



تحلیل انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی (4E) یک سیستم جدید تولید همزمان توان، هیدروژن و آب شیرین با ترکیب انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی

محمدعلی صباغی^۱، محمد سفید^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

چکیده

استفاده از سیستم‌های تولید همزمان در سال‌های اخیر با استقبال زیادی همراه بوده است. پژوهش حاضر به تحلیل انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی (4E) یک سیکل ارگانیک رانکین با هدف تولید همزمان توان، هیدروژن و آب شیرین با منبع انرژی ترکیبی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی می‌پردازد. در سیکل مذکور، سیال عامل ابتدا توسط حرارت بازیافتی پیش‌گرم شده و پس از آن توسط سه مبدل حرارتی اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر تا دمای ماکزیمم سیکل، سوپرهیت می‌شود؛ همچنین کارکرد سیستم در دو حالت با و بدون انرژی زمین گرمایی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین درصد تخریب اگزرژی برابر ۳۵٪ و مربوط به الکتروولایزر است؛ همچنین کمترین مقدار فاکتور اگزژیواکونومیک برای الکتروولایزر غشاء پروتونی و برابر ۸/۳۹ درصد است. میزان هیدروژن تولیدی و آب شیرین به ترتیب ۱/۶۴ لیتر بر ثانیه و ۴/۳۶ کیلوگرم بر ثانیه است و با افزایش دمای منبع زمین گرمایی از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد، مقدار هیدروژن و آب شیرین تولید شده به ترتیب به میزان ۲۹ و ۱۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. در صورت عدم استفاده از انرژی زمین گرمایی و تامین کل انرژی توسط حرارت بازیافتی، مقدار دی‌اکسیدکربن منتشر شده به مقدار ۶۹ درصد افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سیستم تولید همزمان؛ زمین گرمایی؛ حرارت بازیافتی؛ اگزرژی اقتصادی؛ زیست محیطی.

Energy, Exergy, Economic and Environmental Analysis (4E) of an Organic Rankine Cycle to produce power, hydrogen and desalinated water by combining geothermal energy and heat recovery

Mohammad Ali Sabbaghi¹, Mohammad Sefid^{2*}

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

² Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

Abstract

The usage of multi-generation systems is quickly developing in recent years. The present study analyzes the energy, exergy, economic and environmental (4E) of a novel Rankine organic cycle to produce power, hydrogen and fresh water with a combined energy source of geothermal and heat recovery. Also, the cycle performance in both modes with and without geothermal energy is compared. Calculations show that the highest percent of exergy destruction is equal to 35% and is related to the PEM. Also, the lowest amount of exergoeconomic factor is calculated for the PEM is equal to 8.39. The amount of hydrogen and desalinated water produced is 1.64 lit/s and 4.36 kg/s, respectively. With increasing the temperature of the geothermal source from 125 to 155°C, the amount of hydrogen and desalinated water produced are 29 and 17 percentage increases, respectively. If geothermal energy is not used and all energy is supplied by heat recovery, the amount of carbon dioxide emitted will increase to 69%.

Keywords: CHP Production system; Geothermal; Heat recovery; Exergoeconomic Analysis; Environment

۱- مقدمه

سیکل‌های ارگانیک رانکین از سیکل‌های پر استفاده در تولید توان می‌باشند که سیال عامل آنها یک سیال ارگانیک است. از مشخصه این سیکل‌ها دمای عملکردی پائین یا متوسط آنها است و به همین جهت، با منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی زمین گرمایی و همچنین حرارت بازیافتی قابلیت استفاده زیادی دارند. سیکل رانکین دارای چهار جزء توربین، کندانسور، پمپ و بویلر بوده و عملکرد آن بدین گونه است که سیال عامل با دفع حرارت در کندانسور چگالیده شده و تبدیل به مایع می‌شود. سپس فشار سیال توسط پمپ افزایش داده شده و از آنجا به بویلر انتقال می‌یابد. با جذب حرارت، سیال عامل تغییر حالت داده و با دما و فشار بالا به توربین هدایت شده و با تولید کار، فشار و دمای آن پائین آمده و به کندانسور وارد می‌شود و سیکل مذکور مجدداً تکرار می‌گردد [۱].

در سالین اخیر، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی جهت تأمین نیازهای بشر، موجب کاهش قابل ملاحظه ذخایر این سوخت‌ها گردیده است. مضاف بر این، استفاده از سوخت‌های فسیلی، سبب آلودگی محیط زیست و گرم شدن کره زمین می‌شود. از این رو، منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین حرارت بازیافتی از صنایع، جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی بوده و قادر به تأمین آینده انرژی بشر می‌باشند.

انرژی زمین گرمایی از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر بوده که دارای مزایای زیادی است. از محاسن انرژی زمین گرمایی، می‌توان به عدم ایجاد آلاینده‌های زیست محیطی و ظرفیت بالای آن برای تولید توان اشاره کرد [۳-۴].

حرارت اتلافی در واحدهای صنعتی یکی از منابع انرژی قابل حصول بوده که در کشور ما توجه چندانی به این امر نشده است. امروزه مقادیر قابل ملاحظه‌ای حرارت اتلافی با دمای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد در واحدهای صنعتی وجود دارد که استفاده از آن‌ها در بهینه‌سازی مصرف انرژی کشور و همچنین ارتقای عملکرد سیستم‌های انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نقش بسزایی دارد. استفاده از این حرارت به علت دما و فشار پائین برای سیکل‌های رانکین سنتی امکان‌پذیر نیست.

۱-۲- پیشینه پژوهش

راتلامولا و دینسر [۵] یک سیستم تولید همزمان بر پایه انرژی زمین گرمایی سیکل تبخیر چندگانه را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد، راندمان انرژی با افزایش تعداد مراحل تبخیر از یک به پنج مرحله، از ۶/۵۳٪ به ۴۷/۲۹٪ افزایش یافته است. ییلماز و همکارانش [۶] هفت آرایش مختلف زمین گرمایی و تولید هیدروژن با روش الکترولیزر را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها حاکی از کاهش هزینه تولیدی هیدروژن در ازای افزایش دمای منبع زمین گرمایی بود. وانگ و همکارانش [۷] در پژوهش خود چهار روش مختلف تولید همزمان برق در کارخانه سیمان مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای هر روش نوع سیکل بخار، سیکل کالینا و سیکل جداگانه بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک و برای پیشینه‌سازی بازده انرژی با به نوعی کمینه کردن تلفات در مجموع مراحل فرآیند تولید سیمان صورت گرفته است. با تحلیل انرژی هر چهار روش، محل وقوع تلفات در مراحل مختلف شناسایی شده و در نهایت چرخه کالینا با حدود ۴۵٪ بازده انرژی به عنوان مناسب‌ترین سیستم برای بازیافت حرارت سیمان انتخاب شده است. کیولین و همکارانش [۸] به بهینه‌سازی یک سیکل کوچک رانکین آلی با منبع حرارت اتلافی مبتنی بر اندازه سیستم و سیال‌های کاری مختلف پرداخته‌اند. بهینه‌سازی ترمودینامیکی برای سیکل با سیال ان-بوتان با بازدهی ۵/۲ درصد بدست آمده و رقم ۲۱۳۶ یورو به ازای هر کیلووات نیز بهترین پاسخ اقتصادی برای تولید ۴/۲ کیلووات توان بوده است. سونگ و همکارانش [۹] به بررسی بازیافت حرارت از یک موتور دیزل دریایی پرداختند که نتایج بررسی آن‌ها حاکی از افزایش ۱۰/۲ درصدی بازده موتور دیزل بود. لارسن و همکارانش [۱۰] مقایسه‌ای روی سیکل رانکین سنتی و سیکل رانکین آلی همراه با یک موتور دیزلی دو زمانه انجام دادند. آن‌ها بیشترین توان تولیدی را برای سیکل رانکین آلی گزارش کردند در حالیکه توان تولیدی سیکل کالینا مقدار ۷۵ درصد توان بدست آمده از سیکل رانکین آلی بود. پیربن و همکارانش [۱۱] به بررسی بهترین تکنولوژی بازیافت گرما در تجهیزات دور از ساحل پرداختند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که سیکل رانکین آلی نسبت به سیکل رانکین سنتی عملکرد بسیار بالاتری دارد. گیرگین و ازگی [۱۲] به تحلیل ترمودینامیکی یک سیکل رانکین آلی و استفاده از حرارت اتلافی یک ژنراتور دیزلی در

۲- شرح سیستم و مدل‌سازی

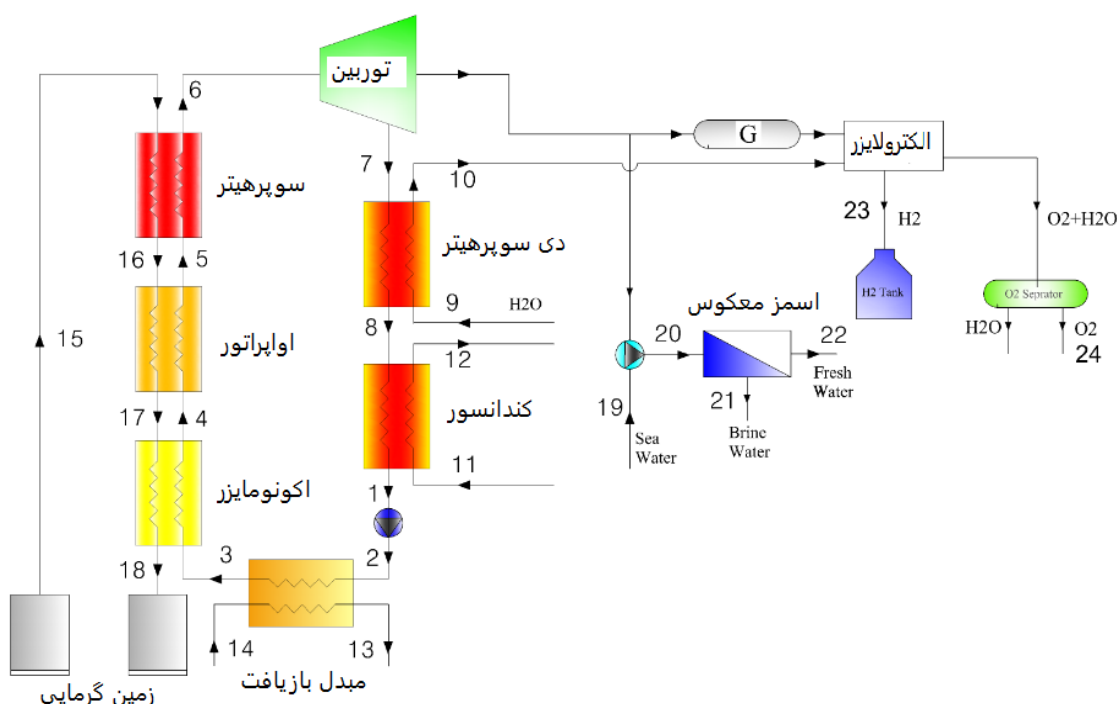
در پژوهش حاضر، یک سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی (PEM) و یک سیستم اسمز معکوس (RO)، با سیکل رانکین آلی ترکیب شده‌اند. از انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی برای تامین انرژی سیکل رانکین آلی استفاده شده است. در شکل ۱، سیکل مورد بررسی نشان داده شده است که شامل یک سیستم تولید همزمان توان، هیدروژن و گرمایش با منبع انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی است. این سیستم شامل چهار زیر سیستم می‌شود. زیر سیستم سیکل رانکین آلی، زیر سیستم زمین گرمایی، زیرسیستم تولید آب شیرین و زیر سیستم تولید هیدروژن. خروجی اصلی این سیستم، توان، گرمایش، هیدروژن و آب شیرین است که به ترتیب در زیر سیستم سیکل رانکین آلی، هیدروژن و اسمز معکوس تولید می‌شود. زیرسیستم زمین گرمایی، انرژی اصلی سیستم را تامین می‌کند. سیال عامل این سیکل R134a می‌باشد، که در ابتدا توسط پمپ به مبدل بازیافت حرارت رفته و پیش‌گرم می‌شود و بعد از آن توسط مبدل‌های حرارتی زمین گرمایی تا دمای بیشینه سیکل، سوپر هیت می‌شود. این مبدل‌های حرارتی از یک اکونومایزر، یک اواپراتور و یک سوپر هیت تشکیل شده است. سیال عامل ابتدا توسط مبدل حرارت بازیافتی، پیش‌گرم شده و وارد اکونومایزر می‌شود، بعد از آن در اواپراتور به حالت بخار اشباع تبدیل می‌گردد و در نهایت در سوپر هیت از حالت بخار اشباع به بخار مافوق گرم تغییر حالت می‌یابد. سپس سیال مافوق گرم شده وارد توربین می‌شود و توان تولید می‌کند. بعد از عبور از توربین سیال عامل همچنان ظرفیت تولید حرارت دارد و می‌توان از حرارت آن به منظور تامین گرمای لازم برای گرمایش آب ورودی به الکترولایزر استفاده کرد؛ بنابراین سیال عامل وارد دی سوپر هیت شده و گرمای لازم برای الکترولایزر تامین می‌گردد. سپس سیال عامل وارد کندانسور شده و با دفع گرما و تامین حرارت لازم برای آب گرم بهداشتی برای مصارف ساختمانی، به مایع اشباع تبدیل و این سیکل تکرار می‌شود.

توان تولید شده در سیکل رانکین آلی در یک ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل شده و تماما و بطور مساوی برای تولید هیدروژن و آب شیرین به سیستم غشاء پروتونی و اسمز معکوس منتقل می‌شود.

کشتی پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که استفاده از سیال تولون باعث تولید توان به میزان ۹۲ کیلووات و همچنین صرفه جویی ۲۵۰۰۰ لیتر سوخت دیزل و کاهش ۶۷/۲ تن انتشار دی اکسید کربن در پایان ۱۰۰۰ ساعت کاری می‌شود. برای استفاده از انرژی زمین گرمایی، اغلب بکارگیری سیستم‌های دمپائین موضوعیت پیدا می‌کند. راندمان انرژی این سیستم‌ها چندان بالا نیست و از طرف دیگر مصرف کل توان حاصل از انرژی زمین گرمایی برای تولید هیدروژن و آب شیرین باعث کاهش راندمان انرژی بسیار پائین‌تر از سیستم تولید توان با شرایط مشابه می‌گردد [۱۳]؛ بنابراین توصیه می‌شود که از منابع انرژی دیگری نیز برای تامین انرژی لازم برای سیکل ارگانیک رانکین استفاده کرد. به همین منظور و همچنین در دسترس بودن منابع حرارت بازیافتی، در این پژوهش سیکل جدید تولید همزمان توان، گرمایش، هیدروژن و آب شیرین پیشنهاد شده که از ترکیب انرژی‌های زمین گرمایی و حرارت بازیافتی استفاده می‌کند.

در سیستم ارائه شده سه مبدل حرارتی برای تامین انرژی لازم برای توربین بکار گرفته شده است. وجود مبدل‌های حرارتی کوچک افزایش بازدهی سیکل رانکین می‌گردد، ولی به سرمایه گذاری بیشتری نیاز دارند؛ بنابراین لازم است با ارزیابی‌های فنی اقتصادی، اثربخشی و جایگاه آنها مشخص شود. از طرفی دیگر، در گرمای حاصل از حرارت بازیافتی دی-اکسید کربن آزاد شده و تبعات زیست محیطی دارد؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده تا با رویکردی همه جانبه به تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی سیکل پیشنهادی پرداخته شود؛ همچنین به منظور تاثیر استفاده از انرژی زمین گرمایی، عملکرد سیکل در دو حالت با و بدون زمین گرمایی مقایسه می‌گردد. عمده موارد این پژوهش به شرح زیر است.

- استفاده از انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی برای تامین انرژی لازم برای سیکل رانکین آلی.
- تولید هیدروژن توسط سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی و آب شیرین توسط سیستم اسمز معکوس.
- مقایسه دو حالت سیستم با و بدون زمین گرمایی و تاثیر آن بر میزان انتشار آلاینده‌ها



شکل ۱- سیکل مورد بررسی

- دما و فشار محیط به ترتیب برابر ۲۵ درجه سانتیگراد و ۱۰۱ کیلوپاسکال است.
 - دمای آب زمین گرمایی ۱۵۵ درجه سانتیگراد و دبی آن ۱ kg/s فرض شده است.
 - کل سیستم آدیاباتیک در نظر گرفته شده و از تلفات حرارتی صرف نظر شده است.
- داده‌های ورودی مربوط به سیکل رانکین آلی، سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی و سیستم اسمز معکوس در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- داده های ورودی سیکل ارگانیک رانکین

مقدار	نام متغیر
۸۰	راندمان آیزنتروپیک پمپ و توربین (%)
۳۷۰۰	فشار ورودی به توربین (kPa)
۱۲۰۰	فشار خروجی از توربین (kPa)
۱۰۱	فشار آب ورودی به کندانسور (kPa)
1	دبی آب ورودی به دی سوپرهیتر (kg/s)
10	اختلاف دمای پینچ دی سوپرهیتر (K)
۳	اختلاف دمای پینچ کندانسور (K)
۵	اختلاف دمای پینچ اوپراتور (K)

در سیستم الکترولایزر، همانطور که در شکل ۱ مشخص است، آب ورودی با فشار اتمسفر وارد دی سوپرهیتر شده و تا دمای مورد نیاز سیستم الکترولایزر گرم می‌شود. در سیستم الکترولایزر، هیدروژن خروجی از کاتد، حرارت خود را به محیط دفع کرده و در یک منبع ذخیره می‌شود. اکسیژن تولیدی در آند توسط یک جداکننده، از مخلوط آب و اکسیژن جدا میگردد و در نهایت آب باقیمانده برای تولید هیدروژن مجدداً به الکترولایزر باز می‌گردد.

در سیستم اسمز معکوس توسط پمپ، فشار لازم برای عبور آب شور از غشاء تامین می‌گردد. آب شور یا آب دریا پس از گذر از دستگاه اسمز معکوس، شوری خود را از دست داده و به آب شیرین (نقطه ۲۲) و آبی با شوری بیشتر (نقطه ۲۱) تبدیل می‌شود. برای ساده سازی معادلات بیان شده، فرضیات زیر بکار گرفته شده است [۱۴].

- تمامی اجزای سیکل در حالت پایا عمل می‌کنند.
- از افت فشار لوله‌ها و مبدل‌های حرارتی و سایر اجزا صرف نظر شده است.
- سیال زمین گرمایی، آب در نظر گرفته شده است.

$$E\dot{x}_W = \dot{W} \quad (5)$$

$$ex = ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

راندمان انرژی سیستم تولید همزمان مورد بررسی بر اساس رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$\eta_{CHP} = \frac{W_{net} + Q_{heating}}{Q_{recovery} + Q_{geothermal}} \quad (7)$$

$$Q_{heating} = \dot{m}_a (h_{11} - h_a) + \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11}) \quad (8)$$

$$W_{net} = W_{turbine} - W_{pump} \quad (9)$$

$$Q_{geothermal} = \dot{m}_{15} \times (h_{15} - h_{18}) \quad (10)$$

راندمان انرژی سیستم تولید همزمان بر اساس رابطه ۱۱ بدست می‌آید

$$\eta_{ex} = 1 - \left(\frac{E\dot{x}_{D,tot}}{(E\dot{x}_{15} - E\dot{x}_{18}) + E_{Recovery}} \right) \quad (11)$$

$$E_{Recovery} = E\dot{x}_{14} - E\dot{x}_{13} \quad (12)$$

در جدول ۲، معادلات انرژی سیکل رانکین آلی و در جدول ۳، معادلات سیستم الکترولاایزر غشاء پروتونی ارائه شده است.

جدول ۲- معادلات انرژی سیکل رانکین آلی

نام جزء	انرژی محصول	انرژی سوخت
توربین	\dot{W}_{tur}	$\dot{E}_p - \dot{E}_v$
دی سوپرهیتر	$\dot{E}_{11} - \dot{E}_9$	$\dot{E}_v - \dot{E}_8$
کندانسور	$\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11}$	$\dot{E}_8 - \dot{E}_7$
پمپ	$\dot{E}_7 - \dot{E}_6$	\dot{W}_{pump}
مبدل بازیافت حرارت	$\dot{E}_7 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_{14} - \dot{E}_{13}$
اکونوماایزر	$\dot{E}_6 - \dot{E}_5$	$\dot{E}_{17} - \dot{E}_{18}$
اوپراپاتور	$\dot{E}_5 - \dot{E}_4$	$\dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}$
سوپر هیتر	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16}$

جدول ۳- معادلات سیستم الکترولاایزر غشاء پروتونی

معادله	پارامتر
$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm}$	ولتاژ الکترولاایزر
$E_{electric} = JV, E_{electric} = W_{ORCT}$	توان مصرفی الکترولاایزر
$V_{act,c} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{2j_{0,c}} \right)$	پتانسیل فعال
$j_{0,c} = \int_c^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,c}}{RT} \right)$	سازی کاتد
$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{2j_{0,a}} \right)$	پتانسیل فعال
$j_{0,a} = \int_a^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,a}}{RT} \right)$	سازی آند

اختلاف دمای پینچ سوپر هیتر (K)			
۱۰			
داده های ورودی الکترولاایزر غشاء پروتونی [۱۶]			
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Po (bar)	۱	T PEM (C)	۸۰
D (mm)	۵۰	E _{act,a} (kJ/mol)	۷۶
F (C/mol)	۹۶۴۸۶	E _{act,c} (kJ/mol)	۱۸
J _a ^{ref} (A/m ²)	۱۷۰۰۰۰	λ _a	۱۴
J _c ^{ref} (A/m ²)	۴۶۰۰	λ _c	۱۰

داده های ورودی سیستم اسمز معکوس [۱۷]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
RR(-)	۰/۴	T ₀ (C)	۲۵
m _{required} (kg/s)	۴/۱۵	X _{feed} (g/kg)	۴
n(-)	۱۰۰	A _{mem} (m ²)	۳۷

۲-۱- تحلیل انرژی و انرژی

برای مدل سازی انرژی سیستم، می‌بایست قوانین پایستگی جرم و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم اعمال شود. به همین منظور، هر یک از المان‌ها یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (2)$$

انرژی [۱۸] به چهار دسته انرژی فیزیکی، انرژی شیمیایی، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل تقسیم بندی می‌شود. به سبب تغییرات ناچیز سرعت و ارتفاع در این پژوهش از ترم‌های انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است. انرژی فیزیکی حداکثر کار مفید تئوری بدست آمده سیستم در تعامل با محیط در شرایط تعادل است. با در نظر گرفتن قانون اول و دوم ترمودینامیک، موازنه انرژی را به صورت رابطه ۳ می‌توان در نظر گرفت [۱۸].

$$E\dot{x}_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + E\dot{x}_W + E\dot{x}_D \quad (3)$$

اندیس‌های i و e مشخص کننده انرژی ورودی و خروجی حجم کنترل هستند. E \dot{x}_D بیانگر تخریب انرژی و ترم‌های دیگر از طریق معادلات ۶-۴ تعیین می‌شوند [۱۸].

$$E\dot{x}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \dot{Q}_i \quad (4)$$

۲-۲- تحلیل انرژی - اقتصادی

فرآیند هزینه‌گذاری انرژی شامل معادلات بالانس هزینه‌ای است که برای هر یک از اجزای سیستم بر اساس رابطه ۱۳ به صورت جداگانه نوشته می‌شود [۲۰].

$$\sum (c_e E \dot{x}_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{Q,k} E \dot{Q}_k + \sum (c_i E \dot{x}_i)_k + Z_k \quad (13)$$

در رابطه فوق، c هزینه واحد انرژی و Z_k نرخ هزینه برای جزء k ام است و از رابطه ۱۴ به دست می‌آید.

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \times CRF \times \varphi}{N} \quad (14)$$

در رابطه فوق Z_k هزینه اولیه خریداری شده جزء، φ ضریب مربوط به هزینه عملکرد و نگهداری جزء، N تعداد ساعات عملکرد سالانه جزء و CRF ضریب بازگشت سرمایه است و از رابطه ۱۵ تعیین می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، i نرخ سود سرمایه برابر ۱۲ درصد و n تعداد سال‌های عملکرد سیستم برابر ۲۰ سال است؛ همچنین φ برابر ۱/۰۶ و N برابر ۸۰۰۰ ساعت در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از روابط ارائه شده در مرجع [۲۱] برای به دست آوردن قیمت اولیه اجزای سیکل رانکین و از روابط مرجع [۲۲] برای به دست آوردن قیمت مبدل‌ها و انرژی زمین گرمایی و از مرجع [۲۳] برای بدست آوردن قیمت اولیه واحد آب شیرین کن و از مرجع [۲۴] برای بدست آوردن قیمت اولیه واحد الکتروولتیر استفاده شده است. روابط تعیین هزینه ارائه شده مربوط مربوط به سال‌های گذشته بوده و این قیمت‌ها توسط رابطه ۱۶ بروز رسانی می‌گردد.

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{Index_1}{Index_2} \quad (16)$$

c_1 و c_2 قیمت تجهیزات در سال‌های ۱ و ۲ و $Index_1$ و $Index_2$ شاخص هزینه معرف تورم است و برای اصلاح هزینه اجزا استفاده می‌شود. در این تحقیق از شاخص ارائه شده توسط مارشال و سوئیفت جهت بروز رسانی قیمت‌ها برای سال ۲۰۲۱ استفاده شده است [۲۵]. روابط نرخ هزینه سوخت و محصول اجزای مختلف سیستم در جدول ۵ ارائه شده است.

$V_{ohm} = J R_{PEM}$ $R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]}$ $\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c$ $\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \times \exp\left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right]$	پتانسیل اهمیک
$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298)$	پتانسیل برگشت پذیر
$N_{H_2O,out} = \frac{J}{2F} = N_{H_2O,reacted}$	نرخ جریان مولی اکسیژن
$N_{O_2,out} = \frac{J}{4F}$	نرخ جریان مولی اکسیژن
$N_{H_2O,out} = N_{H_2O,in} - \frac{J}{2F}$	نرخ جریان آب باقیمانده

جدول ۴- معادلات تولید آب شیرین با اسمز معکوس

معادله	پارامتر
$RR = \frac{M_d}{M_f}$	نسبت بازیابی
$M_b = M_f - M_d$	دبی آب شور
$X_d = X_f(1 - SR)$	نمک موجود در آب شیرین خروجی
$X_b = \frac{M_f \cdot X_f - M_d \cdot X_d}{M_b}$	نمک موجود در آب شور خروجی
$X_b = \frac{M_f \cdot X_f - M_b \cdot X_b}{M_b}$	متوسط غلظت نمک
$TCF = \exp\left(2700 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)$	فاکتور اصلاح دما
$k_w = \frac{6.48 \times 10^{-8} \times (18.6865 - 0.177 X_b)}{T}$	نفوذپذیری غشاء
$\pi_{eva} = 0.5 \times (\pi_b + \pi_f)$	متوسط فشار در سمت تغذیه
$\Delta \pi = \pi_{eva} - \pi_d$	فشار اسمزی خالص
$\Delta p = \left(\frac{M_d}{3600 \times TCF \times FF \times A_e \times n_e \times n_p \times k_w}\right) + \Delta \pi$	اختلاف فشار خالص
$W_{HPP} = \left(\frac{1000 \times M_f \times \Delta P}{3600 \times \eta_p \times \rho_f}\right)$	توان پمپ فشار

سیستم تولید همزمان انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی، برای تعیین پارامترهای ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم فرض شده که در محفظه احتراق، احتراق کامل رخ می‌دهد. در حالیکه عملاً به دلیل واکنش شیمیایی ناقص درون محفظه احتراق، در محصولات احتراق مونواکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن تولید می‌گردند [۲۶].

تحلیل انرژی زیست محیطی یک سیستم تولید چندگانه بر اساس هزینه جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها صورت می‌گیرد. در این پژوهش، بررسی برای هزینه انتشار مونواکسیدکربن، دی اکسید کربن و اکسید نیتروژن انجام می‌شود.

$$C_{env} = m_{CO} C_{CO} + m_{NOx} C_{NOx} + m_{CO2} C_{CO2} \quad (21)$$

مقدار CO و NOx تولید شده در محفظه احتراق با دمای شعله آدیاباتیک متغیر است [۲۷]. مقدار دمای آدیاباتیک شعله از رابطه ۲۲ تعیین می‌گردد.

$$T_{pz} = A\sigma^a \exp(\beta(\sigma + \lambda)^2) \Pi^{\alpha} \theta^{\gamma} \psi^z \quad (22)$$

که مقادیر Π , θ , ψ به ترتیب دما و فشار بی بعد و نسبت اتم‌های هیدروژن به کربن هستند. مقادیر α^* , γ^* و z^* بر حسب تابعی از σ در روابط ۲۳-۲۵ بیان شده‌اند.

$$x^* = a_1 + b_1\sigma + c_1\sigma^2 \quad (23)$$

$$y^* = a_2 + b_2\sigma + c_2\sigma^2 \quad (24)$$

$$z^* = a_3 + b_3\sigma + c_3\sigma^2 \quad (25)$$

که A , β , σ , a_i , b_i , c_i از مرجع [۲۸] بدست می‌آیند. به منظور حل معادلات ترمودینامیکی، از نرم افزار EES استفاده شده است.

۳- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از محاسبات ارائه می‌شود. نتایج در دو حالت با و بدون زمین گرمایی ارائه شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی

به منظور تعیین صحت و درستی محاسبات صورت گرفته با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه و نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۵ ارائه شده است که بررسی‌ها نشان می‌دهد، مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد.

جدول ۵- نرخ هزینه سوخت و محصول اجزای مختلف

روابط کمکی	موازنه قیمت	نام جزء
$c_{17} = c_{18}$	$Z_{eco} + \dot{C}_3 + \dot{C}_{17} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{18}$	اکونومایزر
$c_{16} = c_{17}$	$Z_{eva} + \dot{C}_4 + \dot{C}_{16} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{17}$	اواپراتور
$c_{15} = c_{16}$	$Z_{sh} + Z_{geo} + \dot{C}_5 + \dot{C}_{15} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{16}$	سوپرهیتر
$c_6 = c_7$	$Z_{tur} + \dot{C}_6 = \dot{C}_7 + \dot{C}_{wt}$	توربین
$c_7 = c_8$ $c_9 = 0$	$Z_{dsh} + \dot{C}_7 + \dot{C}_9 = \dot{C}_8 + \dot{C}_{10}$	دی سوپرهیتر
$c_1 = c_8$ $c_{11} = 0$	$Z_{cond} + \dot{C}_8 + \dot{C}_{11} = \dot{C}_1 + \dot{C}_{12}$	کندانسور
$c_{23} = c_{24}$	$Z_{hx} + \dot{C}_2 + \dot{C}_{23} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{24}$	مبدل بازیافت
$c_{w,p} = c_{w,t}$	$\dot{Z}_p + \dot{C}_1 + C_{w,p} = \dot{C}_2$	پمپ
$c_{13} = c_{14}$	$Z_{el} + C_{w,el} + \dot{C}_{10} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{14}$	الکترولایزر
$c_{19} = 0$ $c_{21} = 0$	$Z_{RO} + Z_{pump,ro} + \dot{C}_{19} + C_{w,RO} = \dot{C}_{21} + \dot{C}_{22}$	آب‌شیرین کن

تعریف سوخت و محصول برای محاسبات راندمان انرژی در یک جزء منجر به تعریف جریان هزینه مربوط به سوخت و جریان هزینه مربوط به محصول برای سیستم می‌شود. هزینه متوسط واحد سوخت و محصول برای جزء k ام سیستم مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ تعیین می‌شود.

$$C_{F,k} = \frac{C_{F,k}}{E_{F,k}} \quad (17)$$

$$C_{P,k} = \frac{C_{P,k}}{E_{P,k}} \quad (18)$$

نرخ هزینه تخریب انرژی از تلفیق تعادل انرژی و تعادل هزینه بدست می‌آید.

$$C_{D,k} = C_{F,k} E_{D,k} \quad (19)$$

فاکتور انرژی-اقتصادی در هر جزء از رابطه ۲۰ بدست می‌آید.

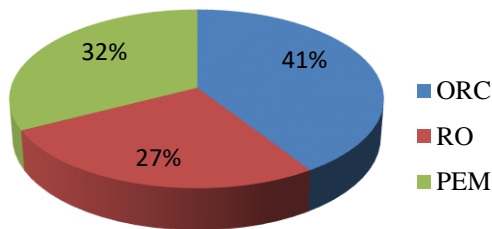
$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + C_{D,k}} \quad (20)$$

۳-۲- تحلیل زیست محیطی

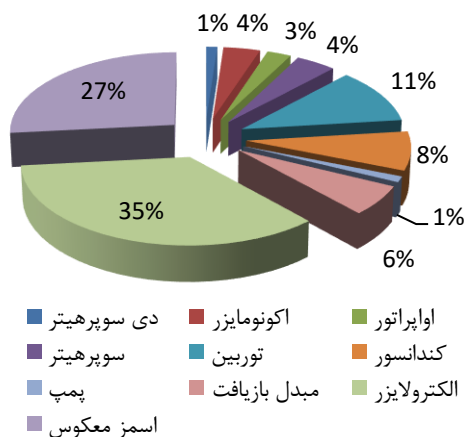
از آنجاکه حرارت بازیافتی به نوبه خود از احتراق سوخت نشأت گرفته است، به منظور بررسی میزان انتشار آلاینده‌ها در صورتی که از انرژی زمین گرمایی استفاده نشود و کل انرژی لازم توسط حرارت بازیافتی تامین شود، تحلیل زیست محیطی روی سیستم پیشنهادی صورت گرفته است. در مدل سازی

تخریب انرژی را دارد که علت آن وجود مبدل‌های حرارتی و اختلاف دمای جریان سرد و گرم است. بعد از سیکل ارگانیک رانکین، الکتروولایزر با مقدار ۳۲ درصد دومین واحد تخریب انرژی است. بالا بودن تخریب انرژی در الکتروولایزرها عمدتاً به علت فرآیند الکتروشیمیایی جهت تجزیه آب است که تخریب انرژی آن وابستگی زیادی به شدت تابع توان مصرفی و چگالی جریان الکتریکی دارد.

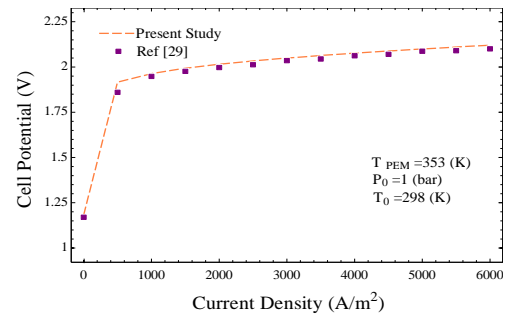
از آنجا که سیکل ارگانیک رانکین مورد بررسی، دارای اجزای زیادی است و علت بالا بودن تخریب انرژی این واحد نیز همین امر است، تعیین سهم هر یک از اجزا محاسبه شده و در شکل ۵، درصد تخریب انرژی هر یک نشان داده شده است.



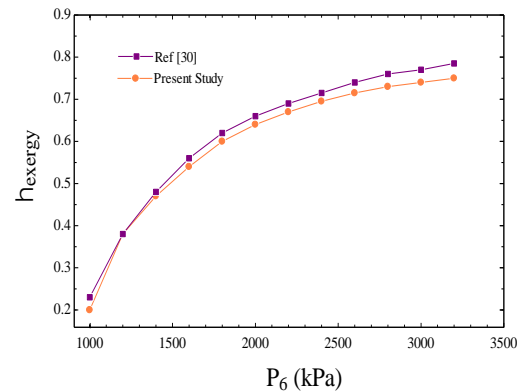
شکل ۴- درصد تخریب انرژی واحدهای مختلف سیستم



شکل ۵- درصد تخریب انرژی اجزای سیستم تولید همزمان



شکل ۲- نتایج مدل‌سازی تولید هیدروژن [۲۹]



شکل ۳- نتایج مدل‌سازی سیکل رانکین آلی [۳۰]

به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی آب شیرین کن، داده‌های ورودی مطابق مرجع [۳۱] در نظر گرفته شده و نتایج آن با کار حاضر مقایسه شده که در جدول ۶ ارائه شده است.

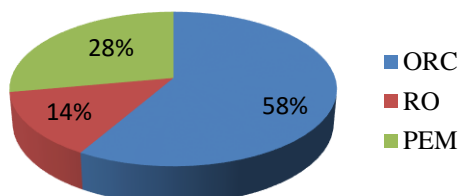
جدول ۶- نتایج مدل‌سازی تولید آب شیرین

متغیرها	پژوهش حاضر	مرجع [۳۱]
M_r (m ³ /hr)	۴۸۵/۹	۴۸۵/۹
M_b (m ³ /hr)	۳۴۰/۱	۳۴۰/۱
X_d (ppm)	۲۵۲	۲۵۰
X_b (ppm)	۶۴۱۸۰	۶۴۱۸۰
\dot{W}_{HPP} (kW)	۱۱۱۸	۱۱۳۱

۲-۳- نتایج تحلیل انرژی-اقتصادی

تحلیل انرژی سیستم‌های انرژی به منظور تعیین میزان تخریب انرژی و بهبود آن است. شکل ۴، درصد تخریب انرژی هر بخش از سیستم را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، سیکل ارگانیک رانکین با مقدار ۴۱ درصد بیشترین سهم

سهام بخش‌های مختلف سیستم مورد بررسی در هزینه کل سیستم در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- سهم قسمت‌های مختلف سیستم در قیمت کل

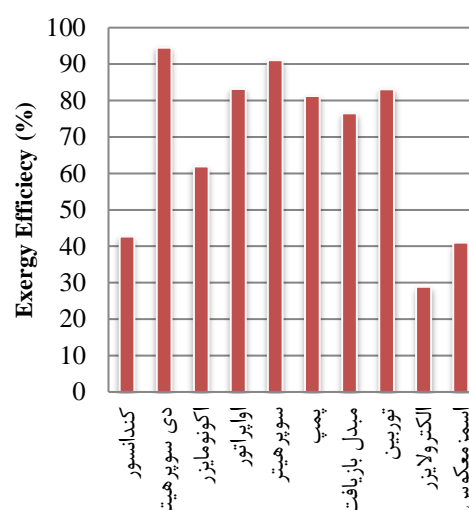
همانگونه که انتظار می‌رفت، نتایج بدست آمده از تحلیل اقتصادی به طور معمول نتایج تحلیل انرژی را تصدیق می‌نماید. سیکل ارگانیک رانکین از منظر اقتصادی دارای بیشترین تاثیرگذاری بوده و ۵۸ درصد سرمایه‌گذاری را شامل می‌شود. این درحالیست که بیشترین تخریب انرژی نیز مربوط به سیکل رانکین بود. پس از سیکل رانکین، الکترولیزر بیشترین اهمیت را از دیدگاه اقتصادی دارد.

در تحلیل اقتصادی، یکی از پارامترهای مهم تعیین فاکتور انرژی‌اقتصادی است. دلیل اهمیت این پارامتر پاسخ به این سوال است که بالا بودن هزینه جزء مربوط به بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری است یا بالا بودن نرخ تخریب انرژی آن جزء. در جدول ۸ مقدار فاکتور انرژی‌اقتصادی و در شکل ۸ درصد هریک از اجزای سیستم مورد بررسی نشان داده شده است. کمترین مقدار این پارامتر مربوط به الکترولیزر و برابر ۸/۳۹، بعد از آن واحد اسمز معکوس و برابر ۲۳/۵۴ درصد است. مقدار پائین فاکتور انرژی‌اقتصادی این اجزاء نشان دهنده این است که هزینه زیاد آنها ناشی از تخریب انرژی بالای این اجزاء و نه هزینه سرمایه‌گذاری آنها است؛ بنابراین با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری این اجزاء و ارتقای عملکردشان می‌توان هزینه کل سیستم را کاهش داد.

جدول ۸ - مقادیر فاکتور انرژی‌اقتصادی اجزای مختلف

توربین	مبدل باز یافت	کندانسور	دی سوپر هیتر	سوپر
۶۰/۱	۸۴/۳	۶۱/۵۵	۸۶/۶۹	۹۶/۴
اسمز معکوس	الکترولیزر	اکونومایزر	پمپ	اوپراتور
۲۳/۵۴	۸/۳۹	۹۴/۳۶	۲۶/۱	۹۷/۲۱

مطابق شکل ۵ بیشترین میزان تخریب انرژی برای الکترولیزر و برابر ۳۵ درصد بدست آمده است. پس از الکترولیزر، در بین اجزای سیستم، دستگاه اسمز معکوس دارای بیشترین میزان تخریب انرژی است که ۲۷ درصد میزان تخریب کل سیستم را به خود اختصاص داده است. شکل ۶ مقدار راندمان انرژی هر یک از اجزای سیستم مورد بررسی را نشان می‌دهد.

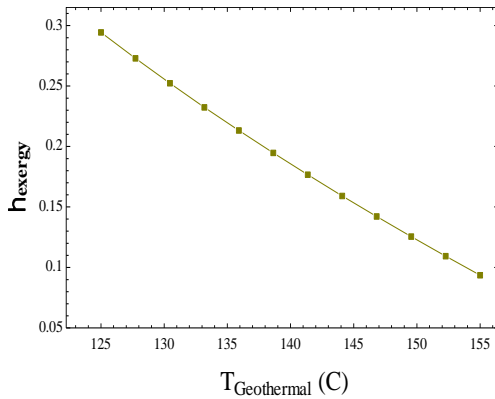


شکل ۶- راندمان انرژی اجزای مختلف سیستم

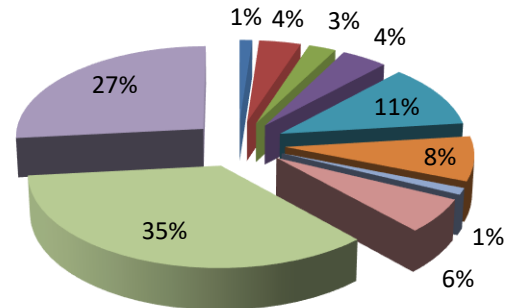
مطابق شکل ۶، بیشترین راندمان انرژی مربوط به دی سوپر هیتر و کمترین آن مربوط به الکترولیزر است. پائین بودن راندمان الکترولیزر باعث تخریب زیاد انرژی درون آن است. جدول ۷ مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۷ - پارامترهای عملکردی سیستم مورد بررسی

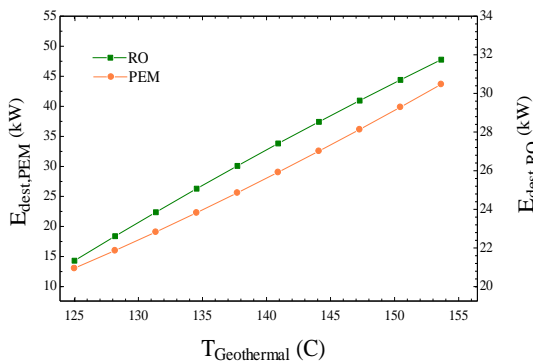
مقدار	نام متغیر
۶۴/۶۳	توان تولید توربین (kW)
۷/۳۸۳	توان پمپ (kW)
۲۵۹	حرارت دی سوپر هیتر (kW)
۲۵۸/۱	حرارت کندانسور (kW)
۱۲۹/۲	گرمای جذب شده در اوپراتور (kW)
۱۸۴/۶	گرمای باز یافت (kW)
۱/۵۷۸	هیدروژن تولیدی (lit/s)
۴/۱۵	آب شیرین تولیدی (kg/s)
۱۰/۳۹	راندمان انرژی سیستم تولید همزمان (%)



شکل ۹- تغییرات راندمان انرژی کل سیستم را با تغییرات دمای منبع زمین گرمایی



شکل ۸- فاکتور انرژی و اکونومیکی اجزای مختلف سیستم



شکل ۱۰- تاثیر دمای منبع زمین گرمایی با میزان تخریب انرژی واحدهای الکترولیزر و آب شیرین کن

بنابراین اگرچه با افزایش دمای منبع زمین گرمایی، مقدار توان خالص تولیدی و راندمان انرژی سیکل ارگانیک رانکین افزایش می‌یابد، ولی بخش زیادی از توان تولید شده در زیرسیستم‌های الکترولیزر و آب شیرین کن تخریب می‌گردد که همین امر سبب کاهش بازدهی انرژی کل سیستم با افزایش دمای منبع است.

شکل ۱۱ تغییرات دمای منبع زمین گرمایی را با میزان تولید هیدروژن و تولید آب شیرین نشان می‌دهد. با افزایش دمای منبع از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد، مقدار تولید هیدروژن از ۱/۲۵ به ۱/۶۷ لیتر بر ثانیه (۲۹ درصد) و مقدار تولید آب شیرین از ۳/۴۳ به ۴/۳۲ کیلوگرم بر ثانیه (۱۷ درصد) افزایش پیدا می‌کند.

۳-۳- مطالعه پارامتریک

در این بخش، تاثیر تغییر دمای منبع زمین گرمایی و میزان حرارت بازیافتی در عملکرد ترمودینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۹ تغییرات بازدهی انرژی کل سیستم را با تغییرات دمای منبع زمین گرمایی نمایش می‌دهد. مطابق شکل مذکور، با افزایش دمای منبع زمین گرمایی از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد، میزان بازدهی انرژی کل سیستم از ۰/۲۹ به ۰/۰۹ کاهش می‌یابد. در توجیه این نتیجه لازم است، بیان شود که اگرچه با افزایش دمای منبع، مقدار توان خالص خروجی سیکل ارگانیک رانکین افزایش می‌یابد و عملکرد سیکل رانکین ارتقا پیدا می‌کند، ولی مقدار تخریب انرژی واحدهای الکترولیزر و اسمز معکوس با افزایش دمای منبع از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد به ترتیب از ۱۳/۰۷ به ۴۳/۶۶ کیلووات و ۲۱/۳۴ به ۳۱/۷۵ کیلووات افزایش می‌یابد. تغییرات میزان تخریب انرژی این دو واحد با دمای منبع زمین گرمایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۲، با افزایش دبی سوخت ورودی از ۰/۰۰۳۷ تا ۰/۰۱۲ کیلوگرم بر ثانیه، مقدار انتشار دی اکسیدکربن ۰/۰۰۱۶ تا ۰/۰۰۵ کیلوگرم بر ثانیه و ضریب کلی انتشار آلاینده‌ها از ۰/۰۰۱۷ تا ۰/۰۰۰۵۶ دلار بر کیلوگرم افزایش می‌یابد؛ همچنین مقدار دی اکسیدکربن تولید شده و ضریب آلاینده‌ها در حالت بدون منبع زمین گرمایی به میزان ۶۹ درصد افزایش داشته است.

جدول ۹ مقایسه‌ای بین نتایج سیکل حاضر و پژوهش جلیلی [۳۲] را نشان می‌دهد که سیکل پیشنهادی مورد بررسی دارای راندمان انرژی و توان تولیدی بالاتری است. علت این امر، استفاده از مبدل‌های حرارتی بیشتر است که میزان تخریب انرژی سیستم را کاهش داده و سبب افزایش راندمان می‌شود.

جدول ۹- مقایسه عملکرد سیکل حاضر با سیکل قبلی

سیکل پیشنهادی	دمای زمین گرمایی (C)	توان خالص (kW)	راندمان سیستم (%)
پژوهش حاضر	۱۵۵	۶۴/۶۳	۱۰/۳۹
کار جلیلی [۳۲]	۱۷۰	۴۹/۷۸	۹/۹۶

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک سیستم تولید همزمان توان، هیدروژن و آب شیرین با منبع انرژی زمین گرمایی و حرارت بازیافتی مورد تحلیل انرژی، اقتصادی و محیط زیستی قرار گرفت که به مهمترین نتایج بدست آمده اشاره می‌شود.

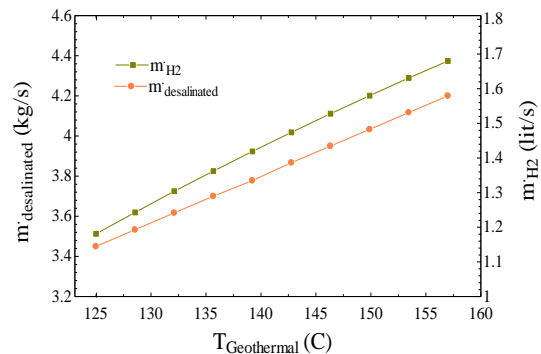
۱- بیشترین مقدار تخریب انرژی کل سیستم مربوط به الکترولیزر و برابر ۳۵٪ در سیکل رانکین آلی برای توربین و برابر ۱۱ درصد (بر اساس شکل ۵) بدست آمد.

۲- سیکل رانکین آلی دارای بیشترین هزینه کل و برابر ۵۸٪ و بعد از آن الکترولیزر با ۲۸٪ است.

۳- کمترین مقدار فاکتور انرژی و اکونومیک مطابق جدول ۴، مربوط به الکترولیزر و برابر ۸/۳۹، بعد از آن مربوط به واحد اسمز معکوس و برابر ۲۳/۵۴ درصد است.

۴- با افزایش دمای منبع از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد، مقدار راندمان انرژی کل سیستم از ۰/۲۹ به ۰/۰۹ کاهش می‌یابد.

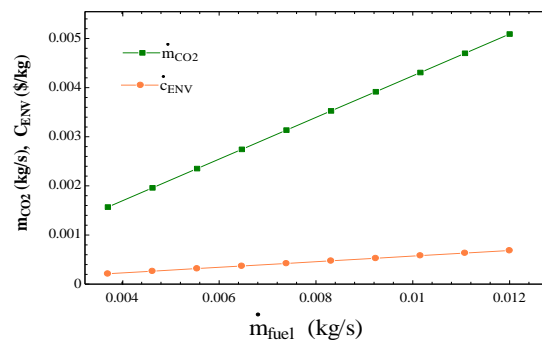
۵- با افزایش دمای منبع از ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه سانتیگراد، مقدار تولید هیدروژن از ۱/۲۵ به ۱/۶۷ لیتر بر ثانیه و مقدار تولید آب شیرین از ۳/۴۳ به ۴/۳۲ کیلوگرم بر ثانیه



شکل ۱۱- تغییرات دمای منبع زمین گرمایی با میزان تولید هیدروژن و تولید آب شیرین

۳-۴- تحلیل سیستم بدون منبع زمین گرمایی

بخش زیادی از انرژی مورد نیاز سیال عامل سیستم مورد بررسی توسط منبع زمین گرمایی تامین می‌شود و در صورت عدم استفاده از آن و تامین کل انرژی توسط حرارت بازیافتی آلاینده‌هایی (به صورت غیرمستقیم) به محیط زیست وارد می‌شود، شکل ۱۲ تاثیر استفاده از منبع زمین گرمایی جهت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. در صورت عدم استفاده از انرژی زمین گرمایی، کل انرژی لازم برای مبدل‌های حرارتی اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر توسط حرارت بازیافتی تامین شده و مقدار سوخت گاز طبیعی مورد نیاز برابر ۰/۰۱۲ kg/s بدست آمده است که به تبع آن میزان تخریب انرژی مبدل بازیافت و مقدار انتشار دی اکسیدکربن و در نهایت ضریب انتشار آلاینده‌ها (C_{env}) افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن ۵۰۴۸ kJ/kg ارزش حرارتی سوخت گاز طبیعی، مقدار دبی سوخت در دو حالت محاسبه و میزان انتشار آلاینده‌ها محاسبه شده است.



شکل ۱۲- تاثیر افزایش دبی سوخت بر میزان انتشار آلاینده‌ها

کیلوگرم بر ثانیه، مقدار انتشار دی اکسید کربن ۰/۰۰۱۶ تا ۰/۰۰۵ کیلوگرم بر ثانیه و ضریب کلی انتشار آلاینده‌ها از ۰/۰۰۱۷ تا ۰/۰۰۵۶ دلار بر کیلوگرم افزایش می‌یابد.

۶- (شکل ۱۱) افزایش و از طرفی میزان تخریب اگزرژی این دو واحد نیز افزایش می‌یابد.

۷- در صورت عدم استفاده از منبع زمین گرمایی، با افزایش دبی سوخت ورودی از ۰/۰۰۳۷ تا ۰/۰۱۲

۵- نمادها

حروف یونانی		A	سطح (m ²)
راندمان	η	C	هزینه جریان (\$/s)
اگزرژی شیمیایی (kW)	Ψ	C _{env}	ضریب انتشار آلاینده‌ها (\$/kg)
آب موجود در سطح غشاء کاتد و آند (Ω^{-1})	λ	CRF	ضریب بازگشت سرمایه
ضریب هزینه تعمیر و نگهداری	φ	D _{sh}	دی سوپرهیتر
زیر نویس‌ها		\dot{E}_x	آهنگ اگزرژی (kW)
ورودی	i	$\dot{E}_{x,D}$	نرخ تخریب اگزرژی (kW)
خروجی	e	E _{va}	اواپراتور
شرایط محیط	0	E _{co}	اکونومایزر
		E _{act,i}	انرژی فعالسازی کاتد و آند (kJ)
		F	ثابت فارادی (C/mol)
		h	آنتالپی (kJ/kg)
		J	چگالی جریان (A/m ²)
		m _k	دبی جرمی عبوری از جزء k (kg/s)
		\dot{M}_d	دبی آب شیرین (kg/s)
		\dot{M}_f	دبی آب تغذیه (kg/s)
		\dot{N}	دبی مولی (mol/s)
		ORC	چرخه رانکین آلی
		PEM	الکترولایزر غشاء پروتونی
		R	ثابت جهانی گازها (kJ/kg.K)
		RO	اسمز معکوس
		RR	نسبت بازیابی غشاء
		R _{PEM}	مقاومت مبادله کن غشاء پروتونی (W)
		s	آنتروپی (kJ/kg.K)
		Sh	سوپرهیتر
		T	دما (C)
		V ₀	پتانسیل برگشت پذیر (V)
		V _{act,i}	پتانسیل فعالسازی کاتد و آند (V)
		W _{net}	کار خالص تولیدی (kW)
		Z _k	سرمایه اولیه خرید تجهیزات

- nologies for off shore platforms”. *Appl Energy*;136, pp. 228-41.
- [12] Girgin I, Ezgi C, (2017). “Design and thermodynamic and thermoeconomic analysis of an organic Rankine cycle for naval surface ship applications”. *Energy Convers Manage*,148, pp. 623-634.
- [13] Zhu, X, Zhan, X, Liang, H, Zheng, X, Qiu, Y, Lin, J, Zhao, Y. (2020) The optimal design and operation strategy of renewable energy-CCHP coupled system applied in five building objects. *Renew. Energy* 146, 2700-2715.
- [14] Shokati N., Ranjbar F., Yari M. (2015) Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined cycles based on exergoeconomic criteria, *Appl. Therm. Eng.*, 91, pp. 479-495.
- [15] Poulomi Sannigrahi, Arthur J. Ragauskas, Gerald A. Tuskan. (2010) Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics”, *Biofuels, Bioprod, Bioref*, 209-226.
- [16] Ni M, Leung MK, Leung DY. (2008) Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy Convers Manag*, Vol. 49, pp. 2748-56.
- [17] Nafey A, Sharaf M. (2010) Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: energy, exergy, and cost evaluations. *Renew Energy*, Vol. 35, No 11, pp. 2571-2580.
- [18] H. Nami, A. Nemati, F.J. Fard, (2017) Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC), *Appl. Therm. Eng.* 122, 59–70.
- [19] Fahad A. Al-Sulaiman, Ibrahim Dincer, Feridun Hamdullahpur, (2012) Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle”, *Energy* 45: 975-985.
- [20] A. Nemati, H. Nami, and M. Yari, (2018) Assessment of different configurations of solar energy driven organic flash cycles (OFCs) via exergy and exergoeconomic methodologies, *Renew. Energy*, vol. 115, pp. 1231–1248.
- [21] Hoseyn. Sayyaadi, Reza. Mehrabipour, (2012) Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger, *Energy*, 38; 362-375.
- [22] Ahmadi, Pouria, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen. (2012). Exergoenvironmental analysis of an integrated organic Rankine cycle for trigeneration. *Energy Convers Manag*, 64: 447–453.
- [23] Nafey A, Sharaf M (2010). Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination
- ۶- مراجع**
- [1] Razmi A, Soltani M, Torabi M. (2019) Investigation of an efficient and environmentally-friendly CCHP system based on CAES, ORC and compression absorption refrigeration cycle: energy and exergy analysis. *Energy Convers Manag*; 195:1199e211.
- [2] Guoquan Qiu, Yingjuan Shao, Jinxing Li, Hao Liu, Saffa .B. Riffat, (2012) Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications”, *Fuel*, 96: 374–382.
- [۳] ح. امامی، ا.جعفری، شناسایی مناطق مستعد زمین گرمایی سطحی با ترکیب دمای سطح و فلوهای انرژی حاصل از روش سیبال. نشریه علوم و فنون نقشه برداری، ص ۴۴-۲۵، ۱۳۹۶.
- [۴] ش.متین، م.کریمزاده، پ.قصابی، کاربردها و مزیت‌های انرژی زمین گرمایی. دومین همایش انرژی‌های نو و پاک، ۱۳۹۲.
- [5] Ratlamwala T, Dincer I. (2012) Comparative efficiency assessment of novel multi-flash integrated geothermal systems for power and hydrogen production. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 48, pp. 359-66.
- [6] Yilmaz C, Kanoglu M, Bolatturk A, Gadalla M. (2012) Economics of hydrogen production and liquefaction by geothermal energy. *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 37, pp. 2058-69.
- [7] J. Wang, Y. Dai, and L. Gao, (2009) "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 941-948.
- [8] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, (2013) "Technoeconomic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems," *Renewable Sustainable Energy Rev*, vol. 22, pp. 168-186.
- [9] Song J, Song Y, Gu C, (2015). “Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines”. *Energy*;82, pp. 976-85.
- [10] Larsen U, Sigthorsson O, Haglind F, (2014). “A comparison of advanced heat recovery power cycles in a combined cycle for large ships”. *Energy*,74, pp. 260-8.
- [11] Pierobon L, Benato A, Scolari E, Haglind F, Stoppato A, (2014). “Waste heat recovery tech-

- [29] Ahmadi, P., I. Dincer, and M.A. Rosen, (2013) Performance assessment and optimization of a novel integrated multigeneration system for residential buildings. *Energy and Build.* 67: p. 568-578.
- [30] M. Leveni, G. Manfrida, R. Cozzolino and B. Mendecka, (2019) Energy and exergy analysis of cold and power production from the geothermal reservoir of torre alfina. *Energy.* P 807-818.
- [31] Nafey A, Sharaf M. (2010) Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process:energy,exergy and cost evaluations. *Renew. Energy*, Vol. 35, No 11, pp. 2571-2580.
- [32] Jalilinasraby S., Ryuichi I., (2012) Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept, Elsevier, *Geothermics*, 43, pp. 75-82.
- process:energy,exergy and cost evaluations. *Renew Energy*, Vol. 35, No 11, pp. 2571-2580.
- [24] Ahmadi, P., I. Dincer, and M.A. Rosen, (2014) Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system. *J. Sol. Energy.* 108: p. 576-591.
- [25] Pashapur, M. Jafarmadar, S. Khalilarya, Sh. (2021) Energy,exergy and exergoeconomic analyses of a novel three-generation system to produce power, heat and distilled water. *Int J. Exergy*, Vol. 35, No. 4.
- [26] Ahmadi, Pouria, Marc A. Rosen, Ibrahim Dincer. (2011) Greenhouse gas emission and exergo-environmental analyses of a trigeneration energy system. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 5: 1540-49.
- [27] Gu'lderO' L (1986) Flame temperature estimation of conventional and future jet fuels. *J. Eng. Gas Turb Power*, 108: 376-380.
- [28] Dincer, I., M.A. Rosen. (2007) *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development.* Elsevier.