

2-2- مدل‌سازی و اعتبارسنجی

برای مدل‌سازی این سیکل از نرم‌افزار اسپن هابسیس استفاده شده است. پکیج خواص استفاده شده برای تحلیل سیال، اسمه استیم است که مناسب‌ترین انتخاب برای تحلیل حالت‌های مختلف آب می‌باشد. همان‌طور

کلکتورهای سهموی خطی می‌باشد. در این نوع نیروگاه نخست روغن حرارتی به دمایی حدود 400 درجه سانتی‌گراد می‌رسد، سپس با استفاده از یک مبدل حرارتی می‌توان گرمای حاصله را به سیال عامل منتقل کرد و از طریق توربین انرژی الکتریکی به‌دست آورد. استفاده از بازیاب حرارتی و پیش‌گرمایش در افزایش بازده سیکل بسیار موثر است.

خلیل‌زاده و محمودی مهر [2] به بهینه‌سازی عملکرد روزانه‌ی یک نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره‌سازی گرما پرداخته‌اند. آن‌ها ابتدا از طریق حل معادلات غیرخطی حاکم مدل‌سازی را انجام داده‌اند و سپس با تعریف توابع هدف و استفاده از الگوریتم ژنتیک، سیستم را بهینه‌سازی کرده‌اند. کالوگیرو و همکاران [3] به تحلیل انرژی انواع کلکتورهای خورشیدی پرداخته‌اند و در نهایت آنالیز انرژی را به‌عنوان یک ابزار موثر در تحلیل آرایش این سیستم‌ها دانسته‌اند.

روش‌های جدید صرفه‌جویی در مصرف و جلوگیری از هدر رفت انرژی، باعث به وجود آمدن روش‌های تحلیلی براساس قانون دوم ترمودینامیک شده است که این روش‌ها در قالب مفهوم انرژی بیان می‌شوند. قوانین کلی و روش تحلیل انرژی را می‌توان در کوتاس [4] و بژان [5] یافت. تحلیل انرژی یک ابزار کارآمد برای طراحی، بهینه‌سازی و سنجش عملکرد سیستم‌های انرژی است. برتری تحلیل انرژی در قابلیت استفاده از تمامی خواص جریان (دما، فشار و ترکیب) است. تخریب انرژی یا برگشت‌ناپذیری در واقع مقادیری هستند که برگشت‌ناپذیری سیستم به‌وسیله‌ی آن‌ها نشان داده می‌شود.

تشخیص این که کدام یک از اجزای سیستم هزینه‌ی تخریب انرژی بیشتری دارند قابلیت‌های پیشرفت سیستم را به ما نشان می‌دهد. ترمو اکونومیک ابزاری قوی برای بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی سیستم‌های انرژی در اختیار ما قرار می‌دهد. ترمو اکونومیک شاخه‌ای از ترمودینامیک است که در آن مفهوم انرژی از قوانین اقتصادی ترکیب می‌شود و در واقع برای برگشت‌ناپذیری‌ها شاخصی ملموس‌تر در قالب هزینه یافت می‌شود [6]. در سال‌های اخیر بررسی‌های زیادی در زمینه‌ی تحلیل انرژی انجام شده است. جواهرده و همکاران [7] ابتدا سیکل ترکیبی رانکین بخار و رانکین آبی با بازیافت گازهای اتلافی دما بالا را شبیه‌سازی کرده و سپس از دیدگاه انرژی بررسی کرده‌اند. حنیفی و همکاران [8] تحلیل انرژی و انرژی اکونومی را برای سیکل تولید همزمان تحت مدل دینامیکی تابش خورشیدی انجام داده‌اند.

برای بررسی این که چه میزان از تخریب انرژی قابل اجتناب است و یا چه میزان از آن ناشی از اجزای دیگر می‌باشد، از آنالیز انرژی پیشرفته استفاده می‌گردد. تقسیم‌بندی تخریب انرژی باعث فهم عمیق‌تر از نتایج آن و افزایش دقت تحلیل می‌شود. تخریب انرژی صورت گرفته در یک جزء، تنها ناشی از عملکرد جزء مورد بررسی نمی‌باشد (تخریب انرژی درون‌زا)، بلکه به عملکرد سایر اجزا نیز بستگی دارد (تخریب انرژی برون‌زا). همچنین بررسی این که آیا می‌توان از تخریب انرژی یک جزء جلوگیری به عمل آورد (تخریب انرژی قابل اجتناب) یا این امکان وجود ندارد (تخریب انرژی غیر قابل اجتناب). در جمع‌بندی انواع تحلیل انرژی می‌توان گفت که تحلیل انرژی و اقتصادی سیستم را از دو دید مختلف بررسی می‌کنند و فقط در بحث فاکتور انرژی اکونومیک، تحلیل اقتصادی از نتایج انرژی استفاده می‌کند. همچنین تحلیل انرژی پیشرفته نیز در واقع قدم بعدی تحلیل انرژی و تحلیل بیشتر نتایج آن می‌باشد.

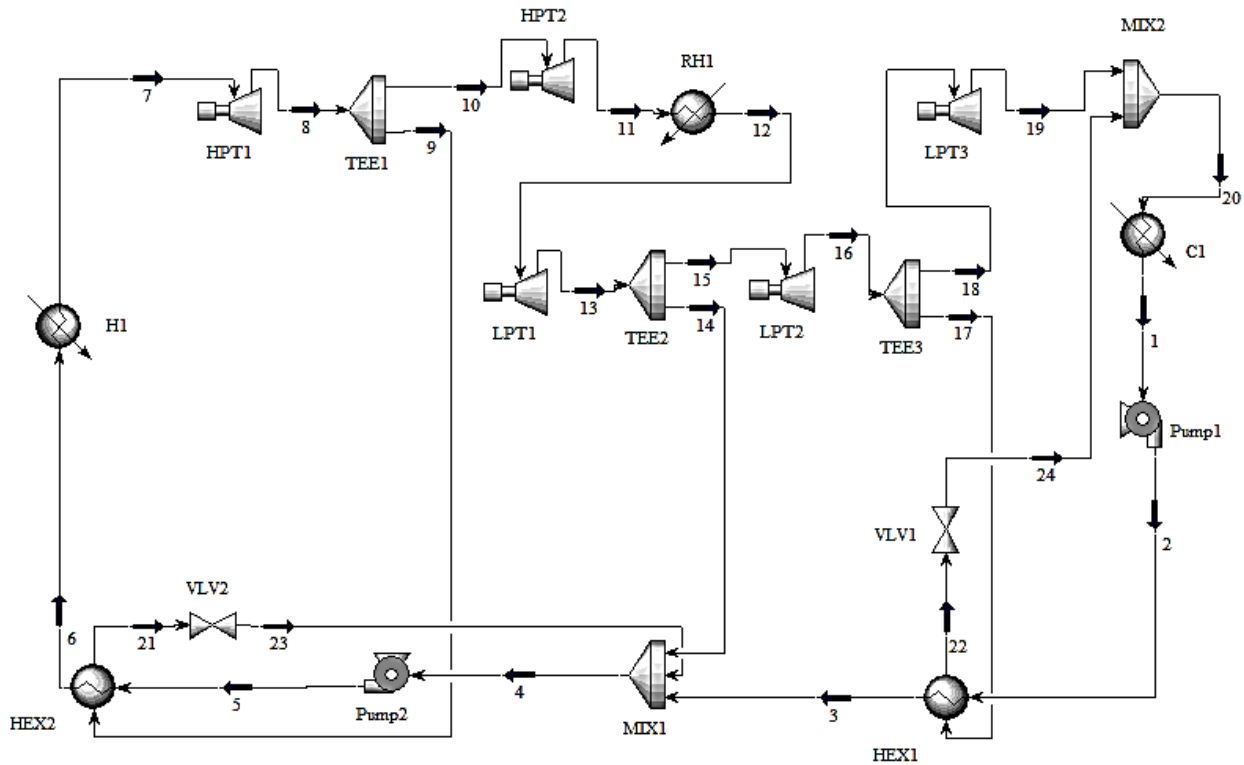


Fig. 1 Solar power plant Clausius-Rankine cycle modeled in Aspen HYSYS simulator

شکل 1 سیکل کلاسیوس-رانکین نیروگاه خورشیدی مدل سازی شده در نرم افزار Aspen HYSYS

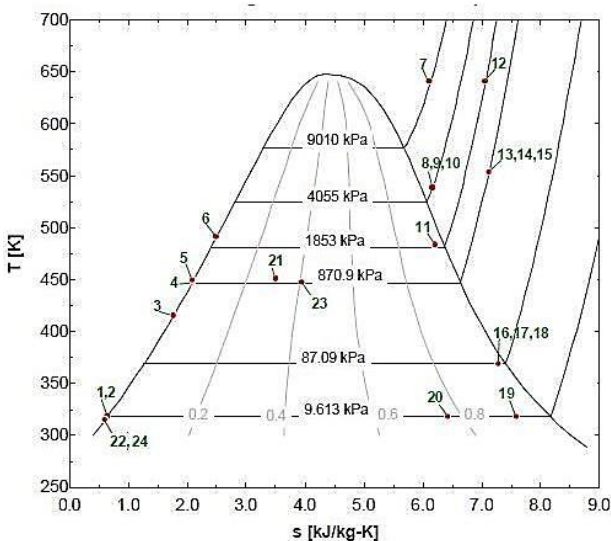


Fig. 2 T-s diagram for the power plant Clausius-Rankine cycle [11]

شکل 2 نمودار T-s برای سیکل کلاسیوس-رانکین نیروگاه [11]

مشاهده می شود [13]:

$$e = e^{ph} + e^{ch} \quad (1)$$

اگزرژی فیزیکی جریان نیز طبق رابطه (2) تعریف می شود [14]:

$$e^{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (2)$$

که در آن زیرنویس 0 مربوط به شرایط در دما و فشار محیط است. اگزرژی شیمیایی جریان نیز از رابطه (3) به دست می آید [15]:

$$e^{ch} = \sum x_i e_i^0 + RT_0 \sum x_i \ln x_i \quad (3)$$

که بیان شد، طراحی سیکل براساس داده های ارائه شده در "شکل 2" انجام شده است. همچنین دبی ورودی H1 نیز طبق [11]، 35Kg/s در نظر گرفته شده است و دبی های خروجی از TEE1، TEE2، TEE3 نیز به وسیله دستور اجاست تنظیم شده اند، به این صورت که دبی جریان جدا شده را تا حدی به طور خودکار افزایش می دهد که خروجی میکسر و مبدل به دما و فشار مورد نظر برسد و در حالت مایع اشباع باقی بماند.

در این حالت مجموع خروجی توربین ها به میزان 29.6MW که با نتیجه حاصل از [11] که 30MW است مطابقت دارد. همچنین از آن جا که مشخصات ترمودینامیکی نقاط مختلف سیکل با تغییر دبی تغییر چندانی نمی کند و تنها تغییر در سائز اجزا (توربین ها و مبدل و ..) می باشد، می توان با استفاده از همین مشخصات ترمودینامیکی و کاهش دبی سیستم به توان مورد نیاز رسید. حال با کاهش دبی تا میزان 12Kg/s میزان توان خروجی توربین ها را تا 10.1MW که حدود میزان مورد نظر برای این پژوهش است کاهش داده می شود.

3- تحلیل اگزرژی

اگزرژی بیشترین کار موجود در هنگام انتقال برگشت پذیر اشکال مختلف انرژی به سیستم مرجع است، که خود سیستم در تعادل ترمودینامیکی با محیط است و قابلیت انجام کار ندارد. اگزرژی همچنین معیار مشخص کردن فاصله سیستم از تعادل کلی است، به این صورت که هر چقدر اگزرژی مصرف می شود، مقادیر حالت دما، فشار و ترکیب سیستم به محیط نزدیک می شود. به همین منظور به حالت مرجع حالت مرده نیز گفته می شود که در واقع همان شرایط محیط است [12]. کل اگزرژی جریان های چندجزیی برابر با دو جزء است: اگزرژی شیمیایی، و اگزرژی فیزیکی که در رابطه (1)

برای سال زام یک سیستم یکنواخت نیستند. به‌طور کلی با گذشت چند سال از راه‌اندازی، هزینه‌های حمل و نقل کاهش و هزینه‌های سوخت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین برای بررسی اقتصادی سیستم نیاز به محاسبه‌ی هزینه‌های طبقه‌بندی شده است. ارزش طبقه‌بندی شده TRR_i [18] براساس تخمین هزینه‌ی خرید تجهیزات (PEC) و هزینه‌ای سرمایه‌گذاری اعمال می‌شود. برای تخمین هزینه‌ی خرید هر کدام از تجهیزات از رابطه‌ی جداگانه‌ای استفاده می‌شود که وابسته به دما یا فشار گاز در ورود یا خروج جزء موردنظر هستند و از داده‌های خروجی نرم‌افزار استخراج می‌شوند. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی خرید توربین، از رابطه‌ی (5) که در مرجع [19] آمده استفاده می‌شود:

$$PEC_T = \left(\frac{479.34m_g}{0.92 - \eta_T} \right) \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) (1 + \exp(0.036T_{in} - 56.4)) \quad (5)$$

همچنین از رابطه‌ی (6) موجود در مرجع [20] برای محاسبه‌ی هزینه‌ی خرید مبدل استفاده می‌شود:

$$PEC_{HEX} = 0.322 \times (30000 + 0.75A_{surface}^{0.8}) \quad (6)$$

سیس با استفاده از رابطه‌ی (7) به تخمین هزینه‌ی خرید پمپ‌ها می‌پردازیم [21]:

$$PEC_{pump} = 1.55 \exp[8.883 - 0.6019 \ln(\dot{m}\sqrt{H})] + 0.0519(\ln(\dot{m}\sqrt{H}))^2 \quad (7)$$

در نهایت هزینه‌های طبقه‌بندی شده‌ی جزء k ام که شامل هزینه‌های نگهداری (Z_k^{CL}) و راه‌اندازی سالانه (Z_k^{OM}) از روابط (8) و (9) محاسبه می‌شود [22]. در این روابط CC_L برابر هزینه‌های نگهداری سالانه‌ی کل سیستم و OMC_L برابر هزینه‌های راه‌اندازی کل سیستم می‌باشد که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها در مرجع [5] آمده است:

$$Z_k^{CL} = \frac{CC_L \cdot PEC_k}{\tau \sum PEC_k} \quad (8)$$

$$Z_k^{OM} = \frac{OMC_L \cdot PEC_k}{\tau \sum PEC_k} \quad (9)$$

که e_i^0 و x_i به ترتیب عبارت‌اند از انرژی شیمیایی استاندارد در دما و فشار محیط و جزء مولی جزء i ام در جریان. در محاسبه‌ی انرژی فیزیکی اختلاف حالت ترمودینامیکی سیستم با حالت مرجع در نظر گرفته می‌شود و در محاسبه‌ی انرژی شیمیایی خود سیستم باید به حالت مرجع برسد و در واقع تعادل مرده داشته باشیم. البته در این تحقیق به دلیل این‌که نرم‌افزار شبیه‌ساز مورد استفاده انرژی کل هر جریان را در اختیار ما قرار می‌دهد، تنها به محاسبه‌ی انرژی فیزیکی اکتفا کرده و انرژی شیمیایی را از تفاضل انرژی کل و فیزیکی به دست می‌آوریم.

در تحلیل انرژی دو شاخص مورد توجه هستند، تخریب انرژی و راندمان انرژی. تخریب انرژی برابر با اختلاف سوخت ورودی به هر جزء و راندمان انرژی با استفاده از تعریف کلی رابطه‌ی (4) محاسبه می‌گردد [16]:

$$\varepsilon_i = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (4)$$

نتایج تحلیل انرژی در جداول 1 و 2 آورده شده است. منفی یا مثبت بودن مقادیر فاقد هر گونه معنی خاصی است و به دلیل مبدا انتخابی نرم‌افزار برای مقادیر آنتالپی می‌باشد. گفتنیست تنها اختلاف انرژی جریان‌ها که برای به دست آمدن سوخت و محصول محاسبه می‌شوند، برای تحلیل اهمیت و کاربرد دارد.

4- مدل اقتصادی

4-1- تحلیل انرژی اقتصادی

این روش تمامی هزینه‌های مربوط به پروژه، از جمله کمترین میزان بازگشت سرمایه‌ی موردنیاز را محاسبه می‌کند. کل سود سالیانه‌ی موردنیاز براساس کل سرمایه‌ی اولیه و پارامترهای اقتصادی، راه‌اندازی و بازاری ورودی اولیه، به صورت سال به سال محاسبه می‌شود و در آخر ارزش مالی سالیانه‌ی غیریکنواخت سالیانه‌ی مرتبط با سرمایه‌گذاری، راه‌اندازی، نگهداری و هزینه‌ی سوخت سیستم بررسی و دسته‌بندی می‌شوند [17].

مجموعه هزینه‌های مرتبط با نگهداری (CC_j) و دستمزدها (OMC_j و FC_j)

جدول 1 نتایج آنالیز انرژی

Table 1 Results of exergy analysis							
جریان	انرژی فیزیکی (kJ/h)	انرژی شیمیایی (kJ/h)	انرژی کل (kJ/h)	جریان	انرژی فیزیکی (kJ/h)	انرژی شیمیایی (kJ/h)	انرژی کل (kJ/h)
1	-625759526.1	625862008	102481.52	13	-649616090.4	688383770	38767680
2	-625759526.1	625864011	104484.8	14	-58991757.47	62512257.7	3520500.2
3	-625542543.4	625921320	378777.04	15	-590669445.2	625919317	35249872
4	-854238879	860438079	6199200	16	-607600794.6	625968123	18367328
5	-854238879	860443479	6204600	17	-273482231.4	281749399	8267168
6	-849112686	860479686	11367000	18	-334118563.2	344218723	10100160
7	-796779639	860283639	63504000	19	-340972491.6	344085052	3112560
8	-805121397	860201397	55080000	20	-619947500.2	625705948	5758448
9	-161024279.4	172040279	11016000	21	-167749477.2	172007917	4258440
10	-644097117.6	688161118	44064000	22	-277408747.2	281772171	4363424
11	-650312733.6	688337374	38024640	23	-167775267.6	172008868	4233600
12	-642239884.8	688377485	46137600	24	-279129205.7	281774134	2644928

جدول 2 محاسبه سوخت و محصول اجزای سیکل

Table 2 Fuel and product calculation of cycle components

اجزا	اگزرژی سوخت (kJ/h)	اگزرژی محصول (kJ/h)	اجزا	اگزرژی سوخت (kJ/h)	اگزرژی محصول (kJ/h)	اجزا	اگزرژی سوخت (kJ/h)	اگزرژی محصول (kJ/h)
C1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_1(e_{20} - e_1)$	MIX2	5812025.92	6145455.907	C1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_1(e_{20} - e_1)$
H1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_1(e_7 - e_6)$	HPT1	52333047	54462025.78	H1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_1(e_7 - e_6)$
RH1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_{22}(e_{22} - e_3)$	HPT2	4149098.2	4242169.421	RH1	$Q(1 - \frac{T_0}{T})$	$\dot{m}_{22}(e_{22} - e_3)$
Pump1	W	$\dot{m}_1(e_1 - e_2)$	TEE1	0	2645	Pump1	W	$\dot{m}_1(e_1 - e_2)$
Pump2	W	$\dot{m}_4(e_4 - e_5)$	TEE2	0	4012	Pump2	W	$\dot{m}_4(e_4 - e_5)$
HEX1	$\dot{m}_{17}(e_{17} - e_{22})$	$\dot{m}_2(e_3 - e_2)$	TEE3	216982.72	280465.4171	HEX1	$\dot{m}_{17}(e_{17} - e_{22})$	$\dot{m}_2(e_3 - e_2)$
HEX2	$\dot{m}_9(e_9 - e_{21})$	$\dot{m}_5(e_6 - e_5)$	LPT1	5126193	6725197.8	HEX2	$\dot{m}_9(e_9 - e_{21})$	$\dot{m}_5(e_6 - e_5)$
VLV1	$\dot{m}_{22}(e_{22})$	$\dot{m}_{24}(e_{24})$	LPT2	-279129205.7	-277408747.2	VLV1	$\dot{m}_{22}(e_{22})$	$\dot{m}_{24}(e_{24})$
VLV2	$\dot{m}_{21}(e_{21})$	$\dot{m}_{23}(e_{23})$	LPT3	-167775267.6	-167749477.2	VLV2	$\dot{m}_{21}(e_{21})$	$\dot{m}_{23}(e_{23})$
MIX1	$\dot{m}_3(e_3) + \dot{m}_{14}(e_{14}) + \dot{m}_{23}(e_{23})$	$\dot{m}_4(e_4)$	-	-854238879	-852309568.5	MIX1	$\dot{m}_3(e_3) + \dot{m}_{14}(e_{14}) + \dot{m}_{23}(e_{23})$	$\dot{m}_4(e_4)$

مورد بررسی هستند. نوشتن این معادله برای همه اجزای سیستم به همراه معادلات کمکی (با توجه به قوانین P و F، مراجعه به مرجع [5]) به روابط (12) تا (35) می انجامد. با حل این معادلات قیمت واحد جریان های اگزرژی در سیستم مورد بررسی به دست می آید:

$$c_{20}\dot{E}_{20} + \dot{Z}_{c1} = c_1\dot{E}_1 \quad (12)$$

کندانسور:

$$c_2\dot{E}_2 + c_{17}\dot{E}_{17} + \dot{Z}_{HEX1} = c_3\dot{E}_3 + c_{22}\dot{E}_{22} \quad (13)$$

مبدل HEX1:

$$c_2\dot{E}_3 = c_3\dot{E}_2 \quad (14)$$

مبدل HEX2:

$$c_9\dot{E}_9 + c_5\dot{E}_5 + \dot{Z}_{HEX2} = c_6\dot{E}_6 + c_{21}\dot{E}_{21} \quad (15)$$

$$c_6 = c_5 \quad (16)$$

هیتر H1:

$$c_6\dot{E}_6 + c_{QH1}\dot{E}_{QH1} + \dot{Z}_{H1} = c_7\dot{E}_7 \quad (17)$$

توربین HPT1:

$$c_7\dot{E}_7 + \dot{Z}_{HPT1} = c_8\dot{E}_8 + c_{QHPT1}\dot{E}_{QHPT1} \quad (18)$$

توربین HPT2:

$$c_{10}\dot{E}_{10} + \dot{Z}_{HPT2} = c_{11}\dot{E}_{11} + c_{QHPT2}\dot{E}_{QHPT2} \quad (19)$$

هیتر RH1:

$$c_{11}\dot{E}_{11} + c_{QRH1}\dot{E}_{QRH1} + \dot{Z}_{RH1} = c_{12}\dot{E}_{12} \quad (20)$$

توربین LPT1:

$$c_{12}\dot{E}_{12} + \dot{Z}_{LPT1} = c_{13}\dot{E}_{13} + c_{QLPT1}\dot{E}_{QLPT1} \quad (21)$$

توربین LPT2:

$$c_{15}\dot{E}_{15} + \dot{Z}_{LPT2} = c_{16}\dot{E}_{16} + c_{QLPT2}\dot{E}_{QLPT2} \quad (22)$$

توربین LPT3:

$$c_{18}\dot{E}_{18} + \dot{Z}_{LPT3} = c_{19}\dot{E}_{19} + c_{QLPT3}\dot{E}_{QLPT3} \quad (23)$$

میکسر MIX1:

$$c_4\dot{E}_4 = c_3\dot{E}_3 + c_{14}\dot{E}_{14} + c_{23}\dot{E}_{23} \quad (24)$$

میکسر MIX2:

عبارت \dot{Z}_k بیانگر هزینه های مرتبط با سرمایه گذاری و راه اندازی و نگهداری است که از رابطه (10) به دست می آید و نتایج آن در جدول 3 مشاهده می شود [22]:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CL} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (10)$$

دیگر متغیر مورد اهمیت در این تحلیل، فاکتور اگزژی و کونومیک است که نشان دهنده نسبت هزینه سرمایه گذاری به مجموع هزینه های سرمایه گذاری و تخریب و اتلاف اگزژی می باشد. اما همان طور که گفته شده در این سیستم مصرف سوخت وجود ندارد و به همین علت هزینه اگزژی ناچیز می باشد و محاسبه نمی شود.

4-2- مدل ترمواکونومیک

معادله مدل ترمواکونومیک برای بالانس هزینه یک جزء سیستم انرژی به صورت رابطه (11) است [23]:

$$\sum_{j=1}^n (c_i E_j)_{k.in} + \dot{Z}_k^{CL} + \dot{Z}_k^{OM} = \sum_{j=1}^m (c_j E_j)_{k.out} \quad (11)$$

که در آن c_j قیمت واحد اگزژی برای جریان z ام ورودی/خروجی از جزء z ام و \dot{E}_j جریان اگزژی برای جریان z ام ورودی/خروجی از جزء z ام است. در معادله (16)، n و m به ترتیب برابر تعداد جریان های ورودی و خروجی از جزء

جدول 3 هزینه های سرمایه گذاری، راه اندازی و نگهداری اجزا

Table 3 Investment and maintenance cost of components

اجزا	\dot{Z}_k (\$/hr)
C1	4.70
H1	8.67
RH1	6.93
HEX1	3.19
HEX2	98.31
HPT1	40.06
HPT2	31.92
LPT1	22.46
LPT2	85.18
LPT3	119.46

تقسیم برگشت‌ناپذیری از این دیدگاه اهمیت زیادی داشته و نتایج آن گویای چگونگی کیفیت چیدمان و ساختار فرآیندی به شمار می‌رود؛ با این حال، انجام آن و محاسبه برگشت‌ناپذیری درون‌زای تجهیزات، پیچیدگی و دشواری بیشتری نسبت به محاسبه برگشت‌ناپذیری غیر قابل اجتناب آن‌ها داشته و در واقع مسئله اصلی تحلیل انرژی پیشرفته به حساب می‌آید. در نتیجه تعیین دقیق آن می‌تواند تأثیر زیادی در دقت نتایج حاصله از تحلیل داشته باشد. در این تحقیق از روشی که توسط سترانس و همکاران [26] ایجاد شده استفاده شده است. در این روش ابتدا یک سیکل هابرید⁴ طراحی می‌کنیم. سیکل هابرید سیکلی است که در آن تمامی اجزاء، بجز جزء مورد مطالعه، در شرایط تئوری⁵ کار می‌کنند. برگشت‌ناپذیری درون‌زای جزء مورد نظر از محاسبه تخریب انرژی آن در این سیکل به دست می‌آید. سپس به سادگی تخریب انرژی برون‌زا را از رابطه‌ی (37) به دست آورده می‌شود:

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} = \dot{E}_{D,k} - \dot{E}_{D,k}^{EN} \quad (37)$$

در این تحقیق شرایط تئوری برای مبدل‌ها $\Delta T_{min} = 0$ و برای توربین‌ها بازده 100% در نظر گرفته شده است.

از دیدگاه توانایی برطرف نمودن برگشت‌ناپذیری نیز برگشت‌ناپذیری هر دستگاه به دو دسته تقسیم می‌شود [27]، برگشت‌ناپذیری قابل اجتناب⁶ و برگشت‌ناپذیری غیرقابل اجتناب⁷ (رابطه 38):

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (38)$$

برگشت‌ناپذیری غیرقابل اجتناب، بخشی از برگشت‌ناپذیری است که به دلیل وجود محدودیت‌های فنی و اقتصادی نمی‌تواند برطرف گردد و همواره وجود خواهد داشت و برگشت‌ناپذیری‌های قابل اجتناب، بخشی از برگشت‌ناپذیری است که با کمی سرمایه‌گذاری و بهبود نوع دستگاه قابل برطرف شدن می‌باشد. تعیین برگشت‌ناپذیری غیرقابل اجتناب به محدودیت‌های فنی و اقتصادی در نظر گرفته شده در طراحی فرآیند بستگی دارد و ملاک‌های فرضی آن توسط خود تحلیل‌گر ارائه می‌شود [25]؛ در حقیقت این خود تحلیل‌گر است که با در نظر گرفتن شرایط فرآیند، قیمت تجهیزات فرآیندی، مقادیر موجود در منابع کتابخانه‌ای مانند مقالات و ... ملاک غیرقابل اجتناب بودن برگشت‌ناپذیری را که همان بالاترین راندمان یک دستگاه می‌باشد، فرض می‌کند.

در این تحقیق فرض‌های تعیین برگشت‌ناپذیری غیرقابل اجتناب تجهیزات مختلف، برای مبدل‌ها $\Delta T_{min} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ و برای توربین‌ها بازده 90% در نظر گرفته شده است.

عبارت $(E_D/E_P)_k^{UN}$ جهت تعیین برگشت‌ناپذیری غیرقابل اجتناب به ازای واحد انرژی تولیدی دستگاه k به کار می‌رود. این عبارت، وقتی بهترین شرایط عملکرد دستگاه k با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی در شرایط کنونی در نظر گرفته شود، محاسبه شده و به دنبال آن برگشت‌ناپذیری غیر قابل اجتناب از رابطه‌ی (39) به دست می‌آید [27]:

$$\dot{E}_{D,k}^{UN} = \dot{E}_{P,k} \left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P} \right)_k^{UN} \quad (39)$$

با محاسبه این مقدار، مقدار برگشت‌ناپذیری قابل اجتناب را می‌توان از معادله‌ی (38) محاسبه نمود.

تنها داشتن اطلاعاتی از برگشت‌ناپذیری‌های درون‌زا، برون‌زا، قابل اجتناب و غیر قابل اجتناب به‌طور مجزا برای ارزیابی عملکرد تجهیزات کافی

$$c_{20}\dot{E}_{20} = c_{19}\dot{E}_{19} + c_{24}\dot{E}_{24} \quad (25)$$

جداکننده TEE1:

$$c_8\dot{E}_8 = c_9\dot{E}_9 + c_{10}\dot{E}_{10} \quad (26)$$

$$c_9 = c_{10} \quad (27)$$

جداکننده TEE2:

$$c_{13}\dot{E}_{13} = c_{14}\dot{E}_{14} + c_{15}\dot{E}_{15} \quad (28)$$

$$c_{14} = c_{15} \quad (29)$$

جداکننده TEE3:

$$c_{16}\dot{E}_{16} = c_{17}\dot{E}_{17} + c_{18}\dot{E}_{18} \quad (30)$$

$$c_{17} = c_{18} \quad (31)$$

شیر فشار شکن VLV1:

$$c_{22}\dot{E}_{22} = c_{24}\dot{E}_{24} \quad (32)$$

شیر فشار شکن VLV2:

$$c_{21}\dot{E}_{21} = c_{23}\dot{E}_{23} \quad (33)$$

پمپ Pump1:

$$c_1 + \dot{Z}_{\text{Pump1}} = c_2 \quad (34)$$

پمپ Pump2:

$$c_4 + \dot{Z}_{\text{Pump2}} = c_5 \quad (35)$$

که طبق مصوبه‌ی وزارت نیرو خروجی توربین‌ها 4900 ریال بر کیلووات ساعت [24] و با دلار 3600 تومان محاسبه شده است. در مجموع 24 جریان وجود دارد که با 24 معادله‌ی بالا توسط اکسل¹ حل می‌شوند و تأثیر بهینه‌سازی بر مجموع هزینه‌های محصولات تعیین می‌گردد.

5- تحلیل انرژی پیشرفته

تحلیل انرژی پیشرفته براساس نتایج تحلیل انرژی انجام می‌گیرد. ایده‌ی اصلی تحلیل انرژی پیشرفته، تقسیم برگشت‌ناپذیری یک دستگاه می‌باشد. برگشت‌ناپذیری که در یک دستگاه رخ می‌دهد، تنها ناشی از سوء عملکرد ترمودینامیکی خود دستگاه نبوده و به عملکرد سایر دستگاه‌های فرآیندی که با آن‌ها در ارتباط است نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر، تحلیل انرژی در تعیین بخشی از برگشت‌ناپذیری دستگاه‌ها که منشأی به جز عملکرد خود دستگاه دارد ناتوان است. این تقسیم‌بندی در تحلیل انرژی پیشرفته صورت می‌گیرد.

در این تحلیل، برگشت‌ناپذیری تجهیزات از دو دیدگاه تقسیم‌بندی می‌شود: یکی از دیدگاه منشأ پیدایش برگشت‌ناپذیری و دیگری از دیدگاه توانایی برطرف نمودن برگشت‌ناپذیری. از دیدگاه نخست، برگشت‌ناپذیری هر دستگاه به دو دسته تقسیم می‌شود [25]، برگشت‌ناپذیری درون‌زا² و برگشت‌ناپذیری برون‌زا³ (رابطه 36).

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX} \quad (36)$$

برگشت‌ناپذیری درون‌زا، بخشی از برگشت‌ناپذیری است که به عملکرد ذاتی خود دستگاه و نوع فرآیند تبدیل انرژی رخ داده در آن مربوط بوده و حتی اگر سایر تجهیزات فرآیندی در شرایط ایده‌آل خود عمل کرده و برگشت‌ناپذیری نداشته باشند، این بخش از برگشت‌ناپذیری در دستگاه مربوطه وجود خواهد داشت. برگشت‌ناپذیری برون‌زا نیز بخشی از برگشت‌ناپذیری است که اثر القایی برگشت‌ناپذیری در سایر دستگاه‌ها می‌باشد.

⁴ Hybrid cycle

⁵ Theoretical condition

⁶ Avoidable Irreversibility

⁷ Unavoidable Irreversibility

¹ Excell

² Endogenous Irreversibility

³ Exogenous Irreversibility

است.

با تحلیل نتایج و مقایسه‌ی تخریب انرژی اجزای سیستم مشخص می‌شود که LPT2، H1، LPT3 و HEX2 به ترتیب دارای بیشترین میزان تخریب انرژی می‌باشند. در این میان H1 به دلیل راندمان انرژی بالا و مقدار سوخت بسیار بالاتر نسبت به بقیه اجزا عملکرد قابل قبول‌تری دارد. میزان بالاتر تخریب انرژی LPT2 نیز به دلیل سوخت بالاتر نسبت به بقیه است و در کل عملکرد مشابهی با LPT3 و HEX2 دارد. تخریب انرژی در توربین‌ها رابطه‌ی عکس با بازدهی آن‌ها دارد. همچنین از آن‌جا که با افزایش دما چگالی کاهش، و کار موردنیاز در نسبت فشار یکسان افزایش می‌یابد، افزایش دمای محیط باعث کاهش تخریب انرژی می‌شود. از دیدگاه آنالیز انرژی، اجزای با تخریب انرژی بیشتر در اولویت افزایش بازدهی و بازنگری قرار دارند. بنابراین در این‌جا نیز LPT2، H1، LPT3 و HEX2 به ترتیب در اولویت قرار می‌گیرند.

یک روش برای اولویت‌بندی اجزا از لحاظ انرژی و اکونومی، مرتب کردن آن‌ها براساس مقدار \dot{Z}_k (\$/hr) + C_D (\$/hr) می‌باشد. به این صورت که هر که این مقدار بالاتر باشد ارجحیت بیشتری برای بهینه‌سازی دارد. در این تحقیق به دلیل عدم مصرف سوخت در سیستم، C_D (هزینه‌های تخریب انرژی) صفر بوده و این بررسی براساس مقدار \dot{Z}_k صورت می‌گیرد. نتایج در جدول 5 موجود است. همان‌طور که مشخص است LPT2، LPT3 و HEX2 که تخریب انرژی بالایی نیز داشتند، در این‌جا نیز مورد توجه هستند.

بنابراین با جمع‌بندی نتایج آنالیز انرژی و اقتصادی و با توجه به این‌که عملکرد H1 نسبت به باقی اجزا قابل قبول‌تر بود، سه جزء LPT2، LPT3 و HEX2 در اولویت بازنگری و ارتقا قرار می‌گیرند. در قسمت بعد و در آنالیز انرژی پیشرفته مشخص می‌گردد که چه میزان از تخریب انرژی این سه جزء قابل اجتناب است و همچنین اهمیت بازنگری اجزای دیگر با توجه به مقدار تخریب انرژی قابل اجتناب آن‌ها بررسی می‌شود.

نیست، بلکه نیاز به اطلاعات بیشتری در این زمینه وجود دارد. بنابراین کل تخریب انرژی به چهار قسمت تقسیم می‌شود که عبارتند از: تخریب انرژی درون‌زا- قابل اجتناب، درون‌زا- غیرقابل اجتناب، برون‌زا- قابل اجتناب، برون‌زا- غیرقابل اجتناب. در این تحقیق پس از تقسیم برگشت‌ناپذیری از دو دیدگاه بیان شده، برگشت‌ناپذیری درون‌زای غیرقابل اجتناب مطابق رابطه‌ی (39) تجهیزات تعیین گردیده و با استفاده از آن سایر دسته‌های برگشت‌ناپذیری محاسبه شده است [28]:

$$\dot{E}_{D,k}^{UN.EN} = \dot{E}_{D,k}^{EN} \left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P} \right)_k^{UN} \quad (40)$$

حال با توجه به مقدار برگشت‌ناپذیری درون‌زای غیرقابل اجتناب باقی را محاسبه می‌شود (روابط 41-43):

$$\dot{E}_{D,k}^{UN.EX} = \dot{E}_{D,k}^{UN} - \dot{E}_{D,k}^{UN.EN} \quad (41)$$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV.EX} = \dot{E}_{D,k}^{EX} - \dot{E}_{D,k}^{UN.EX} \quad (42)$$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV.EN} = \dot{E}_{D,k}^{EN} - \dot{E}_{D,k}^{UN.EN} \quad (43)$$

نتایج تحلیل انرژی پیشرفته در جدول 4 آورده شده است.

6- تحلیل نتایج

6-1- تحلیل نتایج انرژی و اقتصادی

با به دست آوردن انرژی جریان‌ها، نتایج معادلات بالانس انرژی را برای هر جزء در جدول 2 ارائه داده شد که در آن سوخت، محصول، بازده انرژی، تخریب و اتلاف انرژی برای هر جزء محاسبه شده است. تخریب و اتلاف انرژی دو معیار بسیار مناسب برای بررسی عملکرد اجزای سیستم هستند.

به صورت تئوری، تخریب و اتلاف انرژی مفاهیم جداگانه‌ای دارند، ولی در این‌جا تأثیر هر دو یکسان است. همچنین در بسیاری از اجزا ما فرض رفتار آدیاباتیک کردیم، که در نتیجه از اتلاف انرژی در آن صرف‌نظر می‌شود. در "شکل‌های 3 و 4" بازده انرژی و تخریب انرژی هر جزء نشان داده شده

جدول 4 نتایج ارزیابی انرژی پیشرفته

Table 4 Results of advanced exergy analysis

تقسیم بندی تخریب انرژی								اجزا
$\dot{E}_{D,k}^{UN.EX}$	$\dot{E}_{D,k}^{UN.EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV.EX}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV.EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$	$\dot{E}_{D,k}^{UN}$	$\dot{E}_{D,k}^{EX}$	$\dot{E}_{D,k}^{EN}$	
101425.23	55499.47	114080.76	62424.52	176505.3	156924.7	215506	117924	C1
538463.58	455864.31	614453.42	520197.47	1134651	994327.89	1152917	976061.78	H1
8405.67	37234.4	8735.54	38695.59	47431.14	45640.08	17141.22	75930	RH1
3507.05	35983.79	2130.64	21861.20	23991.84	39490.85	5637.697	57845	HEX1
78144.12	1054744.52	54935.4	741486.48	796421.9	1132888.65	133079.5	1796231	HEX2
18442.2	87682.79	8353.87	39718.20	48072.08	106125	26796.08	127401	HPT1
74303.23	547680.76	77025.76	567748.23	644774	621984	151329	1115429	HPT2
43354.21	404197.79	19573.87	182490.21	202064.1	447552	62928.09	586688	LPT1
48043.7	377556.29	20545.09	161455.7	182000.8	425600	68588.79	539012	LPT2
75554.76	666813.23	59623.83	526213.77	585837.6	742368	135178.6	1193027	LPT3

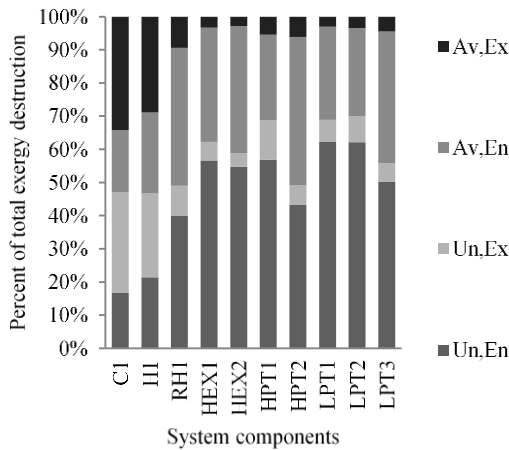


Fig. 5 Different part of system component's exergy destruction

شکل 5 قسمت‌های مختلف تخریب اگزرژی اجزای سیستم

برای کاهش آن باید به بهبود خود آن جزء پرداخته شود. همچنین مقدار زیادی از تخریب اگزرژی اجزای سیستم غیرقابل اجتناب هستند و در نتیجه با توجه به "شکل 5" در بهترین حالت کارکرد نیز در حدود 50-60٪ تخریب اگزرژی در سیستم وجود خواهد داشت. در ادامه با توجه به "شکل 5" مشاهده می‌شود که با بازنگری و اصلاح سه جزء LPT2، LPT3 و HEX2 که در آنالیز اگزرژی و اقتصادی در اولویت قرار گرفتند می‌توان حدود 20 الی 30 درصد از تخریب اگزرژی آن‌ها را کاهش داد.

حال که قسمت‌های مختلف تخریب اگزرژی اجزای سیستم مشخص شد، مرحله‌ی بعدی پیشنهادهایی برای کاهش این برگشت ناپذیری‌هاست. در جدول 6 راه‌حلهایی کلی برای رویارویی با حالت‌های مختلف بیان شده است. در مورد برگشت ناپذیری‌های درون‌زای قابل اجتناب، تعویض و یا طراحی دوباره‌ی جزء مورد بررسی پیشنهاد شده است. در مورد برگشت ناپذیری‌های برون‌زای قابل اجتناب، بهینه‌سازی فرآیند و یا بالا بردن بازده باقی اجزا پیشنهاد شده است.

3-6- بهینه‌سازی سیستم

در این قسمت نیز از نرم‌افزار اسپن هایسیس 8.3 و اریجینال اپتیمایزر برای بهینه‌سازی سیستم استفاده می‌کنیم. سه قدم کلی برای تنظیم بهینه‌ساز هایسیس وجود دارد. ابتدا انتخاب متغیرهای اصلی¹ است، که در واقع همان متغیرهایی هستند که برای بهینه کردن تابع هدف باید دست‌کاری شوند. در این تحقیق نسبت فشار توربین‌ها به‌عنوان متغیر اصلی انتخاب شده است. در قدم بعد ابتدا باید تابع هدف را در اسپریدشت نرم‌افزار تعریف، و سپس به عنوان مقداری که قرار است بهینه شود انتخاب کرد که در اینجا مجموع توان توربین‌ها به‌عنوان تابع هدف تعریف می‌شود.

در مرحله‌ی آخر قیدهایی² بهینه‌سازی مشخص می‌شوند. مشخص کردن این قیدها در این تحقیق بیشتر برای محکم کاری عملکرد سیستم و مبدل‌هاست و در صورت پیش نیامدن ایرادی در اجزا پس از بهینه‌سازی نیازی به تعریف آن‌ها نیست. در این تحقیق قیدهایی زیر در نظر گرفته شده است:

- ΔT_{min} در مبدل‌ها بیشتر از 0.5°C باشد (کمتر از 0.5 حالت ایده‌آل و دور از دسترس)

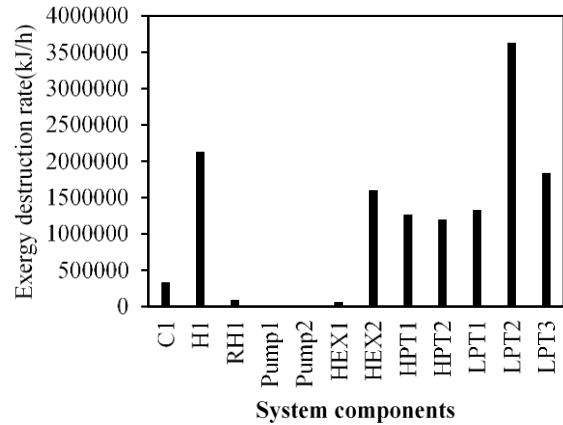


Fig. 3 Exergy destruction of system components

شکل 3 تخریب اگزرژی اجزای سیستم

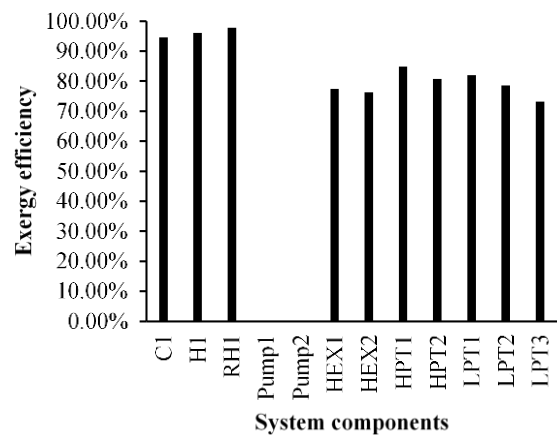


Fig. 4 Exergy efficiency of system components

شکل 4 بازده اگزرژی اجزای سیستم

جدول 5 مرتب‌سازی اجزا براساس اولویت بهبود یابی

Table 5 Arranging the components based on preference of improvement

اجزا	\dot{Z}_k (\$/hr)	اجزا	\dot{Z}_k (\$/hr)
LPT3	119.467	H1	8.676241
HEX2	98.31	RH1	6.938762
LPT2	85.18	C1	4.705752
HPT1	40.06	HEX1	3.199873
HPT2	31.92	Pump2	2.338696
LPT1	22.46	Pump1	2.145664

2-6- تحلیل نتایج اگزرژی پیشرفته

"شکل 5" تقسیم بندی تخریب اگزرژی برای اجزای مختلف سیستم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، مقدار زیادی از تخریب اگزرژی کندانسور C1 و هیتر H1 برون‌زا است که ناشی از تأثیر آن‌ها از برگشت ناپذیری‌های توربین‌های LPT2 و LPT3 و مبدل HEX2 می‌باشد که قبل از آن‌ها قرار گرفته‌اند می‌باشد. بنابراین افزایش بازدهی و کارایی این سه جزء که در قسمت قبل نیز به آن اشاره شده علاوه بر کاهش تخریب اگزرژی خود آن‌ها باعث کاهش تخریب اگزرژی برون‌زای کندانسور و هیتر H1 نیز می‌شوند. در اجزای دیگر تخریب اگزرژی وابسته به جزء خارجی ناچیز بوده و

¹ Primary variables

² Constraint functions

جدول 6 روش‌های کاهش تخریب انرژی قابل اجتناب

Table 6 Methods to reduce avoidable exergy destruction

اجزا	تقسیم بندی تخریب انرژی			قسمت‌های دارای اهمیت	روش‌های کاهش		
	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$		روش الف	روش ب	روش پ
C1	333430	62424.528	176505.3	EN./EX.	×	×	×
H1	2128979	520197.47	1134651	EN./EX.	×	×	×
RH1	93071.22	38695.598	47431.14	EN.	×		
HEX1	63482.7	21861.203	23991.84	EN.	×		
HEX2	1929311	741486.48	796421.9	EN.	×		
HPT1	154197.1	39718.204	48072.08	EN.	×		
HPT2	1266758	567748.23	644774	EN.	×		
LPT1	649616.1	182490.21	202064.1	EN.	×		
LPT2	607600.8	161455.7	182000.8	EN.	×		
LPT3	1328206	526213.77	585837.6	EN.	×		

سیکل شده است، تا بتوان با ایجاد تغییراتی در برخی از اجزا، اعم از افزایش بازدهی برخی اجزا و یا جایگزینی آن‌ها با تجهیزاتی ارزانتر و با صرفه‌تر، مصرف انرژی و هزینه‌های سیکل کاهش پیدا کند. سپس با انتخاب متغیرهای اصلی و تابع هدف، بهینه‌سازی بر روی سیستم انجام شده که به افزایش توان استحصال و کاهش تخریب انرژی و هزینه‌ی محصولات سیستم انجامیده است.

بر طبق نتایج حاصل از تحلیل انرژی، LPT2، LPT3 و HEX2 به دلیل بیشترین میزان اتلاف انرژی، جهت افزایش کارآمدی ارجحیت دارند که نتیجه‌ی آن با نتایج حاصل از اولویت‌بندی اجزای سیستم بر طبق تحلیل انرژی اکونومی مطابقت دارد.

همچنین با تقسیم‌بندی تخریب انرژی توسط آنالیز انرژی پیشرفته به دو جزء درون‌زا و برون‌زا، مشاهده می‌شود که عامل اکثر تخریب انرژی برون‌زا، سه جزء LPT2، LPT3 و HEX2 هستند که این نتیجه‌گیری از بالا بودن تخریب انرژی برون‌زا در کندانسور C1 و مبدل H1 نسبت به سایر اجزا ناشی می‌شود. در مرحله‌ی بعد و تقسیم تخریب انرژی به چهار قسمت، راه‌حل‌های موثر برای کاهش بازگشت‌ناپذیری هر جزء ارائه شده است.

همچنین تخریب انرژی درون‌زای سه جزء LPT2، LPT3 و HEX2 نشان‌دهنده‌ی امکان کاهش 20 الی 30 درصدی از کل تخریب انرژی آن‌ها می‌باشد. بنابراین با بهبود همزمان پنج جزء LPT2، LPT3، HEX، C1 و H1 می‌تواند با کاستن قابل توجه از تخریب انرژی سیستم، باعث بهبود عملکرد و افزایش توان خروجی شود.

در مرحله‌ی نهایی و با تعریف متغیرها و توابع هدف در اپتیماایزر نرم‌افزار اسپن‌هایسیس، سیستم بهینه‌سازی شد که در نتیجه‌ی آن توان خروجی سیستم افزایش و تخریب انرژی و هزینه‌ی محصولات (محاسبه شده توسط انرژی اکونومی) کاهش پیدا کرده است.

8- فهرست علائم

c	قیمت جریان (\$/Tj)
E	انرژی (kJ/h)
h	آنتالپی
n	عمر سیستم
OMC	هزینه‌ی راه‌اندازی و نگهداری (\$)

- خروجی H1 و RH1 ثابت در دما و فشار 356.9°C و 9010KPa (خروجی ثابت پس از دریافت انرژی حرارتی سیال داغ شده توسط خورشید)
- خروجی LPT3 در دما و فشار 45.06°C و 9.613KPa و آب اشباع (خروجی مشخص برای ورودی کندانسور)
- عدم وجود بخار تا خروجی پمپ دوم.

تغییرات پارامترهای بهینه‌سازی شده در جدول (7) موجود است. همچنین همان‌طور که در جدول (8) مشخص است، بهینه‌سازی سیستم علاوه بر افزایش توان استحصال، باعث کاهش تخریب انرژی و هزینه‌ی محصولات سیستم (محاسبه شده توسط حل معادلات مدل ترمودینامیک) می‌شود.

7- نتیجه‌گیری

در این پروژه ابتدا یک فرایند سیکل نیروگاه خورشیدی در اسپن‌هایسیس مدل‌سازی و پس از اعتبارسنجی، مورد ارزیابی انرژی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. سپس با توجه به نتایج پیشنهاداتی برای ایجاد تغییرات در این

جدول 7 مقایسه‌ی پارامترهای بهینه‌سازی

Table 7 comparison of optimization parameters

پارامتر	حالت پایه	حالت بهینه
نسبت فشار HPT1	2.22	2.21
نسبت فشار HPT2	2.18	2.20
نسبت فشار LPT1	2.12	2.19
نسبت فشار LPT2	10	9.66
نسبت فشار LPT3	9.05	9.49

جدول 8 مقایسه‌ی ویژگی‌های مهم سیستم پایه با بهینه‌سازی شده

Table 8 comparison of important parameters of basic and optimized system

پارامتر	حالت پایه	حالت بهینه
کل توان استحصالی (MW)	10.1	10.8
تخریب انرژی کل (kJ/h)	19380576.66	18294105.92
هزینه‌ی محصولات (\$/h)	1532	1493

- Mechanical Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 2247, 2016.
- [10] M. Mehrpooya, A. Shafaei, Advanced exergy analysis of novel flash based Helium recovery from natural gas processes, *Energy*, Vol. 114, pp. 64-83, 2016.
- [11] T. Stuetzle, N. Blair, J. W. Mitchell, W. A. Beckman, Automatic control of a 30 MWe SEGS VI parabolic trough plant, *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1, pp. 187-193, 2004.
- [12] B. Tirandazi, M. Mehrpooya, A. Vatani, S. A. Moosavian, Exergy analysis of C 2+ recovery plants refrigeration cycles, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, No. 6, pp. 676-689, 2011.
- [13] P. Ahmadi, I. Dincer, M. A. Rosen, Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 282-300, 2013.
- [14] C. J. Brown, *Advanced Exergy and Exergoeconomic Analysis of the Major Components of a Combined Cycle Power Plant*, Thesis, Texas A&M University, 2015.
- [15] K. J. Ptasiński, Exergy Analysis, *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*, pp. 37-90, 2016.
- [16] L. Wang, Y. Yang, T. Morosuk, G. Tsatsaronis, Advanced thermodynamic analysis and evaluation of a supercritical power plant, *Energies*, Vol. 5, No. 6, pp. 1850-1863, 2012.
- [17] F. Fabrega, J. Rossi, J. d'Angelo, Exergetic analysis of the refrigeration system in ethylene and propylene production process, *Energy*, Vol. 35, No. 3, pp. 1224-1231, 2010.
- [18] F. Petrakopoulou, A. Boyano, M. Cabrera, G. Tsatsaronis, Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a combined cycle power plant with chemical looping technology, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 5, No. 3, pp. 475-482, 2011.
- [19] D. Igbong, D. Fakorede, Exergoeconomic analysis of a 100 MW unit GE Frame 9 gas turbine plant in Ughelli, Nigeria, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 8, pp. 463-468, 2014.
- [20] M. Mishra, P. K. Das, S. Sarangi, Optimum design of crossflow plate-fin heat exchangers through genetic algorithm, *International Journal of Heat Exchangers*, Vol. 5, No. 2, pp. 379-401, 2004.
- [21] S. S. Grossel, Chemical process equipment: Selection and design, *Chemical Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 10-12, 2006.
- [22] L. Wang, Y. Yang, C. Dong, Z. Yang, G. Xu, L. Wu, Exergoeconomic evaluation of a modern ultra-supercritical power plant, *Energies*, Vol. 5, No. 9, pp. 3381-3397, 2012.
- [23] H. Sayyaadi, M. Babaelahi, Thermoeconomic optimization of a cryogenic refrigeration cycle for re-liquefaction of the LNG boil-off gas, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 6, pp. 1197-1207, 2010.
- [24] Barghnews, 1395; <http://www.barghnews.com>.
- [25] S. Kelly, Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 17, pp. 2142-47, 2008.
- [26] G. Tsatsaronis, T. Morosuk, Advanced exergetic analysis of a refrigeration system for liquefaction of natural gas, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-18, 2010.
- [27] T. Morosuk, G. Tsatsaronis, Advanced exergy analysis for chemically reacting systems—application to a simple open gas-turbine system, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 12, No. 3, pp. 105-111, 2009.
- [28] F. Petrakopoulou, G. Tsatsaronis, T. Morosuk, A. Carassai, Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant, *Energy*, Vol. 41, No. 1, pp. 146-152, 2012.

PEC	هزینه‌ی تجهیزات (\$)
T	دما (K)
Z	قیمت اجزا (\$/h)
ε	راندمان انرژی
Av	قابل اجتناب
ch	شیمیایی
En	داخلی
Ex	خارجی
OM	نگهداری
ph	فیزیکی
Un	غیرقابل اجتناب
D	مربوط به تخریب انرژی
k	اجزا
total	کل

علایم یونانی

بالانویس‌ها

زیرنویس‌ها

9- مراجع

- [1] R. Rosa, Carbon Management and Low Carbon Emission Strategies, *Proceeding of the first International Exergy, Energy and Environment Symposium*, 2003.
- [2] V. Khalilzadeh Babil, J. Mahmoudimehr, Modeling and optimization of the quasi-steady operation of Solar Power Plant equipped with thermal energy storage system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 249-258, 2015. (In Persian)
- [3] S. A. Kalogirou, S. Karellas, K. Braimakis, C. Stanciu, et al., Exergy analysis of solar thermal collectors and processes, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 56, pp. 106-137, 2016.
- [4] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*: Elsevier, pp. 29-56, 2013.
- [5] A. Bejan, G. Tsatsaronis, *Thermal Design and Optimization*: John Wiley & Sons, pp. 333-405, 1996.
- [6] S. Sheikhi, B. Ghorbani, R. Shirmohammadi, M. H. Hamed, Thermodynamic and economic optimization of a refrigeration cycle for separation units in the petrochemical plants using pinch technology and exergy syntheses analysis, *Gas Processing Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 39-52, 2014.
- [7] K. Javaherdeh, A. Alizadeh, M. Zoghi, Simulation of combined steam and organic rankine cycle from energy and exergoeconomic point of view with exhaust gas source, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 308-316, 2016. (In Persian)
- [8] K. Hanifi, K. Javaherdeh, M. Yari, Exergy, exergoeconomic analysis and optimization of cogeneration cycle under solar radiation dynamic model by using Genetic Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 205-216, 2015. (In Persian)
- [9] F. Boyaghchi, M. Sabaghian, Advanced exergy and exergoeconomic analyses of Kalina cycle integrated with parabolic-trough solar collectors, *Scientia Iranica Transaction B*,