

تحلیل ترمودینامیکی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید هم‌زمان قدرت و گرمایش

بر مبنای بازیافت حرارت از سیکل توربین گاز

امیر ابراهیمی مقدم

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
amir_brahim_051@shahroodut.ac.ir

علی جباری مقدم

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
alijabari@shahroodut.ac.ir

محمود فرزانه گرد

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی
imchm@yahoo.co.uk

چکیده

در مقاله حاضر، یک سیستم تولید دوگانه به منظور تولید هم‌زمان گرمایش و قدرت ارائه شده است. پیکربندی سیستم پیشنهادی متشکل از سیکل برایتون به همراه بازیافت حرارتی و یک مبدل تولید بخار HRSG می‌باشد. بخار تولید شده به منظور کاربردهای گرمایشی می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. به منظور ارزیابی سیستم پیشنهادی، شاخص‌های بازده انرژی، بازده اگزرژی و جریمه سالیانه انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، اثر پارامترهای مهم مسئله شامل نسبت فشار کمپرسور، دمای ورودی به توربین، بازده‌های آیزنتروپیک کمپرسور و توربین بر روی این سه شاخص ارائه شده است. نتایج بیانگر این است که با در نظر گرفتن یک دمای ثابت و معین برای هوای ورودی به محفظه احتراق (در این پژوهش 850 K)، افزایش دمای ورودی به توربین و بازده‌های آیزنتروپیک کمپرسور و توربین به ترتیب باعث کاهش و افزایش بازده سیستم شده و بنابراین میزان انتشار آلاینده‌ها به محیط زیست به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین، با بررسی اثر نسبت فشار کمپرسور مشاهده شد که یک نسبت فشار بهینه وجود دارد که باعث حداکثر بازده سیستم و حداقل میزان انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در شرایط کاری پژوهش حاضر، مقدار نسبت فشار بهینه برای حصول حداکثر بازده و حداقل آلاینده‌ها به ترتیب تقریباً ۱۱ و ۴/۵ می‌باشد.

کلمات کلیدی: تولید هم‌زمان، سیکل توربین گاز، تحلیل انرژی و اگزرژی، تحلیل زیست‌محیطی.

۱- مقدمه

یکی از اهداف اساسی مهندسی مکانیک در شاخه تبدیل انرژی، استفاده از انرژی حرارتی در جهت تولید انرژی الکتریکی به صورت مؤثر، ارزان و سازگار با محیط زیست می‌باشد. از طرفی، انرژی مورد نیاز جهان به صورت پیوسته در حال افزایش است. به منظور تأمین اهداف ذکر شده، به کارگیری روش‌های نوین در این زمینه لازم است. بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی جهان از طریق سیکل‌های قدرت ترمودینامیکی فراهم می‌شود.

در سال‌های اخیر توجه زیادی به مسئله افزایش بازدهی سیکل‌های ترمودینامیکی معطوف شده و تحقیقات بسیار زیادی پیرامون آن انجام شده است. تولید هم‌زمان سرمایه‌ش، گرمایش و برق در حقیقت تولید متوالی چند صورت مفید انرژی از یک منبع تولید انرژی (سوخت) است. در اغلب کاربردهای سیستم‌های تولید هم‌زمان، انرژی شیمیایی سوخت به انرژی مکانیکی و گرمایی تبدیل می‌گردد. معمولاً انرژی مکانیکی برای تولید برق و انرژی گرمایی برای تولید گرمایش و سرمایه‌ش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یکی از تحقیقات انجام شده پیرامون بهبود کارایی سیکل توربین گازی، کاوشیک و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۳، اثر تغییرات بازده آیزنتروپیک توربین و کمپرسور را بر نرخ قدرت خروجی و نیز بازده حرارتی یک موتور حرارتی برایتون

¹ Kaushik et al.

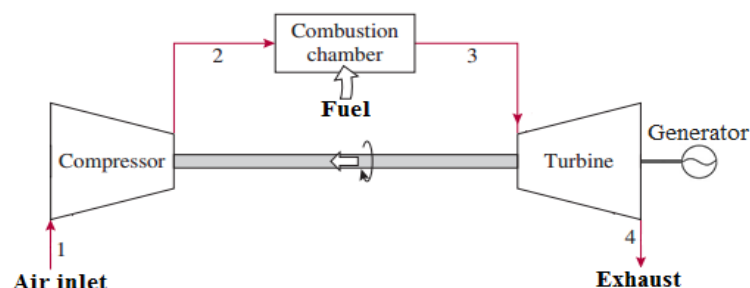
بازگشت‌ناپذیر به همراه بازیاب بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر این بود که تأثیر بازده توربین بر نرخ قدرت خروجی و همچنین بازده حرارتی سیکل بیشتر از تأثیر بازده کمپرسور می‌باشد [۱]. در سال ۲۰۰۹، تحلیل و بهینه‌سازی (بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک) یک سیکل برایتون کربن‌دی‌اکسید فوق بحرانی تراکم مجدد توسط سرکار^۲ انجام شد. او در مطالعات خود، اثر شرایط کاری را بر مقدار بهینه نسبت فشار، مقدار بازگشت‌ناپذیری هر یک از اجزاء سیکل و همچنین بازده‌های قانون اول و قانون دوم بررسی نمود [۲]. در یکی از جدیدترین تحقیقات صورت گرفته پیرامون تحلیل ترمودینامیکی سیکل برایتون، ایدریسا و بولاما^۳ (۲۰۱۹)، به تحلیل پیشرفته‌تر از سیکل نوین متشکل از دو سیکل برایتون به صورت موازی (برایتون/برایتون) را مورد بررسی قرار داده است. بدین صورت که حرارت اتلافی از سیکل برایتون فوقانی، به عنوان گرمایش سیکل برایتون تحتانی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با تغییر دمای احتراق از 1000 K تا 1600 K باعث کاهش تخریب انرژی کل گردید [۳].

همانطور که اشاره شد، از مهم‌ترین راه‌کارهای بهبود بازده سیکل توربین گاز، استفاده از بازیاب حرارتی و همچنین تولید هم‌زمان گونه‌های مختلف انرژی در این سیکل است. در مقاله پیش‌رو در نظر گرفته شده است که به تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید هم‌زمان حرارت و قدرت بر مبنای سیکل توربین گاز با بازیاب حرارتی پرداخته شود. بدین منظور، مدل‌سازی و تحلیل انرژی، انرژی و زیست‌محیطی این سیکل در این مقاله ارائه خواهد شد.

۲- شرح مسأله و مدل‌سازی آن

سیکل‌های توربین گازی یکی از پرکاربردترین سیکل‌های قدرت در صنعت بوده که سیکل برایتون پایه کار توربین‌های گاز است. رایج‌ترین سیکل نیروگاه گازی، سیکل ساده توربین گاز است. اجزای اصلی سیکل ساده عبارت‌اند از کمپرسور، محفظه احتراق و توربین که در شکل ۱ نشان داده شده است. سیال عامل سیکل تا قبل از احتراق، هوا و بعد از آن محصولات داغ حاصل از احتراق است. هوا دو وظیفه عمده را بر عهده دارد؛ یکی اینکه مقدار اکسیژن لازم برای سوزاندن سوخت را فراهم می‌کند و دیگر اینکه با مکش آن مقداری بیش از مقدار موردنیاز، هم شانس احتراق کامل افزایش یافته و هم دمای محصولات احتراق کنترل می‌شود تا از حد مجازی که توسط خواص حرارتی توربین محدود می‌شود بالاتر نرود [۴].

در صنعت ساختارهای متعددی از موتور توربین گاز که دارای تغییراتی نسبت به سیکل ساده می‌باشند برای تولید توان و یا تولید هم‌زمان توان و حرارت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از جمله این تغییرات می‌توان به سیکل‌های توربین گاز همراه مبدل حرارتی بازیافت انرژی، سیکل همراه خنک‌کن میانی، سیکل بازگرمایش و یا استفاده از سیکل ساده توربین گاز در قالب سیکل ترکیبی که در آن موتور توربین گاز با واحد بخار مولد انرژی کوپل می‌شود اشاره کرد. اساس کار شبیه سیکل ساده است با این تفاوت که استفاده از این تغییرات و بهبود کننده‌های جانبی سبب بهبود عملکرد و افزایش میزان سودمندی توربین گاز می‌شود.



شکل ۱: سیکل پایه توربین گاز

² Sarkar

³ Idrissa and Boulama

در سیستم‌های تولید چندگانه^۴ می‌توان سه شکل متفاوت از انرژی شامل انرژی الکتریکی، حرارتی و برودتی را هم‌زمان تولید کرد. در واقع سی-سی-اچ-پی^۵ تولید هم‌زمان توان مکانیکی (اغلب به الکتریسیته تبدیل می‌شود)، گرمایش و سرمایش از یک منبع سوخت اولیه است و یک توسعه از تولید هم‌زمان برق و گرما (سی-اچ-پی)^۶ و تولید هم‌زمان برق و سرما (سی-سی-پی)^۷ می‌باشد. منابع انرژی اولیه شامل فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی، زغال‌سنگ، زیست‌توده و هیدروژن و انرژی مفید تولیدی نیز شامل حرارت، برودت و کار مکانیکی است که انرژی کار مکانیکی غالباً جهت راه‌اندازی ژنراتور تولید برق به کار می‌رود. [۵]

سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر سیستم تولید دوگانه موسوم به CGAM است که علاوه بر اجزای سیکل توربین گاز با بازیاب، دارای یک مبدل تولید بخار یا HRSG (Heat Recovery Steam Generator) است که طرح‌واره آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سیستم هوا با شرایط اتمسفر وارد کمپرسور هوا شده و سپس هوای فشرده وارد محفظه احتراق می‌گردد. محصولات احتراق وارد توربین گاز شده و توان خالصی به اندازه ۳۰ MW تولید می‌شود. گازهای داغ منبسط شده خروجی از توربین گاز وارد بازیاب حرارتی شده تا هوای ورودی به محفظه احتراق را پیش‌گرم کرده و سپس حرارت مورد نیاز برای تولید ۱۵ kg/s بخار اشباع در فشار ۲۰ bar را در HRSG تأمین می‌کنند. برای تحلیل سیستم مورد بررسی فرضیاتی اتخاذ شده است که عبارتند از:

- سیستم در حالت پایدار عمل می‌کند.
- تغییرات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل قابل صرف‌نظر هستند.
- اجزای تشکیل دهنده هوای ورودی به کمپرسور عبارتند از: N_2 ، ۷۷/۴۸٪، O_2 ، ۲۰/۵۹٪، CO_2 ، ۰/۰۳٪ و $H_2O(g)$ ، ۱/۹٪.
- افت حرارتی در محفظه احتراق معادل ۲٪ ارزش حرارتی پایین سوخت و افت فشار در آن برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است.
- محصولات احتراق، در دمای ۱۴۵۰ K محفظه احتراق را ترک می‌کنند.
- دمای هوای ورودی به محفظه احتراق برابر ۸۵۰ K فرض شده است.
- نسبت فشار کمپرسور، بازده آیزنتروپیک کمپرسور و بازه آیزنتروپیک توربین گاز به ترتیب برابر ۱۰٪، ۸۵٪ و ۸۵٪ در نظر گرفته شده است.
- افت فشار در سمت جریان هوا و در سمت جریان گازهای احتراق در بازیاب حرارتی به ترتیب برابر ۵٪ و ۳٪ در نظر گرفته شده است.

بر اساس هدف پژوهش حاضر، معادلات حاکم شامل تحلیل انرژی، انرژی و زیست‌محیطی می‌شوند. معادلات اساسی ترمودینامیک شامل معادلات تعادل جرم و انرژی است که در حالت دائم به صورت روابط **Error! Reference source not found** (۱) و **Error! Reference source not found** (۲) نوشته می‌شوند. طبق قانون بقای جرم، جرم خاصیت زوال-ناپذیر ماده است که در تغییرات شیمیایی ماده همواره ثابت می‌ماند و تنها از ماده‌ای به ماده دیگر منتقل می‌شود. قانون بقای انرژی نیز بیانگر این است که انرژی نه تولید می‌شود و نه نابود می‌گردد؛ بلکه همواره از صورتی به صورت دیگر تبدیل می‌شود.

$$\sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right) - \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right) + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (2)$$

⁴ Polygeneration

⁵ Combined Cooling, Heating and Power (CCHP)

⁶ Combined Heating and Power (CHP)

⁷ Combined Cooling and Power (CCP)

$$\sigma = \begin{cases} \xi & ; \quad \xi < 1 \\ \xi - 0.7 & ; \quad \xi \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x^* = a_1 + b_1\sigma + c_1\sigma^2 \\ y^* = a_2 + b_2\sigma + c_2\sigma^2 \\ z^* = a_3 + b_3\sigma + c_3\sigma^2 \end{cases} \quad (13)$$

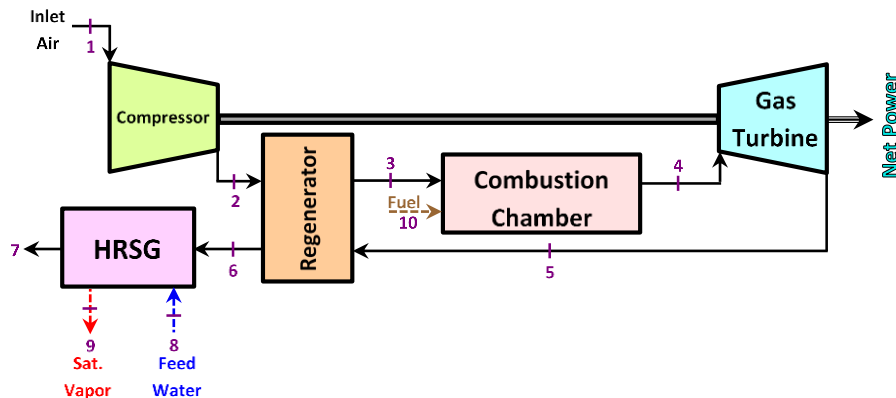
که در این روابط، ξ نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا (بر مبنای مولی یا جرمی) می‌باشد. به منظور ارزیابی کارایی سیستم تولید هم‌زمان پیشنهادی، سه شاخص در نظر گرفته شده است که عبارتند از: بازده حرارتی (بازده انرژی)، بازده انرژی و شاخص زیست‌محیطی. این سه شاخص به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_{th,CHP} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{Heating}}{\dot{m}_f \times LHV} \quad (14)$$

$$\eta_{ex,CHP} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{E}_{Heating}}{\dot{E}_f} \quad (15)$$

$$\epsilon = [C_{CO_2}\dot{m}_{CO_2} + C_{CO}\dot{m}_{CO} + C_{NOx}\dot{m}_{NOx}] \times t_{year} \quad (16)$$

که در رابطه فوق، t_{year} تعداد ساعات کارکرد سیستم در یک سال بوده و در پژوهش حاضر ۷۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است.

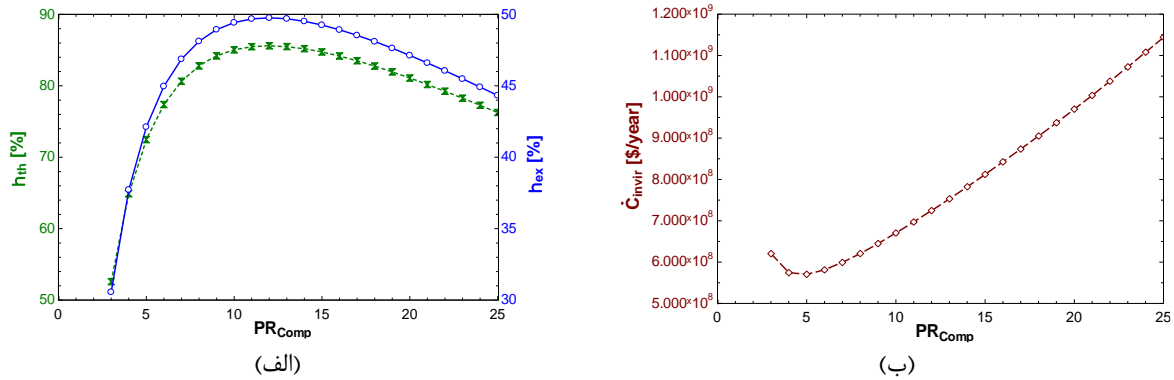


شکل ۲: طرح‌واره سیستم تولید هم‌زمان گرمایش و قدرت مورد بررسی در پژوهش حاضر

۳- نتایج و بحث

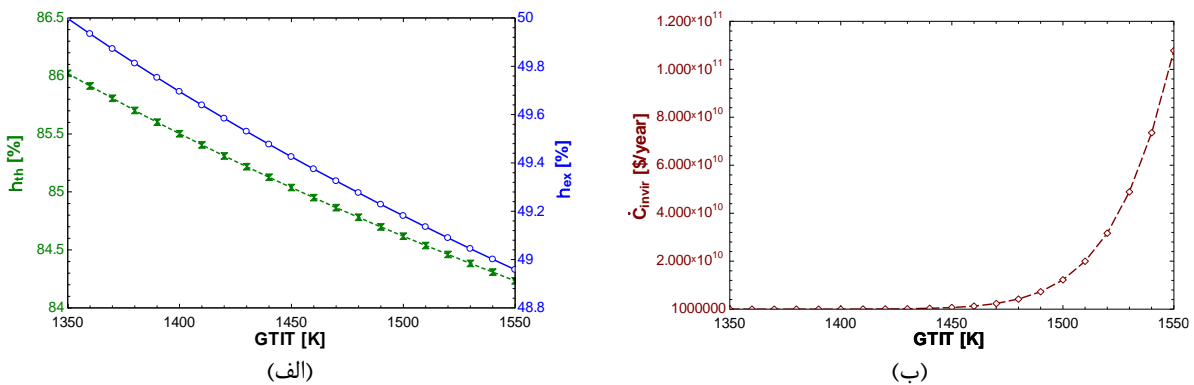
در این بخش یک آنالیز حساسیت جهت بررسی اثر مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر مسأله ارائه خواهد شد. لذا اثر نسبت فشار کمپرسور (η_{PRComp})، دمای گازهای ورودی به توربین (η_{GTIT})، بازده آیزنتروپیک توربین ($\eta_{iseGTur}$) و بازده آیزنتروپیک کمپرسور ($\eta_{iseComp}$) بر روی سه شاخص ارزیابی سیستم که در بخش قبل معرفی شدند (یعنی بازده انرژی، بازده انرژی و جریمه ناشی از انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست) بررسی خواهد شد.

با افزایش نسبت فشار کمپرسور، در ابتدا دمای خروجی از کمپرسور افزایش می‌یابد. در نتیجه، باعث کاهش تزریق سوخت به محفظه احتراق برای حصول دمای موردنظر ورودی به توربین می‌شود. بنابراین در این حالت شاهد افزایش بازده‌های انرژی و انرژی سیستم خواهیم بود. اگر این روند افزایش نسبت فشار کمپرسور ادامه پیدا کند، مشاهده می‌گردد که از یک مقدار معین η_{PRComp} به بعد، بازده سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین یک نسبت فشار معین وجود دارد که به ازای آن حداکثر مقدار توان تولیدی سیستم اتفاق می‌افتد. این مقدار نسبت فشار بهینه نامیده می‌شود که در سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر، نسبت فشار بهینه تقریباً برابر ۱۱ می‌باشد (شکل ۳-الف). از سوی دیگر، همانطور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، برای بخش زیست‌محیطی نیز یک مقدار بهینه وجود دارد که متناظر با کمترین مقدار انتشار آلاینده‌ها (و به دنبال آن کمترین جریمه ناشی از انتشار آلاینده‌ها) می‌باشد. این مقدار نیز در سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر تقریباً برابر ۴/۵ می‌باشد.



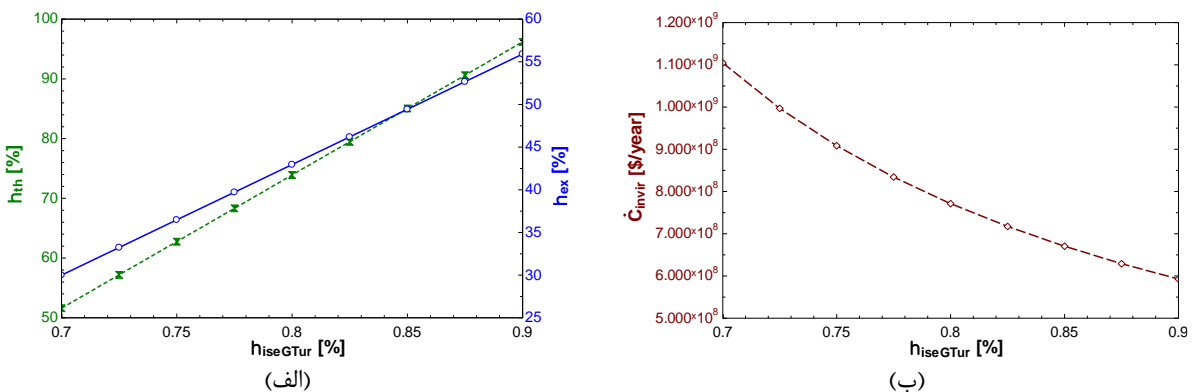
شکل ۳: اثر نسبت فشار کمپرسور بر، الف) بازده انرژی و اگزرژی سیستم، ب) جریمه سالیانه انتشار گازهای آلاینده به محیط زیست

یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار در سیکل توربین گاز، دمای گازهای ورودی به توربین می باشد. از آنجایی که دمای ورودی به محفظه احتراق در پژوهش حاضر مقدار ثابتی فرض شده است (۸۵۰ K)، با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین شاهد کاهش بازده سیستم و بنابراین افزایش میزان انتشار آلاینده ها هستیم. به طوری که با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین از ۱۳۵۰ K به ۱۵۵۰ K، بازده های انرژی و اگزرژی به ترتیب تقریباً ۲/۰۳٪ و ۲/۱۶٪ کاهش می یابند.

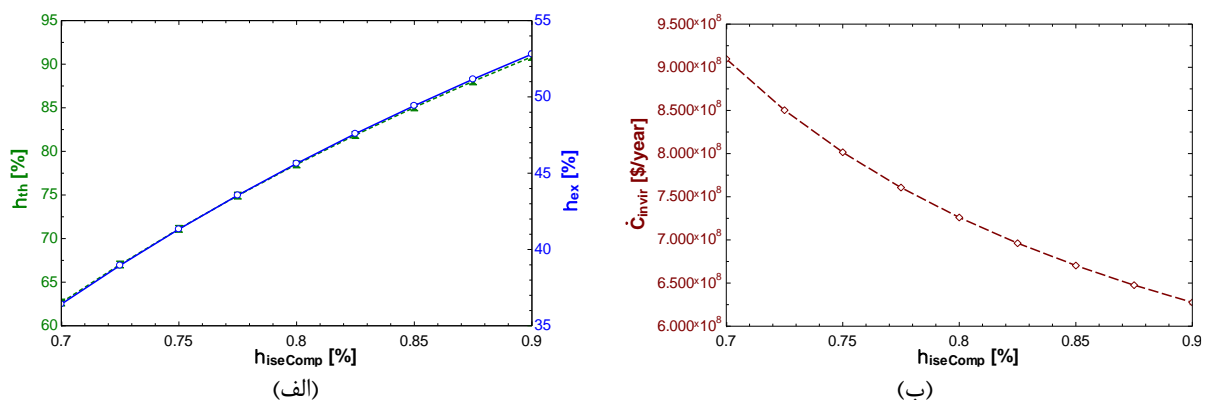


شکل ۴: اثر دمای گازهای ورودی به توربین بر، الف) بازده انرژی و اگزرژی سیستم، ب) جریمه سالیانه انتشار گازهای آلاینده به محیط زیست

شکل های ۵ و ۶ به ترتیب اثر بازده های آیزنتروپیک توربین و کمپرسور را بر شاخص های ارزیابی سیستم نشان می دهند. همانطور که انتظار می رود، با افزایش بازده آیزنتروپیک توربین و کمپرسور، بازده سیستم افزایش یافته و نرخ جریمه سالیانه انتشار گازهای آلاینده کاهش می یابد.



شکل ۵: اثر بازده آیزنتروپیک توربین بر، الف) بازده انرژی و اگزرژی سیستم، ب) جریمه سالیانه انتشار گازهای آلاینده به محیط زیست



شکل ۶: اثر بازده آیزنتروپیک کمپرسور بر، الف) بازده انرژی و اگرژی سیستم، ب) جریمه سالیانه انتشار گازهای آلاینده به محیط زیست

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای مهم تأثیرگذار بر روی یک سیستم تولید هم‌زمان حرارت و قدرت پرداخته شد. سیستم مورد نظر سیکل توربین گاز به همراه بازیاب حرارتی است و به منظور کاربردهای گرمایشی یک مبدل HRSG نیز به سیستم اضافه شد. اثر نسبت فشار کمپرسور، دمای گازهای داغ ورودی به توربین، بازده‌های آیزنتروپیک کمپرسور و توربین بر روی سه شاخص بازده انرژی، بازده اگرژی و جریمه سالیانه انتشار آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر این است که با در نظر گرفتن یک دمای ثابت و معین برای هوای ورودی به محفظه احتراق (در این پژوهش K ۸۵۰)، افزایش دمای ورودی به توربین و بازده‌های آیزنتروپیک کمپرسور و توربین به ترتیب باعث کاهش و افزایش بازده سیستم شده و بنابراین میزان انتشار آلاینده‌ها به محیط زیست به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین، با بررسی اثر نسبت فشار کمپرسور مشاهده شد که یک نسبت فشار بهینه وجود دارد که باعث حداکثر بازده سیستم و حداقل میزان انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در شرایط کاری پژوهش حاضر، مقدار نسبت فشار بهینه برای حصول حداکثر بازده و حداقل آلاینده‌ها به ترتیب تقریباً ۱۱ و ۴/۵ می‌باشد.

مراجع

- [1] Kaushik SC, Tyagi SK, Singhal MK. Parametric study of an irreversible regenerative Brayton cycle with isothermal heat addition. *Energy Convers Manag* 2003;44:2013–25. doi:https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00221-2.
- [2] Sarkar J. Second law analysis of supercritical CO2 recompression Brayton cycle. *Energy* 2009;34:1172–8. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.030.
- [3] Mossi Idrissa AK, Goni Boulama K. Advanced exergy analysis of a combined Brayton/Brayton power cycle. *Energy* 2019;166:724–37. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.117.
- [4] Chen L, Sun F, Wu C, Kiang RL. Theoretical analysis of the performance of a regenerative closed Brayton cycle with internal irreversibilities. *Energy Convers Manag* 1997;38:871–7. doi:https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00090-8.
- [5] Al Moussawi H, Fardoun F, Louahlia-Gualous H. Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach. *Energy Convers Manag* 2016;120:157–96. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.085.
- [6] Rizk NK, Mongia HC. Semianalytical Correlations for NOx, CO, and UHC Emissions. *J Eng Gas Turbines Power* 1993;115:612–9.
- [7] Deymi-Dashtebayaz M, Kazemiani-Najafabad P. Energy, Exergy, Economic, and Environmental analysis for various inlet air cooling methods on Shahid Hashemi-Nezhad gas turbines refinery. *Energy Environ* 2018;0958305X18793112. doi:10.1177/0958305X18793112.
- [8] Lefebvre AH, Ballal DR. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. 3rd ed.

CRC Press Taylor & Francis Group; 2010.

- [9] Razak AMY. *Industrial Gas Turbines: Performance and Operability*. 1st ed. Elsevier; 2007.
- [10] Amiri Rad E, Kazemiani-Najafabadi P. Thermo-environmental and economic analyses of an integrated heat recovery steam-injected gas turbine. *Energy* 2017;141:1940–54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.044>.
- [11] Amiri Rad E, Kazemiani-Najafabadi P. Introducing a novel optimized Dual Fuel Gas Turbine (DFGT) based on a 4E objective function. *J Clean Prod* 2019;206:944–54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.129>.
- [12] Barzegar Avval H, Ahmadi P, Ghaffarizadeh AR, Saidi MH. Thermo-economic-environmental multiobjective optimization of a gas turbine power plant with preheater using evolutionary algorithm. *Int J Energy Res* 2011;35:389–403. doi:10.1002/er.1696.