

تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید سه‌گانه جدید برای بازیافت حرارت اتلافی در صنایع نفت و گاز

وحید بیگ زاده¹، شهرام خلیل آریا^{2*}، ایرج میرزائی³، غلامرضا میری⁴، وحید زارع⁵

1. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

2. استاد مهندسی مکانیک دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

3. استاد مهندسی مکانیک دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

4. کارشناس ارشد بخش مدیریت بازرگانی شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده های نفتی ایران، تهران، ایران

5. استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

دریافت: 95/6/17 پذیرش: 96/11/2

چکیده

بررسی انرژی و انرژی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه جدید بر اساس بازیافت انرژی به وسیله مبدل حرارتی لوله گرمایی حلقه‌ای از گازهای خروجی از دودکش توربین گاز برای حالت خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی انجام گرفته است. اثر دمای ورودی گاز خروجی از دودکش توربین گاز بر روی بازده‌های انرژی و انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی سیستم تولید سه‌گانه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش دمای ورودی گاز اتلافی، بازده انرژی افزایش و بازده انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی کاهش می‌یابد. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد سیستم تولید سه‌گانه بر اساس آنالیز انرژی کافی نیست و ارزیابی دقیق‌تر باید شامل آنالیز انرژی نیز باشد. این مطالعه به کسب اطلاعات بیشتر در مورد نقش دمای گاز ورودی دودکش توربین گاز بر روی عملکرد بازیافت گاز دودکش از نظر ترمودینامیکی، کمک می‌کند. روش‌های موجود در این مقاله، همچنین در مقایسه و انتخاب سیستم‌های بازیابی حرارت اتلافی دودکش بسیار مفید است.

کلمات کلیدی: چرخه آلی رانکین، مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، گازهای اتلافی، بازیاب، چرخه تولید سه‌گانه

مقدمه

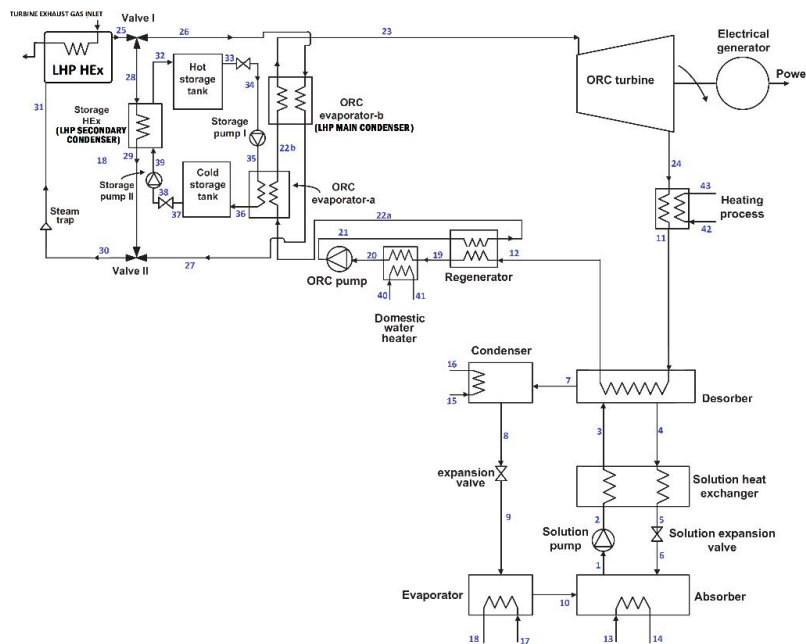
توربین گاز به دلیل نسبت توان به وزن بالا، پیکربندی چرخه ساده و بازده بالا، نقش مهمی در تولید صنعتی انرژی مکانیکی دارد همچنین می‌تواند با سیستم بازیابی حرارت یکپارچه شده و علاوه بر آن، گرمای اتلافی

گازهای داغ توربین به صورت خارجی یا به صورت داخلی در خود چرخه بازیابی شود. [1-4] دمای خروجی از توربین گاز و نرخ جریان گاز خروجی از دودکش آن بالا است و به همین دلیل استفاده از سیستم‌های بازیابی حرارت در جاهایی که توربین گاز استفاده می‌شود، ضروری است. [5]

در این تحقیق نیز مبدل جدید لوله گرمایی حلقه‌ای برای بازیافت حرارت اتلافی توربین گاز و انتقال آن به سیستم تولید سه‌گانه برای تولید همزمان توان، برودت و گرما، پیشنهاد شده است. از آنالیز انرژی و اگزرژی برای تجزیه و تحلیل سیستم پیشنهادی استفاده شده است و بازده‌های انرژی و اگزرژی برای سیستم تولید سه‌گانه بر اساس بازیافت حرارت اتلافی از توربین گاز، ارایه شده است. این آنالیزها باعث جامع بودن تحقیق می‌شود که می‌تواند به عنوان ابزاری علمی و مناسب مورد استفاده محققان و مهندسين انرژی قرار گیرد. چون علاوه بر آنالیز انرژی، از آنالیز اگزرژی که ابزاری قدرتمند برای ارزیابی سیستم‌های ترکیبی حرارت و گرما و برودت است، استفاده شده است. بازده اگزرژی اندازه تلفات چرخه و علل و مکان این اتلافات را به طور دقیق معین می‌کند و باعث تصمیم‌گیری مناسب به منظور ارتقای راندمان چرخه و اجزای چرخه می‌شود.

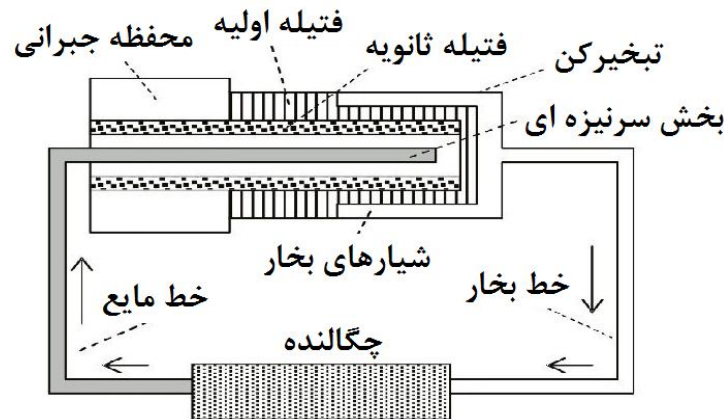
روش تحقیق

در این تحقیق، آنالیز انرژی و اگزرژی سیستم متشکل از مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای و سیستم تولید سه‌گانه توان، برودت و گرما برای بازیافت حرارت از گازهای خروجی دودکش توربین گاز برای حالت خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی انجام گرفته است. این سیستم شامل مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، چرخه آلی رانکین، مبدل حرارتی تولید گرما و چیلر جذبی تک‌اثره هست. طرح‌واره سیستم پیشنهادی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. طرح‌واره سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی

در این سیستم، چرخه آلی رانکین برای تولید توان، چرخه چیلر جذبی تک‌اثره برای تولید سرمایش و مبدل حرارتی برای تولید انرژی حرارتی، استفاده شده است. مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، وسیله دوفاز انتقال گرما است و دارای قابلیت انتقال گرمای بسیار بالا است. [6] این نوع مبدل‌ها به دلیل استفاده از سیال با ظرفیت جذب و دفع گرمای بالا (در این تحقیق، از پروپیلن استفاده شده است) در بازیابی حرارت اتلافی بسیار مناسب هستند. طرح‌واره لوله گرمایی حلقه‌ای استفاده شده در مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، در شکل 2 نشان داده شده است. در واقع، مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای شامل مجموعه‌ای از این لوله‌های گرمایی حلقه‌ای است.



شکل 2. طرح‌واره لوله گرمایی حلقه‌ای

سیال عامل مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای پروپیلن است که گرمای گازهای اتلافی را جذب کرده و تبدیل به بخار می‌شود. و سپس برای بخار کردن سیال عامل چرخه آلی رانکین به کار می‌رود و در توربین سیال عامل چرخه آلی رانکین (ان-اکتان) منبسط می‌شود. در ادامه، حرارت اتلافی چرخه آلی رانکین، برای تولید گرما در فرآیند گرمایشی به کار می‌رود. و سیال عامل چرخه آلی رانکین پس از خروج از مبدل حرارتی فرآیند گرمایشی، برای تولید سرمایش، وارد چیلر جذبی تک‌اثره (با سیال عامل لیتیم بروماید-آب) می‌شود. برای داشتن چرخه آلی رانکین با کارایی بالا، سیال عامل آن باید دارای دمای بحرانی بالایی باشد تا بتواند به بهترین حالت ممکن گرما جذب کند. [7-9] و به همین جهت سیال عامل ان-اکتان که دارای دمای بحرانی نسبتاً بالایی (569 کلوین) است، برای سیکل پیشنهادی انتخاب شده است.

سیستم تولید سه‌گانه براساس حرارت اتلافی، سیستم دینامیکی است به همین جهت، زیر سیستم ذخیره کننده انرژی گرمایی نیز برای آن در نظر گرفته می‌شود. این زیرسیستم انرژی اضافی را ذخیره می‌کند و کاربرد پایای سیستم را تضمین می‌نماید. [10-11]

در این تحقیق نیز دو تانک ذخیره گرمای سرد و گرم برای سیستم پیشنهاد شده در نظر گرفته شده است. پروپیلن دارای محدوده عملکرد دمایی بین 153/15 تا 363/15 کلوین است و علاوه بر آن دارای فشار نسبی کمتری است و فشار آن نسبت به تغییرات دما حساس نیست. [12] به همین دلیل به عنوان سیال عامل مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای در نظر گرفته شده است. سیستم خورشیدی جدید پیشنهاد شده، دارای پتانسیل بالقوه



برای غلبه بر مشکلات سیستم‌های خورشیدی موجود شامل چیدمان بزرگ سیستم‌ها و تلفات حرارتی بالا به دلیل سیستم لوله کشی طولانی (در لوله‌های گرمایی حلقه‌ای از سیال با ظرفیت جذب و دفع گرمای بالا استفاده می‌شود و این موضوع باعث کاهش اندازه مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای و کاهش طول لوله‌کشی می‌گردد)، خطر انجماد لوله‌ها (در مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای پیشنهاد شده، سیال عامل لوله گرمایی حلقه‌ای سیالی با نقطه انجماد 88 کلون است)، کارایی کمتر در تبدیل انرژی خورشیدی به گرما (لوله گرمایی حلقه‌ای از سیال با ظرفیت جذب و دفع گرمای بالا استفاده می‌کند که چنین سیالی بهترین سیال برای افزایش کارایی سیستم‌های خورشیدی طبق بررسی منابع انجام گرفته است) می‌باشد. مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهاد شده در این بخش آورده شده است. و برای حل معادلات حاکم بر سیستم، از نرم‌افزار EES استفاده شده است. داده‌های ورودی برای سیستم در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1. داده‌های ورودی سیستم تولید سه‌گانه

بازده توربین چرخه آلی رانکین	80%	فشار ورودی توربین چرخه آلی رانکین	20kPa
بازده پمپ چرخه آلی رانکین	80%	دمای ورودی پمپ چرخه آلی رانکین	310/2 K
اختلاف دمای پینچ تبخیرکن چرخه رانکین آلی (سلسیوس)	5	بازده ژنراتور الکتریکی	95%
کارایی مبدل آب خانگی	100%	کارایی مبدل فرآیند حرارتی	100%
اختلاف دمای پینچ چگالنده ثانویه (سلسیوس)	9	بازده بازیاب	60%
بازده موتور الکتریکی	95%	ضریب انتقال حرارت کلی چگالنده	1/2kW/K
ضریب انتقال حرارت کلی ژنراتور	1kW/K	ضریب انتقال حرارت کلی تبخیرکننده	2/25kW/K
ضریب انتقال حرارت کلی جذب کننده	1/8 kW/K	دمای ورودی ژنراتور	323/15K
کارایی مبدل حرارتی محلول	64%	کارایی مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای	90%

معادلات موازنه انرژی، انرژی و جرم برای هر حجم کنترل در حالت پایا و بدون در نظر گرفتن اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل، به ترتیب، به صورت‌های زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i (h_i) - \sum_e \dot{m}_e (h_e) = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dEx_{cv}}{dt} = \sum_j (1 - \frac{T_0}{T_j}) \dot{Q}_j - (\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt}) + \sum_i \dot{m}_i ex_i - \sum_e \dot{m}_e ex_e - \dot{E}_{x,j} \quad (2)$$

$$\sum_k \dot{m}_i - \sum_k \dot{m}_e = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (3)$$

و انرژی مخصوص با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$ex^{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (4)$$

بازده انرژی برای هر حجم کنترل در حالت پایا، با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{ex} = \frac{Exergy_{recovered}}{Exergy_{supplied}} = 1 - \frac{Exergy_{destroyed}}{Exergy_{supplied}} \quad (5)$$

انرژی مفید جذب شده از گازهای داغ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{25} \cdot (h_{25} - h_{31}) \quad (6)$$

نرخ نابودی انرژی مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای برابر است با:

$$\dot{E}x_{LHP} = (\dot{E}x_{LHP,exh} + \dot{E}x_{31} - Ex_{25}) \quad (7)$$

معادلات مربوط به سیستم تولید سه‌گانه عبارتند از:

انرژی ورودی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_u \quad (8)$$

توان الکتریکی خالص از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{net} = \eta_g \cdot \dot{W}_{ot} - \dot{W}_{op} / \eta_{motor} - \dot{W}_{sp} / \eta_{motor} \quad (9)$$

نرخ تولید تبرید از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10}) \quad (10)$$

بازده الکتریکی خالص، طبق رابطه زیر تعریف شده است:

$$\eta_{el} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in} \quad (11)$$

بازده انرژی چرخه آلی رانکین به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta_{ORC} = \eta_g \cdot \dot{W}_{ot} - \dot{W}_{op} / \eta_{motor} / \dot{Q}_{ORC} \quad (12)$$

بازده انرژی تولید همزمان گرمایش (انرژی گرمایی ذخیره شده، به صورت فرآیند گرمایشی در نظر گرفته شده است) به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta_{cog,h} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{hp} + \dot{Q}_{dw} + \dot{Q}_{st}}{\dot{Q}_{in}} \quad (13)$$

که در آن، \dot{Q}_{hp} توان گرمایشی است و زیر نویس cog, h نشان دهنده تولید همزمان گرمایش است. توان گرمایشی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\dot{Q}_{hp} = \dot{m}_{hp} \cdot (h_{43} - h_{42}) \quad (14)$$

که در آن، \dot{m}_{hp} جریان جرمی فرآیند گرمایشی، $h_{hp,1}$ و $h_{hp,2}$ به ترتیب، آنتالپی‌های مخصوص آب در ورودی و خروجی مبدل حرارتی فرآیند گرمایشی هستند.

بازده انرژی تولید همزمان سرمایه‌گذاری به صورت زیر تعریف شده است:



$$\eta_{cog,c} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ev}}{\dot{Q}_{in}} \quad (15)$$

که در آن، زیرنویس‌های cog, c و ev نشان دهنده تولید همزمان سرمایه‌ش هستند. بار سرمایه‌شی تبخیرکن به صورت زیر تعریف شده است:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_9 \cdot (h_{10} - h_9) = \dot{m}_{17} \cdot (h_{17} - h_{18}) \quad (16)$$

بازده انرژی سیستم تولید سه‌گانه به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta_{tri} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{hp} + \dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_{dw} + \dot{Q}_{st}}{\dot{Q}_{in}} \quad (17)$$

نسبت انرژی الکتریکی به گرمایش به صورت زیر تعریف شده است:

$$R_{E/H} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{hp} + \dot{Q}_{dw} + \dot{Q}_{st}} \quad (18)$$

نسبت انرژی الکتریکی به سرمایه‌ش به صورت زیر تعریف شده است:

$$R_{E/C} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{ev}} \quad (19)$$

بازده انرژی تولید همزمان گرمایش به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta_{ex,cog,h} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{hp} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{hp}}\right) + \dot{Q}_{dw} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{dw}}\right) + \dot{Q}_{st} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{st}}\right)}{\dot{E}x_{in}} \quad (20)$$

بازده انرژی چرخه آلی رانکین به صورت زیر می‌باشد:

$$\eta_{ex,ORC} = \frac{\eta_{motor} \cdot \dot{W}_{ORC} - \dot{W}_{OP} / \eta_{motor}}{\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{27}} \quad (21)$$

بازده انرژی تولید همزمان سرمایه‌ش به صورت زیر تعریف شده است:

$$\eta_{ex,cog,c} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ev} \cdot \left(\frac{T_0 - T_{eva}}{T_{eva}}\right)}{\dot{E}x_{in}} \quad (22)$$

بازده انرژی چرخه تولید سه‌گانه به صورت زیر تعریف شده است:

که در آن، $\dot{E}x_{in}$ انرژی گاز اتلافی خروجی از دودکش توربین گاز است.

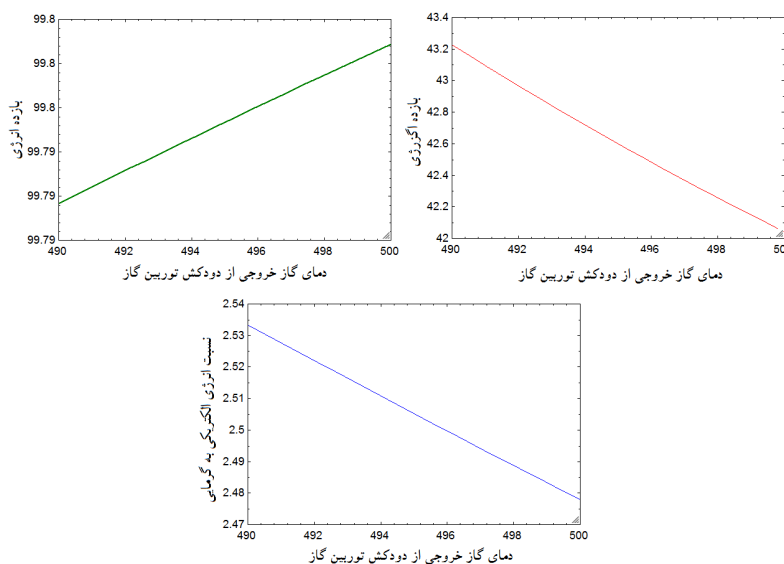
$$\eta_{ex,tri} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ev} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{eva}}\right) + \dot{Q}_{hp} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{hp}}\right) + \dot{Q}_{dw} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{dw}}\right) + \dot{Q}_{st} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{st}}\right)}{\dot{E}x_{in}} \quad (23)$$

نتایج و بحث

در این تحقیق، آنالیز انرژی و انرژی سیستم متشکل از مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای و سیستم تولید سه‌گانه توان، برودت و گرما برای بازیافت حرارت از گازهای خروجی دودکش توربین گاز برای حالت خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی انجام گرفته است. آنالیز انرژی، حالت نقاط را در ورودی و خروجی هر یک از اجزاء سیستم تولید سه‌گانه نشان می‌دهد. همچنین دبی جرمی، انتقال انرژی (به صورت کار یا گرما) را نیز نشان می‌دهد. هدف از تحقیق حاضر، تعیین بازده انرژی و انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی سیستم پیشنهاد شده بوده است.

برای بررسی اثر دمای گاز خروجی از دودکش توربین گاز بر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید سه‌گانه که تحت شرایط مختلف کار می‌کند، مشخصه‌های جریان گاز خروجی از دودکش توربین گاز به صورت زیر بوده است: دبی جرمی گازهای خروجی از دودکش توربین گاز 5 کیلوگرم بر ثانیه، فشار گازهای خروجی از دودکش توربین گاز 2 مگاپاسکال، دمای گازهای خروجی از دودکش توربین گاز 495 کلوین و دمای محیط 298/15 کلوین.

شکل 3 اثر تغییرات دمای ورودی و خروجی دودکش توربین گاز بر روی بازده انرژی، بازده انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی چرخه تولید سه‌گانه را نشان می‌دهد.



شکل 3: اثر تغییرات دمای ورودی و خروجی دودکش توربین گاز بر روی بازده انرژی، بازده انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی چرخه تولید سه‌گانه



مشاهده می‌شود که با افزایش دمای گاز دودکش توربین گاز، بازده انرژی افزایش و بازده انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی کاهش می‌یابد و دلیل آن این است که دمای بالای گاز دودکش توربین گاز باعث زیاد شدن نرخ گرمای وارده به سیستم و بهبود در گرمای تولیدی در فرآیندهای سیستم و افزایش بازده چرخه و کاهش جزئی در تولید توان و تبرید می‌شود و چون افزایش گرمای فرآیندی به نسبت، بیش‌تر از افزایش در نرخ گرمای وارده به کل سیستم است، بازده انرژی سیستم افزایش می‌یابد. اما بازده انرژی کاهش می‌یابد چون افزایش دمای گاز ورودی از دودکش توربین گاز به سیستم، انرژی مرتبط با گرمای فرآیندی و میزان در دسترس بودن گاز خروجی از دودکش را افزایش و انرژی مرتبط با توان و تبرید چرخه را کاهش می‌دهد (با افزایش دمای گاز خروجی از دودکش توربین گاز، گرمای تولیدی در فرآیندهای سیستم افزایش و تولید توان و تبرید چرخه کاهش می‌یابد). در نتیجه، بازده انرژی کل سیستم کاهش می‌یابد.

نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی نیز به دلیل اینکه گرمای فرآیندهای گرمایی چرخه افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد چون با افزایش دمای گاز خروجی از دودکش توربین گاز، میزان تولید بخار در مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای افزایش می‌یابد و به همین دلیل، تولید گرمای فرآیندی، توان و تبرید کل چرخه افزایش می‌یابد اما به دلیل اینکه، افزایش در تولید گرمای فرآیندی، بیش‌تر از افزایش در تولید توان و تبرید است، نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی کاهش می‌یابد.

سیستم تولید سه‌گانه پیشنهاد شده با استفاده از روابط فوق و در نظر گرفتن دمای مرجع محیط 298/15 کلون و فشار مرجع محیط 1/013 بار انجام شده و خواص ترمودینامیکی نقاط مربوط به شکل 1، که با استفاده از نرم افزار EES محاسبه شده‌اند در جدول 2 آورده شده است. و نتایج حاصل از مدل‌سازی برای آنالیز انرژی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه به کار رفته‌اند.

جدول 2. خواص ترمودینامیکی نقاط مرتبط با شکل 1

نقطه	سیال	دبی جرمی (kg/s)	دما (K)	فشار (KPa)	آنآلی (kJ/kg)	آنآلی (kJ/kg-K)
1	لیتیم بروماید-آب	0/05	299/75	1/14	50/4	0/2033
2	لیتیم بروماید-آب	0/05	299/75	3/543	50/4	0/2033
3	لیتیم بروماید-آب	0/05	312/85	3/543	79/5	0/2976
4	لیتیم بروماید-آب	0/04943	320/55	3/543	97	0/3462
5	لیتیم بروماید-آب	0/04943	307/25	3/543	67/5	0/2527
6	لیتیم بروماید-آب	0/04943	301/05	1/14	67/5	0/2077
7	آب	0/0005719	319/65	3/543	2586/7	8/635
8	آب	0/0005719	300/05	3/543	112/6	0/3933
9	آب	0/0005719	282/05	1/140	112/6	0/4015
10	آب	0/0005719	282/05	1/140	2516/9	8/926
11	ان - اکتان	0/85	323/2	3/543	406/8	1/312
12	ان - اکتان	0/85	321/7	3/543	404/2	1/304

1/267	392/2	3/543	314/8	0/85	ان - اکتان	19
0/08926	26/99	3/543	310/2	0/85	ان - اکتان	20
0/08928	27/02	20	310/2	0/85	ان - اکتان	21
0/1274	38/95	20	315/4	0/85	ان - اکتان	22
1/351	462/2	20	354/2	0/85	ان - اکتان	23
1/377	428	3/543	335	0/85	ان - اکتان	24
-0/8376	-72/51	4400	362/3	5	پروپیلن	25
-0/8376	-72/51	4400	362/3	1/5	پروپیلن	26
-1/523	-312/3	4400	320/4	1/5	پروپیلن	27
-0/8376	-72/51	4400	362/3	3/5	پروپیلن	28
-1/464	-293/1	4400	327/1	3/5	پروپیلن	29
-1/481	-289/9	4400	325/1	5	پروپیلن	30
-1/464	-289/9	1900	319/5	5	پروپیلن	31

ادامه جدول 2. خواص ترمودینامیکی نقاط مرتبط با شکل 1

می‌توان گفت بازده سیستم تولید سه‌گانه، پارامتری مرتبط با مواردی مثل دمای محیط، دمای سیال‌های عامل، دمای کاری مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، نرخ‌های جریان و ساختار سیستم می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارزیابی عملکرد یک سیستم تولید سه‌گانه بازیابی حرارت اتلافی از دودکش توربین‌های صنایع نفت و گاز، بر اساس مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای، از طریق پارامترهای بازده انرژی و بازده انرژی مطالعه شده است. چنین سیستم‌هایی راه حلی مؤثر برای تولید ترکیبی توان، حرارت و برودت و همچنین بازیابی حرارت اتلافی در فرایندهای صنعتی هستند. علاوه بر موارد فوق، با توجه به نیاز واحد صنعتی به تبرید، توان یا حرارت، می‌توان سیستم را طوری طراحی کرد که فقط توان یا فقط تبرید یا فقط حرارت تولید کند. از نظر ترمودینامیکی نیز ترکیب چرخه توان رانکین با سیستم چیلر جذبی و فرایند تولید گرما در این سیستم تولید سه‌گانه باعث افزایش بازده کل سیستم می‌شود. نتایج آنالیز انرژی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس بازیابی حرارت اتلافی توربین گاز، در زیر آورده شده است:

1. بازده انرژی، با افزایش دمای ورودی جریان گاز اتلافی افزایش می‌یابد.
2. بازده انرژی و نسبت انرژی الکتریکی به گرمایی با افزایش دمای ورودی جریان گاز اتلافی کاهش می‌یابد.

آنالیزهای انرژی و انرژی ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری عملکرد سیستم‌های تولید چندگانه هستند چون اطلاعاتی را در مورد هم‌چگونگی تبدیل انرژی ورودی به توان خروجی، گرمای فرایندی و برودت و هم در



مورد چگونگی استفاده مؤثر از منابع انرژی مورد استفاده از نقطه نظر کیفیت انرژی بدست می‌دهند. انتظار می‌رود مطالعه کنونی به محققان، مهندسان و طراحان برای طراحی بهتر، آنالیز عملکرد و بهبود عملکرد چنین سیستم‌هایی، کمک کننده باشد.

این مطالعه سیستم تولید سه‌گانه جدید با مبدل لوله گرمایی حلقه‌ای را برای بازیابی حرارت معرفی کرد که دارای پتانسیل برتری و مشکلات کمتر در مقایسه با فناوری موجود برای بازیابی حرارت و تبدیل آن به توان و تبرید و برودت می‌باشد و انتظار می‌رود دارای هزینه کمتر، کارایی بالاتر و جذابیت بالاتر باشد.

تشکر و قدردانی

از شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران که حمایت مالی (قرارداد D-94-004) این پروژه را بر عهده دارند و جناب آقای مهندس غلامرضا میری بابت همکاری و راهنمایی در انجام پروژه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Heppenstall T, Advanced gas turbine cycles for power generation: a critical review, *Appl Therm Eng*, Volume 18, Issue 9-10 (1998) 837-846.
2. Jonsson M, Yan J, Humified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles, *Energy*, Volume 30, Issue 7 (2005) 1013-1078.
3. Wei H, Hongguang J, Na Z, Xiaosong Z, Cascade utilization of chemical energy of natural gas in an improved CRGT cycle, *Energy*, Volume 32, Issue 4 (2007) 306-313.
4. Kuroki H, Hatamiya S, Shibata T, Koganezawa T, Kizuka N, Marushima S, Development of elemental technologies for advanced moist air turbine system, *J. Eng. Gas Turbines Power*, Volume 130, Issue 3 (2008).
5. Carapellucci R, A unified approach to assess performance of different techniques for recovering exhaust heat from gas turbines, *Energy Convers Manag* 50 (2009) 1218–1226.
6. Yaws, C.L, 1999. “Chemical Properties Handbook”. McGraw-Hill.
7. Bruno, Joan Carles, Lopez-Villada, Jesus, Letelier, Eduardo, Romera, Silvia, Coronas, Alberto, 2008. “Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination”. *Applied Thermal Engineering*, 28 (17-18), 2212–2226.
8. Kalogirou, Soteris, 2009. “Solar energy engineering: processes and systems”. *Elsevier*.
9. Yu.F. Maydanik, 2005. “Loop heat pipes”. *Applied Thermal Engineering*, 25 (1), 635–657.
10. M. Pauken, J.I. Rodriguez, 2000. “Performance characterisation and model verification of a loop heat pipe”. *Society of Automotive Engineers (SAE)*, Paper No. 2000-01-0108.
11. Baumann, Jane, Rawal, Suraj., 2001. “Viability of Loop Heat Pipes for Space Solar Power Applications”. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 3078 (1), 1–10.
12. Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S.A., 1996. “Absorption Chillers and Heat Pumps”. CRC Press.
13. Xudong Zhao, Zhangyuan Wang, Qi Tang, 2010. “Theoretical investigation of the performance of a novel loop heat pipe solar water heating system for use in Beijing, China”. *Applied Thermal Engineering*, 30 (16), 2526-2536.

14. Xingxing Zhang, Xudong Zhao, Jihuan Xu b, Xiaotong Yu, 2013. “Characterization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system”. *Applied Energy*, 102 (3), 1229–1245.
15. Khan, Jameel Ur Rehman, 2006. “Design and Optimization of a Distributed Generation System with the Production of Water and Refrigeration”. PhD Thesis, University of Florida.
16. Khaliq A, Kumar R, Dincer I. Exergy analysis of an industrial waste heat recovery based cogeneration cycle for combined power generation and refrigeration system. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME (Under Review)* 2008.