

بررسی تاثیر مشخصه‌های دمایی بازیافت گرما بر عملکرد اگزورژواکونومیک سیکل ترکیبی توربین گازی مدولار راکتور هلیوم/سیکل رانکین آلی

در این تحقیق، سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گازی و سیکل رانکین با سیال آلی از دیدگاه انرژی، اگزورژی و اگزورژواکونومیک تحلیل شده است. دما، فشار، اگزورژی و نرخ هزینه‌های مرتبط با اگزورژی برای کل جریان‌های سیکل ترکیبی محاسبه شده و عملکرد اقتصادی کل سیکل بررسی شده است. سپس مطالعه پارامتری صورت گرفته و تاثیر پارامترهای اواپراتور از جمله دمای قسمت دوفازی اواپراتور، اختلاف دمای نقطه تنگش و دمای سوپرهیت سیال آلی بر عملکرد اگزورژواکونومیک سیکل ترکیبی بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش دمای قسمت دوفازی و اختلاف دمای نقطه تنگش، موجب کاهش هزینه واحد برق تولیدی می‌شود. علاوه بر این در دمای قسمت دوفازی ۱۰۹ درجه سلسیوس، هزینه‌های مرتبط با تخریب اگزورژی سیکل ترکیبی دارای کمترین مقدار و ضریب اگزورژواکونومیک در دمای ۱۰۲ درجه بیشترین مقدار خواهد بود.

ناصر شوکتی^۱

دانشجوی دکترا

فرزاد محمدخانی^۲

دانشجوی دکترا

مرتضی یاری^۳

دانشیار

سیدمحمد سیدمحمودی^۴

دانشیار

سیدفرامرز رنجبر^۵

استادیار

واژه‌های راهنما: اگزورژی، اگزورژواکونومیک، توربین گاز مدولار راکتور هلیوم، سیکل رانکین آلی، مطالعه پارامتری

۱- مقدمه

افزایش نگرانی‌ها در مورد کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین آلودگی محیط زیست، علاقمندی به روش‌های تولید پربازده انرژی را افزایش داده است. در دنیایی با منابع طبیعی محدود و افزایش تقاضای انرژی در اثر توسعه کشورها، بسیار مهم است که با درک چگونگی کاهش منابع انرژی، روش‌هایی اصولی

^۱ نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز n_shokati@tabrizu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز f.mohammadkhani@tabrizu.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز myari@tabrizu.ac.ir

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز s_mahmoudi@tabrizu.ac.ir

^۵ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

برای بهبود طراحی سیستم‌های انرژی و نیز کاهش اثرات آنها بر محیط زیست ارائه شود [۲۰]. از میان سیستم‌های مطالعه شده راکتورهای خنک شونده با گاز^۱ از جمله سیستم‌هایی هستند که برای تولید توان بسیار مناسب بوده و در میان این راکتورها، راکتور هلیوم مدولار^۲ بدلیل دارا بودن مشخصاتی مانند اقتصادی بودن، امنیت بالا در تولید توان، پایداری سوخت و ... مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۳]. در سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز، گردش هلیوم که در دو مرحله متوالی متراکم می‌شود هسته راکتور را خنک می‌کند. به دلایل ترمودینامیکی قبل از هر مرحله تراکم، هلیوم باید تا دمای حدود 26°C خنک شود که این کار با استفاده از پیش خنک‌کن و خنک‌کن میانی انجام می‌شود. مقدار قابل توجهی انرژی گرمایی در حدود $300 \text{ MW}_{\text{th}}$ (در حالتی که مقدار گرمای مبادله شده در راکتور $600 \text{ MW}_{\text{th}}$ باشد) در این مبدل‌های حرارتی تلف می‌شود [۵۴].

در سال‌های اخیر برخی مطالعات بر بازیابی گرمای ائتلافی از سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز تمرکز داشته‌اند. داردورا^۳ و همکاران [۵] استفاده از این گرما را برای نمک‌زدایی آب دریا مطرح کرده و ثابت کرده‌اند که هزینه نمک‌زدایی در این حالت 34% کمتر از روش‌های مرسوم است. زارع و همکاران [۶] از گرمای ائتلافی سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز برای تولید برودت و توان بیشتر در یک سیکل بر پایه مخلوط آب-آمونیاک بهره برده‌اند. یک سیکل ترکیبی بدین منظور پیشنهاد شده و عملکرد سیکل پیشنهادی بر پایه قانون اول و دوم ترمودینامیک بهینه‌سازی شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط بهینه بازده انرژی و بازده قانون دوم سیکل پیشنهادی به ترتیب 9-15% و 4-10% بالاتر از سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز است.

تلاش‌های دیگری برای بهره‌برداری از گرمای ائتلافی سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز به منظور تولید توان بوسیله سیکل رانکین آلی^۴ صورت گرفته است. یاری و سیدمحمودی [۷] سیستمی را پیشنهاد کرده‌اند که در آن گرمای ائتلافی قبل از خنک‌کن اولیه و خنک‌کن میانی کمپرسورها در سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز، در دو سیکل رانکین آلی ساده برای تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد و در مطالعه‌ای دیگر پیکربندی‌های مختلف سیکل رانکین آلی را در ترکیب با سیکل ترکیبی راکتور هلیوم و توربین گاز بررسی کرده و گزارش کرده‌اند که سیکل رانکین آلی ساده از نظر ترمودینامیکی بهترین است [۸]. سیکل رانکین آلی فرآیندی برای تبدیل گرمای دما پایین و دما متوسط به توان الکتریکی می‌باشد و در مقایسه با دیگر سیستم‌های تولید توان مزایای مهمی مانند هزینه‌های پایین نگهداری را نیز دارد. در مورد تعداد زیادی از سیالات آلی انبساط توربین در ناحیه سوپرهیت پایان می‌پذیرد که این باعث اجتناب از خوردگی در پره‌های توربین شده و نیز باعث عملکرد بهتر سیکل می‌گردد [۹]. در دماهای پایین استفاده از سیال آلی به عنوان سیال عامل منجر به بازدهی بالاتر سیکل در مقایسه با آب می‌شود [۱۰].

^۱ Gas Cooled Reactors (GCRs)

^۲ Modular Helium Reactor (MHR)

^۳ Dardoura

^۴ Organic Rankine Cycle (ORC)

در تحلیل سیستم‌های انرژی استفاده از روش‌هایی که اصول ترمودینامیکی را با اصول اقتصادی ترکیب می‌کنند رو به افزایش است. ترکیب قانون دوم ترمودینامیک با تحلیل اقتصادی، ابزاری بسیار قدرتمند برای مطالعه اصولی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی ارائه می‌کند. این ترکیب اساس و پایه شاخه نسبتاً جدیدی به نام ترمواکونومیک یا اگزورژواکونومیک را تشکیل می‌دهد. واضح است که تحلیل اگزورژی می‌تواند محل، نوع و مقدار واقعی تلفات و تخریب اگزورژی را مشخص کند. اگزورژواکونومیک اصول اقتصادی را با تحلیل اگزورژی ترکیب کرده و هزینه نسبت داده شده به این تخریب را در هزینه کل محصولات سیستم شرکت می‌دهد. این مفهوم می‌تواند در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی که معمولاً تمرکز بر کاهش هزینه‌های کل سیستم دارد مورد استفاده قرار گیرد [۱،۱۱]. تاکنون تحقیقاتی در مورد تحلیل اگزورژواکونومیک سیستم‌های مختلف صورت گرفته است. یعقوبی و باقرنژاد [۱۲] تحلیل اگزورژواکونومیک را بر روی سیکل ترکیبی یکپارچه خورشیدی^۱ انجام داده و سیستم را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده‌اند.

اباسوغلو^۲ و همکاران [۱۳] مروری جامع بر تحلیل اگزورژواکونومیک سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت ارائه کرده و دیدگاه‌های مختلف تحلیل اگزورژواکونومیک را بررسی کرده‌اند. همچنین معایب و مزایای هر کدام از این دیدگاه‌ها بیان شده و این دیدگاه‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

در این مقاله مفهوم اگزورژواکونومیک بر روی سیستم سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی اعمال شده است. ابتدا سیستم مورد مطالعه از نظر انرژی و اگزورژی تحلیل شده است. سپس معادلات توازن هزینه و معادلات کمکی برای تک تک اجزای سیستم نوشته شده است. تحلیل اگزورژواکونومیک بر پایه دیدگاه^۳ SPECOC انجام شده است و سپس تاثیر پارامترهای اواپراتور بر عملکرد اگزورژواکونومیک سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی سیکل

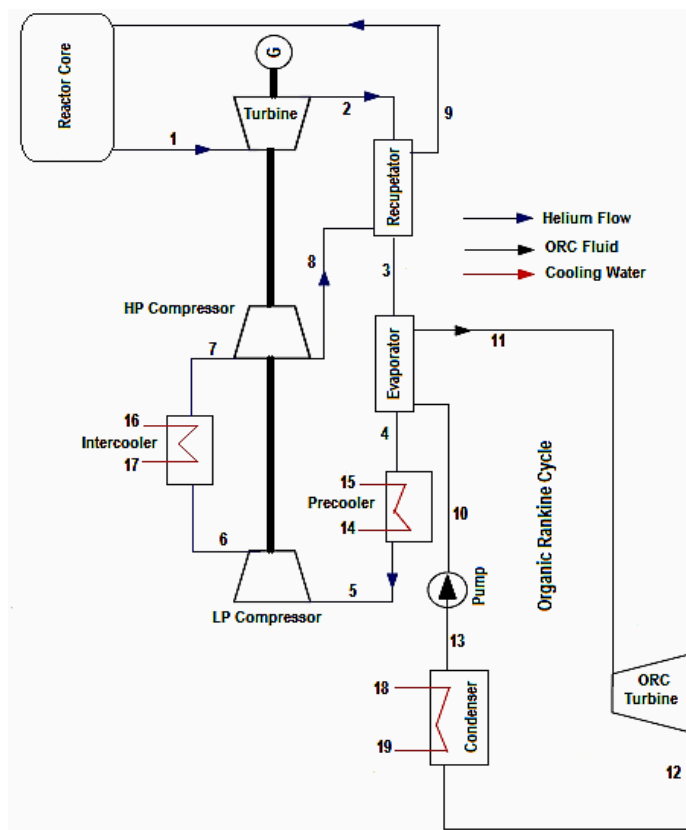
طرح کلی سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی در شکل (۱) نشان داده شده است. در سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و رانکین با سیال آلی، هلیوم در راکتور گرم شده وارد توربین می‌شود. هلیوم در توربین منبسط شده و ژنراتور را بکار می‌اندازد و نیز کار مورد نیاز کمپرسورها را تامین می‌کند. سپس از رکوپراتور عبور کرده و با گذشتن از اواپراتور مقدار زیادی گرما در این فرآیند آزاد می‌کند که این گرما منبع مناسبی برای سیکل رانکین آلی می‌باشد [۷]. قبل از تراکم هلیوم در کمپرسور فشار پایین، هلیوم از خنک‌کن اولیه عبور کرده و دمای آن کاهش می‌یابد و در نتیجه کار مورد نیاز کمپرسور کاهش می‌یابد. هلیوم بعد از عبور از کمپرسور فشار پایین وارد خنک‌کن میانی شده و سپس وارد کمپرسور فشار بالا می‌شود. سپس از رکوپراتور عبور کرده و پس از گرم شدن به راکتور برمی‌گردد. سیال عامل مورد

^۱ Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS)

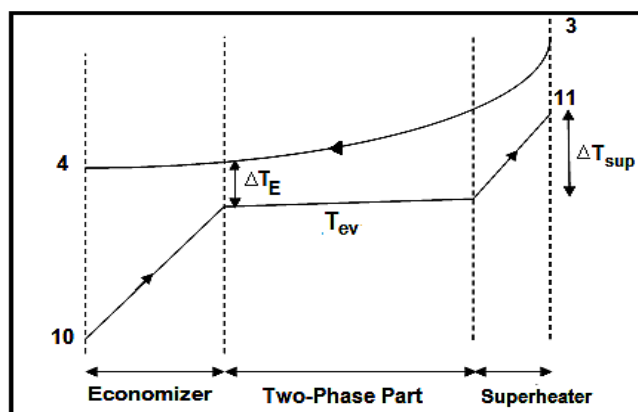
^۲ Abusoglu

^۳ specific exergy costing method

استفاده در سیکل رانکین آلی، R123 است. انتخاب R123 به دلیل داشتن خصوصیات از قبیل داشتن توان عمکردی بالا و آلاینده‌گی کم صورت گرفته است [۱۴ و ۱۵].
 طرحواره جریان‌های اواپراتور همراه با پارامترها و قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی اواپراتور در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱- طرح کلی سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی



شکل ۲- طرحواره جریان‌های اواپراتور همراه با پارامترها و قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی آن

۳- تحلیل اگزورژواکونومیک

اگزورژواکونومیک شاخه‌ای از مهندسی است که ارزیابی ترمودینامیکی بر پایه تحلیل اگزورژی را بصورت مناسبی با اصول اقتصادی ترکیب می‌کند و اطلاعاتی را در اختیار مهندس یا طراح قرار می‌دهد که برای

عملکرد بهینه اقتصادی سیستم بسیار سودمندند ولی منحصر از تحلیل انرژی و انرژی و یا تحلیل اقتصادی سیستم بدست نمی‌آیند. تحلیل انرژی و اکونومیک بر این پایه استوار است که انرژی تنها مفهوم منطقی برای نسبت دادن هزینه به ناکارآمدی‌های سیستم و فعل و انفعالاتی است که سیستم با محیط خود تجربه می‌کند [۱۶]. برای تحلیل انرژی و اکونومیک دیدگاه‌های مختلفی در منابع مطرح شده است. در این مطالعه از دیدگاه SPECO^۱ استفاده شده است. این روش بر پایه انرژی، بازده انرژی و معادلات کمکی برای اجزای سیستم حرارتی بنا شده است [۱۷]. روش SPECO شامل سه گام است: الف) شناسایی جریان‌های انرژی، ب) تعریف سوخت و محصول برای هر یک از اجزای سیستم و ج) تخصیص معادلات هزینه [۱۶]. در ادامه هر یک این گام‌ها در مورد سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی اعمال می‌شود.

۳-۱- مدل ترمودینامیکی و اقتصادی سیکل

مدل ترمودینامیکی سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی بطور کامل در مرجع [۷] ارائه شده است. این مدل شامل روابط بقای جرم، انرژی و انرژی برای تک تک اجزای سیستم می‌باشد. برای تعریف جریان انرژی در هر یک از اجزای سیستم، لازم است مفاهیم سوخت و محصول برای اجزای سیستم تعریف شود. محصول نشانگر نتایج مطلوب یک جزء یا سیستم و سوخت نشانگر منابع مصرف شده برای تولید محصول است و لزوماً یک سوخت واقعی مانند گاز طبیعی، سوخت دیزل و ... نیست. سوخت و محصول هر دو بر حسب جملات انرژی بیان می‌شوند [۱۲]. تعاریف سوخت و محصول برای هر یک از اجزای سیستم سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی در جدول (۱) ارائه شده است. اختصاص هزینه به جریان‌های انرژی شامل معادله توازن هزینه برای هر یک از اجزای سیستم است. معادله توازن هزینه برای جزء k بیان می‌کند که مجموع هزینه‌های متناسب با همه جریان‌های انرژی خروجی برابر است با مجموع هزینه‌های متناسب با همه جریان‌های انرژی ورودی به علاوه نرخ هزینه متناسب با هزینه اولیه و هزینه نگهداری جزء k که مجموع دو جمله آخر با Z_k نمایش داده می‌شود و بوسیله مدل اقتصادی سیستم محاسبه می‌شود.

مدل اقتصادی برای سیکل ترکیبی راکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی بصورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

توربین:

$$Z_T = \left(\frac{1536\dot{m}_g}{0.92 - \eta_T} \right) \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) (1 + \exp(0.036T_1 - 54.4)) \quad (1)$$

کمپرسور:

$$Z_C = \left(\frac{75\dot{m}_g}{0.9 - \eta_C} \right) \left(\frac{P_e}{P_i} \right) \ln \left(\frac{P_e}{P_i} \right) \quad (2)$$

^۱ Specific exergy costing method

پمپ:

$$Z_p = 3540\dot{W}_p^{0.71} \quad (3)$$

مبدل‌های حرارتی:

$$Z_{HE} = 130\left(\frac{A_{HE}}{0.093}\right)^{0.78} \quad (4)$$

کندانسور:

$$Z_{Cond} = 1773\dot{m}_{ORC} \quad (5)$$

هزینه اولیه برای رآکتور برابر با $371 \text{ \$/kW}_{th}$ در نظر گرفته شده است [۱۸]. همچنین هزینه سوخت هسته‌ای سیستم $8 \text{ \$/MWh}$ فرض شده است [۸]. برای تبدیل هزینه خرید هر یک از اجزای سیستم به هزینه اولیه در واحد زمان می‌توان نوشت:

$$\dot{Z}_k = Z_k \cdot CRF \cdot \varphi / (N \times 3600) \quad (6)$$

در رابطه بالا φ ضریب نگهداری (برابر 1.06)، N تعداد ساعات کارکرد سیستم در سال (در این مطالعه 7446 ساعت) و CRF برابر است با:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

در رابطه بالا منظور از i ، نرخ بهره (در این مطالعه 10%) و n عمر سیستم بر حسب سال (در این مطالعه 20 سال) می‌باشد.

جدول ۱- تعاریف سوخت و محصول برای هر یک از اجزای سیکل ترکیبی

اجزا	اگزورژی سوخت	اگزورژی محصول
رآکتور	$\dot{E}_9 + \dot{E}_{fuel}$	\dot{E}_1
توربین	$\dot{E}_1 - \dot{E}_2$	\dot{W}_T
رکوپراتور	$\dot{E}_2 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$
اوپراتور	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$	$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{10}$
خنک‌کن اولیه	$\dot{E}_4 - \dot{E}_5$	$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{14}$
کمپرسور فشار پایین	$\dot{W}_{C,LP}$	$\dot{E}_6 - \dot{E}_5$
خنک‌کن میانی	$\dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$\dot{E}_{17} - \dot{E}_{16}$
کمپرسور فشار بالا	$\dot{W}_{C,HP}$	$\dot{E}_8 - \dot{E}_7$
توربین سیکل رانکین آلی	$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12}$	$\dot{W}_{T,ORC}$
کندانسور	$\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}$	$\dot{E}_{19} - \dot{E}_{18}$
پمپ	\dot{W}_P	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_{13}$

حال برای هر جریان اگزرژی در سیستم، پارامتری به نام نرخ هزینه جریان \dot{C} [\$/s] تعریف می‌شود. معادله توازن هزینه برای هر جزء از سیستم که گرما گرفته و کار انجام می‌دهد بصورت زیر است [۱۹]:

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (۸)$$

که در آن \dot{Z}_k نرخ هزینه اولیه جزء k ام، اندیس‌های i و e معرف جریان‌های ورودی و خروجی و $\dot{C}_{w,k}$ و $\dot{C}_{q,k}$ به ترتیب نشانگر هزینه‌های مرتبط با انتقال گرما و کار است. معادله توازن هزینه در اصل به صورتی نوشته می‌شود که همه جملات آن مثبت باشد. بنابراین وقتی یکی از اجزای سیستم مانند کمپرسور که کار دریافت می‌کند مورد نظر باشد، جمله دوم طرف اول معادله با علامت مثبت به طرف راست معادله منتقل می‌شود. معادله بالا را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\sum (c_e \dot{E}_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum (c_i \dot{E}_i)_k + \dot{Z}_k \quad (۹)$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}_j$$

برای پیدا کردن هزینه تخریب اگزرژی در هر یک از اجزای سیستم ابتدا لازم است که معادله توازن هزینه برای اجزای سیستم حل شود. در کاربرد معادله توازن هزینه برای اجزای سیستم معمولاً بیش از یک جریان ورودی و خروجی برای هر جزء وجود دارد. بنابراین تعداد هزینه‌های مجهول بیشتر از معادلات موجود است. برای حل این مشکل از معادلات کمکی SPECO استفاده می‌شود [۱۶].

معادلات توازن هزینه و معادلات کمکی برای اجزای مختلف در سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی در جدول (۲) آورده شده است.

با حل دستگاه خطی معادلات جدول (۲) هزینه جریان‌های اگزرژی سیستم محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه نرخ هزینه جریان‌های سیستم می‌توان کارایی هزینه‌ای هر یک از اجزای سیستم را بررسی کرد. این بررسی از طریق پارامترهای اگزژیواکونومیک انجام می‌شود. این پارامترها شامل هزینه متوسط در واحد اگزرژی سوخت $(c_{F,k})$ ، هزینه متوسط در واحد اگزرژی محصول $(c_{P,k})$ ، اختلاف هزینه نسبی (r_k) ، ضریب اگزژیواکونومیک (f_k) و نرخ هزینه متناسب با تخریب اگزرژی (\dot{C}_D) می‌باشند. پارامترهای اگزژیواکونومیک بصورت ریاضی زیر بیان می‌شوند [۱۹]:

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (۹)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (۱۰)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (۱۱)$$

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} \quad (12)$$

r_k اختلاف هزینه متوسط نسبی بین محصول و سوخت را نشان می‌دهد و در واقع نشانگر منابع واقعی ایجاد هزینه در سیستم یعنی هزینه تخریب اگزورژی و هزینه تجهیزات می‌باشد.

جدول ۲- معادلات توازن هزینه و معادلات کمکی برای اجزای مختلف سیکل ترکیبی

معادلات کمکی	توازن هزینه متناسب با اگزورژی	اجزا
-----	$\dot{C}_9 + \dot{C}_{fuel} + \dot{Z}_{RC} = \dot{C}_1$	رآکتور
$\frac{\dot{C}_1}{\dot{E}_1} = \frac{\dot{C}_2}{\dot{E}_2}$	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_T = \dot{C}_2 + \dot{C}_{WT}$	توربین
$\frac{\dot{C}_2}{\dot{E}_2} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{E}_3}$	$\dot{C}_2 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_R = \dot{C}_3 + \dot{C}_9$	رکوپراتور
$\frac{\dot{C}_3}{\dot{E}_3} = \frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4}$	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_E = \dot{C}_4 + \dot{C}_{11}$	اواپراتور
$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4} = \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5}, c_{14} = 0$	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{PC} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{15}$	خنک‌کن اولیه
$\frac{\dot{C}_{WC,LP}}{\dot{W}_{C,LP}} = \frac{\dot{C}_{WT}}{\dot{W}_T}$	$\dot{C}_5 + \dot{C}_{WC,LP} + \dot{Z}_{C,LP} = \dot{C}_6$	کمپرسور فشار پایین
$\frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_7} = \frac{\dot{C}_7}{\dot{E}_8}, c_{16} = 0$	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{IC} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{17}$	خنک‌کن میانی
$\frac{\dot{C}_{WC,HP}}{\dot{W}_{C,HP}} = \frac{\dot{C}_{WT}}{\dot{W}_T}$	$\dot{C}_7 + \dot{C}_{WC,HP} + \dot{Z}_{C,HP} = \dot{C}_8$	کمپرسور فشار بالا
$\frac{\dot{C}_{11}}{\dot{E}_{13}} = \frac{\dot{C}_{12}}{\dot{E}_{14}}$	$\dot{C}_{11} + \dot{Z}_{ORCT} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_{W_{ORCT}}$	توربین سیکل رانکین آلی
$\frac{\dot{C}_{12}}{\dot{E}_{14}} = \frac{\dot{C}_{13}}{\dot{E}_{11}}, c_{18} = 0$	$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{Cond} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{19}$	کندانسور
$\frac{\dot{C}_{W_{ORCP}}}{\dot{W}_{ORCP}} = \frac{\dot{C}_{W_{ORCT}}}{\dot{W}_{ORCT}}$	$\dot{C}_{13} + \dot{C}_{W_{ORCP}} + \dot{Z}_{ORCP} = \dot{C}_{10}$	پمپ

ضریب اگزورژواکونومیک، f_k ، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k}} \quad (14)$$

f_k یکی از مهم‌ترین پارامترهای تحلیل اگزورژواکونومیک است که اهمیت نسبی هزینه خرید، نگهداری و تعمیرات جزء k را به هزینه تخریب و تلفات اگزورژی در آن نشان می‌دهد.

جدول (۳) فرضیات و پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی و تحلیل سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی را نشان می‌دهد [۷].

جدول ۳- فرضیات و پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی سیکل ترکیبی

مقدار	پارامتر
100	فشار محیط (kPa)
3.244	نسبت فشار کلی کمپرسورها
600	نرخ گرمای منتقل شده توسط رآکتور (MW)
25	دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$)
850	دمای ورودی به توربین ($^{\circ}\text{C}$)
30	دمای کندانسور ($^{\circ}\text{C}$)
100	دمای اواپراتور ($^{\circ}\text{C}$)
2	اختلاف دمای نقطه تنگش ^۱ ($^{\circ}\text{C}$)
2	اختلاف دمای سوپرهیت و اواپراتور ($^{\circ}\text{C}$)
85	بازده ایزنتروپیک پمپ (%)
80	بازده ایزنتروپیک توربین (%)
90	بازده مبدل‌های حرارتی (%)
100	اختلاف فشار ورودی و خروجی رآکتور (kPa)
40	اختلاف فشار ورودی و خروجی اواپراتور، خنک‌کن اولیه و میانی (kPa)
80	اختلاف فشار ورودی و خروجی رکوپراتور در قسمت فشار بالا (kPa)
50	اختلاف فشار ورودی و خروجی رکوپراتور در قسمت فشار پایین (kPa)

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تحلیل اگزورژواکونومیک

در جدول (۴) اطلاعات ترمودینامیکی سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی نمایش داده شده است. این اطلاعات از مدل ترمودینامیکی EES^۲ توسعه داده شده برای سیکل ترکیبی استخراج شده است. با حل دستگاه معادلات حاصل از معادلات توازن هزینه و معادلات کمکی، هزینه جریان‌های اگزورژی سیستم محاسبه می‌شود. این مقادیر همراه مقادیر اگزورژی جریان‌ها در جدول (۵) ارائه شده است.

^۱ Pinch point temperature difference

^۲ Engineering Equation Solver (EES)

همانطور که جدول (۵) نشان می‌دهد هزینه تولید توان توسط توربین گاز برابر $6.887 \text{ \$/s}$ می‌باشد. همچنین هزینه سوخت سیستم برابر $2.413 \text{ \$/s}$ است که نشان می‌دهد تامین سوخت مورد نیاز سیستم می‌تواند یکی از دغدغه‌های اقتصادی برای این سیستم باشد. مقادیر پارامترهای مهم اگزرژی و اگزروزواکونومیک اجزای سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات ترمودینامیکی سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی

نقاط	سیال	فشار (kPa)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	دبی (kg/s)	آنتالپی (kJ/kg)	آنتروپی (kJ/kg.K)	اگزرژی (kW)
1	هلیوم	7508	850	283.1	4305	-2.053	1.394E+06
2	هلیوم	2500	476.5	283.1	2352	-1.87	825973
3	هلیوم	2450	162.6	283.1	722.1	-4.644	598758
4	هلیوم	2410	67.78	283.1	229.9	-5.884	564020
5	هلیوم	2370	29.3	283.1	30	-6.471	556977
6	هلیوم	4269	119.1	283.1	501.9	-6.342	679733
7	هلیوم	4229	34.41	283.1	62.48	-7.584	660180
8	هلیوم	7688	127.4	283.1	555.8	-7.452	788696
9	هلیوم	7608	441.6	283.1	2185	-4.426	994697
10	R123	786.6	30.32	656.3	231.9	1.109	351.8
11	R123	786.6	102	656.3	444.3	1.698	24350
12	R123	109.7	52.23	656.3	417.2	1.719	2487
13	R123	109.7	30	656.3	231.4	1.109	43.97
14	آب	-	25	1000	104.8	0.3669	0
15	آب	-	38.53	1000	161.4	0.5525	1246
16	آب	-	25	1500	104.8	0.3669	0
17	آب	-	44.83	1500	187.8	0.6363	3963
18	آب	-	25	6154	104.8	0.3669	0
19	آب	-	29.74	6154	124.7	0.4329	959

اجزایی که بالاترین مقدار $\dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k$ را دارند مهم‌ترین جزءها از دیدگاه اگزروزواکونومیک هستند [۲۰]. این مقدار برای رآکتور سیکل ترکیبی بیشترین است. همچنین مقدار 45.66% برای ضریب اگزروزواکونومیک این جزء نشان می‌دهد که در این جزء هزینه تخریب اگزرژی بر هزینه خرید و هزینه نگهداری جزء غالب است. همچنین این جزء بالاترین مقدار تخریب اگزرژی را در میان اجزای سیکل ترکیبی داراست.

بعد از رآکتور بالاترین مقدار $\dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k$ متعلق به توربین است. توربین پایین ترین مقدار r را در میان اجزای سیستم دارد. مقدار 52.73% برای ضریب اغزرژواکونومیک این جزء نشانگر عملکرد نسبتاً مطلوب این جزء از دیدگاه اغزرژی و اغزرژواکونومیک می‌باشد. توربین سیکل رانکین آلی هم از نظر مقدار ضریب اغزرژواکونومیک تقریباً مشابه توربین سیکل ترکیبی رآکتور و توربین گازی است و با توجه به توان پایین تولیدی هزینه بسیار کمتری به سیستم تحمیل می‌کند.

جدول ۵- هزینه جریان‌های اغزرژی سیکل ترکیبی

نقاط	\dot{E} (kW)	\dot{C} (\$/s)	c (\$/GJ)
1	1.394E+06	16.39	11.76
2	825973	9.711	11.76
3	598758	7.04	11.76
4	564020	6.631	11.76
5	556977	6.548	11.76
6	679733	8.22	12.09
7	660180	7.984	12.09
8	788696	9.731	12.34
9	994697	12.42	12.48
10	351.8	0.01114	31.68
11	24350	0.431	17.7
12	2487	0.04402	17.7
13	43.97	0.0007783	17.7
14	0	0	-
15	1246	0.08736	70.1
16	0	0	-
17	3963	0.2401	60.59
18	0	0	-
19	959	0.04864	50.72
fuel	600000	2.413	4.03
\dot{W}_T	552911	6.887	12.45
$\dot{W}_{C,HP}$	139670	1.74	12.45
$\dot{W}_{C,LP}$	133621	1.664	12.45
$\dot{W}_{T,ORC}$	17760	0.458	25.78
\dot{W}_P	360.3	0.009291	25.78

مقدار بسیار پایین ضریب اغزرژواکونومیک برای رکوپراتور نشانگر غالب بودن هزینه تخریب اغزرژی بر هزینه خرید و نگهداری این جزء می‌باشد. پیشنهاد اغزرژواکونومیک برای این جزء می‌تواند بصورت افزایش هزینه اولیه از طریق افزایش سطح انتقال حرارت مطرح شود. مقادیر پایین ضریب اغزرژواکونومیک برای اواپراتور سیکل ترکیبی هم مثل رکوپراتور نشان می‌دهد که هزینه تخریب اغزرژی بر هزینه خرید و نگهداری

این جزء غالب است. بنابراین می‌توان با افزایش سطح انتقال حرارت هزینه اولیه اواپراتور را افزایش داد. تخریب اگزرژی در اواپراتور ناشی از اختلاف دبی و دمای جریان گذرنده از آنهاست. پایین‌ترین مقدار ضریب اگزروزواکونومیک و بالاترین مقدار r در میان اجزای سیکل ترکیبی مربوط به مبدل‌های حرارتی خنک‌کن اولیه و خنک‌کن میانی می‌باشد. این مقادیر برای این اجزا نشان می‌دهند که هزینه متناسب با تخریب اگزرژی در این اجزا بسیار غالب بر هزینه خرید و هزینه نگهداری این اجزا می‌باشد. تخریب اگزرژی بالا در این اجزا عمدتاً بدلیل اختلاف بسیار زیاد دبی جریان‌های گذرنده از آنهاست.

جدول ۶- پارامترهای مهم اگزرژی و اگزروزواکونومیک اجزای سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی

اجزا	f (%)	r (%)	$\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k}$ (\$/s)	\dot{Z}_k (\$/s)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/s)	\dot{E}_D (kW)	\dot{E}_P (kW)	\dot{E}_F (kW)
رآکتور	45.66	20.91	3.428	1.565	1.863	200312	1.394E+06	1.595E+06
توربین	52.78	5.614	0.3866	0.2044	0.1822	15500	552911	568412
رکوپراتور	4.9	9.771	0.26225	0.01285	0.2494	21214	206001	227215
اواپراتور	8.318	32.8	0.13776	0.01146	0.1263	10740	23998	34738
خنک‌کن اولیه	6.269	83.23	0.07271	0.004558	0.06815	5797	1246	7043
کمپرسور فشار پایین	5.126	8.533	0.14261	0.007312	0.1353	10865	122756	133621
خنک‌کن میانی	1.912	80.04	0.19217	0.003675	0.1885	15589	3963	19552
کمپرسور فشار بالا	5.065	8.377	0.14631	0.007413	0.1389	11154	128516	139670
توربین رانکین آلی	49.42	31.35	0.14359	0.07096	0.07263	4103	17760	21863
کندانسور	17.07	65.1	0.03166	0.005405	0.02626	1484	959	2443
پمپ	10.37	23.43	0.01037	0.001075	0.00929 1	360.3	307.8	360.3

افزایش \dot{Z} این اجزا می‌تواند باعث بهبود عملکرد اگزروزواکونومیک این اجزا و نیز کل سیکل ترکیبی شود. کمپرسورهای فشار بالا و فشارپایین تقریباً وضعیتی مشابه هم دارند و از نظر مقدار $\dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k$ بعد از رآکتور، توربین، رکوپراتور و خنک‌کن میانی قرار دارند. مقدار پایین ضریب اگزروزواکونومیک برای این اجزا نشان می‌دهد که می‌توان هزینه اولیه کمپرسورها را افزایش داد. این کار می‌تواند از طریق افزایش نسبت فشار کمپرسورها و بازده آنها انجام شود. همچنین مقدار $\dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k$ برای پمپ بسیار پایین‌تر از سایر اجزاست. بنابراین پمپ‌ها هزینه بسیار پایینی به سیستم تحمیل می‌کنند و اهمیت بسیار کمتری از دیدگاه اگزروزواکونومیک دارند. تغییر پارامترهای اگزروزواکونومیک پمپ‌ها اثر ناچیزی بر پارامترهای اگزروزواکونومیک کل سیکل ترکیبی خواهد داشت.

لازم به ذکر است که پیشنهادهای اگزروزواکونومیک ارائه شده برای هر جزء با در نظر گرفتن تنها خود آن جزء ارائه شده است و هنگام در نظر گرفتن عملکرد بهینه کل سیکل ترکیبی ممکن است هر یک از این پیشنهادها در نظر گرفته نشود و یا بر دیگری ارجحیت داده شود.

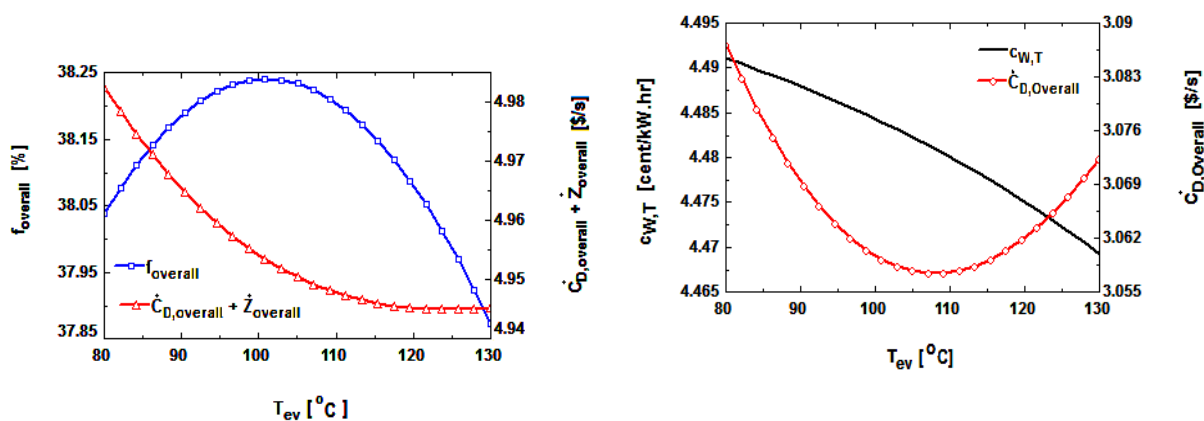
مقدار ضریب اگزروزواکونومیک برای کل سیکل ترکیبی رآکتور هلیوم، توربین گاز و سیکل رانکین آلی برابر 38.24% محاسبه شده است. این مطلب بیانگر این است که 61.76% از هزینه‌های تحمیل شده به کل سیستم در اثر تخریب اگزرژی در آن رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان هزینه اولیه اجزای سیستم را به منظور

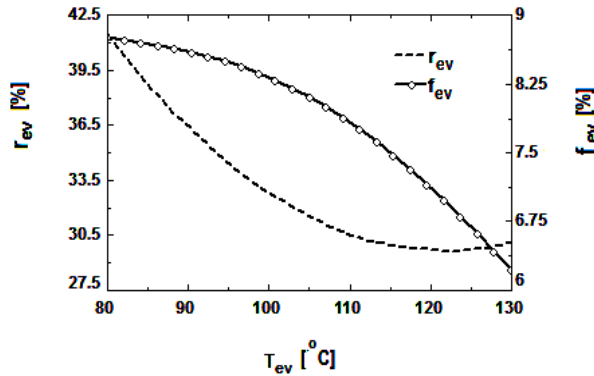
کاهش هزینه تخریب انرژی افزایش داد. هزینه خرید و نگهداری اجزا برای کل اجزای سیکل ترکیبی برابر $1.894 \text{ \$/s}$ و هزینه تخریب انرژی در کل اجزای سیکل ترکیبی برابر $3.06 \text{ \$/s}$ محاسبه شده است. در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای اواپراتور شامل دمای قسمت دوفازی (دمای اواپراتور)، اختلاف دمای نقطه تنگش و دمای سوپرهیت سیال آلی بر پارامترهای انرژی و اکونومیک سیکل ترکیبی می پردازیم.

۴-۲- مطالعه پارامتری

۴-۲-۱- دمای اواپراتور

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود با افزایش دمای اواپراتور هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین گاز کاهش می یابد. بنابراین کمترین هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین گاز در دمای اواپراتور حداکثر اتفاق می افتد. همچنین نرخ هزینه تخریب انرژی نسبت به دمای اواپراتور دارای نقطه مینیمم است. علت این است که با افزایش دمای اواپراتور، آنتالپی ورودی به توربین سیکل رانکین آلی افزایش یافته و از طرفی دبی جرمی سیال آلی کاهش می یابد. بنابراین کار تولیدی و به تبع آن بازده انرژی سیکل رانکین آلی نسبت به دمای اواپراتور دارای یک نقطه بهینه و تخریب انرژی و به تبع آن هزینه مرتبط با این تخریب نسبت به دمای اواپراتور دارای نقطه کمینه است. همچنین با افزایش دمای اواپراتور، هزینه خرید و نگهداری کل اجزای سیکل ترکیبی کاهش پیدا می کند. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود که نرخ هزینه تخریب انرژی سیکل ترکیبی نسبت به دمای اواپراتور دارای نقطه مینیمم است. بنابراین با توجه به تعریف ضریب انرژی و اکونومیک، در نقطه ای که نرخ هزینه تخریب انرژی کمترین مقدار است مقدار ضریب انرژی و اکونومیک بیشترین خواهد بود. لذا مشاهده می شود که ضریب انرژی و اکونومیک کل سیکل ترکیبی دارای نقطه ماکزیمم است. از طرفی دیگر با افزایش دمای اواپراتور، هزینه خرید و نگهداری اواپراتور کاهش یافته و این امر موجب کاهش ضریب انرژی و اکونومیک این جزء خواهد شد. همچنین با افزایش دمای اواپراتور، هزینه تخریب انرژی اواپراتور کاهش یافته و در نتیجه اختلاف هزینه متوسط نسبی بین محصول و سوخت تعریف شده برای اواپراتور (r_{ev}) کاهش خواهد یافت.

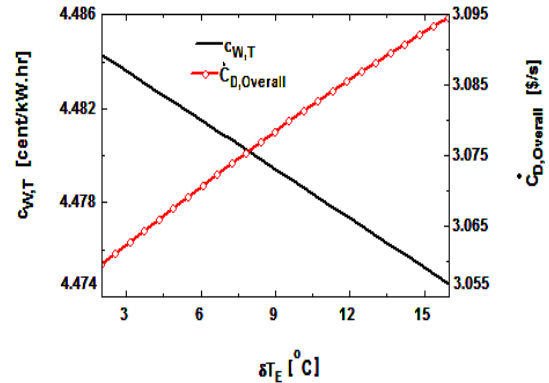
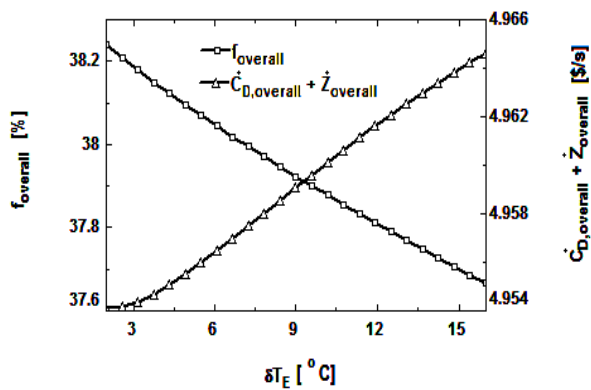


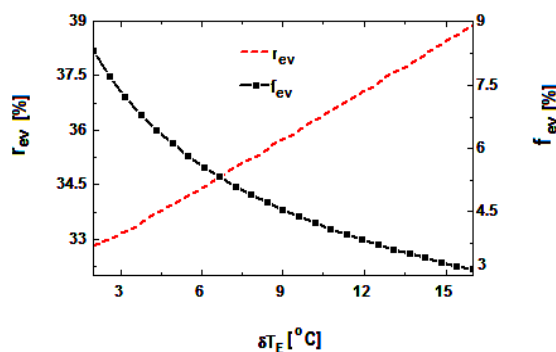


شکل ۳- تاثیر دمای اواپراتور بر عملکرد اگزروزواکونومیک سیکل ترکیبی

۴-۲-۲- اختلاف دمای نقطه تنگش

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش اختلاف دمای نقطه تنگش، هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین گاز به مقدار بسیار کم کاهش می‌یابد، ولی هزینه تخریب اگزرژی افزایش خواهد یافت. دلیل این امر آن است که با افزایش اختلاف دمای نقطه تنگش، بازیابی گرما در اواپراتور کاهش یافته و باعث کاهش دبی جرمی سیال آلی و کار تولیدی سیکل رانکین آلی و به تبع آن باعث کاهش بازده اگزرژی می‌شود. بنابراین تخریب اگزرژی و هزینه مرتبط با آن افزایش می‌یابد. همچنین طبق آنچه قبلاً گفته شد افزایش هزینه تخریب اگزرژی کل سیکل ترکیبی باعث کاهش ضریب اگزروزواکونومیک سیکل ترکیبی خواهد شد. چون این دو پارامتر عکس هم عمل می‌کنند. افزایش اختلاف دمای نقطه تنگش موجب کاهش هزینه خرید و نگهداری اواپراتور شده و در کل هزینه خرید و نگهداری کل سیکل ترکیبی را به مقدار بسیار کم کاهش می‌دهد ولی شیب افزایش هزینه تخریب اگزرژی بر شیب کاهش \dot{Z} سیکل ترکیبی غلبه کرده و در نتیجه $\dot{C}_D + \dot{Z}$ برای کل سیکل ترکیبی افزایش می‌یابد. همانطور که گفته شد افزایش اختلاف دمای نقطه تنگش، موجب کاهش هزینه خرید و نگهداری اواپراتور و افزایش هزینه تخریب اگزرژی اواپراتور می‌شود. بنابراین با توجه به تعریف، ضریب اگزروزواکونومیک اواپراتور کاهش خواهد یافت و همچنین اختلاف هزینه متوسط نسبی بین محصول و سوخت تعریف شده برای اواپراتور با افزایش هزینه تخریب اگزرژی اواپراتور بیشتر می‌شود.

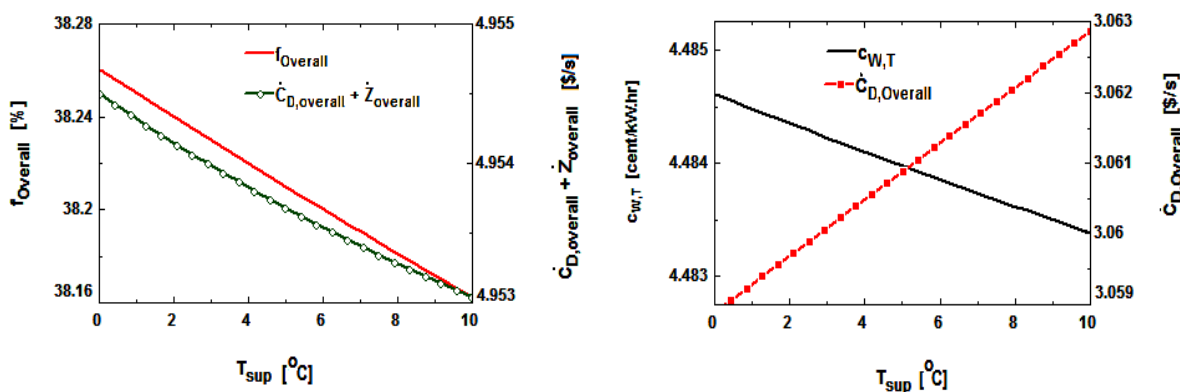


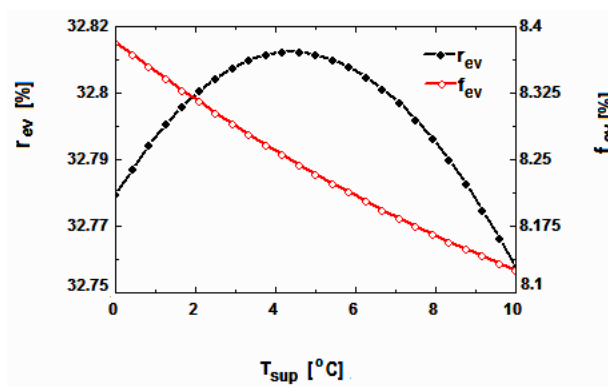


شکل ۴- تاثیر اختلاف دمای نقطه تنگش بر عملکرد اگزرترواکنومیک سیکل ترکیبی

۴-۲-۳- دمای سوپرهیت سیال آلی

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای سوپرهیت سیال آلی، هزینه تولید واحد برق تولید شده توسط توربین گاز به مقدار بسیار کم کاهش می‌یابد، ولی هزینه تخریب اگزرترو به مقدار کمی افزایش خواهد یافت. با افزایش دمای سوپرهیت سیال آلی، مقدار دبی سیال آلی کاهش یافته و دمای ورودی به توربین سیکل رانکین آلی افزایش پیدا می‌کند ولی در کل اثر کاهش دبی سیال آلی غالب بوده و توان تولیدی سیکل رانکین آلی و در نتیجه بازده اگزرترو کاهش می‌یابد. بنابراین تخریب اگزرترو و هزینه مرتبط با آن افزایش می‌یابد. با افزایش دمای سوپرهیت سیال آلی، هزینه خرید و نگهداری کل اجزای سیکل ترکیبی کاهش یافته و از طرف دیگر همانطور که گفته شد هزینه تخریب اگزرترو کل سیکل ترکیبی افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب اگزرترواکنومیک سیکل ترکیبی کاهش می‌یابد. همچنین شدت کاهش هزینه خرید و نگهداری کل اجزای سیکل ترکیبی بیشتر از شدت افزایش هزینه مرتبط با تخریب اگزرترو خواهد بود و لذا مجموع $\dot{C}_D + \dot{Z}$ کل سیکل ترکیبی کاهش خواهد یافت. مقدار ضریب اگزرترواکنومیک اوپراتور هم به دلیل ذکر شده در بالا کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش دمای سوپرهیت سیال آلی، ابتدا با کاهش هزینه محصول تعریف شده برای اوپراتور، مقدار پارامتر r_{ev} افزایش ولی سپس با کاهش اختلاف هزینه متوسط نسبی بین محصول و سوخت تعریف شده برای اوپراتور، مقدار پارامتر r_{ev} با کاهش مواجه خواهد شد.





شکل ۵- تاثیر دمای سوپرهیت سیال آلی بر عملکرد اگزرژیواکونومیک سیکل ترکیبی

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سیکل ترکیبی رآکتور، توربین گازی و سیکل رانکین آلی از دیدگاه انرژی، اگزرژی و اگزرژیواکونومیک شبیه‌سازی شد. پس از بدست آمدن نرخ هزینه جریان‌های اگزرژی سیستم، کارایی اگزرژیواکونومیک هر یک از اجزای سیکل بررسی شده و پیشنهادهایی برای بهبود آن‌ها از دیدگاه اگزرژیواکونومیک ارائه شد. تنها جزء مشترک بین سیکل رانکین آلی و سیکل ترکیبی رآکتور و توربین گاز، اواپراتور می‌باشد و تغییر پارامترهای این جزء می‌تواند در عملکرد اگزرژیواکونومیک سیکل ترکیبی بسیار مهم باشد. به همین دلیل یک مطالعه پارامتری به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای اواپراتور بر هزینه واحد برق تولید شده توسط توربین گاز، هزینه متناسب با تخریب اگزرژی کل سیکل، ضریب اگزرژیواکونومیک سیکل، حاصل جمع هزینه خرید و نگهداری اجزای سیکل ترکیبی و هزینه تخریب اگزرژی کل سیکل و در نهایت پارامتر اختلاف هزینه نسبی محصولات و سوخت تعریف شده برای اواپراتور (r_{ev}) انجام شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای بررسی شده اثر متفاوتی بر عملکرد اگزرژیواکونومیک سیکل ترکیبی دارند و در برخی موارد مقادیر بهینه‌ای برای پارامترهای اواپراتور بدست آمد.

مراجع

- [1] Ahmadi, P., and Dincer, I., "Exergoenvironmental Analysis and Optimization of a Cogeneration Plant System using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)", Energy, Vol. 35, pp. 5161-5172, (2010).
- [2] Meckler, M., and Hyman, L.B., "Sustainable On-site CHP Systems", McGraw-Hill, New York, (2010).
- [3] Zare, V., Mahmoudi, S.M.S., and Yari, M., "An Exergoeconomic Investigation of Waste Heat Recovery from the Gas Turbine-modular Helium Reactor (GT-MHR) Employing an Ammonia-water Power/Cooling Cycle", Energy, Vol. 61, pp. 397-409, (2013).

- [4] Zare, V., Yari, M., and Mahmoudi, S.M.S., "Proposal and Analysis of a New Combined Cogeneration System Based on the GT-MHR Cycle", *Desalination*, Vol. 286, pp. 417-428, (2012).
- [5] Dardoura, S., Nisan, S., and Charbit, F., "Utilization of Waste Heat from GT-MHR and PBMR Reactors for Nuclear Desalination", *Desalination*, Vol. 205, pp. 254–268, (2007).
- [6] Zare, V., Mahmoudi, S.M.S., and Yari, M., "Ammonia-water Cogeneration Cycle for Utilizing Waste Heat from the GT-MHR Plant", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 48, pp. 176-185, (2012).
- [7] Yari, M., and Mahmoudi, S.M.S., "Utilization of Waste Heat from GT-MHR for Power Generation in Organic Rankine Cycles", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 366–375, (2010).
- [8] Yari, M., and Mahmoudi, S.M.S., "A Thermodynamic Study of Waste Heat Recovery from GT-MHR using Organic Rankine Cycles", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 181–196, (2011).
- [9] Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., and Spliethoff, H., "Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1809–1817, (2009).
- [10] Shokati, N., Mohammadkhani, F., Farrokhi, N., and Ranjbar, F., "Thermodynamic and Heat Transfer Analysis of Heat Recovery from Engine Test Cell by Organic Rankine Cycle", *Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1661–1671, (2014).
- [11] Shokati, N., Ranjbar, F., and Yari, M., "A Comparative Analysis of Rankine and Absorption Power Cycles from Exergoeconomic Viewpoint", *Energy Conversion and Management*, Vol. 88, pp. 657-668, (2014).
- [12] Baghernejad, A., and Yaghoubi, M., "Exergoeconomic Analysis and Optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using Genetic Algorithm", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 2193-2203, (2011).
- [13] Abusoglu, A., and Kanoglu, M., "Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Heat and Power Production: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 2295-2308, (2009).
- [14] Yari, M., "Performance Analysis of the Different Organic Rankine Cycles (ORCs) using Dry Fluids". *International Journal of Exergy*, Vol. 6, pp. 323-342, (2009).
- [15] Yari, M., "Exergetic Analysis of Various Types of Geothermal Power Plants", *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 112-121, (2010).
- [16] Tsatsaronis, G., "Definitions and Nomenclature in Exergy Analysis and Exergoeconomics", *Energy*, Vol. 32, pp. 249–253, (2007).

- [17] Lazzaretto, A., and Tsatsaronis, G., "SPECO: A Systematic and General Methodology for Calculating Efficiencies and Costs in Thermal Systems", *Energy*, Vol. 31, pp. 1257–1289, (2006).
- [18] Schultz, K.R., Brown, L.C., Besenbruch, G.E., and Hamilton, C.J., "Large-scale Production of Hydrogen by Nuclear Energy for the Hydrogen Economy", The U.S. Department of Energy, (2003).
- [19] Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M., "*Thermal Design and Optimization*", Wiley, New York, (1996).
- [20] Mohammadkhani, F., Khalilarya, Sh., and Mirzaee, I., "Exergy and Exergoeconomic Analysis and Optimization of Diesel Engine Based Combined Heat and Power (CHP) System using Genetic Algorithm", *International Journal of Exergy*, Vol. 12, pp. 139–161, (2013).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A_{HE} : سطح انتقال حرارت مبدل‌ها (m^2)
- ΔT_E : اختلاف دمای نقطه تنگش در اواپراتور ($^{\circ}C$)
- ΔT_{sup} : درجه سوپرهیت سیال آلی در اواپراتور ($^{\circ}C$)
- \dot{m} : دبی جرمی (kg/s)
- T_{ev} : دمای قسمت دوفازی اواپراتور ($^{\circ}C$)
- P : فشار (kPa)
- T : دما ($^{\circ}C$)
- \dot{W} : توان تولیدی یا مصرفی اجزا (kW)
- Z : هزینه اولیه اجزای سیکل (\$)
- \dot{Z} : هزینه اولیه اجزای سیکل در واحد زمان ($\$/s$)

Abstract

In the present work, the Gas Turbine Modular Helium Reactor (GT/MHR) combined with Organic Rankine Cycle (ORC) is simulated from the viewpoints of first and second laws of thermodynamics as well as the exergoeconomics. Temperature, pressure and exergetic cost of all streams are calculated and exergoeconomic performance of combined cycle is investigated. Attention is paid to the effects of the evaporator temperature, the pinch point temperature difference in the evaporator and the superheat degree of the organic fluid on the exergoeconomic performance of the combined cycle. The results of parametric study showed that as the evaporator temperature, T_e , and pinch point temperature difference in the evaporator, ΔT_E , increase, the unit cost of electricity produced by gas turbine is decreased. Furthermore, the exergy destruction cost rate is minimized at $T_{ev}=109$ °C while the exergoeconomic factor is maximized at $T_{ev}=102$ °C.