

امکان‌سنجی فنی و اقتصادی استفاده از فناوری‌های نوین بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی در صنعت فولاد

مرصاد شعاعی^{۱*}، سامان قاسمیان^۲

۱- نخبه وظیفه، واحد پژوهش و فناوری، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت ایران | shaoeimersad@gmail.com

۲- کارشناس ارشد، واحد پژوهش و فناوری، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت ایران | S.ghasemian.tf@gmail.com

خلاصه

در پژوهش حاضر، تلاش می‌شود که امکان‌سنجی فنی و اقتصادی روش‌های بازیابی حرارت اتلافی در صنعت فولاد به‌منظور بهینه‌سازی انرژی موردبررسی قرار گیرد. ابتدا منابع اتلاف حرارت در صنعت فولاد و همچنین، روش‌های بازیابی انرژی اتلافی معرفی می‌شوند. در ادامه، مجتمع فولاد خراسان به‌عنوان نمونه مطالعه موردی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس، یک بر اساس پتانسیل اتلافات موجود، یک‌چرخه تولید هم‌زمان برق و حرارت جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از بازیابی انرژی در این کارخانه می‌تواند به‌طور میانگین منجر به کاهش مصرف حدود ۱۰۸ گیگاوات ساعت برق و ۳۵ میلیون مترمکعب گاز طبیعی به‌صورت سالیانه گردد که این مقدار، به ترتیب ۱۰٪ و ۹٪ مصارف کلی برق و گاز کارخانه تولید فولاد خراسان هستند. همچنین، اجرای سیستم‌های بازیابی حرارت به‌طور میانگین کمتر از ۷ سال مدت زمان بازگشت سرمایه دارند و ارزش خالص فعلی آنان در واحدهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی به ترتیب حدود ۵ و ۱۶ میلیون دلار (میانگین) است.

کلمات کلیدی: صنعت فولاد، بهینه‌سازی انرژی، ارزیابی فنی، ارزیابی اقتصادی، مطالعه امکان‌سنجی

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، در راستای اجرای توافق‌نامه پاریس، بسیاری از کشورها مبارزه با تغییرات آب‌وهوایی را به‌عنوان یک اولویت تعیین کرده‌اند. شورای اروپا در یکی از آخرین دستورالعمل‌های خود پیرامون بهره‌وری انرژی، هدف ۳۰ درصد صرفه‌جویی در انرژی را تا سال ۲۰۳۰ برای بخش‌های مختلف از جمله تولید برق و صنایع تأیید کرده است. صنایع سنگین مانند صنعت فولاد به شدت تحت تأثیر چنین استراتژی‌هایی قرار می‌گیرند و بنابراین باید تغییرات عملیاتی را متناسب با آن ایجاد کنند. صنایع باید تغییرات استراتژیک را اتخاذ کنند که شامل برنامه ریزی اولیه برای تغییرات فناوری و فرایند و همچنین، بازسازی مسیرهای تولید فعلی برای برآوردن نیازهای انرژی و انتشار است. یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی که منجر به کاهش انتشار کربن نیز می‌شود، استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت اتلافی در طول چرخه تولید فولاد می‌باشد [۱].

تولید آهن و فولاد به‌عنوان شاخص کلیدی شکوفایی ملی محسوب می‌شود و نقش پیشرو در اقتصاد جهانی دارد. این بخش از کوره‌های با دمای بالا برای تولید آهن و فولاد استفاده می‌کند که به دومین مصرف‌کننده انرژی در صنعت تبدیل



شده است. به دلیل افزایش تولید فولاد خام، مصرف انرژی این بخش از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ سالانه ۶.۲ درصد رشد کرد. علاوه بر این، انتشار دی اکسید کربن (CO_2) از کارخانه‌های آهن و فولاد بیشترین سهم را در بخش تولید به خود اختصاص می‌دهد (حدود ۲۷ درصد). آهن و فولاد در دهه‌های اخیر به پیشرفت‌های قابل توجهی دست یافته‌اند، با این حال، هنوز پتانسیل‌های زیادی را برای کاهش بیشتر مصرف انرژی و انتشار CO_2 تا حدود ۲۰ درصد نشان می‌دهد، یعنی صرفه‌جویی ۴.۷ اِتاژول (EJ) انرژی و ۳۵۰ میلیون تن CO_2 . این پیشرفت‌ها را می‌توان با صرفه‌جویی در انرژی در حین یا بعد از فرایندهای تولید به دست آورد [۲، ۳].

با در نظر گرفتن انرژی اولیه، بیشتر سوخت‌های فسیلی در فرایندهای تولید آهن و فولاد مصرف می‌شوند که در آن زغال سنگ کک‌سازی سهم عمده‌ای از مصرف انرژی را دارد. در سال ۲۰۱۷، سه چهارم مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد از زغال سنگ تامین می‌شود. علاوه بر این، بازده واقعی منابع تولید جهانی فولاد به دلیل تعداد زیادی از دست دادن انرژی تنها ۳۲.۹٪ است. با افزایش سریع قیمت انرژی اولیه، بهبود بیشتر بهره‌وری انرژی که می‌تواند مصرف سوخت فسیلی و انتشار جهانی CO_2 را در صنعت آهن و فولاد کاهش دهد بسیار مهم است. اقدامات مختلف صرفه‌جویی در انرژی برای کاهش مصرف انرژی اولیه در کارخانه فولاد اتخاذ شده است. این پیشرفت‌های بالقوه شامل تنظیم ترکیب جریان‌های انرژی ورودی، تنظیم فرایندهای مرتبط با انرژی، و استفاده از جریان‌های خروجی در صنعت آهن و فولاد است. اگرچه استفاده کارآمد از انرژی تا حدی توسط تحقیقات مختلف در طول دهه‌های گذشته به دست آمده است، اما میانگین راندمان افزایش قابل توجهی نداشته است. در آینده، استقرار فناوری‌های صرفه‌جویی در انرژی هنوز برای ساخت آهن و فولاد حیاتی است. هدف این فناوری‌ها در نهایت کاهش تقاضای انرژی در صنعت آهن و فولاد بوده و باید بر اساس شبکه انبوه بهینه‌سازی شوند [۲]. به دلیل ماهیت نوسانی و متناوبی که گرمای ناشی از اتلاف در فرایند تولید فولاد وجود دارد، بهره‌برداری از این انرژی اتلافی با موانعی رو به رو هستند که دلیل آن، تناوب جریان‌های گرمایی در فرایندهای صنعتی است. در واقع، سیستم‌های بازیابی گرمای اتلاف طوری طراحی شده‌اند که معمولاً با حداکثر توان حرارتی موجود در منبع گرمای هدر رفته مطابقت دارد. به منظور رفع این مشکل، راهکارهای مختلفی توسط محققان ارائه شده‌اند که بیشتر راه‌حل‌های پیشنهادی برای مدیریت نوسانات و تناوب انرژی گرمای اتلاف، استفاده از چرخه رانکین بخار (SRC) یا چرخه رانکین آلی (ORC) برای بازیابی انرژی گرمای اتلاف است [۱].

بازیافت حرارت در صنعت آهن و فولاد در طول زمان به طور قابل توجهی تکامل یافته است. در گذشته، تمرکز اصلی بر بازیابی حرارت فرایند در واحدهای جداگانه بود. برای مثال، کوره‌های بلند اولیه از گازهای خروجی داغ برای گرم کردن هوای ورودی استفاده می‌کردند، این رویه امروزه با سیستم‌های احیاکننده مدرن ادامه دارد. امروزه، تاکید به سمت بازیابی حرارتی یکپارچه، استفاده از شبکه‌ای از مبدل‌های حرارتی برای بازیابی گرمای تلف شده در مراحل مختلف فرایند فولادسازی است. تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته، مانند تجزیه و تحلیل پینچ، برای بهینه‌سازی این سیستم‌های بازیابی حرارت یکپارچه استفاده می‌شوند [۲، ۴].

محرک‌های بازیابی گرما نیز در طول زمان تغییر کرده‌اند. از لحاظ تاریخی، انگیزه اولیه بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی بود. در حال حاضر، نگرانی‌های زیست محیطی، به ویژه نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به یک نیروی محرکه اصلی تبدیل شده است. صنعت آهن و فولاد سهم قابل توجهی در انتشار جهانی CO_2 دارد و کاهش ردپای کربن آن برای رسیدگی به تغییرات آب و هوا ضروری است [۵، ۶].

سهم مصرف انرژی نهایی صنایع انرژی نسبت به کل صنایع در ایران حدود ۴۸ درصد می‌باشد که این صنایع، ارزش افزوده ۲۱ درصد کل بخش صنعت را شامل می‌شوند [۷]. صنعت فولاد با مصرف حدود ۵.۲ درصد گاز طبیعی و ۱۱.۲ درصد



از برق کشور، بخش مهمی از سبد انرژی نهایی کل کشور را شامل می‌شود [۸].

به‌رغم آن که صنعت فولاد از اساس مصرف انرژی بالایی دارد، اما شدت مصرف انرژی نسبت به محصول تولید شده در ایران بالاتر از استانداردهای جهانی است. میزان انرژی مصرفی به‌ازای یک تن تولید فولاد در ایران و اروپا به ترتیب ۱۷ و ۱۴.۴ گیگاژول است. مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که پتانسیل بالایی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی صنعت فولاد در ایران وجود دارد [۷].

در جدول ۱، بخش‌هایی از زنجیره تولید فولاد که پتانسیل بازیابی حرارت را دارا می‌باشند، به تفکیک میزان انرژی صرفه‌جویی شده، میزان کاهش انتشار کربن، و هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای واحد تولید ارائه می‌شوند.

جدول ۱- پتانسیل سنجی صرفه‌جویی مصرف انرژی در طول زنجیره فولاد و تاثیرات زیست محیطی و

اقتصادی آن [۷]

فرایند	عنوان فناوری	صرفه‌جویی انرژی بر واحد تولید	کاهش انتشار	هزینه سرمایه‌گذاری بر واحد تولید
		(گیگاژول بر هزار تن)	بر CO ₂ (تن هزار تن)	(هزار دلار بر هزار تن)
کوره بلند	نصب توربین برای بازیافت گرمای خروجی با فشار بالا	۴۵	۴.۱۸	۲.۰۵
	بازیافت گرما از خاکستر	۸۷	۸.۱۲	۰.۶۲
کوره قوس الکتریکی	کنترل و نظارت گاز دودکش	۳۷	۱۷.۰۶	۲.۳۲

ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه، با چالش کمبود منابع انرژی به خصوص در بخش‌های حساس مانند برق روبرو است. صنعت فولاد به عنوان یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی، نقش قابل توجهی در تشدید این کمبود دارد. استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی در این صنعت می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد و به حفظ منابع انرژی برای نسل‌های آینده کمک کند. صنعت فولاد یکی از بزرگترین تولیدکنندگان آلاینده‌های هوا از جمله گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق است. این آلاینده‌ها اثرات مخری بر سلامت انسان و محیط زیست دارند. استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی در این صنعت می‌تواند به طور قابل توجهی آلودگی‌ها را کاهش دهد و به بهبود کیفیت هوا و سلامت انسان‌ها کمک کند. استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی در صنعت فولاد می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه‌های عملیاتی این صنعت شود. این امر می‌تواند به افزایش سودآوری شرکت‌های فولادی و همچنین کاهش قیمت فولاد برای مصرف کنندگان نهایی شود.

هدف اصلی این پژوهش، کاهش قابل توجه مصرف انرژی در صنعت فولاد از طریق استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی است. این امر می‌تواند به حفظ منابع انرژی برای نسل‌های آینده و همچنین کاهش وابستگی ایران به واردات انرژی کمک کند. هدف دیگر، کاهش قابل توجه آلودگی‌های تولیدی صنعت فولاد از جمله گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق است. این امر می‌تواند به بهبود کیفیت هوا و سلامت انسان‌ها و همچنین حفاظت از محیط زیست کمک کند. هدف نهایی مقاله حاضر، کاهش هزینه‌های عملیاتی صنعت فولاد از طریق استفاده از فناوری‌های بازیافت حرارت و بهینه‌سازی انرژی است. این امر می‌تواند به افزایش سودآوری شرکت‌های فولادی و همچنین کاهش قیمت فولاد برای مصرف کنندگان

نهایی منجر شود.

در ادامه این مقاله، ابتدا به معرفی مجتمع فولاد خراسان به عنوان مطالعه موردی پرداخته می شود. سپس، روابط مدل سازی چرخه های بازیابی اتلاف حرارت به همراه شاخص های ارزیابی فنی و اقتصادی معرفی می گردند. در بخش بعد، نتایج حاصل از پژوهش با جزئیات مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. در انتها، جمع بندی کلی از پژوهش حاضر صورت می گیرد و پیشنهادات تکمیلی نیز ارائه می گردند.

۲. مجتمع فولاد خراسان

مجتمع فولاد خراسان به عنوان بزرگ ترین قطب صنعتی شرق کشور، از سال ۱۳۸۰ رسماً وارد باشگاه تولیدکنندگان فولاد کشور شده است. این شرکت در زمینه تولید میلگرد، شمش، آهن اسفنجی و بریکت فعالیت می نماید. در حال حاضر ظرفیت تولید فولاد خام این مجتمع صنعتی ۱/۴ میلیون تن در سال شامل: (کارخانه نورد با ظرفیت سالانه تولید ۶۰۰ هزار تن، کارخانه فولادسازی شماره ۱ و ۲ با ظرفیت ۱/۴ میلیون تن، کارخانه آهن اسفنجی ۱ و ۲ با ظرفیت ۱/۶ میلیون تن و کارخانه گندله سازی با ظرفیت ۲/۵ میلیون تن در سال) و با ایجاد اشتغال ۵ هزار نفر به طور مستقیم است که محصولات آن در صنایع ساختمانی، عمرانی، شرکت های نوردکار مورد استفاده قرار می گیرد. در حال حاضر واحد تغلیظ سنگ آهن (کنسانتره سازی) با ظرفیت ۲/۵ میلیون تن در سال در محل معادن سنگان را در دست اجرا دارد. مجتمع فولاد خراسان از شرکت فولاد خراسان از ۵ واحد اصلی از جمله واحد گندله سازی، احیاء مستقیم، ذوب ریخته گری و نورد و چندین واحدها جانبی و پشتیبانی تشکیل شده است [۹].

مهم ترین منابع اتلاف حرارت در فرایندهای تولید فولاد، گازهای خروجی از دودکش در فرایندهای احیاء مستقیم و قوس الکتریکی هستند. با توجه گزارش های ممیزی انرژی مجتمع فولاد خراسان، مشخصات گاز دودکش خروجی برای فرایند احیاء مستقیم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ - مشخصات ترمودینامیکی گاز دودکش [۱۰]

Flue Gas Properties		
Temperature	527.00	C
Pressure	0.991	bar
Flow	195,806	Nm ³ /h
Composition	Vol%	Mol%
CO	0.00%	0.00%
CO ₂	14.21%	14.21%
Hydrogen	0.00%	0.00%
H ₂ O	20.85%	20.87%
Methane	0.00%	0.00%
Ethane	0.00%	0.00%
Propane	0.00%	0.00%
Nitrogen	62.51%	62.49%
Oxygen	2.43%	2.43%

گاز خروجی از دودکش می تواند تا جایی سرد شود که منجر به تشکیل مایع نگردد. در گزارش ممیزی موجود، میزان

انرژی اتلافی برای فرایند احیاء مستقیم داده نشده است و می‌بایست باتوجه به خواص ترمودینامیکی گاز محاسبه گردد. بر خلاف این موضوع، حداکثر میزان استحصال انرژی از گاز خروجی در فرایند قوس الکتریکی معلوم بوده و حدود ۲۲ مگاوات است [۱۰].

۳. روش های بازیابی حرارت

با توجه به پتانسیل بالای میزان انرژی تلف شده در فرایندهای تولید فولاد، استفاده از چرخه رانکین و چرخه تولید همزمان توان و گرما در اولویت هستند. در این قسمت، توضیحات مربوط به چرخه های ترمودینامیکی ذکر می شوند.

چرخه بخار رانکین

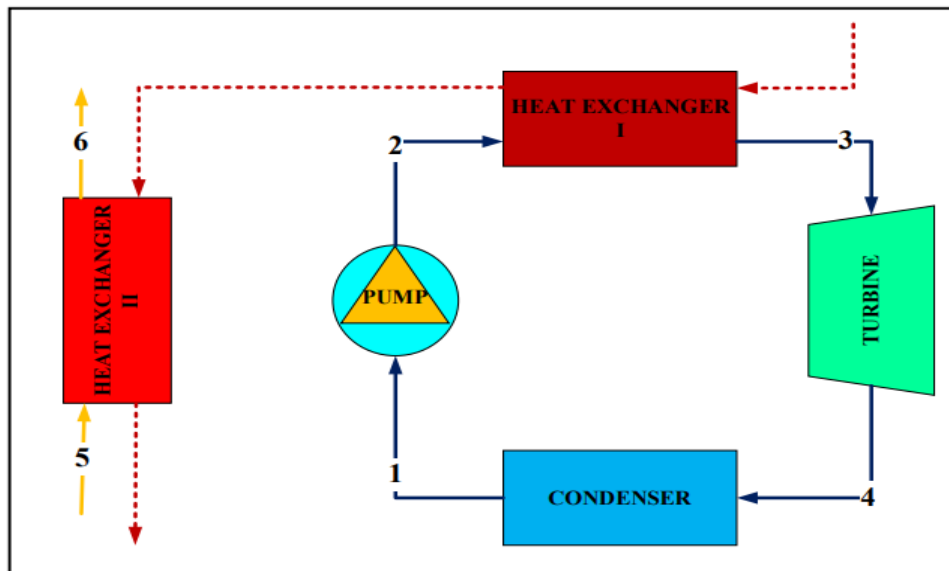
هنگامی که منبع گرم در چرخه‌های تولید توان پتانسیل بالایی داشته باشد (در مقیاس مگاوات و بالاتر)، استفاده از چرخه بخار رانکین بهترین گزینه است. سیال کاری در این چرخه آب است و از ۴ جزء اصلی تشکیل می شود: دیگ حرارتی (بویلر) یا مبدل حرارتی، توربین بخار، کندانسور، و پمپ. بویلر وظیفه تبدیل آب از حالت مایع متراکم به بخار اشباع یا فوق گرم در فشارهای بالا را به عهده دارد. در چرخه‌های بازیافت حرارت، به جای بویلر از یک مبدل حرارتی استفاده می‌شود. توربین بخار می‌تواند یک یا چندطبقه باشد. توربین وظیفه تولید توان در چرخه بخار رانکین را به عهده دارد و خروجی آن، سیال دوفاز است. کندانسور یک مبدل حرارتی است که در فشارهای پایین بخار خروجی حاصل از توربین را به مایع اشباع یا متراکم تبدیل می‌کند. حرارت اضافی موجود در چرخه از طریق کندانسور به محیط اطراف دفع می‌شود. نقش پمپ در چرخه بخار رانکین، افزایش فشار مایع متراکم است به‌طوری‌که آماده ورود به دیگ یا مبدل حرارتی باشد. پمپ بخش ناچیزی از توان تولیدی توربین را مصرف می‌کند.

چرخه تولید همزمان توان و گرما (CHP)

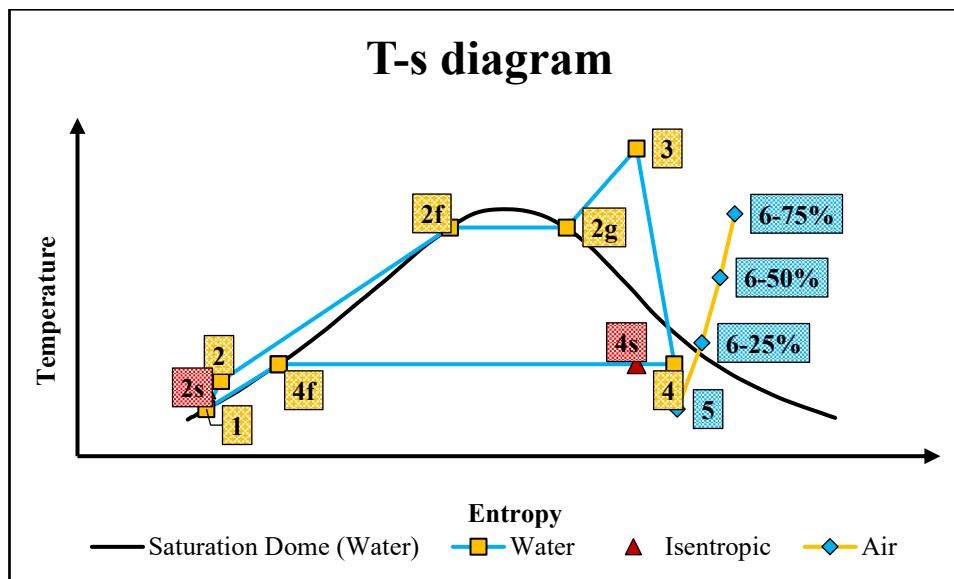
چرخه بخار رانکین که در بخش قبل معرفی شد، بازده انرژی نسبتاً پایینی دارد. به‌منظور افزایش بازدهی سیستم و همچنین، استفاده از انرژی حرارتی اتلافی در طی فرایند تولید برق، از چرخه‌های تولید همزمان توان و گرما موسوم به CHP استفاده می‌گردد. ایده اصلی در این چرخه‌ها این است که بخشی از گرمای منبع حرارتی (که در اینجا همان گرمای اتلافی در فرایند تولید فولاد است) صرف پیش‌گرمایش یا گرمایش محیطی (در صورت نیاز) در واحد صنعتی تولید فولاد شود. با انجام این کار، بازدهی کلی سیستم به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به دنبال خواهد داشت.

روش پیشنهادی

به منظور بهره برداری بهینه از مزایای روش های بازیابی حرارت، ۴ چرخه ترمودینامیکی برای هر یک از واحدهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی مورد بررسی و ارزیابی فنی و اقتصادی قرار می گیرد. تفاوت این چرخه ها، میزان استفاده از منبع حرارت اتلافی در تولید برق است که به ترتیب ۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ خواهد بود (۱۰۰٪ بدین معناست که تمام انرژی حرارتی بازیافتی صرف تولید برق در چرخه بخار رانکین شود و عملاً چرخه CHP نخواهیم داشت). شماتیک چرخه های ترمودینامیکی پیشنهادی به همراه نمودار دما بر حسب انتالپی کل چرخه (T-s) در شکل ۱ و شکل ۲ آورده شده اند.



شکل ۱- نمای کلی چرخه های ترمودینامیکی پیشنهادی (خط چین: جریان حرارت اتلافی از فرایندهای تولید فولاد - خط توپر: سیال کاری در چرخه (آب و هوا))



شکل ۲- نمودار شماتیک دما بر حسب انتروپی کل چرخه ترمودینامیکی

حالات ترمودینامیکی موجود در شماتیک چرخه در جدول ۳ توضیح داده شده اند.

جدول ۳- توضیح حالات ترمودینامیکی در چرخه پیشنهادی

توضیحات	سیال عامل	حالت ترمودینامیکی
ورودی به پمپ - خروجی از کندانسور	آب	۱

ورودی به مبدل حرارتی - خروجی از پمپ	آب	۲
ورودی به توربین - خروجی از مبدل حرارتی	آب	۳
ورودی به کندانسور - خروجی از توربین	آب	۴
CHP (ورودی به مبدل حرارتی) (چرخه)	هوا	۵
CHP (خروجی از مبدل حرارتی) (چرخه)	هوا	۶

در مدل‌سازی چرخه‌های ترمودینامیکی پیشنهادی، از فرضیاتی استفاده شده است که در ادامه ارائه می‌شوند [۱۰-۱۲]:

- ۱- دما و فشار سیال کاری در شرایط محیطی به ترتیب ۲۰ درجه سانتی گراد و ۱ بار هستند.
- ۲- گرمای اتلافی قابل‌استفاده در فرایندهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی به ترتیب حدود ۳۳ و ۲۲ مگاوات است.
- ۳- فرض بر این است که تمام فرایندها در چرخه‌ها در حالت پایدار و جریان ثابت هستند.
- ۴- افت فشار، اثرات گرانش و انرژی جنبشی همگی نادیده گرفته می‌شوند.
- ۵- راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ به ترتیب ۸۰٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته می‌شوند.

۴. ارزیابی فنی و اقتصادی

ارزیابی فنی

ارزیابی فنی چرخه‌های ترمودینامیکی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعه و بهبود آنان است. این ارزیابی امکان مقایسه پارامترهای مختلفی از قبیل راندمان الکتریکی، راندمان حرارتی، راندمان کلی سیستم، توان تولیدی، و راندمان انرژی را فراهم می‌کند. تمام تحلیل‌های انجام شده بر اساس سه قانون کلی ترمودینامیک استوار هستند: بقای جرم، بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)، و بقای انرژی (قانون دوم ترمودینامیک). معادلات این قوانین به ترتیب در معادلات (۱) - (۳) ارائه شده‌اند [۱۳].

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

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

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

در معادلات فوق، $\dot{m}_{in}$ و h_{in} دبی جرمی و انتالپی ورودی به چرخه، $\dot{m}_{out}$ و h_{out} دبی جرمی و انتالپی خروجی از چرخه، $\dot{Q}$ نرخ گرمای مبادله شده، $\dot{W}$ نرخ توان خالص چرخه، $\dot{E}_{x_{in}}$ و $\dot{E}_{x_{out}}$ جریان‌های انرژی ورودی و خروجی، و $\dot{I}$ تخریب انرژی در طول فرایند هستند.

تحلیل انرژی بر اساس قانون اول ترمودینامیک انجام می‌شود. با استفاده از این قانون، می‌توان راندمان را محاسبه کرد. در سیستم‌های تولید همزمان توان و گرما معمولاً سه نوع راندمان تعریف می‌شود. راندمان الکتریکی (η_{elect})، راندمان

حرارتی (η_{heat})، و راندمان کلی سیستم ($\eta_{overall}$). راندمان کلی سیستم در واقع نسبت کل انرژی مفید در سیستم (چه به صورت توان تولیدی و چه به صورت گرما) به انرژی ورودی به آن است. در ادامه، روابط مورد نیاز جهت یافتن این راندمان ها ارائه می گردند (معادلات (۴)-(۶)).

$$\eta_{elect} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{h1}} \quad (4)$$

$$\eta_{heat} = \frac{\dot{Q}_{h2}}{\dot{Q}_h} \quad (5)$$

$$\eta_{overall} = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} \quad (6)$$

در معادلات فوق، $\dot{W}_{net}$ توان تولیدی خالص سیستم، $\dot{Q}_h$ انرژی حرارتی از منبع اتلاف حرارت، $\dot{Q}_{h1}$ انرژی حرارتی ورودی به چرخه تولید توان، $\dot{Q}_{h2}$ انرژی حرارتی مورد استفاده برای فرایند پیش گرم، و $\dot{Q}_c$ گرمای دفع شده از سیستم در کندانسور است.

تحلیل انرژی بر پایه قانون دوم ترمودینامیک استوار است. این تحلیل در واقع میزان بهره برداری از انرژی در دسترس را مشخص می کند. برای هر حالت ترمودینامیکی بر روی چرخه، یک خاصیت شدتی به نام انرژی مخصوص به شکل زیر تعریف می شود [۱۴].

$$ex_i = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0) \quad (7)$$

در معادله (۷)، اندیس i به ترتیب بیانگر خاصیت ترمودینامیکی در حالت i و در حالت مرجع هستند. بازده انرژی کل چرخه به صورت نسبت انرژی مفید به کل انرژی ورودی به چرخه تعریف می می شود که شکل ریاضی آن به فرم زیر است [۱۳].

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{I}_{tot}}{\dot{E}x_{Q_{h1}} + \dot{E}x_{Q_{h2}}} \quad (8)$$

در معادله (۸)، هر چقدر تخریب انرژی ($\dot{I}_{tot}$) بالاتر باشد، میزان راندمان انرژی کاهش یافته و منجر به برگشت ناپذیری فرایند می شود. در این معادله، $\dot{E}x_{Q_{h1}}$ و $\dot{E}x_{Q_{h2}}$ به ترتیب بیانگر نرخ انرژی منابع حرارتی بخش تولید توان و بخش پیش گرم می باشند.

ارزیابی اقتصادی

ارزیابی اقتصادی یکی از مهم ترین اقدامات لازم جهت بررسی میزان سودآوری یک پروژه است. در واقع، با انجام این محاسبات می توان دریافت که آیا طرح پیشنهادی ارائه شده ارزش سرمایه گذاری از سوی متولیان مربوطه را دارد یا خیر. سیستم پیشنهادی هر چقدر که از بعد فنی توانمند باشد، چنانچه نتواند بازگشت سرمایه و سودآوری مناسبی را تضمین کند، با شکست مواجه خواهد شد.

به منظور محاسبه هزینه سالیانه کل سیستم، متغیر $\dot{Z}_{tot}$ به شکل زیر تعریف می شود.

$$\dot{Z}_{tot} = \sum \dot{Z}_i = \sum Z_i \cdot CRF \quad (9)$$

در معادله (۹)، ضریبی موسوم به نرخ بازگشت سرمایه (CRF) استفاده شده است که تعریف آن بدین صورت می باشد.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

طبق تعریف در معادله (۱۰)، i نمایانگر نرخ تنزیل یا بهره است که برابر با ۸ درصد فرض می شود (این نرخ بهره بر اساس محاسبات ارزی است نه ریالی). همچنین، n نمایانگر مدت بهره برداری از سیستم بر حسب سال است که در این پروژه برابر ۲۰ سال می باشد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای پرکاربرد در محاسبات اقتصادی پروژه‌ها، محاسبه ارزش خالص فعلی (NPV) است. هر چقدر مقدار NPV بیشتر باشد، نمایانگر سودآوری بیشتر پروژه است. اگر مقدار NPV منفی شود، این‌طور برداشت می‌شود که پروژه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبوده و ارزش سرمایه‌گذاری را ندارد. تعریف NPV در معادله (۱۱) ارائه می گردد.

$$NPV = -Z_{tot} + \sum_{t=1}^n \frac{ANCF}{(1+i)^t} \quad (11)$$

در معادله بالا، Z_{tot} هزینه کلی تجهیزات اصلی سیستم و ANCF، بیانگر جریان پول خالص سالیانه است. معیار کمی دیگری که در ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها استفاده می‌شود، نرخ بازده داخلی (IRR) است. این نرخ نشان‌دهنده نرخ تنزیلی‌ای است که ارزش فعلی خالص (NPV) جریان‌های نقدی آتی یک پروژه را به صفر می‌رساند. به عبارت دیگر، IRR نرخ بهره‌ای است که در آن سرمایه‌گذاری بدون سود یا ضرر خاصی انجام می‌شود. IRR برای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری‌ها بسیار مفید است؛ معمولاً اگر IRR یک پروژه بالاتر از نرخ هزینه سرمایه (در اینجا همان نرخ بهره) باشد، آن پروژه گزینه‌ای مناسب برای اجرا تلقی می‌شود. روش محاسبه آن با کمک معادله (۱۱) بدین صورت است که NPV برابر صفر در نظر گرفته شده و مقدار i (نرخ بهره) محاسبه می‌شود که همان نرخ بازده داخلی (IRR) خواهد بود. آخرین مطلب ارائه شده در این بخش، معرفی معیاری تحت عنوان مدت بازگشت سرمایه (PBP) است. این معیار مشخص می‌کند که مدت‌زمان انتظار جهت جبران هزینه‌های انجام شده و شروع سودآوری پروژه چقدر است. هر چقدر که PBP کمتر باشد، نمایانگر وضعیت بهتر پروژه از نظر تأمین منافع مالی سرمایه‌گذاران است. این معیار در معادله (۱۲) تعریف می‌شود.

$$PBP = \frac{Z_{tot}}{ANCF} \quad (12)$$

۵. نتایج و بحث

در ادامه، ابتدا نتایج حاصل از مدل‌سازی ترمودینامیکی فرایندهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی به تفکیک ارائه می‌شوند. سپس، نتایج ارزیابی‌های فنی هر دو بخش که شامل تحلیل‌های انرژی و اگزرژی هستند، با جزئیات کافی شرح داده می‌شوند. در گام بعدی، نتایج ارزیابی اقتصادی و میزان سودآوری پروژه پیشنهادی تعیین می‌گردند.

نتایج ارزیابی فنی

مهم ترین پارامترهای ارزیابی فنی شامل توان تولیدی خالص چرخه، راندمان الکتریکی، راندمان کلی، و راندمان انرژی (قانون دوم ترمودینامیک) هستند. مقادیر این پارامترها برای فرایندهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی در جدول 4 و جدول 5 ارائه می گردند.

جدول ۴ - نتایج ارزیابی فنی چرخه تولید توان و گرمای پیشنهادی (فرایند احیاء مستقیم)

Share of Power	$\dot{W}_{net}$ (kW)	η_{elect} (%)	$\eta_{overall}$ (%)	η_{exergy} (%)
100%	8116.1		24.446	67.380
75%	6087.1	24.446	43.335	58.622
50%	4058.0		62.223	60.635
25%	2029.0		81.112	68.970

جدول ۵ - نتایج ارزیابی فنی چرخه تولید توان و گرمای پیشنهادی (فرایند احیاء کوره قوس الکتریکی)

Share of Power	$\dot{W}_{net}$ (kW)	η_{elect} (%)	$\eta_{overall}$ (%)	η_{exergy} (%)
100%	5370.8		24.446	59.541
75%	4028.1	24.446	43.335	51.566
50%	2685.4		62.223	50.884
25%	1342.7		81.112	55.578

نکات قابل توجهی در ارزیابی فنی چرخه‌های ترمودینامیکی پیشنهادی وجود دارد. اول، راندمان الکتریکی و راندمان کلی بر اساس میزان تولید توان در هر دو حالت برابر هستند. دلیل این موضوع، برابر بودن نسبت تولید توان به گرما در هر دو چرخه (از ۱۰۰٪ تا ۲۵٪) و همچنین، کیفی بودن خاصیت راندمان الکتریکی است (به بیان دیگر، به دبی جرمی چرخه وابسته نیست). نکته بعدی آن است که بازده الکتریکی چرخه‌ها که حدود ۲۴٪ هستند، نسبتاً پایین می‌باشند. با این حال، در نسبت‌های بالای تولید توان (۱۰۰٪ و ۷۵٪) مقدار قابل توجهی توان خالص تولید می‌شود که می‌تواند عملکرد این چرخه‌ها را توجیه‌پذیر کند.

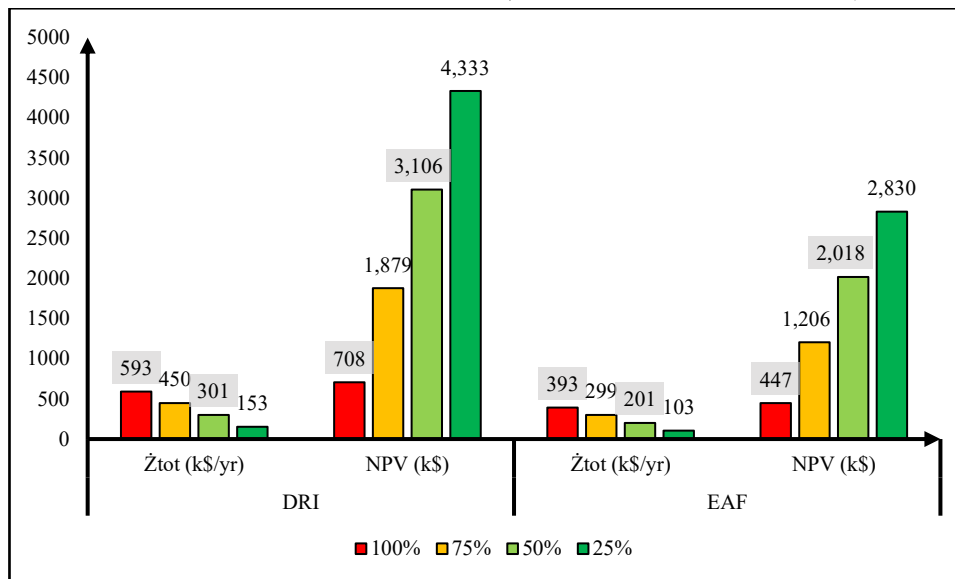
از دیدگاه قانون دوم، راندمان انرژی چرخه‌ها حاکی از میزان استفاده مفید از انرژی در دسترس است. این راندمان برای فرایند احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی به صورت میانگین در چهار چرخه پیشنهادی به ترتیب حدود ۶۴٪ و ۵۴٪ است که اعداد نسبتاً مناسبی هستند. با این حال، رفتار راندمان انرژی به صورت خطی نیست (بر خلاف سایر پارامترهای ذکر شده).

نتایج ارزیابی اقتصادی

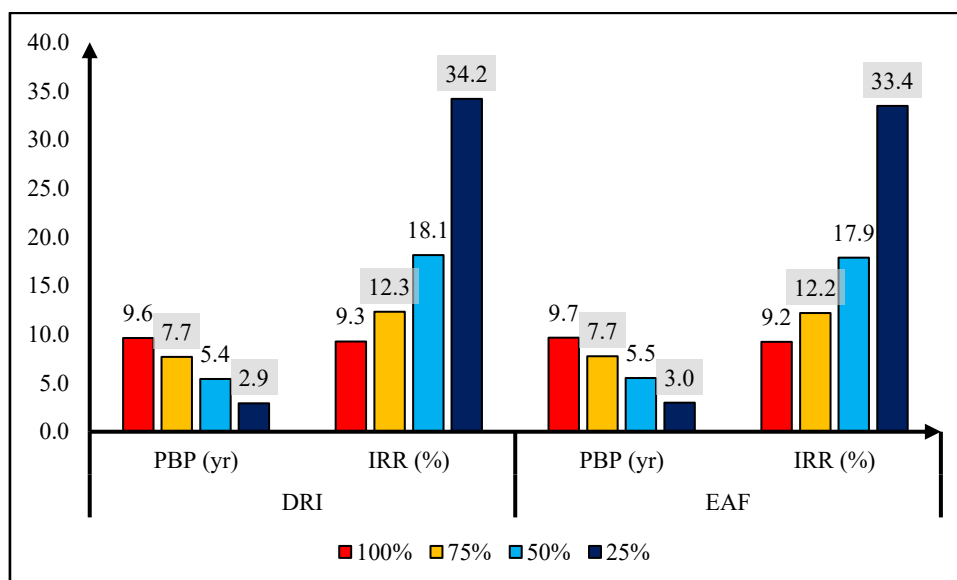
در کنار توجیه‌پذیری فنی، ارزیابی اقتصادی عاملی است که می‌تواند سیاست‌گذاران و سرمایه‌داران را به اجرای یک طرح پیشنهادی متقاعد کند. چنانچه پروژه‌ای سودآوری و منفعت مالی در پی نداشته باشد، اجرای موفقیت‌آمیز آن ناممکن خواهد بود.

معیارهای ارزیابی اقتصادی که در این بخش ارائه می گردند عبارت اند از: هزینه سالیانه کل سیستم ($\dot{Z}_{tot}$)، ارزش خالص فعلی (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR)، و مدت بازگشت سرمایه (PBP). به منظور مقایسه بهتر، معیارها به دو گروه تقسیم می شوند: معیارهای هزینه شامل هزینه سالیانه کل سیستم و ارزش خالص فعلی و گروه دوم، معیارهای بازدهی شامل

نرخ بازده داخلی و مدت بازگشت سرمایه. نمودار مقایسه هر یک از این گروه‌ها برای فرایندهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی در شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب آورده شده‌اند. در پروژه‌های سودآور، هر چقدر میزان هزینه سالیانه کمتر و ارزش خالص فعلی بیشتر باشد، پروژه از نظر سرمایه‌گذاران و تصمیم‌سازان جذاب‌تر خواهد بود.



شکل ۳ - نمودار مقایسه شاخص‌های هزینه سالیانه کل سیستم و ارزش خالص فعلی به تفکیک فرایندها



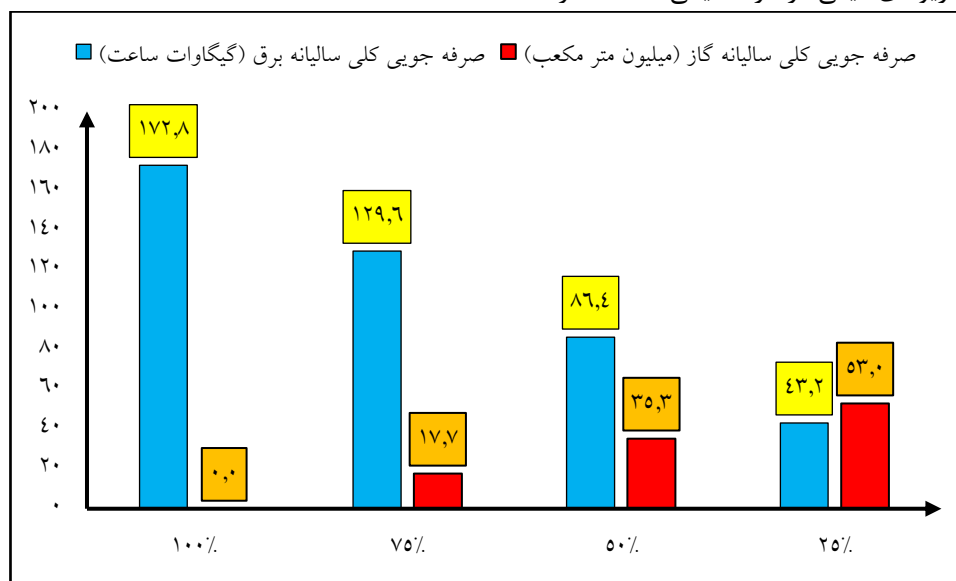
شکل ۴ - نمودار مقایسه شاخص‌های مدت بازگشت سرمایه و نرخ بازدهی داخلی به تفکیک فرایندها

باتوجه به نمودار شکل ۳، روند تغییرات هزینه سالیانه و ارزش خالص فعلی در هر دو فرایند مشابه بوده و به ترتیب نزولی و صعودی است. نتایج نشان می‌دهند که هر چقدر میزان صرفه جویی در مصرف گاز بیشتر باشد، پروژه از دیدگاه اقتصادی سودآورتر است. به علاوه، مقادیر مطلق ارزش خالص فعلی در فرایند احیاء مستقیم بیش از ۵۰ درصد بیشتر از آنان در فرایند کوره قوس الکتریکی می‌باشند. از سوی دیگر، نیاز به سرمایه‌گذاری برای فرایند احیاء مستقیم حدود ۵۰ درصد

بیشتر خواهد بود که نقطه ضعف محسوب می گردد. به علاوه، نرخ کاهش هزینه ها و افزایش سودآوری در فرایند کوره قوس الکتریکی اندکی بالاتر است. برای مثال، نسبت افزایش ارزش خالص فعلی برای فرایندهای احیاء و کوره قوس با تغییر سناریو از ۱۰۰٪ به ۲۵٪ توان، به ترتیب حدود ۵۱۲٪ و ۵۳۳٪ می باشد که حاکی از تفاوت حدود ۲۰ درصدی میان دو روش است. نمودار ارائه شده در شکل ۴ نتایج جالبی به دنبال دارد. با وجود تفاوت نسبتا زیاد در هزینه های بازیابی انرژی در دو فرایند مورد مطالعه، به دلیل برابر بودن نسبت افزایش هزینه ها به افزایش ارزش خالص فعلی پروژه، مدت زمان بازگشت سرمایه و همچنین، نرخ بازدهی داخلی برای هر دو فرایند تقریبا برابر هستند. با توجه به این که بازگشت سرمایه در تمامی سناریوها زیر ۱۰ سال است، هر یک از طرح های ارائه شده می توانند قابلیت اجرا و توجیه پذیری اقتصادی را داشته باشند.

میزان صرفه جویی برق و گاز

در نمودار شکل ۵، میزان صرفه جویی سالیانه برق و گاز به تفکیک سناریو تولید توان آورده شده است. مطابق انتظار، تغییرات صرفه جویی برق با حرکت از سناریو ۱۰۰٪ به ۲۵٪ به صورت نزولی و برای گاز، به صورت صعودی است. در واقع، سناریو تولید ۱۰۰٪ برق در اینجا به دلیل قیمت پایین گاز در کشور و سهولت دسترسی به آن نامتوازن به نظر می رسد و بهتر است از سناریوهای میانی در فاز عملیاتی استفاده گردد.



شکل ۵- نمودار میزان صرفه جویی کلی سالیانه در مجتمع فولاد خراسان بر اساس سناریوهای مختلف تولید توان

تحلیل سناریوهای پیشنهادی

به منظور انتخاب بهتر میان سناریوهای پیشنهادی جهت بازیابی انرژی حرارتی در مجتمع فولاد خراسان، ابتدا می بایست میزان مصارف برق و گاز در هر واحد صنعتی معلوم شود. سپس، با توجه به پتانسیل صرفه جویی، می توان ایده هایی عملیاتی جهت بهره برداری از انرژی بازیابی شده را مطرح نمود. بر اساس گزارش ممیزی انرژی در مجتمع فولاد خراسان، میزان مصرف سالیانه برق و گاز به تفکیک واحد صنعتی در جدول ۶ ارائه شده است [۹].

جدول ۶- مصرف سالیانه برق و گاز در مجتمع فولاد خراسان (به تفکیک واحد)

واحد صنعتی	مصرف سالیانه	
	برق (گیگاوات ساعت)	گاز (میلیون مترمکعب)
گندله‌سازی	۷۴.۶۶	۱۰.۳۷
احیا مستقیم	۱۰۵.۸۹	۳۵۱.۸۹
قوس الکتریکی	۸۱۷.۹۵	۱۱.۴۸
نورد گرم	۴۵.۲۲	۱۴.۳۵
مجموع	۱۰۴۳.۷۲	۳۸۸.۰۹

باتوجه به داده‌های جدول ۶، واضح است که تامین انرژی کامل مجتمع از طریق بازیابی انرژی امکان پذیر نیست که بدیهی می باشد. با این حال، سناریوهای متفاوتی را می توان جهت بکار گیری برق یا گاز صرفه جویی شده مطرح نمود که به توزیع مصرفی در واحدهای مختلف وابسته است.

بر اساس اطلاعات ارائه شده، سناریوهای متنوع استفاده از میزان برق و گاز صرفه جویی شده در دو جدول ۷ و جدول ۸ ارائه می شوند. هر یک از حالات تولید توان از ۱۰۰٪ تا ۲۵٪ به ترتیب سه و دو سناریو مجزا جهت بهره برداری از برق و گاز صرفه جویی شده دارند (توان ۱۰۰٪ سناریو گاز ندارد). در ادامه، بررسی این سناریوها با جزئیات انجام می شود.

جدول ۷- سناریوهای مختلف استفاده از میزان برق صرفه جویی شده در واحدهای صنعتی

گندله سازی	احیا مستقیم	قوس الکتریکی	نورد گرم	مجموع
۱۰۰٪-۱	۰٪	۲۱٪	۰٪	۱۶.۶٪
۱۰۰٪-۲	۱۰۰٪	۰٪	۰٪	
۱۰۰٪-۳	۱۰۰٪	۰٪	۱۰۰٪	
۷۵٪-۱	۰٪	۱۶٪	۰٪	۱۲.۴٪
۷۵٪-۲	۰٪	۸۰٪	۱۰۰٪	
۷۵٪-۳	۱۰۰٪	۹٪	۱۰۰٪	
۵۰٪-۱	۰٪	۸۲٪	۰٪	۸.۳٪
۵۰٪-۲	۵۵٪	۰٪	۱۰۰٪	
۵۰٪-۳	۱۰۰٪	۰٪	۲۶٪	
۲۵٪-۱	۰٪	۰٪	۹۶٪	۴.۱٪
۲۵٪-۲	۵۸٪	۰٪	۰٪	
۲۵٪-۳	۰٪	۴۱٪	۰٪	

جدول ۸ - سناریوهای مختلف استفاده از میزان گاز صرفه جویی شده در واحدهای صنعتی

گندله سازی	احیا مستقیم	قوس الکتریکی	نورد گرم	مجموع
۷۵٪-۱	۰٪	۰٪	۰٪	۴.۶٪
۷۵٪-۲	۶۰٪	۰٪	۱۰۰٪	
۵۰٪-۱	۰٪	۱۰٪	۰٪	۹.۱٪
۵۰٪-۲	۱۰۰٪	۰٪	۹۴٪	
۲۵٪-۱	۰٪	۱۵٪	۰٪	۱۳.۷٪
۲۵٪-۲	۱۰۰٪	۵٪	۱۰۰٪	

در حالت استفاده از تولید توان به صورت ۱۰۰٪، مجموعاً سه سناریو در کل بخش ها وجود دارد. این سناریوها می توانند ۱۶.۶٪ از کل برق مصرفی در مجتمع فولاد را تامین کنند. در سناریو ۱-۱۰۰٪، تامین برق ۲۱٪ بزرگترین واحد مصرف کننده برق یعنی کوره قوس الکتریکی انجام می گردد. سناریو ۲-۱۰۰٪، تلاش می کند که برق حداقل دو واحد را با بالاترین میزان پوشش تامین کند که واحدهای گندله سازی و احیاء مستقیم به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۲٪ از برق خود را از این طریق تامین می کنند. آخرین سناریو در این بخش (همان ۳-۱۰۰٪)، تلاش می کند که بیشترین تعداد واحد با پوشش کامل مصرف برق را داشته باشد. بدین منظور، واحدهای گندله سازی و نورد گرم به صورت کامل پوشش داده شده اند و احیاء مستقیم نیز حدود ۵۰٪ مصرفش را از این طریق تامین می کند.

در سناریوهایی که بر اساس توان‌های کمتر از ۱۰۰٪ هستند، مجموعاً ۶ حالت بهره برداری در بخش های برق و گاز وجود دارد. در بخش برق، منطبق سناریوها مشابه ۱۰۰٪ هستند؛ بدین معنا که سناریوهای شماره ۱ (مثل ۱-۷۵٪، ۱-۵۰٪، ۱-۲۵٪) پوشش حداکثری بزرگترین مصرف کننده برق را هدف گرفته اند. در سناریوهای شماره ۲، تلاش بر این است که حداکثر پوشش برای مصارف برق دو واحد در نظر گرفته شود. در آخرین سری سناریوها، هدف اصلی بیشترین تعداد پوشش در واحدهای صنعتی بوده است (در حالت توان ۲۵٪، بعضی از این موارد محقق نشده اند). در مجموع، سناریوهای ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ تولید توان به ترتیب ۱۲.۴٪، ۸.۳٪ و ۴.۱٪ کل مصرف برق سالیانه در مجتمع فولاد خراسان را پوشش داده اند.

در بخش گاز، اوضاع متفاوت است. سناریو شماره ۱ برای هر یک از توان های ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ شامل پوشش تقاضای گاز در پر مصرف ترین واحد صنعتی است که همان احیاء مستقیم می باشد. در سناریوهای شماره ۲، هدف نهایی پوشش تقاضای گاز حداقل یک واحد صنعتی به صورت کامل است. با توجه به جدول ۸، تقاضای گاز واحد صنعتی قوس الکتریکی به صورت کامل پوشش داده می شود. در حالت تولید توان ۷۵٪، حدود ۶۰٪ از تقاضای واحد گندله سازی نیز برآورده می شود. در حالات تولید توان کمتر، تقاضای گاز در واحد گندله سازی نیز مشابه واحد قوس الکتریکی کاملاً توسط منابع صرفه جویی شده تامین می گردد. تفاوت سناریوهای ۵۰٪-۲ و ۲۵٪-۲ در سایر واحدها می باشد. در حالی که سناریو ۵۰٪-۲ تقریباً ۹۴٪

نیاز واحد نورد گرم را تامین می کند، سناریو ۲۵٪-۲ نه تنها این مقدار را به ۱۰۰٪ می رساند، بلکه سهم اندکی از تقاضای گاز واحد احیاء مستقیم را نیز پوشش خواهد داد (حدود ۰.۵٪).

۶. جمع‌بندی و پیشنهادات

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی و امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بهره‌مندی از فناوری‌های نوین بازیابی انرژی حرارتی اتلافی در صنعت فولاد، به‌عنوان یکی از صنایع پرمصرف انرژی، بوده است. براین اساس، ابتدا مروری بر فرایندها و روش‌های بکار رفته در صنایع آهن و فولاد صورت گرفت. سپس، بخش‌هایی که بالاترین پتانسیل صرفه‌جویی حامل‌های انرژی (شامل برق و گاز) را دارند، شناسایی شدند که شامل واحدهای احیاء مستقیم و کوره قوس الکتریکی هستند. در ادامه، فناوری‌های نوین بازیابی حرارت معرفی شدند. در بخش روش‌ها، کارخانه تولید فولاد خراسان به‌عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شده و مصرف ویژه انرژی آن در واحدهای صنعتی مختلف ارائه گردید. سپس، بر اساس پتانسیل موجود، یک روش چرخه ترمودینامیکی تولید هم‌زمان برق و حرارت با سناریوهای متفاوت پیشنهاد شد. در ادامه، معیارهای ارزیابی فنی و اقتصادی طرح حاضر معرفی شدند. در بخش نتایج، خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی چرخه پیشنهادی مورد تحلیل قرار گرفتند، نتایج ارزیابی‌های فنی و اقتصادی ارائه شدند، و سناریوهای متفاوت وابسته به نیاز واحدهای صنعتی کارخانه فولاد خراسان با جزئیات مورد بررسی قرار گرفتند.

موارد زیر مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر هستند:

- چرخه ترکیبی پیشنهادی می‌تواند بازدهی کلی سیستم را تا حدود ۹۰٪ افزایش دهد؛
- در صورت اجرای کامل طرح بازیابی حرارت، حدود ۱۸٪ از کل انرژی مصرفی (شامل برق و گاز) در کارخانه فولاد خراسان کاسته می‌شود؛
- ۲۱ سناریو متفاوت جهت بهره‌برداری سیستم بازیابی حرارت پیشنهاد شده است که دامنه و انعطاف پذیری در تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد؛
- تمامی سناریوهای موجود از منظر اقتصادی سودآور بوده و میانگین زمان بازگشت سرمایه آنان کمتر از ۷ سال است.

باتوجه به اتلافات بسیار زیاد در مطالعه موردی (مقیاس مگاواتی)، مقادیر کمتر از ۱ مگاوات که میزان قابل توجهی نیز هستند، بررسی نشدند. پیشنهاد می‌شود این اتلافات در مطالعات آتی در نظر گرفته شوند. همچنین، بخش‌های پایین دست صنعت فولاد نیز می‌توانند مورد بررسی دقیق‌تری مشابه پژوهش حاضر جهت پتانسیل سنجی صرفه‌جویی انرژی در این بخش قرار گیرند. پیشنهاد دیگر، تغییر در مدل تأمین مالی پروژه است. در ارزیابی اقتصادی سیستم پیشنهادی، فرض بر آن است که میزان صرفه‌جویی در کارخانه فولاد توسط مجری طرح تضمین می‌گردد. به‌منظور افزایش جذابیت برای سرمایه‌گذاری، شرکت‌های خدمات انرژی می‌توانند با و یا بدون مشارکت شخص ثالث (مانند بانک‌ها، مؤسسات تأمین مالی و...) از سایر مدل‌های تأمین مالی قراردادهای مبتنی بر کارایی انرژی مانند پرداخت از صرفه‌جویی و یا اشتراک صرفه‌جویی استفاده کنند. به‌عنوان آخرین پیشنهاد، یک سیستم ارزیابی جامع فنی و اقتصادی به‌گونه‌ای طراحی شود که با دریافت داده‌های ممیزی انرژی، بتواند بهترین راهکارهای بهره‌برداری و صرفه‌جویی انرژی را در صنعت فولاد (شامل کارخانه‌ها و واحدهای گوناگون صنعتی) پیشنهاد دهد.

۷. مراجع

- [1] I. Alshehhi, W. Alnahdi, M. Ali, A. Bouabid, and A. Sleptchenko, "Assessment of waste heat recovery in the steel industry," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 1-22, 2023.
- [2] R. Q. Wang, L. Jiang, Y. D. Wang, and A. P. Roskilly, "Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, p. 122997, 2020/11/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122997>.
- [3] L. Chen, B. Yang, X. Shen, Z. Xie, and F. Sun, "Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: A case study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 86, pp. 151-160, 2015/07/05/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.026>.
- [4] M. McBrien, A. C. Serrenho, and J. M. Allwood, "Potential for energy savings by heat recovery in an integrated steel supply chain," *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 592-606, 2016/06/25/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.099>.
- [5] Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, and Y. Li, "Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry," *Applied Energy*, vol. 191, pp. 502-520, 2017/04/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.072>.
- [6] A. Inayat, "Current progress of process integration for waste heat recovery in steel and iron industries," *Fuel*, vol. 338, p. 127237, 2023/04/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127237>.
- [7] س. فکوربان and س. حبیب زاده, "پتانسیل سنجی بهبود مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران presented at the 13th International Conference on Energy Efficiency in the Steel Industry," [Online]. Available: ۱۳۹۷, <https://civilica.com/doc/932706>.
- [8] "مطالعات طرح جامع فولاد کشور," شرکت ملی فولاد ایران, ۱۴۰۰-۱۴۰۲. [Online]. Available: https://niscoir.com/?page_id=4756.
- [9] "بازنگری استاندارد مصرف انرژی در صنایع آهن و فولاد - گزارش فاز دوم (ممیزی انرژی مجتمع فولاد خراسان)," شرکت انرژی آریان بهسا, ۱۴۰۳.
- [10] "ممیزی انرژی و بازنگری استاندارد و معیار مصرف سوخت در صنایع آهن و فولاد (مجتمع فولاد خراسان)," شرکت سامان انرژی اصفهان, ۱۳۹۱.
- [11] D. Atashbozorg, A. M. Arasteh, G. Salehi, and M. T. Azad, "Analysis of Different Organic Rankine and Kalina Cycles for Waste Heat Recovery in the Iron and Steel Industry," *ACS Omega*, vol. 7, no. 50, pp. 46099-46117, 2022/12/20 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c03922.
- [12] E. Dashtizadeh, M. Mehrpour Darestani, S. Rostami, M. Ashjaee, and E. Houshfar, "Comparative optimization study and 4E analysis of hybrid hydrogen production systems based on PEM, and VCI methods utilizing steel industry waste heat," *Energy*

- Conversion and Management*, vol. 303, p. 118141, 2024/03/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118141>.
- [13] Ö. Kaşka, "Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 108-117, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.026>.
- [14] T. Yan *et al.*, "Energy Optimization Based on Steam System Analysis and Waste Energy Recovery for Iron and Steel Industry," *Energy Technology*, vol. 10, no. 12, p. 2200191, 2022/12/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/ente.202200191>.