

تحلیل ترمودینامیکی (انرژی و انگرژی) یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر ترموالکتریک جهت بازیافت گرما از سرباره مذاب در صنعت فولاد

مرتضی سعادت طرقي*
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران،
msaadat@esfarayen.ac.ir

امین نباتی
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران،
amin459@yahoo.com

چکیده

امروزه استفاده از ترموالکتریک به عنوان یکی از روش‌های بازیافت انرژی گرمایی اتلافی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق ضمن ارائه یک سیستم جدید بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره مذاب صنعت فولاد، آنالیز ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی از دیدگاه انرژی و انگرژی نیز ارائه گردیده است. سپس تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضریب سیبک بر عملکرد سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی در دو حوزه چرخه توان و ترموالکتریک، با تحقیقات پیشین اعتبارسنجی گردیده‌اند. نتایج تحلیل ترمودینامیکی نشان می‌دهد که بیشترین سهم در نابودی انگرژی سیستم پیشنهادی، مربوط به سیستم بازیافت گرما می‌باشد. مطابق نتایج، سهم توان تولیدی سیستم بازیافت گرما از توان تولیدی کل حدود ۴۹٪ می‌باشد و راندمان قانون اول ترمودینامیک برای سیستم پیشنهادی ۲۴/۷٪ و راندمان قانون دوم ترمودینامیک برابر با ۲۲/۸۸٪ می‌باشند. ارزیابی اقتصادی نشان می‌دهد که به ازای قیمت ترموالکتریک ۱ \$/W زمان بازگشت سرمایه کمتر از ۲ سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرباره، سیستم بازیافت گرما، ترموالکتریک، نابودی انگرژی، راندمان، ضریب سیبک.

Thermodynamic Analysis (Energy and Exergy) of a Proposed Thermoelectric Based System for Heat Recovery from Molten Slag in the Steel Industry

M. Saadat-Targhi

Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

A. Nabati

Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

Abstract

Nowadays, the use of thermoelectric as one of the methods of recovering waste heat energy has received much attention. In this research, while presenting a new thermal energy recovery system in the molten slag of steel Industry, thermodynamic analysis of the proposed system from the perspective of energy and exergy is also presented. Then the effect of various parameters including Seebeck coefficient on the performance of the proposed system is investigated. The results of modeling in both power cycle and thermoelectric cycles have been validated by previous research. The results of thermodynamic analysis show that the largest contribution to the exergy destruction of the proposed system is related to the heat recovery system. According to the results, the production capacity of the heat recovery system from the total production capacity is about 49% and the efficiency of the first law of thermodynamics for the proposed system is 24.7% and the efficiency of the second law of thermodynamics is 32.88%. Economic analysis indicates that with thermoelectric generator cost of 1 \$/W the payback rate of investment is less than 2 years.

Keywords: Slag, Heat recovery system, Thermoelectric, Exergy destruction, Efficiency, Seebeck coefficient.

۱-۱- روش‌های مختلف بازیافت گرما از سرباره

یکی از اولین پیشنهادها ارائه شده جهت بازیافت گرمای سرباره توسط مهندسی سوندی ارائه گردیده است [۱]. در این سیستم پیشنهادی سرباره مذاب توسط سرباره‌های جامد، به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم شده و انتقال گرما از طریق هوا صورت می‌گیرد. هوای داغ نهایتاً وارد یک جوش‌آور شده و برق تولید می‌شود. سیستم پیشنهادی دیگری توسط یک شرکت فولاد ژاپنی ارائه گردیده است [۲]. در این روش عمل هم زدن و خرد شدن توسط یک میله انجام می‌گیرد و مکانیزم غالب انتقال گرما، تابش و رسانش به سیال آب می‌باشد. سیستم دیگری مشابه سیستم قبل ارائه گردیده است با این تفاوت که هم زدن توسط پره‌های چرخان صورت می‌گیرد [۳]. در انواع دیگری از سیستم‌های بازیافت گرمای سرباره، عمل خرد کردن سرباره مذاب توسط

۱- مقدمه

سرباره کوره ذوب کارخانه‌های فولاد یک محصول جانبی می‌باشد که در فرآیند تولید آهن به دست می‌آید. این سرباره شامل ناخالصی‌های سنگ آهن و سنگ آهک می‌باشد. سرباره مذاب در دمای حدود ۱۶۵۰ درجه سلسیوس مقدار زیادی انرژی گرمایی دارد که می‌تواند بخشی از آن طی فرآیندی بازیافت گردد. با توجه به اینکه حدود ۱۰ درصد انرژی کل تولیدی در جهان توسط کارخانه‌های فولاد مصرف می‌شوند [۱]، اهمیت بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره مشهود می‌باشد. در ادامه به انواع روش‌هایی که تاکنون برای بازیافت انرژی گرمایی از سرباره ارائه گردیده پرداخته می‌شود.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: Msaadat@esfarayen.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۰۸

گلتک دوار صورت می‌گیرد. برای اولین بار یک شرکت ژاپنی این سیستم را ارائه نمود [۲]. سپس یک شرکت ژاپنی دیگر استفاده از دو غلطک را جهت بهبود عملکرد پیشنهاد نمود [۲]. لازم به ذکر است که روش‌های ذکر شده در فوق تماماً بر اساس هم زدن مکانیکی می‌باشند که با توجه به هزینه‌های بالای راه‌اندازی و بهره‌برداری و عدم وجود تقاضا برای سرباره دانه‌بندی شده، هیچ کدام کاربرد تجاری نداشته‌اند.

استفاده از جریان هوا با سرعت زیاد جهت خرد کردن سرباره برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ پیشنهاد گردیده است که معروف به روش دمیدن هوا است [۴]. در این روش جریان هوا با سرعت زیاد به سرباره مذاب برخورد کرده و آن را پخش می‌کند. بعدها این روش کمی توسعه پیدا کرد [۲] ولی همچنان به دلیل پیچیدگی تجهیزات و مصرف زیاد انرژی، مورد استفاده تجاری قرار نگرفت. همچنین نیاز به سرباره با سیالیت خوب شرط اولیه برای این نوع سیستم‌ها است که عمدتاً در کارخانه‌های فولاد مخصوصاً در کارخانه‌های فولاد ایران امکان پذیر نمی‌باشد و معمولاً ذرات جامد و ذوب نشده همراه سرباره وجود دارد.

فناوری دیگری که در بحث بازیافت انرژی گرمایی سرباره ارائه گردیده است، استفاده از نیروی گریز از مرکز جهت دانه‌بندی سرباره می‌باشد. در یکی از این سیستم‌ها، سرباره مذاب داخل یک جام دوار ریخته شده و با چرخش جام با استفاده از نیروی گریز از مرکز، ذرات سرباره پخش می‌شوند [۵]. فرایند مشابه دیگری نیز ارائه گردیده است که در لبه جانبی جام چند خروجی هوا تعبیه شده که علاوه بر نیروی گریز از مرکز، جریان هوا نیز بر بازیافت گرما کمک می‌نماید [۶]. در یک سیستم دیگر که باز هم مشابه سیستم قبل است، به جای جام از یک دیسک دوار استفاده شده است که کنترل در اندازه دانه‌های سرباره، مهمترین مزیت این روش می‌باشد [۷]. همچنین در نوع مشابهی از این سیستم، به جای دیسک از یک سیلندر دوار استفاده گردیده است [۸]. این روش نیز در سایزبندی دانه‌های سرباره بسیار با دقت عمل می‌نماید. در مجموع وجود پیچیدگی در تجهیزات و هزینه اولیه و نگهداری زیاد و نیاز به سرباره کاملاً مذاب و یکنواخت همچنان باعث شده است که این سیستم‌ها نیز در مقیاس آزمایشگاهی باقی بمانند و مورد استفاده تجاری قرار نگیرند.

۲-۱- استفاده از ترموالکتریک‌ها در بازیابی گرمای اتلافی

امروزه استفاده از مواد ترموالکتریک که قابلیت تولید برق از گرما به شکل مستقیم را دارند، بسیار رایج گردیده است. دلیل استقبال از این نوع سیستم‌های تولید برق، عدم داشتن قطعات متحرک، هزینه بهره‌برداری پایین، طول عمر بالا و بهره‌برداری بدون سروصدا می‌باشند. البته بزرگترین مشکل آنها راندمان پایین است که پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نه چندان دور با استفاده از روش‌های نوین، این مشکل نیز برطرف گردد. تولید برق با استفاده از ترموالکتریک یکی از سه پتانسیل برتر تولید برق در قرن ۲۱ می‌باشد [۹]. از ترموالکتریک‌ها در سیستم‌های بازیافت گرما^۱ (WHRS) در صنایع مختلف مانند حمل و نقل، تولید برق مصرفی حسگرهای کوچک و همچنین تبدیل انرژی خورشیدی به برق استفاده می‌شود [۱۰].

¹ Waste heat recovery systems

در یکی از آخرین تحقیقات مربوط به استفاده از ترموالکتریک‌ها در بازیافت گرمای اتلافی خودرو، لئو و همکاران [۱۱] یک مدل عددی به منظور بازیافت گرمای اتلافی اگزوز خودرو ارائه نمودند. همچنین سنگ و همکاران [۱۲] با استفاده از ترموالکتریک‌ها توانستند گرمای اتلافی از یک پیل سوختی را مجدداً مورد استفاده قرار دهند. بهبود عملکرد یک چرخه ارگانیک با گرمای اتلافی به کمک ترموالکتریک توسط علی‌احمدی و همکاران [۱۳] گزارش گردیده است. آنالیز انرژی و اگزوزی سطح مدول‌های ترموالکتریک جهت بازیافت گرما هدر رفته گازهای احتراقی توسط قریشی و همکاران [۱۴] ارائه گردیده است. از دیگر تحقیقات مرتبط با استفاده از ترموالکتریک‌ها، تحلیل ترموآکونومیک و بهینه سازی چندهدفه یک سیستم راندمان بالا بر مبنای چرخه‌های توربین گاز و رانکین مجهز به ترموالکتریک می‌باشد که توسط نوربخش و همکاران [۱۵] ارائه گردیده است. آنالیز اگزوزی و انرژی همواره به منظور ارزیابی عملکرد سیستم‌های ترمودینامیکی مهم می‌باشد. به عنوان نمونه آنالیز انرژی و اگزوزی یک چرخه پیشنهادی به منظور تولید توان، هیدروژن و آب شیرین توسط عبدالعلی پورعدل و همکاران [۱۶] گزارش گردیده است. همچنین در تحقیق دیگری یک مطالعه اقتصادی-اگزوزی بر روی یک چرخه جدید پیشنهادی برای نیروگاه زمین گرمایی سیلان انجام گردیده است [۱۷].

طبق بررسی نویسندگان مقاله حاضر تنها دو تحقیق با موضوع استفاده از ترموالکتریک‌ها در بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره کارخانه‌های فولاد ارائه گردیده است. در تحقیق اول منگ و همکاران [۱۸] به مدل سازی ترموالکتریک‌های موجود در یک کانال یک طرفه پرداخته‌اند و تأثیر پارامترهای مختلف دمای آب داغ، طول کانال و خصوصیات ترموالکتریک‌ها را بر عملکرد ترموالکتریک‌ها بررسی نمودند. در این تحقیق دمای آب داغ ورودی به کانال ترموالکتریک معلوم در نظر گرفته شده است و اشاره‌ای مبنی بر اینکه چگونه این آب داغ انرژی را از سرباره می‌گیرد نشده است. در تحقیق دوم [۱۹] که توسط محققین تحقیق اول انجام شده است، نتایج برای یک کانال دوطرفه ارائه شده است و عدم ارائه یک سیستم که نحوه تبادل انتقال گرما بین آب و سرباره را نشان دهد، همچنان مشهود می‌باشد.

۳-۱- اهداف و نوآوری

همانطور که در بخش مروری بر مقالات تشریح گردید تمامی روش‌های ارائه شده جهت بازیافت انرژی گرمایی از سرباره با توجه به پیچیدگی تجهیزات و قیمت تمام شده بالا و نیاز به سرباره مذاب یکنواخت تاکنون مورد استفاده تجاری قرار نگرفته‌اند. همچنین هیچ گونه مدلسازی ترمودینامیکی مبتنی بر آنالیز انرژی و اگزوزی برای هیچ کدام از روش‌ها، مشاهده نگردیده است. با توجه به مزیت‌های رو به رشد استفاده از ترموالکتریک‌ها در سیستم‌های بازیافت گرما، تحقیقاتی درباره استفاده از این سیستم‌ها در بازیافت انرژی گرمایی سرباره گزارش شده است که در هیچ کدام، در مورد خود سیستم بازیافت گرما و نحوه عملکرد آن اطلاعاتی گزارش نگردیده است. بنابراین نوآوری تحقیق حاضر را می‌توان در تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر استفاده از ترموالکتریک‌ها در بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره کارخانه‌های فولاد، دانست. همچنین ارزیابی اقتصادی سیستم پیشنهادی با هدف دستیابی به نرخ بازگشت سرمایه انجام گردیده است. در مقاله

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (2)$$

$$\dot{E}_{heat} - \dot{W} = \sum \dot{E}_{out} - \sum \dot{E}_{in} + \dot{E}_D \quad (3)$$

که در آن \dot{Q} ، \dot{W} ، \dot{m} و h به ترتیب نرخ گرمای ورودی، نرخ کار خروجی، دبی جرمی و آنتالپی می‌باشند. همچنین \dot{E}_D نرخ نابودی انرژی و \dot{E}_{heat} نرخ انتقال انرژی به وسیله انتقال گرما و در دمای ثابت T می‌باشند که از معادله زیر بدست می‌آید [۲۰].

$$\dot{E}_{heat} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (4)$$

که در آن زیرنویس 0 به معنای شرایط حالت مرده می‌باشد. شرایط مرده در جدول ۵ تعیین گردیده‌اند.

فرضیات در نظر گرفته شده در فرآیند مدل‌سازی ترمودینامیکی عبارتند از:

- ❖ از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شده است.
- ❖ از افت فشار داخل مبدل‌های گرما و لوله‌های ارتباطی صرف‌نظر شده است.

❖ تمامی فرآیندها در حالت پایا هستند.

- ❖ راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ ثابت در نظر گرفته شده است.
- ❖ دمای سطح خارجی لوله سرامیکی و دمای سمت گرم لوله TEG داخل سیستم بازیافت گرما، ثابت در نظر گرفته شده است (میانگین دمای ورودی و خروجی برای هر دو لوله).
- ❖ فضای بین لوله سرامیکی و سمت گرم لوله TEG، خلاء فرض گردیده است.

مطابق روابط ارائه شده، معادلات بقاء انرژی و انرژی برای هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی اعمال و در جدول ۱ ارائه گردیده است. معادلات موجود در جدول ۱ مربوط به آنالیز انرژی و انرژی سیستم پیشنهادی می‌باشند.

به منظور ارزیابی عملکرد ORC سیستم پیشنهادی، راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک مربوط به ORC مطابق رابطه زیر تعریف شده است:

$$\eta_{I,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{Q}_E} \quad (5)$$

$$\eta_{II,ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{E}_{in,ORC}} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{m}_5 [(h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0)]} \quad (6)$$

حاضر تلاش شده است که با ارائه یک سیستم جدید مبتنی بر ترموالکترونیک بخشی از انرژی گرمایی موجود در سرباره را به برق تبدیل نمود. سادگی این روش و عدم نیاز به سرباره مذاب یکنواخت مهم‌ترین تفاوت‌ها با سیستم‌های پیشنهادی قبلی می‌باشند. در این تحقیق، تحلیل ترمودینامیکی فرآیند پیشنهادی جهت بازیافت انرژی از سرباره مذاب، شامل آنالیز انرژی و انرژی نیز ارائه گردیده است.

۲- تحلیل ترمودینامیکی

۲-۱- تشریح سیستم پیشنهادی

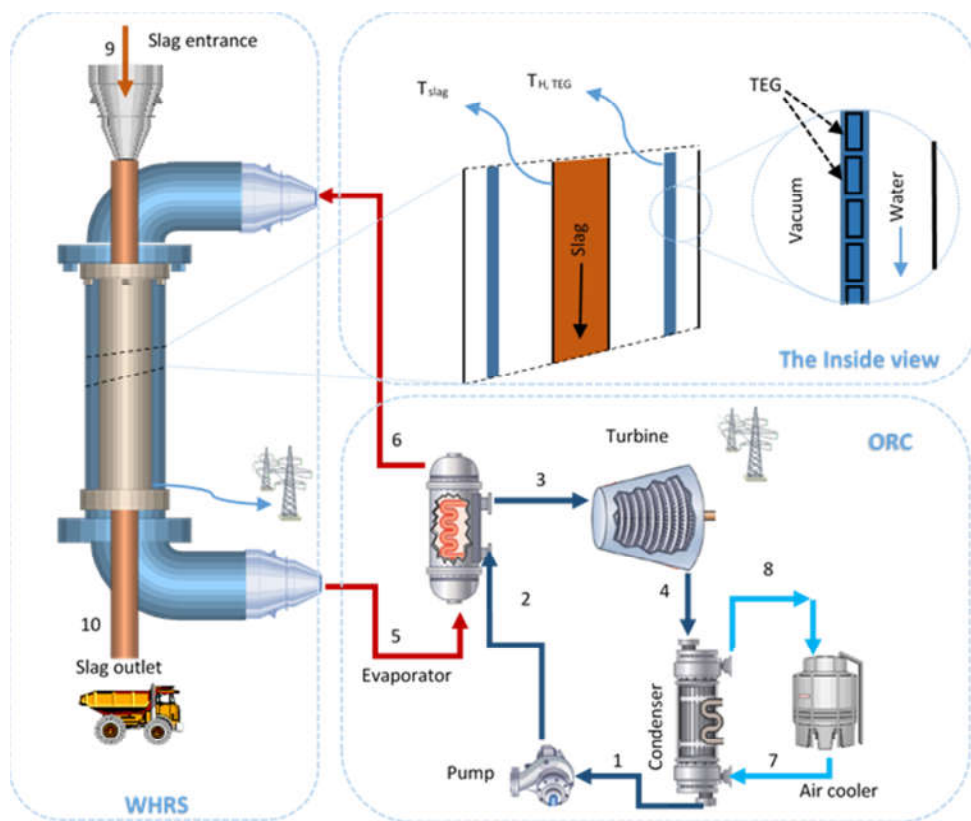
همانطور که در بخش قبل نیز اشاره گردید تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر استفاده از ترموالکترونیک‌ها در بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره، مهمترین نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد. شماتیک سیستم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم پیشنهادی از دو قسمت: WHRS و چرخه رانکین ارگانیک^۱ (ORC) تشکیل شده است. سرباره مذاب که یکنواخت بودن آن اهمیتی ندارد از طریق نقطه ۹ وارد WHRS می‌شود و پس از عبور از لوله سرامیکی از طریق نقطه ۱۰ به خارج سیستم منتقل می‌شود. لوله سرامیکی داخل یک لوله که مواد ترموالکترونیک روی آن نصب شده‌اند، قرار دارد. بین این دو لوله خلاء می‌باشد و تنها مکانیزم انتقال گرما، تابش است. دیواره خارج لوله ترموالکترونیک توسط آب احاطه شده و سبب می‌شود که دمای طرف سرد ترموالکترونیک پایین‌تر از دمای طرف داغ شود. این اختلاف دما سبب به وجود آمدن برق می‌شود. آب داغ از طریق نقطه ۵ وارد اوپرآتور شده و گرمای خود را به سیال عامل ORC می‌دهد و از طریق نقطه ۶ مجدداً به WHRS باز می‌گردد. سیال عامل ORC پس از دریافت انرژی در تبخیرکن و تبدیل شدن به بخار، وارد توربین شده و توربین را به چرخش در می‌آورد. خروجی توربین در نقطه ۴ وارد چگالنده شده و به شکل مایع از نقطه ۱ خارج می‌شود. عمل تبدیل بخار به مایع در چگالنده، توسط کولر هوایی انجام می‌گیرد. خروجی چگالنده وارد پمپ شده و پس از افزایش فشار سیال از طریق نقطه ۲ مجدداً وارد تبخیرکن شده و چرخه کامل می‌گردد. نکته حائز اهمیت این است که در سیستم پیشنهادی از دو طریق برق تولید می‌شود: اول در ترموالکترونیک موجود در WHRS و سپس در توربین ORC. در ادامه به مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی پرداخته شده است [۲۰].

۲-۲- مدل‌سازی ترمودینامیکی

در این بخش به مدل‌سازی سیستم پیشنهادی ارائه شده در بخش قبل، پرداخته شده است. در فرآیند مدل‌سازی هر یک از اجزاء به صورت یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است. اساس مدل‌سازی یک حجم کنترل معادلات بقاء جرم، انرژی و انرژی می‌باشد. این معادلات در شرایط پایا و با صرف‌نظر کردن از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل به شکل زیر می‌باشند [۲۰]:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

¹ Organic Rankine Cycle



شکل ۱- طرحواره سیستم پیشنهادی مربوط به بازیافت انرژی گرمایی موجود در سرباره کارخانه‌های فولاد با کاربرد مواد ترموالکتریک

این دو سطح، از معادله زیر استفاده گردیده است [۲۱].

$$Q_{WHRS} = \frac{2\pi R_s L \sigma (T_{cp}^4 - T_{h,TEG}^4)}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1 - \epsilon_h}{\epsilon_h} \left(\frac{R_s}{R_h} \right)} \quad (10)$$

که در آن ϵ_s ، R_s بترتیب ضریب صدور و شعاع لوله سرامیکی، $T_{h,TEG}$ ، ϵ_h ، R_h بترتیب دمای سطح گرم، ضریب صدور و شعاع لوله TEG می‌باشند. لازم به ذکر است که σ ثابت استفان-بولتزمن و برابر $\sigma = 5.670400 \times 10^{-8} \text{ (J/s}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}\text{)}$ می‌باشد.

جهت محاسبه راندمان ترموالکتریک‌های موجود در TEG رابطه زیر ارائه گردیده است [۲۲]:

$$\eta_{TEG} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h} \right) \left(\frac{\sqrt{1 + ZT_{ave}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{ave}} + \frac{T_c}{T_h}} \right) \quad (11)$$

که در آن T_c ، T_h ، Z و T_{ave} بترتیب دمای سطح سرد ترموالکتریک، دمای سطح گرم ترموالکتریک، میانگین دمای سطح سرد و گرم و نهایتاً ضریب سیبک می‌باشند. همچنین معادله دیگری برای تعریف راندمان ترموالکتریک‌ها تعریف می‌شود:

$$\eta_{TEG} = \frac{\dot{W}_{WHRS}}{Q_{WHRS}} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که $\dot{W}_{net,ORC}$ کار خالص ORC می‌باشد. همچنین به منظور بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی و مشاهده تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم، راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیکی برای سیستم پیشنهادی مطابق زیر تعریف گردیده است:

$$\eta_{I,PS} = \frac{\dot{W}_{net,ORC} + \dot{W}_{WHRS}}{Q_{WHRS}} \quad (7)$$

$$\eta_{II,PS} = \frac{\dot{W}_{net,ORC} + \dot{W}_{WHRS}}{\dot{E}_{in,sys}} = \frac{\dot{W}_{net,ORC} + \dot{W}_{WHRS}}{\dot{m}_0 [(h_0 - h_0) - T_0 (s_0 - s_0)]} \quad (8)$$

که در آن \dot{W}_{WHRS} توان خروجی از ترموالکتریک‌های نصب شده در سیستم بازیافت گرما، می‌باشد.

جهت مدل‌سازی انتقال گرما بین سرباره و دیواره خارجی لوله سرامیکی با در نظر گرفتن دیواره لوله از معادله زیر استفاده می‌شود [۲۱]:

$$Q_{WHRS} = \frac{T_{slag} - T_{cp}}{\frac{L}{2\pi R_s L k_{cp}}} \quad (9)$$

که در آن L طول سیستم بازیافت گرما، T_{slag} ، T_{cp} ، R_s ، k_{cp} بترتیب دمای سطح داخلی لوله سرامیکی که با دمای سرباره برابر فرض شده، دمای سطح بیرونی لوله سرامیکی، شعاع لوله سرامیکی و ضریب انتقال گرما رسانش لوله سرامیکی می‌باشند.

جهت مدل‌سازی فرآیند انتقال گرما بین سطح بیرونی لوله سرامیکی حاوی سرباره مذاب و سطح گرم لوله TEG و با فرض وجود خلاء بین

جدول ۱- روابط انرژی و انرژی مربوط به مدل سازی اجزای فرآیند پیشنهادی

اجزای فرآیند	روابط انرژی	روابط انرژی
تبخیرکن	$\dot{Q}_E = \dot{m}_5 (h_5 - h_6) = \dot{m}_2 (h_3 - h_2)$	$\dot{E}_{D,E} = T_0 [\dot{m}_5 (s_6 - s_5) + \dot{m}_2 (s_3 - s_2)]$
توربین	$\eta_T = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4s})}, \dot{W}_T = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$	$\dot{E}_{D,T} = T_0 [\dot{m}_3 (s_4 - s_3)]$
چگالنده	$\dot{Q}_C = \dot{m}_4 (h_4 - h_1) = \dot{m}_7 (h_8 - h_7)$	$\dot{E}_{D,C} = T_0 [\dot{m}_4 (s_1 - s_4) + \dot{m}_7 (s_8 - s_7)]$
پمپ	$\eta_P = \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{(h_2 - h_1)}, \dot{W}_P = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$	$\dot{E}_{D,P} = T_0 [\dot{m}_1 (s_2 - s_1)]$
خنک کن هوایی	$\dot{Q}_{CA} = \dot{m}_7 (h_8 - h_7)$	$\dot{E}_{D,CW} = \dot{m}_7 [(h_8 - h_7) - T_0 (s_8 - s_7)]$
خروجی تبخیرکن	-	$\dot{E}_{RE} = \dot{m}_6 [(h_6 - h_0) - T_0 (s_6 - s_0)]$
سیستم بازیافت گرما	$\dot{Q}_{WHRS} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6) = \dot{m}_9 (h_9 - h_{10})$	$\dot{E}_{D,WHRS} = T_0 [\dot{m}_9 (s_{10} - s_9) + \dot{m}_5 (s_5 - s_6)]$

۳- بحث و نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل سازی چرخه تولید برق رانکین آلی از نتایج تحقیق باری [۲۳] استفاده گردیده است. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول ۳ ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می گردد مقایسه نتایج مدل سازی تحقیق حاضر مربوط به کار خالص چرخه، نابودی انرژی کل، راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک چرخه با نتایج تحقیق [۲۳] مطابقت قابل قبولی دارد.

جدول ۳- نتایج مربوط به اعتبارسنجی مدل سازی ORC تحقیق حاضر

نتایج	تحقیق [۲۳]	مدل سازی حاضر	خطا، %
کار خالص (kJ/kg)	۵۰/۳۸	۴۹/۵۷	۱/۶
نابودی انرژی (kJ/kg)	۸۰/۲۵	۸۰/۵۷	۰/۳
راندمان قانون اول ORC (%)	۷/۶۵	۷/۵۲	۱/۶
راندمان قانون دوم ORC (%)	۳۸/۷۶	۳۸/۰۹	۱/۷

همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج مربوط به مدل سازی ترموالکتریک، نتایج حاصل شده با نتایج تجربی گزارش شده مربوط به ترموالکتریک HZ-20 [۲۶] در دماهای مختلف طرف سرد و طرف داغ ترموالکتریک، مقایسه گردیده است. مشخصات ترموالکتریک HZ-20 در منبع [۲۶] آمده است. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد اختلاف بسیار ناچیز و در بیشترین حالت حدود ۱/۵ درصد می باشد. لازم به ذکر است که مطابق معادله ۱۱ راندمان ترموالکتریک حدود ۱۲ درصد تعیین گردیده است.

بنابراین با داشتن رابطه فوق می توان مقدار توان تولیدی توسط ترموالکتریک های نصب شده بر روی سیستم بازیافت گرما را تعیین نمود. اطلاعات اصلی و پارامترهای مورد نیاز جهت انجام مدل سازی ترمودینامیکی در جدول ۲ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که از نرم افزار EES جهت برنامه نویسی و حل معادلات تشریح شده در این بخش استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات در نظر گرفته شده در مدل سازی فرآیند پیشنهادی

پارامتر	مقدار	مرجع
دمای محیط (°C)	۲۵	[۲۳]
فشار محیط (kPa)	۱۰۰	[۲۳]
راندمان توربین، η_T (%)	۸۰	[۲۳]
راندمان پمپ، η_P (%)	۹۰	[۲۳]
سیال ORC	R123	[۲۳]
اختلاف دمای نقطه تنگش (°C)	۱۰	[۲۳]
ضریب سیبک، Z (1/K)	۰/۰۰۲	[۲۴]
چگالی سرباره، ρ_S (kg/m ³)	۱۵۶۵	[۲۵]
گرمای ویژه سرباره، c_S (J/kg°C)	۱۲۱۰	[۲۵]
ضریب صدور لوله سرامیکی، ϵ_S	۰/۹	[۲۱]
ضریب صدور سمت گرم لوله، ϵ_H	۰/۸	[۲۱]
شعاع لوله سرامیکی، R_S (m)	۰/۰۵	-
شعاع سمت گرم لوله، R_H (m)	۰/۱	-
طول لوله WHRS، L (m)	۲	-
رسانایی گرمایی (W/mK)	۵۰	[۲۱]

جدول ۴- نتایج مربوط به اعتبارسنجی مدل سازی ترموالکتریک در تحقیق حاضر

مدل سازی	توان (kW)	دمای طرف سرد (°C)	دمای طرف گرم (°C)
تجربی [۲۶]	۳۸/۰۵	۴۰	۳۴۰
مدل سازی	۳۸/۱	۶۰	۲۶۰
	۳۲/۱۲	۸۰	۲۹۳
	۱۸/۱۶	۱۲۰	۳۲۰

۲-۳- نتایج مدل سازی

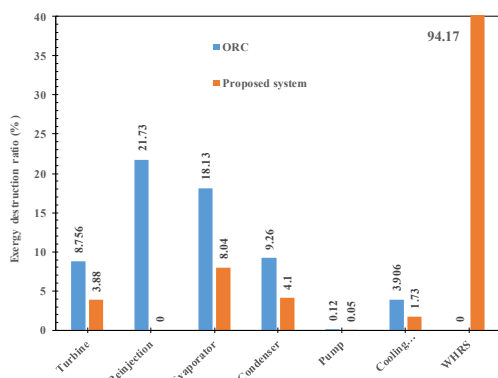
نتایج مربوط به مشخصات ترمودینامیکی نقاط مختلف سیستم پیشنهادی نشان داده شده در شکل ۱، در جدول ۵ ارائه گردیده است. همانطور که پیشتر نیز اشاره گردید، نتایج ارائه شده در جدول ۵ مربوط به مشخصات اولیه ارائه شده در جدول ۲ می باشد.

جدول ۵- مشخصات ترمودینامیکی نقاط مختلف سیستم پیشنهادی

نقطه	ماده	دما (°C)	فشار (kPa)	دبی جرمی (kg/s)	آنتالپی (kJ/kgK)
۰	-	۲۵	۱۰۰	-	۱۰۴/۸
۱	R123	۴۰	۱۵۴/۷	۱	۲۴۱/۹
۲	R123	۴۰/۴۹	۱۲۰/۱	۱	۲۴۲/۷
۳	R123	۱۲۰	۱۲۰/۱	۱	۴۵۲/۹
۴	R123	۶۳/۲۷	۱۵۴/۷	۱	۴۲۴/۶
۵	آب	۱۷۱/۸	۱۰۰/۲	۰/۵۵	۷۶۲/۹
۶	آب	۹۱/۷	۱۰۰/۲	۰/۵۵	۳۸۴/۸
۷	هوا	۲۵	۱۰۰	۱۸	۲۹۸/۶
۸	هوا	۳۵	۱۰۰	۱۸	۳۰۸/۶
۹	سرباره	۱۴۰۰	۱۰۰	۱/۵۷	۱۸۹۴
۱۰	سرباره	۱۳۹۳	۱۰۰	۱/۵۷	۱۷۶۱

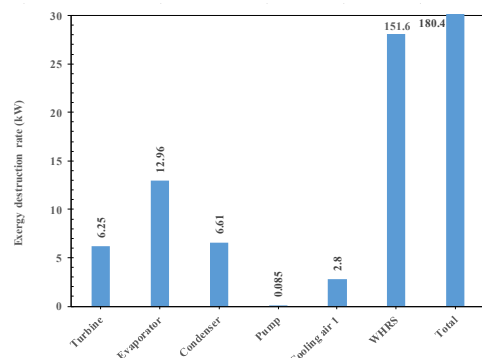
نتایج مربوط به نسبت نابودی انرژی در هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج مربوط به سیستم پیشنهادی و ORC می باشد. همانطور که در نتایج مشاهده می گردد، بیشترین سهم در نابودی انرژی سیستم پیشنهادی مربوط به سیستم بازیافت گرما می باشد، چرا که در سیستم پیشنهادی تنها بخشی از انرژی بسیار زیاد موجود در سرباره بازیافت می شود و مابقی انرژی سرباره از WHRS خارج می گردد که می تواند مجدداً وارد سیستم های دانه بندی سرباره شود. دلیل این امر عدم ایجاد خلل در عملکرد حال حاضر کارخانه های فولاد و هم چنین عدم گیر کردن سرباره در سیستم پیشنهادی می باشد. انواع سیستم های دانه بندی در قسمت مقدمه تشریح گردیده است. مطابق نتایج بیشترین سهم نابودی انرژی در ORC مربوط به خروجی تبخیرکن می باشد که حدود ۲۱٪ است. با توجه به اینکه در سیستم پیشنهادی خروجی تبخیرکن مجدداً وارد WHRS می شود در این حالت هیچ نابودی انرژی وجود ندارد و

همانطور که در نتایج مشاهده است سهم نابودی انرژی اجزاء ORC در سیستم پیشنهادی کمتر از زمانی است که تنها ORC مدنظر قرار گیرد، که دلیل آن افزایش نابودی انرژی WHRS در صورت در نظر گرفتن سیستم پیشنهادی می باشد.



شکل ۲- نسبت نابودی انرژی در هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی ORC و

به منظور مشاهده نرخ نابودی انرژی در هر یک از اجزاء در سیستم پیشنهادی، نتایج مربوط به این مقادیر برای تمامی اجزاء در شبکه ۳ نشان داده شده است. واضح است که بیشترین سهم نابودی انرژی مربوط به WHRS است که دلیل آن قبلاً تشریح گردید. رتبه دوم نابودی انرژی مربوط به اوپراتور می باشد و همچنین کمترین مقدار نابودی انرژی مربوط به پمپ سیستم پیشنهادی است.



شکل ۳- مقادیر نابودی انرژی در هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی

نتایج مربوط به توان تولیدی و توان مصرفی بخش های مختلف چرخه پیشنهادی و ORC در شکل ۴ نشان داده شده است. عامل تولید توان در چرخه پیشنهادی شامل دو بخش توان تولیدی در توربین ORC و توان تولیدی ناشی از ترموالکتریک ها در WHRS می باشد. مطابق نتایج کار تولیدی توربین و کار مصرفی پمپ در سیستم پیشنهادی معادل با مقادیر ORC می باشد. از دیگر نتایج می توان به سهم توان تولیدی کمتر از ۵۰٪ توسط سیستم بازیافت گرما اشاره نمود. در مجموع مقدار کار خالص سیستم پیشنهادی برابر با ۵۳/۷۴ کیلووات می باشد که تمام این توان خالص تولیدی از گرمای موجود در سرباره حاصل می گردد که در حالت عادی در محیط خنک می شوند و

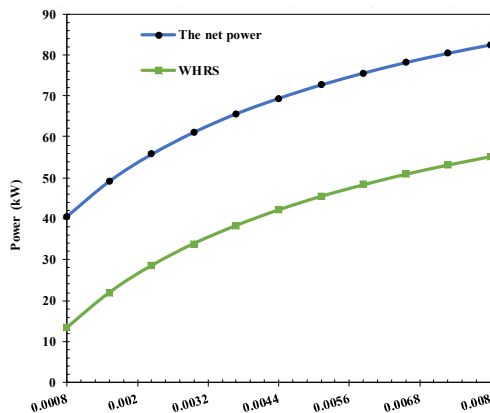


Figure of merit, Z (1/K)

شکل ۶- تغییرات توان خالص و توان تولیدی WHRS برای سیستم پیشنهادی با تغییرات ضریب سیبک

نتایج مربوط به تغییرات راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک با تغییرات ضریب سیبک در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشهود می‌باشد با افزایش ضریب سیبک، راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک افزایش می‌یابند که دلیل آن مربوط به افزایش راندمان ترموالکتریک‌های موجود در WHRS می‌باشد. افزایش راندمان ترموالکتریک‌ها سبب افزایش توان تولیدی سیستم پیشنهادی می‌گردد. مطابق معادلات (۷) و (۸). این افزایش، افزایش راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک چرخه پیشنهادی را در پی دارد. بیشتر بودن مقدار راندمان قانون دوم نسبت به قانون اول در چرخه‌های ارگانیک آلی مرسوم می‌باشد.

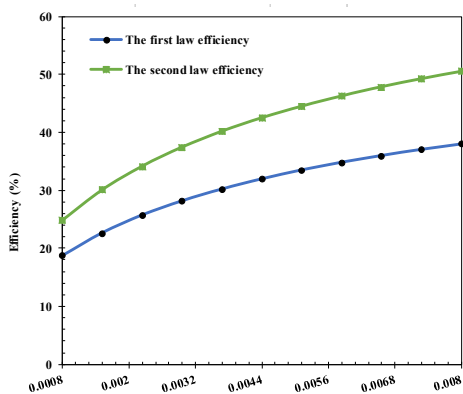


Figure of merit, Z (1/K)

شکل ۷- تغییرات راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک سیستم پیشنهادی با تغییرات ضریب سیبک

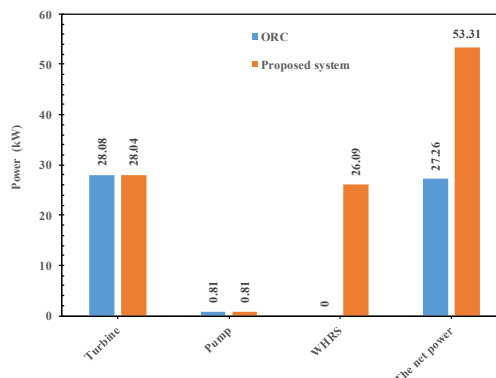
۳-۳- ارزیابی اقتصادی

به طور کلی چندین شاخص اقتصادی مانند بازگشت سرمایه ساده^۱، ارزش فعلی خالص^۲، نرخ خالص درآمد^۱ و زمان بازگشت سرمایه

¹ The simple payback (SP)

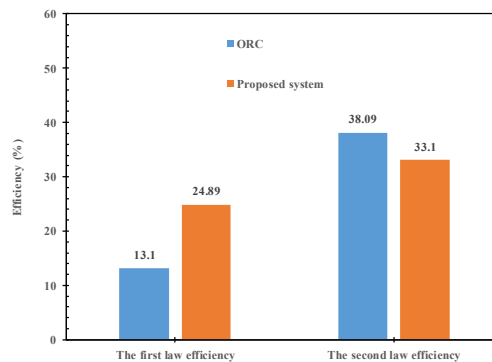
² The net present value (NPV)

این انرژی به محیط دفع می‌گردد.



شکل ۴- مقادیر توان تولیدی و مصرفی در اجزای سیستم پیشنهادی و ORC

همانطور که در بخش مدلسازی نیز اشاره گردید به منظور بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی و همچنین ORC، راندمان‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک تعریف گردیده‌اند. نتایج مربوط به مقادیر راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک برای سیستم پیشنهادی و ORC در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد راندمان قانون اول ترمودینامیک برای سیستم پیشنهادی ۲۴/۷٪ و راندمان قانون دوم ترمودینامیک برابر با ۳۲/۸۸٪ می‌باشد. دلیل کمتر بودن راندمان قانون دوم سیستم پیشنهادی در مقایسه با ORC، به تعریف این دو مقدار برمی‌گردد معادله‌های (۶) و (۸).



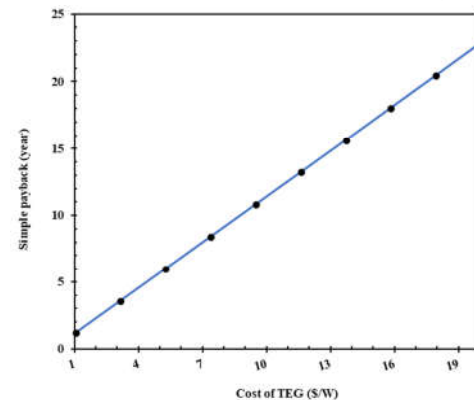
شکل ۵- مقادیر راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک مربوط به سیستم پیشنهادی و ORC

یکی از مهمترین پارامترها در تعیین راندمان ترموالکتریک‌ها خاصیت ضریب سیبک (Z) می‌باشد. بطور مستمر تلاش می‌شود با افزایش این مشخصه بهبود راندمان ترموالکتریک‌ها تسریع یابد. نتایج مربوط به تغییرات توان خالص تولیدی سیستم پیشنهادی و WHRS با تغییرات ضریب سیبک در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به سهم ثابت ORC از توان خالص، نرخ تغییرات توان تولیدی WHRS معادل با تغییرات توان خالص سیستم پیشنهادی می‌باشد. در نتیجه با افزایش ضریب سیبک، راندمان ترموالکتریک مطابق معادله (۱۰) افزایش می‌یابد که این افزایش سبب افزایش توان تولیدی می‌گردد.

تنزیل شده^۲، برای ارزیابی عملکرد یک سیستم یا بخش جدیدی از یک سیستم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که تفاوت اصلی بین دو سیستم ORC و سیستم پیشنهادی، اضافه شدن ترموالکتریک‌های موجود در WHRS می‌باشد و سایر بخش‌ها تفاوتی ندارند، تنها هزینه‌های مربوط به ترموالکتریک‌ها در آنالیز اقتصادی مد نظر قرار گرفته است. همچنین به دلیل اینکه ترموالکتریک‌ها هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری ندارند و دارای عمر حدود ۲۰ سال می‌باشند، تنها هزینه خرید اولیه به عنوان هزینه کل در نظر گرفته شده است. مطالعاتی وجود دارد که نشان می‌دهد قیمت ترموالکتریک‌ها بین \$/W ۵ تا \$/W ۲۰ می‌باشد [۲۷]. تلاش‌های بسیاری در حال انجام است که قیمت ترموالکتریک‌ها تا حدود \$/W ۱ کاهش یابد که شدیداً می‌تواند بر توسعه استفاده از ترموالکتریک‌ها تاثیر مثبت بگذارد [۲۸]. روش SP ساده‌ترین روش برای تخمین زمان بازگشت سرمایه می‌باشد [۲۹]. در این روش تعداد سال‌هایی که درآمد با هزینه اولیه برابر می‌شود، تعیین می‌گردد. مطابق رابطه زیر:

$$SP = \frac{\text{Investment cost of TEG modules}}{CF} \quad (۱۳)$$

که در آن CF بیان کننده درآمد ناشی از فروش برق تولیدی توسط ترموالکتریک‌ها در یک سال می‌باشد. صورت کسر معادله فوق نیز بیان کننده هزینه سرمایه‌گذاری اولیه جهت خرید ترموالکتریک‌ها است. مطابق ارزیابی اقتصادی به روش SP نتایج مربوط به تغییرات نرخ بازگشت سرمایه به سال با تغییرات قیمت‌های ترموالکتریک در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج مربوط به ارزیابی اقتصادی نشان می‌دهد در صورتی که هزینه اولیه مربوط به ترموالکتریک‌ها حدود \$/W ۱ باشد، نرخ بازگشت سرمایه سیستم باز یافت حدود ۱/۱۴ سال می‌باشد. با افزایش هزینه اولیه ترموالکتریک‌ها زمان مربوط به بازگشت سرمایه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تاثیر تغییرات قیمت ترموالکتریک بر نرخ بازگشت سرمایه برای سیستم پیشنهادی WHRS

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک سیستم جدید جهت باز یافت انرژی گرمایی موجود در سرباره کارخانه‌های فولاد ارائه گردیده است. در سیستم

باز یافت گرمای پیشنهادی از ترموالکتریک استفاده شده است که گرمای اتلافی را مستقیماً به توان تبدیل می‌نماید. لازم به ذکر است که تا کنون تحقیقی که به تحلیل و بررسی خود سیستم باز یافت گرما با استفاده از ترموالکتریک بپردازد، گزارش نگردیده است. سیستم پیشنهادی مورد آنالیز ترمودینامیکی از دید انرژی و انرژی قرار گرفته است. نتایج زیر را می‌توان به‌عنوان جمع‌بندی ارائه نمود:

- ❖ مقایسه نتایج مدل‌سازی چرخه توان تحقیق حاضر با نتایج یک تحقیق گذشته رو همچنین نتایج مدل‌سازی ترموالکتریک با اطلاعات تجربی گذشته، مطابقت مناسبی دارد.
 - ❖ بیشترین سهم در نابودی انرژی سیستم پیشنهادی مربوط به سیستم باز یافت گرما می‌باشد.
 - ❖ بیشترین سهم نابودی انرژی در ORC مربوط به خروجی تبخیرکن می‌باشد که حدود ۲۱٪ است.
 - ❖ سهم توان تولیدی سیستم باز یافت گرما از توان تولیدی کل، حدود ۴۹٪ می‌باشد.
 - ❖ راندمان قانون اول ترمودینامیک برای سیستم پیشنهادی ۲۴/۷٪ و راندمان قانون دوم ترمودینامیک برابر با ۳۲/۸۸٪ می‌باشد.
 - ❖ نتایج مربوط به ارزیابی اقتصادی نشان می‌دهد در صورتی که هزینه اولیه مربوط به ترموالکتریک‌ها حدود \$/W ۱ باشد، نرخ بازگشت سرمایه سیستم باز یافت گرما حدود ۱/۱۴ سال می‌باشد.
 - ❖ با افزایش ضریب سبک، راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک افزایش می‌یابند.
- در پایان می‌توان بیان نمود که استفاده از این سیستم می‌تواند بدون ایجاد تداخل در عملکرد کارخانه‌های فولاد در شرایط فعلی، جهت باز یافت گرما و تولید برق امکان‌پذیر باشد. همچنین این سیستم می‌تواند قبل از سیستم‌های دانه‌بندی سرباره نصب شده و با توان تولیدی خود بخشی از توان مصرفی کارخانه‌های فولاد را تامین نماید.

۵- نمادها

\dot{E}_D	نابودی انرژی (kW)
h	آنالیزی (kJ/kg)
L	طول (m)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
p	فشار (kPa)
\dot{Q}	آهنگ انتقال گرما (kW)
R	شعاع (m)
s	آنترپوی (kJ/kg)
T	دما (°C)
\dot{W}	کار تولیدی (kW)
Z	ضریب سبک (1/K)

۶- مراجع

- [1] Zhu, X., H. Zhang, Y. Tan, H. Wang and Q. Liao, Analogue experimental study on centrifugal-air blast

¹The internal rate of revenue (IRR)

² The discounted payback time (DPT)

- [17] Abdolipouradl, M., F. Mohammadkhani and S. Khalilarya, A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy*. Vol. 209, pp. 118235, 2020.
- [18] Meng, F., L.Chen, F. Sun and B. Yang, Thermoelectric power generation driven by blast furnace slag flushing water. *Energy*. Vol. 66, pp. 965-972, 2014.
- [19] Xiong, B., L. Chen, F. Meng and F. Sun, Modeling and performance analysis of a two-stage thermoelectric energy harvesting system from blast furnace slag water waste heat. *Energy*. Vol. 77, pp. 562-569, 2014.
- [20] Van Wylen, G.J. and R.E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. Wiley, 1986.
- [21] Incropera, F.P. and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*. Wiley, 1981.
- [22] Khanmohammadi, S. and M. Saadat-Targhi, Performance enhancement of an integrated system with solar flat plate collector for hydrogen production using waste heat recovery. *Energy*. Vol. 171, pp. 1066-1076, 2019.
- [23] Yari, M., Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy*. Vol. 35 No. 1, pp. 112-121, 2010.
- [24] Soltani, S., A. Kasaecian, H. Sarrafha and D. Wen, An experimental investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system with nanofluid application. *Solar Energy*. Vol. 155, pp. 1033-1043, 2017.
- [25] Liu, J., Q. Yu, J. Peng, X. Hu and W. Duan, Thermal energy recovery from high-temperature blast furnace slag particles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol.69, pp. 23-28, 2015.
- [26] HZ-20 Thermoelectric Generator. <<http://hiz.com/products/>>
- [27] Siddique, A.R.M., S. Mahmud and B.V. Heyst, A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 73, pp. 730-744, 2017.
- [28] Khanmohammadi, S. and M. Saadat-Targhi, Thermodynamic and economic assessment of an integrated thermoelectric generator and the liquefied natural gas production process. *Energy Conversion and Management*. Vol. 185, pp. 603-610, 2019.
- [29] Shahsavari, A., S. Khanmohammadi, M. Khaki and M. Salmanzadeh, Performance assessment of an innovative exhaust air energy recovery system based on the PV/T-assisted thermal wheel. *Energy*. Vol. 162, pp. 682-696, 2018.
- granulation for molten slag. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 88, pp. 157-164, 2015.
- [2] Barati, M., S. Esfahani and T.A. Utigard, Energy recovery from high temperature slags. *Energy*. Vol. 36, No. 9 pp. 5440-5449, 2011.
- [3] Dai, X.T., Y.H. Qi and C.X. Zhang, Development of molten slag dry granulation and heat recovery in steel industry. *Journal of Iron and Steel Research*. Vol. 20, pp. 1-6, 2008.
- [4] Mizuochi, T., J. Yagi and T. Akiyama. *Granulation of molten slag for heat recovery*. in *IECEC '02. 2002 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 2002*.
- [5] Bisio, G., Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. *Energy*. Vol. 22, No. 5 pp. 501-509, 1997.
- [6] Mizuochi, T., T. Akiyama, T. Shimada, E. Kasai and J.-I. Yagi, Feasibility of Rotary Cup Atomizer for Slag Granulation. *Isij International - ISIJ INT*. Vol. 41, pp. 1423-1428, 2001.
- [7] Kashiwaya, Y., Y. In-Nami and T. Akiyama, Development of a Rotary Cylinder Atomizing Method of Slag for the Production of Amorphous Slag Particles. *ISIJ International*. Vol. 50, pp. 1245-1251, 2010.
- [8] Kashiwaya, Y., Y. In-Nami and T. Akiyama, Mechanism of the Formation of Slag Particles by the Rotary Cylinder Atomization. *ISIJ International*. Vol. 50, pp. 1252-1258, 2010.
- [9] Goupil, C., W. Seifert, K. Zabrocki, E. Müller and G.J. Snyder, Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications. *Entropy*. Vol. 13, No. 8 pp. 1481-1517, 2011.
- [10] Champier, D., Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*. Vol. 140, No. pp. 167-181, 2017.
- [11] Luo, D., Z. Sun and R. Wang, Performance investigation of a thermoelectric generator system applied in automobile exhaust waste heat recovery. *Energy*. Vol. 238, No. pp. 121816, 2022.
- [12] Singh, B., W.A.N.W. Mohamed, M.N.F. Hamani and K.Z.N.A. Sofiya, Enhancement of low grade waste heat recovery from a fuel cell using a thermoelectric generator module with swirl flows. *Energy*. Vol. 236, pp. 121521, 2021.
- [13] Aliahmadi, M., A. Moosavi and H. Sadrhosseini, Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery. *Energy Reports*. Vol. 7, pp. 300-313, 2021.
- [14] قریشی ژ، خلیل آریا ش، جعفرمدار ص، آنالیز انرژی و اگزوری سطح مدول مولد ترموالکتریک جهت بازیافت حرارت هدر رفته گازهای احتراقی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۹.
- [15] نوریخش سعداباد، آ، رادمان س، رنجبر س، ف، نامی خلیله ده م، تحلیل ترموآکونومیک و بهینه سازی چندهدفه یک سیستم راندمان بالا بر مبنای چرخه های توربین گاز و رانکین مجهز به ژنراتور ترموالکتریک. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۰.
- [16] Abdolipouradl, M., F. Mohammadkhani, S. Khalilarya and M. Yari, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. *Energy Conversion and Management*. Vol. 226, pp. 113544, 2020.