نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص: ۱۷-۱

J. Energy Conversion

Volume: 12, Issue:3, 2025: 1-17

بهینه‌سازی و تحلیل انرژی، اگزرژی و اقتصادی چرخه رانکین اصلاح‌شده با بهره‌گیری از بازیابی حرارت اتلافی کلینکر در فرایندهای کارخانه سیمان

حبیب‌اله فرخی[۱]، علیرضا باهری [۲]، بهزاد عزیزی‌مهر [۳و*] و فرهاد دولت‌آبادی [۴]

۱- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری های صنعتی، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.habib.farokhi63@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری های صنعتی، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.alireza_baheri@yahoo.com

۳و*- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک و صنایع کاربردی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران b.azizimehr@yahoo.com

۴- گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران dolat748@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۵/۵، بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲

چکیده

با پیشـــرفت تکنولوژی و تحلیل‌های پیشـــرفته‌تر در زمینه ترمودینامیک، امکان بهینه‌ســـازی چرخه رانکین و ادغام آن با ســـایر منابع حرارتی فراهم شده است. در این پژوهش، یک سیستم تولید توان و حرارت کوچک‌مقیاس بر اساس چرخه رانکین اصلاح شده طراحی و شبیه سازی شده است. هدف این تحقیق، استفاده از گرمای اتلافی بخش خنک‌کننده کارخانه تولید سیمان به‌منظور تولید هم‌زمان توان الکتریکی و حرارت با رویکردی جامع از منظر ترمودینامیکی و اقتصـادی اسـت. تحلیل انرژی این سـیسـتم بر پایه قوانین پایسـتگی جرم، انرژی و اندازه حرکت انجام شده و برای تحلیل اگزرژی از مدلی مبتنی بر قوانین اول و دوم ترمودینامیک استفاده شده است. در این راستا، پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر عملکرد سیستم شامل فشار ورودی و خروجی توربین و میزان حرارت ورودی به بویلر، شناسایی شده و تأثیر آن‌ها در بهبود کارایی سیستم بررسی گردیده است. فرایند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن خصوصیات سیال کاری انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در شرایط اولیه، بازده انرژی سیستم معادل ۲۳ درصد و بازده اگزرژی برابر با ۲۲/۶۸ درصد است. با اعمال بهینه‌سازی، بازده انرژی و بازده اگزرژی به ترتیب به ۲۹/۶۳ و ۳۷/۰۳ درصد افزایش یافته است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** b.azizimehr@yahoo.com

کلمات کلیدی: اگزرژی، سیستم ترکیبی تولید هم‌زمان توان و حرارت، کارخانه تولید سیمان، بهینه‌سازی عملکرد سیستم، چرخه حرارتی رانکین بهبودیافته

نحوه استناد به این مقاله حبیب‌اله فرخی, علیرضا باهری, بهزاد عزیزی‌مهر, فرهاد دولت‌آبادی. بهینه‌سازی و تحلیل انرژی، اگزرژی و اقتصادی چرخه رانکین اصلاح‌شده با بهره‌گیری از بازیابی حرارت اتلافی کلینکر در فرایندهای کارخانه سیمان. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴; ۱۲ (۳) : ۱۷-۱.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

۱- مقدمه

تولید سیمان یکی از فرایندهای صنعتی با مصرف بالای انرژی است که شامل مراحل گرمادهی، کلسیناسیون و گندله‌سازی مواد خام می‌شود. این مواد شامل ترکیبات شیمیایی مختلفی نظیر کربنات کلسیم (آهک)، سیلیس، آلومینا، آهن، اوره و مقادیر کمی از مواد دیگر هستند که در طی فرایند حرارتی دچار تغییرات شیمیایی و فیزیکی می‌شوند تا ماده‌ای با خواص مکانیکی مقاوم به نام کلینکر[1] تولید شود. این تغییرات با عبور مواد خام از داخل کوره در دماهای بسیار بالا صورت می‌گیرد و در نهایت کلینکر به‌عنوان محصول میانی تولید و با آسیاب شدن به سیمان نهایی تبدیل می‌شود. به‌طور کلی، مراحل اصلی تولید سیمان شامل آماده‌سازی مواد اولیه، تولید کلینکر و آسیاب کردن آن است. یکی از راهکارهای مهم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت سیمان، بازیابی حرارت اتلافی است. این روش، رویکردی کارآمد برای مدیریت و کنترل انرژی است که از حرارت هدررفته در فرایندهای تولید سیمان استفاده مجدد می‌کند و بهره‌وری سیستم را افزایش می‌دهد. بازیابی حرارت اتلافی می‌تواند برای تأمین انرژی چرخه‌های ترمودینامیکی نظیر چرخه رانکین یا سایر چرخه‌های پیشرفته مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد نه تنها به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند، بلکه هزینه‌های انرژی را کاهش داده و به پایداری محیط زیست و بهبود عملکرد کلی سیستم منجر می‌شود [۱].

دینسر و همکاران [۲] در پژوهشی نوآورانه به طراحی و تحلیل یک سیستم بازیابی حرارت اتلافی در کارخانه سیمان پرداختند. این سیستم که با استفاده از نرم‌افزارهای EES[2] و Aspen Plus مدل‌سازی شده است، به‌طور ویژه از حرارت اتلافی سرباره سیمان برای تولید هیدروژن استفاده می‌کند. هیدروژن تولیدشده با گاز طبیعی ترکیب شده و برای مصارف خانگی به کار می‌رود. ساختار سیستم شامل چرخه رانکین بخار و چرخه رانکین آلی، الکترولایزر قلیایی، مخازن ذخیره هیدروژن و اکسیژن، واحد ترکیب‌کننده و محفظه احتراق است. نتایج نشان دادند که استفاده از سیال کاری R600a در چرخه رانکین آلی بیش‌ترین توان خروجی را تولید می‌کند. بخشی از این توان برای تولید هیدروژن با راندمان ٪۶۲/۹۴ از طریق الکترولایزر قلیایی استفاده شده است. افزایش درصد هیدروژن در ترکیب از ۰٪ به ۵۰٪، مصرف سالانه گاز طبیعی را حدود ۲۳٪ کاهش داده و انتشار دی‌اکسیدکربن از ۳۴٪ به ۲۸٪ تقلیل یافته است. در عین حال، انتشار کربن مونوکسید و دی‌اکسیدکربن با افزایش محتوای هیدروژن کاهش یافته اما انتشار گازهای NO_x اندکی افزایش یافته است. به‌طور کلی، دینسر و همکاران نشان دادند که سیستم پیشنهادی با بازیابی حرارت اتلافی کارخانه سیمان به بهبود راندمان انرژی و اگزرژی و کاهش آلاینده‌های کربنی کمک شایانی کرده است. ایلینکا و همکاران [۳] در پژوهشی به بررسی بازیابی حرارت باقی‌مانده از گازهای خروجی دودکش‌های کوره‌های سیمان پرداختند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب[3] و به‌کارگیری چرخه کالینا، سیستم تولید هم‌زمانی طراحی و تحلیل کردند که توانایی تولید برق و حرارت موردنیاز دفاتر اداری و منازل کارکنان کارخانه سیمان را دارد. این سیستم شامل سه پیکربندی مختلف KCA، KCB وKCC بوده که عملکرد آن‌ها از نظر راندمان حرارتی و اگزرژی، ظرفیت خالص تولید برق و حساسیت به تغییرات دما، فشار و غلظت تحلیل شد. برای کاهش پیچیدگی مدل، چندین فرضیه در نظر گرفته شد و مجموعه‌ای از معادلات با استفاده از نرم‌افزارهای مذکور حل گردید. این سیستم راندمان حرارتی ٪۲۲/۱۵ راندمان اگزرژی ٪۴۵/۱۲ و توان خالص الکتریکی ۲۵۶۵/۰۳ کیلووات را ارائه داد. هم‌چنین، تحلیل حساسیت سیستم به تغییرات مختلف نشان داد که KCA نسبت به دیگر پیکربندی‌ها پایدارتر و کارآمدتر است. میزان حرارت اضافی بازیابی‌شده در سیستم‌های KCA، KCB و KCC به ترتیب ۷۳۶۸/۲۰ کیلووات، ۷۴۲۱/۸۶ کیلووات و ۸۰۹۴/۱۵ کیلووات گزارش شد. سلیمان و همکاران [۴] در پژوهشی به بررسی بهبود بازده انرژی در صنعت سیمان، به‌ویژه در تولید سیمان سفید پرداخته‌اند. تولید سیمان سفید به دلیل مصرف حرارتی تقریبا دو برابر بیش‌تر از سیمان خاکستری، نیازمند راهکارهای کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی است. در این مطالعه، بازیابی حرارت

[1] Clinker
[2] Engineering Equation Solver
[3] MATLAB

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

اتلافی در یک کارخانه سیمان سفید با بهره‌گیری از چرخه‌های مختلف تولید توان شامل چرخه رانکین بخار، چرخه رانکین آلی و چرخه ترکیبی بخار-آلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که از میان سیالات کاری ارزیابی‌شده، اسپایروپنتان[1] با تولید توان خالص ۴۴۸۳ کیلووات ساعت و راندمان حرارتی ٪۴۱/۶۹ بهترین عملکرد را داشته است. با این‌حال، به دلیل عوامل اقتصادی نظیر در دسترس بودن، قیمت پایین‌تر و هزینه سرمایه‌گذاری کم‌تر، استفاده از سیکلوپنتان[2] به‌عنوان سیال کاری پیشنهاد شده است. سیکلوپنتان، علیرغم راندمان حرارتی ٪۱/۶ کم‌تر نسبت به اسپایروپنتان، نرخ برگشت‌ناپذیری پایین‌تری را نشان داده و آن را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه‌تر تبدیل می‌کند. علاوه بر این، چرخه ترکیبی بخار-آلی به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای بازیابی حرارت اتلافی در دماهای بالا معرفی شده است. این چرخه نه‌تنها توان بیش‌تری نسبت به چرخه رانکین بخار سنتی تولید می‌کند، بلکه به دلیل فشارهای عملیاتی پایین‌تر، هزینه سرمایه‌گذاری کم‌تری را به همراه دارد. در نتیجه، چرخه ترکیبی بخار-آلی می‌تواند با بهره‌وری بیش‌تر و هزینه‌های کم‌تر، راهکاری مؤثر برای بازیابی انرژی حرارتی اتلافی در صنعت سیمان باشد. رجب و همکاران [۵] در پژوهشی به بررسی گزینه‌های بازیابی حرارت اتلافی در صنعت سیمان الجزایر پرداختند. آن‌ها با هدف بازیابی حرارت اتلافی در یک کارخانه سیمان واقع در شمال الجزایر، استفاده از چرخه رانکین بخار و چرخه رانکین آلی را پیشنهاد کردند. در این پژوهش، بهینه‌سازی ترمودینامیکی هر دو چرخه با هدف بیشینه‌سازی توان خالص تولیدی واحدهای بازیابی حرارت انجام شد. برای این منظور، شرایط مرزی خاص منطقه الجزایر و داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از کارخانه برای تنظیم مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. مدل بهینه‌سازی در محیط متلب توسعه یافته و به پایگاه داده‌های REFPROP و Coolprop متصل شد. نتایج نشان دادند که پیکربندی بازگشتی چرخه رانکین آلی با استفاده از استون به‌عنوان سیال کاری، مناسب‌ترین گزینه از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای این کاربرد است. این سیستم از حرارت اتلافی گازهای خروجی برج پیش‌گرم‌کن با دمای متوسط ۳۸۲ درجه سانتی‌گراد بهره‌برداری کرده و توان خالص ۲/۹۴ مگاوات تولید می‌کند. زمان بازگشت سرمایه این سیستم ۵/۷ سال بوده و اثرات زیست‌محیطی آن از نظر پتانسیل گرمایش جهانی و تأثیر کل معادل گازهای گلخانه‌ای بسیار پایین گزارش شده است. با تحلیل پژوهش‌های انجام گرفته مذکور، مشخص شد که حرارت اتلافی در فرایند تولید سیمان که به‌طور معمول مقادیر قابل‌توجهی انرژی گرمایی را هدر می‌دهد، می‌تواند به‌طور مؤثر برای تأمین حرارت موردنیاز دیگ بخار در چرخه رانکین مورد استفاده قرار گیرد. ترکولوف و همکاران [۶] در پژوهشی به بررسی بازیابی حرارت اتلافی در صنعت سیمان ازبکستان با تمرکز بر یک کارخانه سیمان با ظرفیت تولید سالانه ۱ میلیون تن پرداختند. این مطالعه با هدف بهبود پایداری و کاهش هزینه‌های عملیاتی، به تحلیل فنی-اقتصادی فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی پرداخت و منابع اصلی حرارت اتلافی، شامل گازهای خروجی پیش‌گرم‌کن (۳۶۸ درجه سانتی‌گراد) و هوای خنک‌کننده کلینکر (۲۴۴ درجه سانتی‌گراد) را شناسایی کرد. با استفاده از چرخه رانکین آلی و مدل‌سازی در نرم‌افزار Aspen Plus، سیال کاری R245fa به دلیل تعادل بین کارایی ترمودینامیکی (۳۶٪/۲۱٪)، ایمنی و اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. نتایج نشان داد که سیستم بازیابی حرارت اتلافی می‌تواند ۱۲/۹۲۷ مگاوات توان خالص تولید کند، هزینه تولید کلینکر را ٪۳/۸۱ (از ۵۸/۲۰ به ۵۵/۹۸ دلار بر تن) و هزینه سطح‌بندی‌شده کلینکر را ٪۷/۴۹ (از ۴۵/۹۵ به ۴۲۰/۵ دلار بر تن) کاهش دهد. هم‌چنین، این سیستم منجر به کاهش ٪۶۳/۲۶ در انتشار غیرمستقیم سالانه CO_2 (از ۸۱/۴۴ به ۲۹/۹ کیلوتن) شد. این پژوهش نشان داد که با آزادسازی قیمت انرژی در ازبکستان از سال ۲۰۲۵، اجرای فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی پایداری و رقابت‌پذیری صنعت سیمان را بهبود بخشد. گومز و همکاران [۷] در پژوهشی به بررسی پتانسیل تولید هم‌زمان برق در صنعت سیمان میناس گرایس برزیل با استفاده از چرخه‌های ترمودینامیکی پرداختند. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی پتانسیل تولید هم‌زمان برق در صنعت سیمان میناس گرایس با استفاده از چرخه‌های ترمودینامیکی بود که این پتانسیل بر اساس داده‌های بخش سیمان میناس گرایس تخمین زده شد. چرخه‌های کالینا، رانکین آلی و رانکین مرسوم به لحاظ فنی و اقتصادی ارزیابی شدند. ارزیابی فنی شامل

[1] Spiroprotan

[2] Cyclopentane

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

مدل‌سازی ترمودینامیکی با بهینه‌سازی بود که توازن‌های جرم، انرژی، آنتروپی و اگزرژی و هم‌چنین محاسبات انتقال حرارت برای مبدل‌های حرارتی را در بر می‌گرفت. ارزیابی اقتصادی نیز مدل‌سازی اقتصادی شامل محاسبه هزینه ویژه برق تولیدی، کل سرمایه‌گذاری، جریان نقدی و زمان بازگشت سرمایه را شامل می‌شد. نتایج نشان دادند که بیش‌ترین برگشت‌ناپذیری‌ها مربوط به توربین‌ها و اواپراتورها است. چرخه کالینا توان تولیدی و بازده اگزرژی بیش‌تری داشت اما از نظر بازده حرارتی، مقادیر بین چرخه‌ها بسیار مشابه بودند. هر سه چرخه توانستند بیش از ۳۵ درصد از تقاضای انرژی را پوشش دهند که به معنای کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید سیمان است. تمامی چرخه‌ها زمان بازگشت سرمایه‌ای کم‌تر از ۳ سال داشتند و از جریان نقدی و رقابت‌پذیری بالایی در سناریوی تعرفه فعلی عملکرد مناسبی از خود نشان دادند. پتانسیل تولید هم‌زمان برق در صنعت سیمان میناس گرایس نزدیک به ۱۰۰ مگاوات است و این پتانسیل می‌تواند از انتشار حدود ۲۸۲/۹۱۳ تن دی‌اکسید کربن در سال جلوگیری کند. هم‌چنین مشخص شد که چرخه‌های کالینا، رانکین آلی و رانکین مرسوم پتانسیل قابل توجهی برای بازیابی حرارت اتلافی و تولید برق در صنعت سیمان دارند و از بین آن‌ها، چرخه کالینا عملکرد ترمودینامیکی بهتری دارد و تمامی چرخه‌ها به لحاظ اقتصادی جذاب هستند. خان‌محمدی و سعادت طرقی [۸] در مطالعه‌ای جامع به بررسی گزینه‌های بازیابی حرارت اتلافی در صنعت سیمان با تمرکز بر کارخانه سیمان Quixere واقع در شمال برزیل با ظرفیت تولید ۳۵۰۰ تن در روز پرداختند. آن‌ها با شناسایی نقاط مستعد بازیابی حرارت اتلافی، شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل پیشنهادی را در سیستم‌های بازیابی انرژی انجام داده و سیستمی نوآورانه مبتنی بر استفاده از چرخه ارگانیک رانکین دوسطحی و الکترولایزر غشای تبادل پروتونی برای تولید هیدروژن پیشنهاد کردند. این پژوهش با بهینه‌سازی سه‌هدفه شامل کاهش نرخ تخریب اگزرژی، کاهش انتشار CO_2 و افزایش تولید هیدروژن، نشان داد که ۸۰۴۰ کیلووات از نرخ تخریب اگزرژی کل به سیستم‌های بازیابی حرارت الکترولایزر و هوای گرم تعلق دارد که حدود ۷۲ درصد از کل تخریب اگزرژی سیستم را تشکیل می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تولید هیدروژن حدود ۱۹/۴۳ کیلوگرم در ساعت بوده و کاهش انتشار CO_2 با افزایش نرخ جریان جرم و فشار کاری افزایش می‌یابد. بهینه‌سازی انجام‌شده با رویکرد نقطه ایده‌آل، مقادیر بهینه‌ای برای نرخ تخریب اگزرژی (۱۱۵۰۱/۰۹ کیلووات)، کاهش CO_2 (۸۳۵/۰۲ کیلوگرم در ساعت) و تولید هیدروژن ارائه کرد.

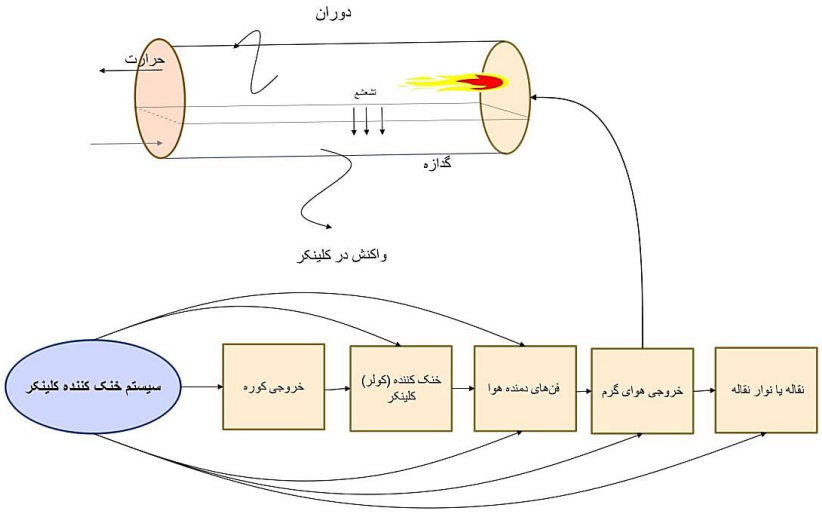
این پژوهش با طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم تولید هم‌زمان توان و حرارت کوچک‌مقیاس مبتنی بر چرخه رانکین اصلاح‌شده، به نوآوری در بهره‌گیری از گرمای اتلافی بخش خنک‌کننده کارخانه سیمان می‌پردازد. این مطالعه از تحلیل‌های پیشرفته ترمودینامیکی و اقتصادی به همراه الگوریتم ژنتیک برای بهبود عملکرد سیستم بهره می‌برد. در بخش‌های بعدی، روش‌شناسی تحقیق شامل مدل‌سازی ترمودینامیکی و فرآیند بهینه‌سازی تشریح می‌شود. سپس، نتایج تحلیل انرژی و اگزرژی ارائه شده و تأثیر پارامترهای عملیاتی بر راندمان سیستم بررسی می‌گردد. در پایان، تحلیل اقتصادی و ارزیابی زیست‌محیطی سیستم بحث شده و پیشنهادهایی برای کاربردهای عملی مطرح خواهد شد.

۲- سیستم تولید سیمان

حرارت موردنیاز در دیگ بخار از چرخه سیمان و از فرایند تولید کلینکر تأمین می‌شود. شکل (۱) شماتیک کلی فرایند سیستم خنک‌کننده کلینکر در صنعت سیمان را نشان می‌دهد. در این سیستم، ابتدا کلینکر داغ خروجی از کوره، مستقیما وارد خنک‌کننده می‌شود. در خنک‌کننده، با دمیدن هوای سرد، دمای کلینکر به شدت کاهش می‌یابد. هوای گرم حاصل از این فرایند که حاوی انرژی حرارتی قابل‌توجهی است، از خروجی سیستم خارج شده و اغلب برای پیش‌گرم کردن مواد اولیه یا تأمین بخشی از انرژی موردنیاز فرایند تولید به کار می‌رود. در نهایت، کلینکر خنک‌شده به منظور ذخیره‌سازی یا انتقال به مراحل بعدی تولید، به کمک نوار نقاله خارج می‌شود. این فرایند نه تنها کیفیت کلینکر را بهبود می‌بخشد، بلکه نقش مهمی در افزایش بهره‌وری انرژی در صنعت سیمان ایفا می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]



شکل ۱: فرایند سیستم خنک‌کننده کلینکر در صنعت سیمان

برای محاسبه حرارت تئوری پخت سیمان ابتدا می‌توان از رابطه تجربی زیر استفاده کرد [۹].

$$q_{\text{theory},1} = 4.187\left(4.11n_{Al_2O_3} + 6.48n_{MgO} + 7.646n_{CaO} - 5.116n_{SiO_2} - 0.59n_{Fe_2O_3}\right)_{CL} \quad (۱)$$

در این معادله، ضریب ۴/۱۸۷ برای تبدیل کالری به ژول استفاده می‌شود و سایر ضرایب انرژی به واحد وزن مرتبط هستند. علامت‌های منفی نشان‌دهنده حضور این مواد در بخش واکنش‌دهنده‌های فرایند پخت می‌باشند. در این رابطه، n درصد وزنی اجزای مختلف کلینکر است که مقادیر آن براساس تحلیلی شیمیایی ذکرشده در بنی‌عامریان و همکاران [۹] در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱: درصد مواد تشکیل‌دهنده سیمان [۹]

Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO
۶/۴۷٪	۳/۳۱٪	۲۰/۸۹٪	۶۲/۸۴٪	۲/٪.۶۷
اکسید آلومینیوم	اکسید آهن	اکسید سیلیسیم	اکسید کلسیم	منیزیم اکسید

گرمای لازم برای انجام واکنش شیمیایی تبدیل ترکیبات قلیایی به سولفات با توجه به مقدار گوگرد موجود در ترکیب محاسبه و تأمین می‌شود.

$$q_{\text{theory},2} = -83.74\left(SO_3 - m_{cement}SO_{3_0}\right) \quad (۲)$$

طبق پژوهش بنی‌عامریان و همکاران [۹]، جرم واحد سیمان (m_{cement}) برابر ۱/۵۲۲ kg، مقدار اولیه یا استاندارد اکسید گوگرد (SO_{3_0}) برابر ۰/۲۵ و مقدار واقعی یا اندازه‌گیری‌شده اکسید گوگرد (SO_3) برابر ۱/۱۹ است. طبق رابطه (۳)، گرمای نهایی مورد نیاز برای تبدیل و پخت سیستم کلینگر برابر مجموع دو مرحله قبل است.

$$q_{\text{theory}} = q_{\text{theory},1} + q_{\text{theory},2} \quad (۳)$$

از طرفی، مقدار کل گرمای تولیدشده از احتراق سوخت به وسیله رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$q_{\text{br}_{\text{chem}}} = m_{\text{br}}Q_j \quad (۴)$$

که در این رابطه، انرژی آزادشده از احتراق واحد جرم سوخت (Q_j) برابر ۴۱۸۸۸ kJ/kg و جرم سوخت مصرف‌شده برای تولید گرما (m_{br}) برابر ۰/۰۸ kg است. در نهایت، پس از محاسبه کل گرمای تولیدشده از احتراق سوخت و تأمین گرمای موردنیاز برای پخت کلینکر، باقی‌مانده حرارت خروجی از چرخه سیمان با توجه به ضریب جداسازی (TSR) ۸۰ درصدی به محاسبه حرارت بویلر و مبدل حرارتی اختصاص یافت.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

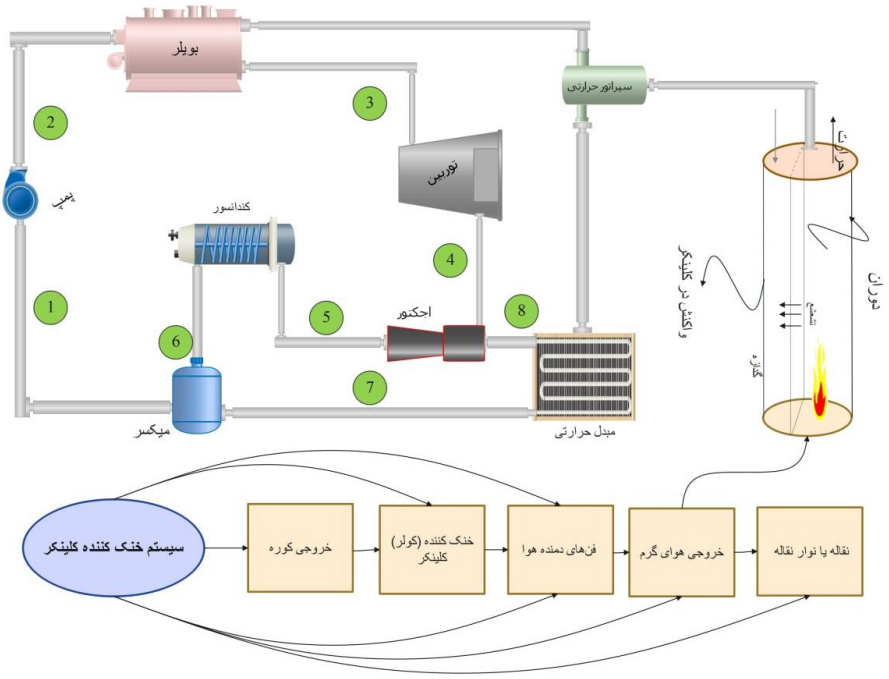
$$q_{\text{boiler}} = \frac{3}{4} TSR \cdot q_{\text{br}_{\text{chem}}} \quad (۵)$$

$$q_{\text{other}} = \frac{1}{4} TSR \cdot q_{\text{br}_{\text{chem}}} \quad (۶)$$

$$q_{\text{heat exchanger}} = q_{\text{br}_{\text{chem}}} (1 - TSR) \quad (۷)$$

۳- چرخه رانکین با بازیابی حرارت کلینکر کارخانه سیمان

چرخه رانکین به دلیل قابلیت استفاده در نیروگاه‌ها و ادغام با سایر سیستم‌های انرژی، ابزاری کلیدی در بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی و کاهش تلفات حرارتی به شمار می‌آید. یکی از راهکارهای نوین برای دست‌یابی به این هدف، اتصال چرخه سیمان به چرخه رانکین است. این روش از حرارت دفع‌شده از کلینکر به عنوان منبع حرارتی برای تأمین انرژی چرخه رانکین استفاده می‌کند. از آن‌جا که میزان حرارت دفع‌شده از کلینکر بیش‌تر از حرارت موردنیاز در بویلر است، لذا به کمک یک جداکننده حرارتی، بخشی از این حرارت برای استفاده در بویلر ذخیره و بخش بعدی در مبدل به کار گرفته می‌شود. شکل (۲) شماتیک کلی چرخه رانکین اصلاح‌شده و ادغام‌شده با چرخه تولید سیمان را به تصویر می‌کشد.



شکل ۲: چرخه رانکین اصلاح‌شده همراه با چرخه تولید سیمان

حرارت اتلافی بخش خنک‌کننده کلینکر سیمان که از طریق جداکننده جدا شده است، وارد بویلر شده و برای گرم‌کردن جریان ورودی استفاده می‌شود. خروجی بویلر که حاوی بخار در دما و فشار بالا است، به توربین منتقل می‌گردد. در توربین، بخار با کاهش فشار، انرژی خود را به‌صورت مکانیکی آزاد می‌کند. با این‌حال، فشار خروجی بخار از توربین هم‌چنان بالا است. لذا برای کاهش بیش‌تر آن از اجکتور[1] استفاده می‌شود. اجکتور دارای دو ورودی اصلی است: بخار خروجی از توربین و گاز یا بخار حاصل از حرارت اتلافی فرایند سیمان. درون اجکتور، جریان پرسرعت با بخار موجود در اجکتور ترکیب می‌شود. این اختلاط باعث ایجاد خلا در اجکتور شده و فشار جریان خروجی از اجکتور را نسبت به فشار ورودی کاهش می‌دهد. این کاهش فشار، عملکرد سیستم را بهینه کرده و شرایط مناسب برای ورود به کندانسور را فراهم می‌کند.

[1] Ejector

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

۳-۱- تحلیل انرژی - اگزرژی

با توجه به شکل (۲)، رابطه (۵) و با در نظر گرفتن ظرفیت گرمایی ویژه نقطه ۲، دما در نقطه ۳ طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$q_{\text{boiler}} = C_{p_2}(T_3 - T_2) \quad (۸)$$

باتوجه به داشتن خواص ترمودینامیکی تمامی جریان‌ها و اختلاف آنتالپی‌ها، می‌توان کار خالص، حرارت ورودی و خروجی و کار پمپ و توربین را محاسبه نمود [۱۰].

$$w_{\text{pump}} = h_2 - h_1 \quad (۹)$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = q_{\text{br}_{\text{chem}}} \quad (۱۰)$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}(h_5 - h_6) \quad (۱۱)$$

$$w_{\text{turbin,is}} = h_3 - h_4 \quad (۱۲)$$

$$w_{\text{turbin,ac}} = w_{\text{turbin,is}} \cdot \eta_{\text{turbin}} \quad (۱۳)$$

$$w_{\text{net}} = w_{\text{turbin,ac}} - w_{\text{pump}} \quad (۱۴)$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m} w_{\text{net}} \quad (۱۵)$$

هم‌چنین برای محاسبه راندمان حرارتی و راندمان اصلی سیستم از روابط زیر کمک گرفته می‌شود.

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_{\text{net}}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \quad (۱۶)$$

هدف اصلی تحلیل اگزرژی، شناسایی بخش‌هایی از سیستم است که بیش‌ترین تلفات اگزرژی (یا ناکارآمدی) در آن رخ می‌دهد. برای افزایش بازدهی سیستم‌های انرژی، لازم است عوامل ایجاد برگشت‌ناپذیری (کاهش کارایی) سیستم شناسایی شوند. این عوامل طبق قانون دوم ترمودینامیک و مفهوم آنتروپی قابل تعریف و تحلیل هستند. در ابتدای امر، برای محاسبه اگزرژی فیزیکی هر جریان لازم است که اگزرژی حالت مرده را محاسبه کرد. در ادامه با کمک رابطه $Ex_i = \dot{m}[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)]$ می‌توان به محاسبه اگزرژی هر جریان در چرخه اصلی رانکین پرداخت. در این رابطه، $\dot{m}$ دبی جرمی سیال عامل برحسب kg/s و h_0، T_0 و s_0 به ترتیب آنتالپی، دما و آنتروپی مرجع برحسب kJ/kg، K و kJ/kgK است. به کمک اگزرژی‌های محاسبه‌شده در مرحله قبل می‌توان نرخ تخریب اگزرژی (Ex_D) را محاسبه کرد که از اختلاف انتالپی ورودی با خروجی بدست می‌آید.

$$Ex_{D,\text{pump}} = \left[\dot{m}\left((h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)\right)\right] - \left[\dot{m}\left((h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)\right)\right] - \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (۱۷)$$

$$Ex_{D,\text{turbin}} = \left[\dot{m}\left((h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0)\right)\right] - \left[\dot{m}\left((h_4 - h_0) - T_0(s_4 - s_0)\right)\right] - \dot{m}\eta_{\text{turbin}}(h_3 - h_4) \quad (۱۸)$$

$$Ex_{D,\text{boiler}} = \left[\dot{m}\left((h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0)\right)\right] - \left[\dot{m}\left((h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)\right)\right] - \dot{Q} \quad (۱۹)$$

با استفاده از اختلاف اگزرژی توربین و پمپ و اگزرژی بویلر، بازده کل چرخه قابل محاسبه است.

$$\varepsilon_{\text{cycle}} = \frac{\left(E_{x_4} - E_{x_3}\right)_{\text{turbin}} - \left(E_{x_2} - E_{x_1}\right)_{\text{pump}}}{\left(E_{x_5} - E_{x_6}\right)_{\text{boiler}}} \quad (۲۰)$$

۳-۲- تحلیل اقتصادی

از منظر ترمو-اقتصادی، یک سیستم زمانی بهینه تلقی می‌شود که میزان اتلاف‌های ترمودینامیکی آن با توجه به هزینه‌های مرتبط، منطقی و قابل‌قبول باشد. در صورتی‌که هزینه‌های ناشی از تلفات انرژی بسیار بالا باشد، لازم است بهینه‌سازی انجام شود

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

تا هم میزان هدررفت انرژی کاهش یابد و هم هزینه‌های اقتصادی سیستم به حداقل برسد. فاکتور بازگشت سرمایه[1] پارامتری اقتصادی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱و۱۲].

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۲۱)$$

در این رابطه، i نرخ بهره و n کل طول دوره عملیاتی سیستم در طی سال‌ها است که باتوجه به پژوهش انوری و همکاران [۱۱] به ترتیب ۱۲ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سیستم نیز از همین رابطه بدست می‌آید. در ادامه به محاسبه فاکتور بازپرداخت سرمایه[2] پرداخته می‌شود. ابتدا ضریب هزینه (Z_{coef}) برای تبدیل هزینه‌های سرمایه‌ای به هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در طول زمان محاسبه می‌گردد. برای محاسبه این ضریب از ضریب بهره‌وری ($\emptyset$) استفاده می‌شود. نرخ بهره مؤثر سالانه (i_{eff}) نیز با توجه به نرخ سالانه بازگشت سرمایه قابل محاسبه است. در نتیجه، با در نظر داشتن نرخ تورم سالانه (r_n)، ضریب تأثیر تورم بر نرخ بازگشت سرمایه (k) حاصل می‌شود.

$$Z_{\text{coef}} = CRF\frac{\emptyset}{3600nn} \quad (۲۲)$$

$$CRF = i_{eff}\left(\frac{\left(1+i_{eff}\right)^n}{\left(\left(1+i_{eff}\right)^n\right)-1}\right) \quad (۲۳)$$

$$k = \frac{1+r_n}{1+i_{eff}} \quad (۲۴)$$

$$CELF = CRF\left(k\frac{1-k^n}{1-k}\right) \quad (۲۵)$$

هزینه‌های کلی سیستم از روابط زیر به‌دست می‌آید. هزینه عملیاتی و نگه‌داری هر زیربخش سیستم از حاصل‌ضرب ضریب هزینه عملیاتی (Z_{coef}) و هزینه سرمایه‌ای هر زیربخش (Z_{subcycle}) حاصل می‌شود [۱۳و۱۴].

توربین

$$Z_{\text{turbin}} = C_{51}{P_3}^{0.7}\left(1+\left(\frac{0.05}{1-\eta_{\text{turbin}}}\right)^3\right)\left(1+5\exp\left(\frac{T_3-866}{10.42}\right)\right) \quad (۲۶)$$

$$\dot{Z}_{\text{turbin}} = Z_{\text{coef}} \cdot Z_{\text{turbin}} \quad (۲۷)$$

پمپ

$$Z_{\text{pump}} = 422\left(\dot{m}W_{\text{pump}}\right)^{0.71} \cdot 1.41 f_\eta \quad (۲۸)$$

$$f_\eta = 1+\left(1-0..8-\eta_{cycle}\right) \quad (۲۹)$$

$$\dot{Z}_{\text{Pump}} = \text{Z}_{\text{pump}} \cdot \text{Z}_{\text{coeficent}} \quad (۳۰)$$

اجکتور

$$Z_{ejector} = 1000 \cdot 16.14 \cdot 0.989 \cdot \dot{m} \cdot \frac{((T_4/P_4)^{0.05})}{{P_5}^{0.75}} \quad (۳۱)$$

$$\dot{Z}_{\text{ejector}} = \text{Z}_{\text{ejector}} \cdot \text{Z}_{\text{coeficent}} \quad (۳۲)$$

کندانسور

$$Z_{\mathbf{cond}} = 1773\dot{m}_5 \quad (۳۳)$$

$$\dot{Z}_{\text{cond}} = \text{Z}_{\text{cond}} \cdot \text{Z}_{\text{coeficent}} \quad (۳۴)$$

بویلر

[1] Capital Return Factor (CRF)

[2] Cumulative Equal Life Factor (CELF)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

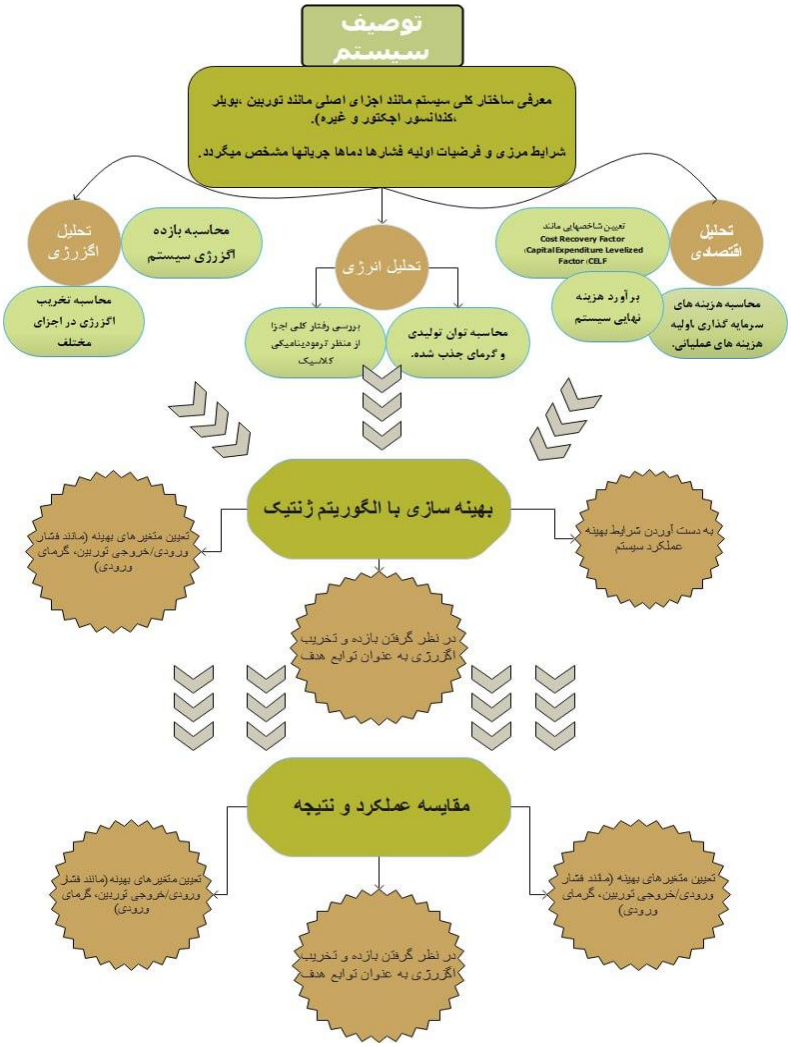
$$Z_{boiler} = 1000 \cdot \left(\frac{q_{boiler}}{t_5 - t_6}\right) \cdot \dot{m}_5 \quad (۳۵)$$

$$\dot{Z}_{boiler} = Z_{boiler} \cdot Z_{coeficent} \quad (۳۶)$$

و نهایتا برای محاسبه هزینه کلی

$$\dot{Z}_{total} = \dot{Z}_{boiler} + \dot{Z}_{cond} + \dot{Z}_{pump} + \dot{Z}_{turbin} \quad (۳۷)$$

شکل (۳) نمایی شماتیک از روند کلی تحلیل، بهینه‌سازی و نتیجه‌گیری ارائه و ارتباط منطقی میان بخش‌های مختلف مطالعه را به‌روشنی نمایش می‌دهد. به‌منظور دست‌یابی به ارزیابی جامع از عملکرد سیستم ترمودینامیکی مورد بررسی، فرآیند تحلیل در قالب چند مرحله پیوسته و هدفمند تدوین شده است. در گام نخست، اجزای اصلی سیستم شامل توربین، بویلر، کندانسور و اجکتور معرفی شده و شرایط مرزی به همراه پارامترهای اولیه تعیین می‌گردند. در ادامه، تحلیل‌های انرژی، اگزرژی و اقتصادی به‌صورت نظام‌مند انجام می‌شود تا تصویری دقیق از منابع اتلاف انرژی، بازده اجزای مختلف و هزینه‌های مرتبط ارائه شود. در مرحله بعد، به‌منظور ارتقای عملکرد سیستم، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی نظیر فشارهای ورودی و خروجی توربین و میزان گرمای ورودی به بویلر بهره گرفته شده است. در این فرآیند، بیشینه‌سازی بازده انرژی و کمینه‌سازی تخریب اگزرژی به‌عنوان اهداف اصلی مدنظر قرار گرفته‌اند. در پایان، با مقایسه نتایج پیش از بهینه‌سازی و پس از آن و تحلیل کمی داده‌های حاصل، تأثیر بهینه‌سازی بر بهبود عملکرد کلی سیستم ارزیابی می‌گردد.



شکل ۳: شماتیکی از روند کلی تحلیل این پژوهش

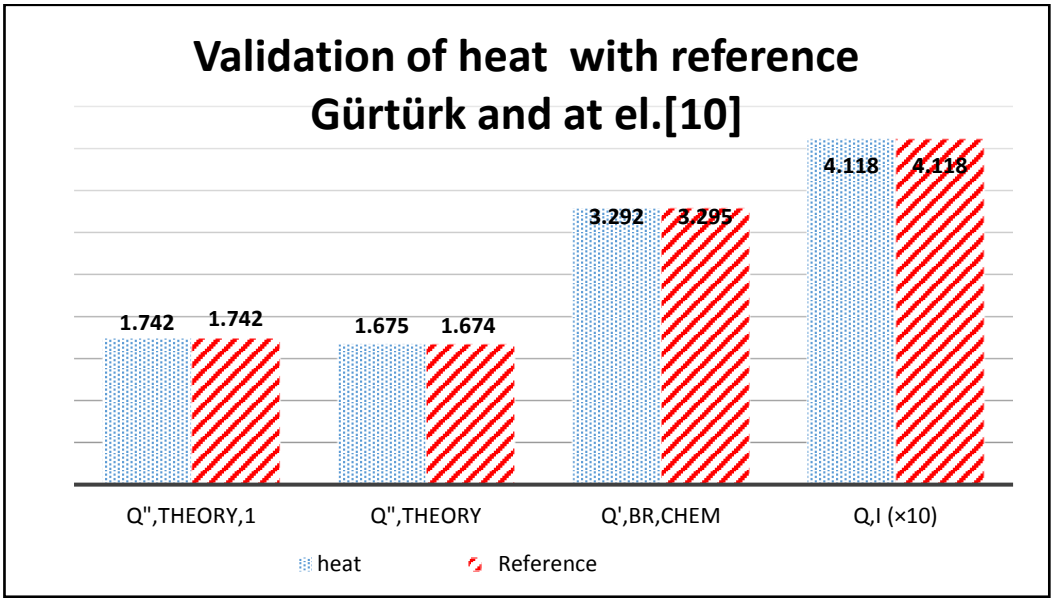
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

۴- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی پژوهش مذکور به‌وسیله مقایسه حرارت اتلافی در سیستم تولید سیمان با نتایج پژوهش بنی‌عامریان و همکاران [۹] انجام شده است. در شکل (۴)، فرآیند اعتبارسنجی مدل حرارتی این پژوهش با استفاده از مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج منتشرشده توسط گورتورک و همکاران نمایش داده شده است. در این مقایسه، چند شاخص کلیدی مرتبط با شار حرارتی و نرخ انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند که اختلاف بین داده‌های این پژوهش و مقادیر مرجع بسیار ناچیز بوده و در تمامی موارد، در محدوده خطای مجاز آزمایشگاهی قرار دارد. این میزان تطابق نزدیک، بیانگر دقت بالای مدل‌سازی حرارتی به‌کاررفته در این مطالعه است. از دیدگاه ترمودینامیکی، چنین هم‌خوانی دقیقی تأییدکننده صحت فرضیات به‌کاررفته در مدل، از جمله شرایط مرزی، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی مواد و نیز روش‌های حل عددی است. هم‌چنین، این موضوع نشان می‌دهد که انتقال حرارت در سیستم به‌درستی شبیه‌سازی شده و افت‌های انرژی با دقت بالا در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع، این اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده قابل اعتماد بوده و می‌توان از آن به‌عنوان پایه‌ای علمی برای تحلیل‌های دقیق‌تر در زمینه بهبود و بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای صنعتی، به‌ویژه صنعت سیمان، بهره‌برداری کرد.



شکل ۴: اعتبارسنجی حرارت اتلافی در سیستم تولید سیمان [۱۰]

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- نتایج تحلیل انرژی - اگزرژی

با داشتن مقادیر ترمودینامیکی برای جریان‌های مختلف سیستم مورد مطالعه می‌توان بازده نظری، بازده چرخه، کار پمپ، کار توربین، کار آیزنتروپیک پمپ و توربین، گرمای منتقل‌شده در مبدل حرارتی و سایر مقادیر مرتبط را محاسبه کرد. این محاسبات، به تحلیل دقیق‌تر عملکرد سیستم و شبیه‌سازی رفتار آن در شرایط مختلف کمک می‌کنند. نتایج این محاسبات در جدول ۲ قابل مشاهده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

جدول ۲: نتایج محاسباتی تحلیل انرژی	
پارامتر	مقدار
η_{cycle}	۰/۳۱۲۵
w_{net}	۷۶۳/۷ kW
w_{pump}	۱۵/۰۴ kW
$w_{\text{turbine,ac}}$	۷۷۸/۷ kW
$w_{\text{turbine,is}}$	۱۱۰۹۵ kW
$\dot{Q}_{\text{in}}$	۱۶۲۱ kJ/s
$q_{\text{heat exchanger}}$	۳۲۴/۱ kW

برای محاسبه و تحلیل اگزرژی سیستم مورد مطالعه با داشتن اگزرژی فیزیکی تمامی جریان‌ها می‌توان اگزرژی تخریب‌شده در اجزای کلیدی مانند پمپ، توربین و بویلر و در نتیجه آن راندمان اگزرژی کل سیستم را محاسبه نمود. اطلاعات محاسبه شده اگزرژی در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۳: نتایج محاسباتی تحلیل اگزرژی	
پارامتر	مقدار
Ex_{dot}^{1}	۱۳۰۵ kJ/s
Ex_{dot}^{2}	۱۶۰۶ kJ/s
Ex_{dot}^{3}	۵۷۷۱۷ kJ/s
Ex_{dot}^{4}	۴۶۵۷۲ kJ/s
Ex_{dot}^{5}	۴۶۵۷۲ kJ/s
Ex_{dot}^{6}	۱۴۵۸ kJ/s
$Ex_{D_{\text{boiler}}}$	۱۶۲۱ kW
$Ex_{D_{\text{pump}}}$	۳۹۹۶ kW
$Ex_{D_{\text{turbine}}}$	۳۶۲۹ kW
$\eta_{ex_{\text{RankineCycle}}}$	۰,۲۴۰۴٪

۲-۵- نتایج تحلیل اقتصادی

با استفاده از محاسبات مربوط به اگزرژی تخریب‌شده در اجزای مختلف سیستم که در بخش قبل به دست آمد، می‌توان تحلیل اگزرژی-اقتصادی سیستم را انجام داد. برای انجام این تحلیل، ابتدا فاکتور بازگشت سرمایه محاسبه می‌شود. این فاکتور بیانگر نسبت سودآوری سرمایه‌گذاری به هزینه اولیه است و پایه‌ای برای سایر محاسبات اقتصادی به شمار می‌رود. پس از محاسبه فاکتور بازگشت سرمایه، از این مقدار برای تعیین هزینه‌های سرمایه‌ای اجزای مختلف سیستم شامل توربین، پمپ، اجکتور، کندانسور، بویلر و هزینه‌های کلی سیستم استفاده می‌شود. جدول (۴) نتایج تمامی این محاسبات را شامل هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های عملیاتی و تحلیل اقتصادی کلی سیستم نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

جدول ۴: نتایج محاسباتی تحلیل اقتصادی	
پارامتر	**مقدار**
CRF	۰/۱۳۹۹
K	۰/۹۳۷۵
CELF	۱/۴۵۶
Z_{coef}	۱/۹۷۱×۱۰$^{-۶}$ kW/m^{2}K
$Z_{turbine}$	۶۵۹۷۰۷ kW/m^{2}K
Z_{pump}	۳۰۳۶۳ kW/m^{2}K
$Z_{ejector}$	۱۹۸۵۵ kW/m^{2}K
$z_{condensor}$	۴۲۵۵۲ kW/m^{2}K
Z_{boiler}	۹۴۱۸۹۱ kW/m^{2}K
$\dot{Z}_{total}$	۳/۳ kJ/m^{2}sK

۳-۵- بهینه‌سازی

در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی سیستم‌های ترمودینامیکی استفاده شده است. در این بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ESS، سه پارامتر فشار ورودی به توربین، گرمای تزریقی به بویلر و فشار خروجی از توربین به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده است (جدول ۵). هم‌چنین راندمان و بازده اگزرژی به‌عنوان توابع هدف تعیین شده‌اند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در جدول (۶) نشان می‌دهد که راندمان انرژی و راندمان اگزرژی به ترتیب به ۲۹/۶۳ و ۳۷/۰۳ درصد افزایش پیدا کرد.

جدول ۵: دامنه پارامترهای بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه	
پارامتر	**دامنه**
فشار ورودی به توربین (P_3)	۱۵۰۰-۱۰۰ kPa
فشار خروجی از توربین (P_4)	۲۰۰-۱۰ kPa
حرارت ورودی به بویلر	۲۰۰۰-۱۰۰۰ kW

جدول ۶: نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه				
پارامتر	**مقدار اولیه**	**مقدار بهینه**	**اگزرژی تخریب‌شده**	**بهینه اگزرژی تخریب‌شده**
فشار ورودی به توربین	۸۰۰ kPa	۱۲۵۰ kPa	۳۶۲۹ kJ	۲۷۵۲/۳ kJ
فشار خروجی از توربین	۴۸ kPa	۱۰۲/۴ kPa		
حرارت ورودی به بویلر	۱۹۷۷ kJ	۳۲۹۸ kJ	۱۶۲۱ kJ	۳۵۰/۹ kJ

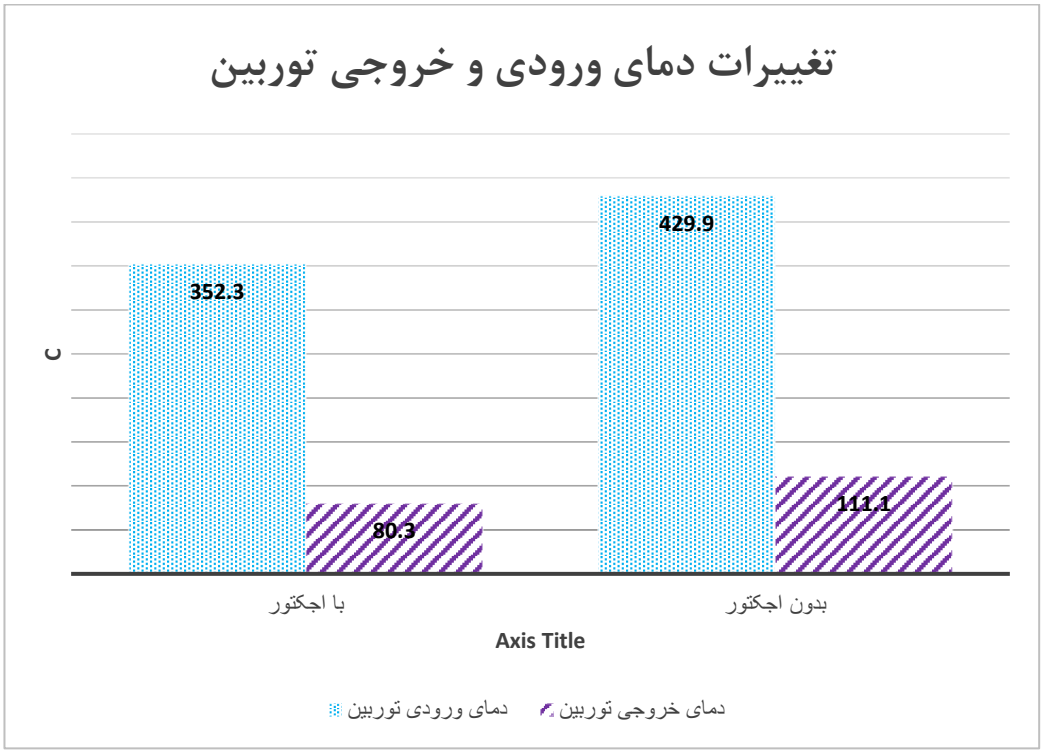
۴-۵- تأثیر استفاده از اجکتور در سیستم پیشنهادی

شکل (۵) روند تغییرات دمای ورودی و خروجی توربین را در دو پیکربندی مختلف چرخه رانکین، یعنی حالت پایه (بدون اجکتور) و حالت اصلاح‌شده (با اجکتور)، به تصویر می‌کشد. با افزودن اجکتور به ساختار چرخه، دمای ورودی توربین از ۹/۴۲۹C° به ۳/۳۵۲C° کاهش یافته است. این کاهش معادل تقریبا ۱۸ درصد و از منظر ترمودینامیکی بیانگر کاهش آنتالپی ورودی به

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

توربین است. کاهش دمای ورودی، ضمن کاهش بار حرارتی اعمال‌شده به دیواره پره‌های توربین، باعث کاهش نرخ انتقال حرارت ناخواسته و بهبود دوام عملکردی تجهیزات چرخان می‌شود. کاهش دمای ورودی همچنین به این معناست که می‌توان منبع حرارتی با دمای پایین‌تر را به‌عنوان ورودی به دیگ بخار یا مبدل حرارتی اصلی مورد استفاده قرار داد، که این امر منجر به افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری حرارتی سیستم در بهره‌برداری از منابع حرارتی با کیفیت پایین نظیر گرمای اتلافی صنعتی، انرژی خورشیدی دمای پایین یا منابع زمین‌گرمایی خواهد شد. از منظر چرخه رانکین، این امر معادل با کاهش دمای بیشینه چرخه است که اثر مستقیمی بر طراحی تجهیزات و هزینه سرمایه‌گذاری دارد. از سوی دیگر، دمای خروجی توربین نیز از ۱/۱۱۱C° به ۳/۸۰C° کاهش یافته است که معادل کاهش حدود ۲۷/۷ درصدی است. این تغییر به معنای کاهش آنتالپی بخار در خروجی توربین بوده و در نتیجه، مقدار گرمای تلف‌شده در کندانسور کاهش می‌یابد. هم‌چنین، دمای پایین‌تر بخار در خروجی توربین، پتانسیل بازیابی انرژی گرمایی را در کاربردهای میانی هم‌چون پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه افزایش می‌دهد. این بازیابی حرارت منجر به کاهش نیاز به حرارت خارجی و در نهایت افزایش بازده حرارتی چرخه خواهد شد. در مجموع، کاهش دماهای ورودی و خروجی توربین در چرخه اصلاح‌شده با اجکتور، علاوه بر بهبود عملکرد ترمودینامیکی، باعث بهینه‌سازی توزیع انرژی، کاهش تلفات حرارتی، افزایش امکان استفاده از منابع حرارتی متنوع، و بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم خواهد شد.



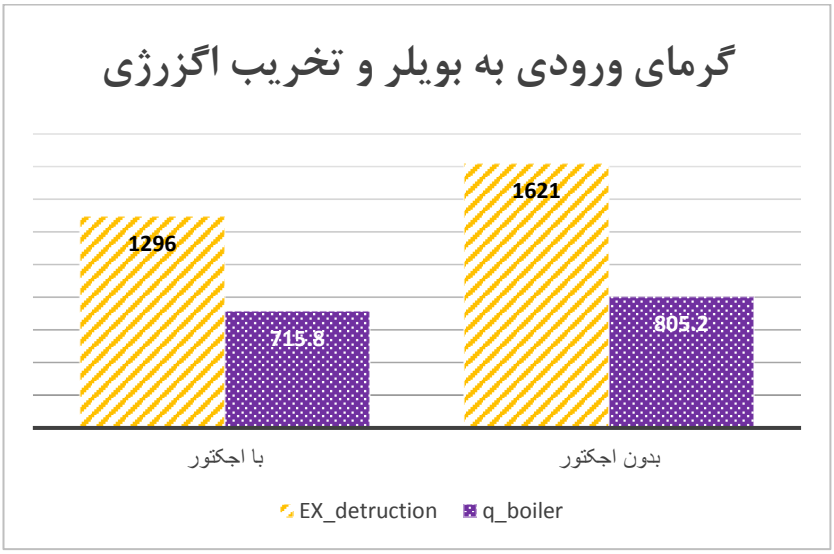
شکل ۵: تغییرات دمای ورودی و خروجی توربین در دو حالت چرخه رانکین ساده و چرخه اصلاح‌شده با اجکتور

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در چرخه رانکین اصلاح‌شده با استفاده از اجکتور، میزان گرمای ورودی به بویلر کاهش قابل توجهی در حدود ۲۲ درصد نسبت به چرخه پایه (بدون اجکتور) داشته است. این کاهش بیانگر استفاده بهینه‌تر از انرژی حرارتی و کاهش بار حرارتی اعمال‌شده بر بویلر می‌باشد. از دیدگاه ترمودینامیکی، کاهش گرمای ورودی در حالی که توان خروجی حفظ یا بهبود یافته باشد، نشان‌دهنده افزایش بازده ترمودینامیکی چرخه است. از سوی دیگر، میزان تخریب اگزرژی نیز در حضور اجکتور حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. کاهش تخریب اگزرژی عمدتاً ناشی از کاهش آنتروپی تولیدی و کاهش اتلافات غیرقابل بازیافت انرژی در اجزای مختلف سیستم، به‌ویژه در بویلر و توربین می‌باشد. این موضوع مطابق با اصول تحلیل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

اگزرژی، نشان‌دهنده بهبود در کیفیت تبدیل انرژی و کاهش نامعادلی‌های ترمودینامیکی است. در مجموع، استفاده از اجکتور نه تنها موجب بهبود بازده حرارتی چرخه می‌شود، بلکه از دیدگاه اگزرژیکی نیز موجب کاهش اتلافات و بهینه‌سازی عملکرد ترمودینامیکی سیستم می‌گردد.



شکل ۶: تأثیر استفاده از اجکتور بر گرمای ورودی به بویلر و تخریب اگزرژی در توربین در چرخه رانکین

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این پژوهش نشان داد که استفاده از گرمای اتلافی در فرایندهای صنعتی نظیر تولید سیمان، علاوه بر کاهش مصرف انرژی و هزینه‌ها، می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز منجر شود. همچنین در سیستم رانکین اصلاح‌شده، استفاده از اجکتور تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش فشار خروجی توربین داشته است. این کاهش فشار با ایجاد خلأ توسط اجکتور حاصل می‌شود که موجب بهبود عملکرد سیستم و افزایش کارایی آن می‌شود. اصلاح چرخه رانکین با استفاده از اجکتور نتایج زیر را به دنبال داشت.

- ✓ کاهش حدودا ۲۰ درصدی دمای ورودی به توربین
- ✓ کاهش حدودا ۳۲ درصدی دمای خروجی از توربین
- ✓ کاهش حدودا ۵ درصدی آنتالپی ورودی به توربین
- ✓ کاهش حدودا ۳/۵ درصدی آنتالپی خروجی از توربین
- ✓ کاهش حدودا ۲۲ درصدی حرارت ورودی به بویلر
- ✓ کاهش حدودا ۱۲ درصدی اگزرژی تخریب‌شده در توربین
- ✓ بازده ۳۱/۲۵ درصدی انرژی سیستم و بازده ۲۴/۰۴ درصدی اگزرژی

استفاده از نانوسیالات به جای سیالات کاری سنتی در این سیستم، به‌همراه بهره‌برداری از حرارت اضافی توربین در چرخه رانکین اصلاح‌شده برای تولید آب شیرین از روش‌های MED و MSF و همچنین به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و مقایسه نتایج به دست آمده، از جمله موضوعاتی هستند که تاکنون به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌گران در تحقیقات آینده، مشابه آن‌چه نورالهی و همکاران [۱۵] انجام داده‌اند، از روش‌های پتانسیل‌سنجی مبتنی بر GIS برای شناسایی ظرفیت‌های موجود در مکان‌های مختلف استفاده کنند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی			
نرخ تخریب اگزرژی، kJ/kg	$\dot{E}x_D$	ضریب جداسازی	TSR
نرخ هزینه، $/s	$\dot{C}$	سرعت باند، m/s	v
گرمای ویژه در فشار ثابت، kJ/kg.°K	C_p	ضریب بازیابی سرمایه	CRF
آهنگ اگزرژی، kJ/kg	$\dot{E}x$	دما، °C	T
نیروی اصطکاک، N	$F_{friction}$	هزینه سرمایه	Z
نرخ گرمای انتقالی، kW	$\dot{Q}$	هزینه بر واحد اگزرژی، $/GJ	c
نرخ حجمی جریان هوا، m/s	$\dot{V}$	اگزرژی ویژه، kJ/kg.s	ex
نرخ کار انجام‌شده، kW	$\dot{W}$	فاکتور تصحیح بهره‌وری، year	n
نرخ هزینه سرمایه، $/s	$\dot{Z}$	فشار، Pa	p
ضریب تصحیح بهره‌وری	f_η	آنتروپی، kJ/kg.°K	s
دبی جرمی، kg/s	$\dot{m}$	**علائم یونانی**	
ارزش خرارتی سوخت	$q_{\mathrm{Br}_{\mathrm{chem}}}$	اگزرژی کل سیستم	$\varepsilon_{\mathrm{cycle}}$
اختلاف دمای لگاریتمی	ΔT_{lm}	راندمان حرارتی	η_{th}
ضریب عمر	CELF	بازده یا بهره‌وری	η
آنتالپی، kJ/kg	h	نرخ بهره	i

مراجع

[1] Engin, T., & Ari, V. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study. Energy conversion and management, 46(4) (2005), 551-562.

[2] Ozturk, M., & Dincer, I. Utilization of waste heat from cement plant to generate hydrogen and blend it with natural gas. International Journal of Hydrogen Energy, 47(48) (2022), 20695-20704.

[3] Mungyeko Bisulandu, B. J. R., Ilinca, A., Tsimba Mboko, M., & Mbozi Mbozi, L. Thermodynamic performance of a cogeneration plant driven by waste heat from cement kilns exhaust gases. Energies, 16(5) (2023), 2460.

[4] Khater, A. M., Soliman, A., Ahmed, T. S., & Ismail, I. M. Power generation in white cement plants from waste heat recovery using steam-organic combined Rankine cycle. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 4 (2021), 100138.

[5] Redjeba, Y., Stoppatob, A., Benatoc, A., & Kaabeche-Djerafid, K. Waste Heat Recovery from Algerian cement industries: SRC and ORC thermodynamic optimization, economic and environmental factors. In Proceedings of ECOS 2021–The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (2021).

[6] Turakulov, Z., Kamolov, A., Norkobilov, A., Variny, M., & Fallanza, M. Enhancing Sustainability and Energy Savings in Cement Production via Waste Heat Recovery. Engineering Proceedings, 67(1) (2024), 11.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

[7] de Assis Gomes, N., de Assis, T. M. B., & Arrieta, F. R. P. Electricity Cogeneration Potential in Minas Gerais Cement Industry with Thermodynamic Cycles. International Journal of Energy Research, 2024(1) (2024), 5560003.

[8] Khanmohammadi, S., & Saadat-Targhi, M. Energy and exergy analyses and multi-criteria optimization of a novel waste heat recovery system in the cement factory for cleaner product. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(2) (2025), 115417.

[۹] علمداری علی‌پور، مهران و بنی‌عامریان، زهرا. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی فرایند تولید همزمان برق و حرارت برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در کارخانه سیمان. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۶(۱)، ۸۳-۷۴.

[10] Moltames, R., Azizimehr, B., & Assareh, E. Energy and Exergy Efficiency Improvement of a Solar Driven Trigeneration System Using Particle Swarm Optimization Algorithm. Journal of Solar Energy Research, 4(1) (2019), 31-39.

[11] Anvari, S., Khalilarya, S., & Zare, V. Exergoeconomic and environmental analysis of a novel configuration of solar-biomass hybrid power generation system. Energy, 165 (2018), 776-789.

[12] Azish, E., Assareh, E., Azizimehr, B., & Lee, M. Exergoeconomic analysis of an integrated electric power generation system based on biomass energy and Organic Rankine cycle. Australian Journal of Mechanical Engineering, (2023), 1-12.

[13] Dincer, I. (Ed.). Comprehensive energy systems. Elsevier. (2018).

[14] Gürtürk, M., & Oztop, H. F. Energy and exergy analysis of a rotary kiln used for plaster production. Applied thermal engineering, 67(1-2) (2014), 554-565.

[15] Moltames, R., Noorollahi, Y., Yousefi, H., Azizimehr, B., & Naseri, A. Assessment of Potential Sites for Biogas Production Plants from Domestic, Agricultural, and Livestock Waste. Fuel Communications (2024), 100132.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]

Optimization and exergy-energy-economic analysis of a modified Rankine cycle utilizing waste heat recovery from clinker processes in a cement plant

Habibollah Farrokhi[1], Alireza Baheri[2], Behzad Azizimehr[3*], Farhad Dowlatabadi[4]

[1]Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C. , Islamic Azad University, Dezful, Iran.
[2]Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C. , Islamic Azad University, Dezful, Iran.
[3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Applied Industries, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
[4]Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: summer 2025 Accepted: autumn 2025

Abstract

With the advancement of technology and more sophisticated thermodynamic analyses, the optimization of the Rankine cycle and its integration with other thermal energy sources have become feasible. This study focuses on the design and simulation of a small-scale power and heat generation system based on a modified Rankine cycle. The primary aim is to harness waste heat from the cooling section of a cement production plant for the simultaneous generation of electricity and heat, employing a comprehensive approach from both thermodynamic and economic perspectives. The energy analysis of the system is based on the principles of conservation of mass, energy, and momentum, while the exergy analysis employs a model derived from the first and second laws of thermodynamics. Critical parameters influencing the system's performance—such as turbine inlet and outlet pressures and the heat supplied to the boiler—were identified and their effects on improving system efficiency were evaluated. Optimization was performed using a genetic algorithm, taking into account the characteristics of the working fluid. The results of the analysis reveal that, under initial conditions, the system achieves an energy efficiency of 23% and an exergy efficiency of 22.68%. After optimization, these efficiencies were increased to 29.63% and 37.03%, respectively.

Keywords: exergy, combined heat and power generation system, cement production plant, system performance optimization, enhanced Rankine thermal cycle.
*corresponding author: b.azizimehr@yahoo.com

Cite this article as: Habibollah Farrokhi, Alireza Baheri, Behzad Azizimehr, Farhad Dowlatabadi, Optimization and exergy-energy-economic analysis of a modified Rankine cycle utilizing waste heat recovery from clinker processes in a cement plant, . **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(3), 1-17**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.544]