



## تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید چندگانه نوین ترکیب شده با ذخیره انرژی

## هوای فشرده و سیستم سرمایش اجکتوری مبتنی بر گوگرد دی اکسید

علی عیوضی<sup>\*۱</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

## کلمات کلیدی

ذخیره‌سازی هوای فشرده،  
تبرید اجکتوری، انرژی، گوگرد  
دی اکسید، تحلیل اقتصادی.

## چکیده

یک سیستم جدید ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که با سرمایش، گرمایش و برق ترکیبی یکپارچه شده است در این مطالعه پیشنهاد و بررسی می‌شود. سیستم مورد بررسی از گوگرد دی اکسید به عنوان سیال کاری زیر سیستم تبرید اجکتوری جهت تولید خنک‌کننده استفاده می‌کند که تاکنون در مطالعات قبلی به کار گرفته نشده است و حرارت اتلافی بازیابی شده و در ذخیره‌ساز هوای فشرده ذخیره می‌شود که جنبه نوآورانه مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی کامل و جامعی روی سیستم پیشنهادی انجام می‌شود. سیستم پیشنهادی از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و عملکرد سیستم از طریق پارامترهای خروجی کمی‌سازی می‌شود. با استفاده از توابع هزینه به روز سیستم مورد مطالعه از جنبه اقتصادی بررسی می‌شود تا مقرون به صرفه بودن سیستم پیشنهادی به خوبی نمایان شود. علاوه بر این، یک تحلیل پارامتریک برای ارزیابی رفتار سیستم با تغییر پارامترهای کلیدی در شرایط کاری گوناگون انجام می‌شود. نتایج تحلیل ترمودینامیکی نشان دهنده عملکرد ترمودینامیکی مطلوب سیستم پیشنهادی است به صورتی که بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد برای سیستم مورد مطالعه حاصل می‌شود. به علاوه، با تحلیل اقتصادی صورت گرفته هزینه کل سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول به دست می‌آید.

## مقدمه

است [۱-۳]. در پی صنعتی شدن کشورها و توسعه شهرنشینی و افزایش تقاضا برای مصرف انواع انرژی بویژه سوخت‌های فسیلی، انرژی به طور عام و نفت و گاز به طور خاص در استراتژی‌های توسعه ملی و جهانی و سیاست‌گذاری‌های کلان، جایگاهی بسیار مهم پیدا کرده و در حقیقت به یک عامل کلیدی و استراتژیک در حیات ملت‌ها و دولت‌ها تبدیل شده است. تولید و انتشار آلاینده‌ها به همراه افزایش مصرف سوخت در کلان شهرها از مسائل جدی مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس گزارش منتشر شده توسط سازمان جهانی بهداشت، سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون نفر بر اثر تنفس هوای آلوده جان خود را از دست می‌دهند. آلاینده‌های هوا مانند دی اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ازن و مونوکسید کربن، پیامدهای ناگوار متعددی را بر سلامتی انسان‌ها و مرگ‌های زودرس به دنبال دارند. بر اساس مطالعات انجام شده، حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد آلودگی هوا ناشی از خودروها و سایر وسایل

سطح زندگی بشر همواره به میزان و نحوه کاربرد انرژی برای انجام فعالیت‌های خود بستگی داشته است، به طوری که شناسایی منابع انرژی‌زا و بهره‌برداری بهینه از آنها، یکی از ابزارهای مهم در جهت توسعه و خودکفایی اقتصادی هر کشور از آغاز تاریخ تاکنون محسوب شده است. صرفه‌جویی در انرژی در ساختمان‌ها یکی از اقدامات مهمی است که برای کاهش کمبود انرژی و توسعه پایدار بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف انرژی سیستم‌های کانال تهویه توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مصرف انرژی فن ناشی از مقاومت سیستم‌های تهویه تقریباً ۲۰ تا ۴۰ درصد انرژی مصرفی ساختمان‌ها ی عمومی است. برای برخی از ساختمان‌ها، نرخ‌ها حتی بالاتر از آنهایی است که با سیستم‌های خنک‌کننده تهویه مرتبط هستند. بنابراین، تعیین نحوه بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های کانال تهویه، در نتیجه کاهش مقاومت و کاهش مصرف انرژی فن، به یک موضوع کلیدی تبدیل شده

\* نویسنده مسئول: [alieyvazi1996@gmail.com](mailto:alieyvazi1996@gmail.com)

ذخیره شده در مواد غذایی بوده است. به تدریج آشنایی بشر با آتش، دامنه استفاده از منابع و انرژی‌های موجود در طبیعت را با به کارگیری چوب افزایش داد. گرچه بشر از وجود سوخت‌هایی نظیر نفت خام آگاهی داشت اما برای قرن‌ها عمده‌ترین ماده تامین‌کننده انرژی جوامع، همان چوب و انرژی شیمیایی نهفته شده در آن بود. پس از اکتشاف منابع نفت در جهان و شروع حرکت صنعتی شدن جوامع، جهت تولید محصولات مختلف که پیامد صنعتی شدن بود، نیازهای انرژی بشر به مراتب گسترده‌تر شد و منابع مختلفی مانند نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی را دربرگرفت. پس از دو قرن استفاده نامحدود از منابع و ذخایر نفتی، هنگامی که عمر برخی از مخازن نفتی در مناطق مختلف جهان به پایان خود نزدیک شد و قیمت آن افزایش یافت، کارشناسان در کشورهای مختلف به فکر جایگزینی حامل‌های انرژی دیگر با سوخت‌های فسیلی افتادند. با این‌حال، همواره در کنار مسئله‌ی محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، بحث زیست محیطی نیز مطرح بوده است. دی‌اکسیدکربن به عنوان بزرگ‌ترین نماینده گازهای گلخانه‌ای به تنهایی بیش از ۱۰۰۰ سال بر روی آب و هوا تاثیر می‌گذارد و با جذب اشعه مادون قرمز منعکس شده توسط زمین، موجب پدیده گرمایش زمین می‌شود. این پدیده، جهان را از نظر تنش آب و هوایی تحت تاثیر قرار داده است و این مسئله ممکن است خساراتی از جمله خشکسالی، باران‌های اسیدی و افزایش سطح دریاها را به همراه داشته باشد [۸]. در این راستا تلاش‌های زیادی انجام گرفته و به کارگیری انرژی‌هایی نظیر گاز طبیعی، انرژی خورشیدی، انرژی باد و انرژی زمین گرمایی اهمیت ویژه‌ای به خود گرفته و با سرعت فراوانی رو به گسترش می‌باشند. با گسترش تحقیقات در زمینه منابع تجدیدپذیر انرژی، انتظار می‌رود در آینده‌ای نه چندان دور، این منابع، به خصوص در سیستم‌های تولید پراکنده انرژی، توجیه اقتصادی لازم برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی را به دست آورند. هدف اصلی از ارزیابی و بررسی منابع تجدید پذیر، یافتن جایگاهی مناسب و ارزان قیمت‌تر برای منابع مصرفی می‌باشد. پژوهشگران موفق شدند توسط برق تولید شده از انرژی‌های تجدیدپذیر و با فشرده‌سازی هوا در زیر زمین برق مازاد بر مصرف را ذخیره کنند. این روش کم هزینه بوده و نسبت به باتری‌های ذخیره کننده برق کارایی بیشتری دارد. استفاده از پانل‌های خورشیدی و مزارع بادی به طور روزافزونی در حال افزایش است؛ اما ذخیره‌سازی انرژی به دست آمده با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از آن در شبکه‌های برق‌رسانی، به یک چالش بزرگ برای دانشمندان تبدیل شده است. دانشمندان اروپایی به تازگی موفق شده‌اند به یک

نقلیه است و مابقی ناشی از صنعت و سایر منابع است. بنابراین کنترل آلاینده‌های هوا برای ایجاد محیطی پاک و دلپذیر بسیار مهم است [۴]. با توجه به تاثیرات انرژی در حوزه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، سیاسی، اجتماعی و زیست محیطی و ضرورت نگرش جامع به این مقوله مهم و حیاتی، آنچه که امروز نیاز آن بیش از گذشته احساس می‌شود، بررسی نقش و اهمیت انرژی در کیفیت زندگی جوامع و لزوم بهینه‌سازی مصرف آن می‌باشد. میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها هر سال در حال افزایش است. از سوی دیگر، کاهش منابع تجدید ناپذیر و تاثیرات زیان‌بار استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، محدودیت‌هایی را برای تأمین انرژی ساختمان‌ها ایجاد می‌کند. از این رو، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای رسیدگی به تقاضای انرژی در ساختمان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. برای تحقق این امر، ساخت ساختمان‌ها و سازه‌های پایدار مورد نیاز است تا شهرنشینی آینده توسط جوامع مورد توجه قرار گیرد. مدیریت و بهبود اقدامات بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها سناریوی آینده اولویت بندی شده تا سال ۲۰۵۰ است. یکی از عوامل مهم در تخریب تجهیزات صنعتی، خوردگی است که به عنوان یکی از مهمترین مشکلات صنعت شناخته می‌شود. علاوه بر اتلاف مواد و انرژی مرتبط با خوردگی، خسارات اقتصادی نیز به دنبال دارد و اثرات مخرب ناشی از خسارات اقتصادی و زیست محیطی و همچنین تلفات جانی را چندین برابر می‌کند. دمای بالا، فشار بالا و محیط شیمیایی بسیار خورنده از ویژگی‌های اصلی خطوط لوله گاز ترش است. انتقال گاز ترش به پالایشگاه موضوعی حیاتی است که می‌تواند دیواره‌های داخلی لوله‌ها را به دلیل وجود هیدروژن گوگرد سمی و خورنده تخریب کرده و منجر به انفجار راه‌اندازی شود. این تلفات به قدری مهم هستند که بخش بزرگی از ادبیات و پیشرفت‌های موجود در کشورهای توسعه یافته به معرفی فناوری‌های مختلف کنترل خوردگی مفید اختصاص یافته است [۵-۷]. بی‌تردید روابط نزدیک و تنگاتنگ انرژی و توسعه صنعتی و افزایش مصرف و بهای انرژی طی سال‌های اخیر از یک طرف و نقش انرژی در بهای تمام شده کالاها تولیدی و صنعتی و نیز فشار اقتصاد و تجارت جهانی بر اقتصاد کشورها در جهت کاهش قیمت محصولات از سوی دیگر موجب شده است که اهمیت مصرف بهینه انرژی بیش از گذشته مورد توجه سیاست‌گزاران و مدیران بنگاه‌های اقتصادی و صنعتی کشور قرار گیرد. جوامع اولیه انسانی، نیازهای خود را با استفاده از ابزارآلات ساده و ابتدایی برآورده می‌نمودند و تنها انرژی که از طبیعت برای ادامه حیات خود دریافت می‌نمودند، همان انرژی

با فشارهای ذخیره‌سازی مختلف بهینه‌سازی شد. چن و همکاران [۱۴] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیباتیک ایزوباریک جدید براساس یک سیال فرار را معرفی کردند که هوای فشرده و سیال فرار محفظه ذخیره گاز را به دو قسمت تقسیم می‌کند تا فشار محفظه ذخیره گاز ثابت بماند. آن‌ها گزارش دادند که راندمان سیستم پیشنهادی ۶/۲۶ درصد بیشتر از سیستم سنتی است. لی و همکاران [۱۵] یک سیستم بهبود یافته ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که از مواد تغییر فاز دهنده و آب برای ذخیره گرما استفاده می‌کند را طراحی کردند. مشخصه سیستم پیشنهادی تولید سرمایش، گرمایش و توان خروجی به طور همزمان می‌باشد. یائو و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید همزمان متشکل از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، یک موتور گازی و سیستم تبرید آب آمونیاک را پیشنهاد داده و بهینه‌سازی کردند. چن و همکاران [۱۷] یک ادغام جدید بین یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و سیستم تولید چندگانه را پیشنهاد کردند. آن‌ها همچنین یک بهینه‌سازی را با استفاده از دو تابع هدف شامل هزینه و عملکرد حرارتی سیستم انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که در زمستان هزینه سیستم، راندمان انرژی و راندمان انرژی به ترتیب ۳۳۳۰ دلار، ۲۲ درصد و ۱۶/۹ درصد است. از سوی دیگر، در تابستان این مقادیر به ترتیب ۳۵۰۷ دلار، ۱۴/۷ و ۶۰ درصد می‌باشد. در مطالعه دیگری، یک سیستم تولید همزمان که شامل یک چرخه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بود توسط روشناس و همکاران [۱۸] پیشنهاد شد. سیستم تولید همزمان پیشنهادی گرمایش و برق را به طور همزمان تولید می‌کند. سیستم پیشنهادی از نظر رویکرد انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها همچنین میزان انتشار کربن دی‌اکسید در محیط را محاسبه کردند. آن‌ها گزارش دادند که بازده انرژی و بازده انرژی به ترتیب ۵۸ درصد و ۷۸ درصد می‌باشد. فراهم کردن قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی در سیستم‌های تولید چندگانه می‌تواند باعث رشد چشمگیر کارایی سیستم تولید چندگانه شود که تا کنون در مطالعات قبلی به این مورد پرداخته نشده است. برای آرایه سیستم تولید چندگانه کارآمد بازیابی حرارت اتلافی امری بسیار حیاتی محسوب می‌شود. به علاوه امکان ذخیره‌سازی انرژی اتلافی بازیابی شده باعث بهبود چشمگیر عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه می‌شود که در کار حاضر با به کارگیری از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده این مهم محقق می‌شود. بررسی مطالعات گذشته نشان داد که اکثر سیستم‌های بررسی شده تولید همزمان ترکیب شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا از راندمان

روش کم هزینه برای ذخیره‌سازی انرژی دست پیدا کنند. در این روش از هوا برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. با وجود اینکه دانشمندان توانسته‌اند با استفاده از باتری‌های جریان و شبکه‌های برق‌رسانی هوشمند، تا حدودی مشکل ذخیره‌سازی برق تولید شده را با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر حل کنند، اما به تازگی محققان اروپایی توانسته‌اند با استفاده از روش فشرده‌سازی هوا، نیز فناوری جدیدی برای ذخیره‌سازی نیروی برق ایجاد است. در این روش که چندین دهه سابقه دارد، از برق مازاد بر مصرف برای فشرده‌سازی هوا استفاده می‌شود و سپس هوای فشرده شده در مکانی غار مانند در زیر زمین ذخیره می‌گردد. برای استفاده از برق ذخیره شده توسط این روش که CAES نام دارد، کافی است هوای فشرده شده به سمت یک توربین گازی هدایت شود تا توربین به کمک آن برق تولید کند. این روش از نظر تئوری، روشی کارآمد و کاربردی است؛ زیرا با هزینه بسیار کمی می‌توان از آن استفاده کرد و در واقع ارزان‌ترین روش برای ذخیره‌سازی انرژی است. از سویی دیگر استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر همانند ایجاد مخازنی برای تولید نیروی برق آبی که باید تجهیزات خاصی در کوه‌ها نصب شوند، نیازمند هیچ‌گونه شرایط جغرافیایی خاصی نیست. ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سنتی از یک توربین گاز برای تولید الکتریسیته در مرحله آزادسازی انرژی استفاده می‌کند که نه تنها سوخت‌های فسیلی را مصرف می‌کند، بلکه گازهای گلخانه‌ای نیز منتشر می‌کند [۹]. بنابراین، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آدیباتیک پیشرفته (AA-CAES) برای ذخیره گرمای فشرده با استفاده از یک دستگاه ذخیره گرما پیشنهاد شد تا دیگر سوخت اضافی در مرحله تخلیه مورد نیاز نباشد [۱۰]. موزایینی و همکاران [۱۱] تحلیل انرژی و پارامتریک سیستم یک مرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوا فشرده را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که بیشترین تخریب انرژی در سیستم مورد بررسی در بسط دهنده‌ها صورت می‌گیرد و راندمان ایزوتروپیک دستگاه روی نابودی انرژی تأثیر زیادی دارد. گو و همکاران [۱۲] یک سیستم چند مرحله‌ای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را مدل‌سازی کردند و عملکردهای غیرطراحی آن را با دو حالت عملیاتی مقایسه و تحلیل کردند. آن‌ها قانون عملیاتی بهینه هر مرحله از جمله توزیع نسبت فشار و توزیع بازده را تعیین کردند. یائو و همکاران [۱۳] با بررسی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز چند مرحله‌ای سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، تأثیرات سرعت چرخش و زاویه ورودی تیغه بر راندمان سیستم را ارزیابی کردند. علاوه بر این، سرعت چرخش برای تحقق بهترین کارایی

پیش گرم می‌شود و سپس قبل از ورود به واحد اجکتور خنک می‌شود. بقیه گوگرد دی‌اکسید به فشارهای کمتر منبسط می‌شود و قبل از ورود به مبدل حرارتی دوم از توربین خارج می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به عنوان جریان محرکه نامیده می‌شود که در ورودی نازل محرک در مرحله اول اجکتور منبسط می‌شود. گوگرد دی‌اکسید به نازل مکش وارد می‌شود، جایی که در مرحله بعدی اجکتور با گوگرد دی‌اکسید خارج شده از نازل محرک مخلوط می‌شود. جریان مخلوط در آخرین مرحله اجکتور وارد واحد انتشار می‌شود و فشار آن افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. جریان دو فاز در واحد جداکننده مکانیکی جدا می‌شود. گوگرد دی‌اکسید مایع اشباع قبل از تولید سرمایه در واحد تبخیر کننده وارد یک شیر انبساط می‌شود و گوگرد دی‌اکسید بخار اشباع قبل از مخلوط شدن با جریان خنک شده از مبدل حرارتی دوم وارد کمپرسور می‌شود. جریان مخلوط در مبدل حرارتی چهار خنک و متراکم می‌شود و چرخه تکرار می‌شود.

### تحلیل ترمودینامیکی

معادلات حاکم بر ترمودینامیکی و اقتصادی در این بخش توضیح داده شده است. در مدل‌سازی حاضر مفروضات زیر مطرح شده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می‌کند.
- تلفات حرارتی لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تلفات فشار در لوله‌ها و اتصالات صفر است.
- تغییرات در انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است.
- دمای سکون ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار سکون ۱۰۱ کیلو پاسکال است.

برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم نیاز است که خواص ترمودینامیکی هر نقطه از سیستم با استفاده از معادله موازنه جرم و انرژی مورد بررسی قرار بگیرد [۱۹].

$$\sum m_i = \sum m_e \quad (1)$$

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i \quad (2)$$

در این رابطه Q و W به ترتیب گرما و کار انتقال یافته در سیستم است. انرژی مخصوص سیستم با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰].

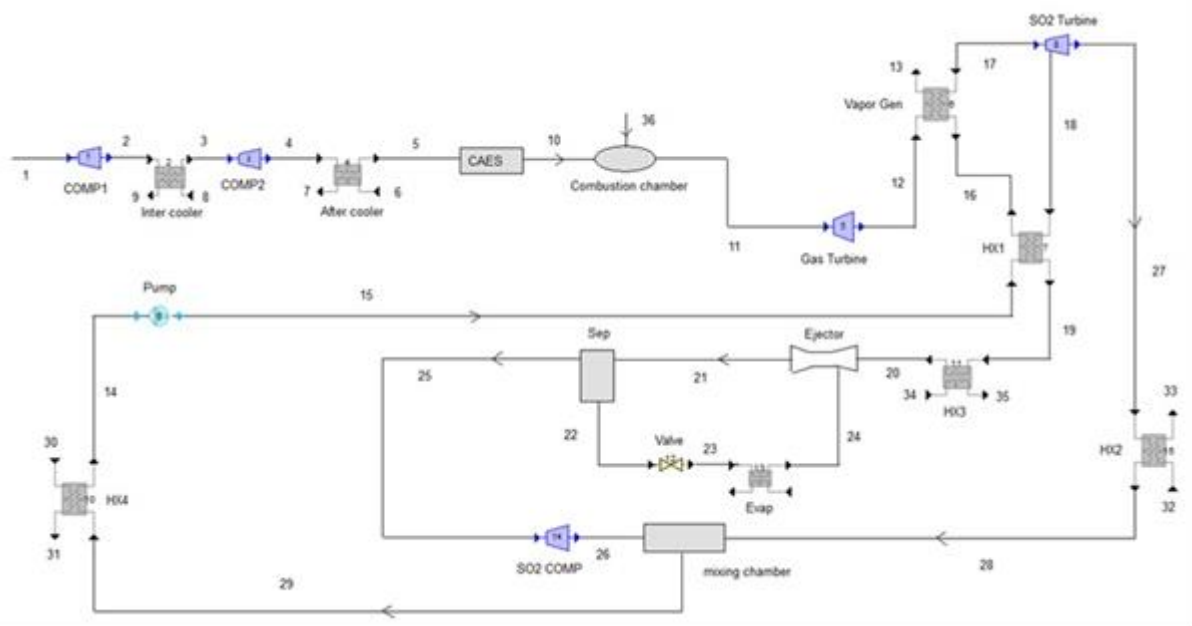
$$\text{ex}_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

در رابطه بیان شده  $T_0$  دمای سکون،  $h_0$  آنتالپی سکون و  $S_0$  آنتروپی سکون است. داده‌های اولیه برای مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

حرارتی پایین رنج می‌برند. بنابراین در تحقیق حاضر آرایش جدیدی از ترکیب سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا با سیستم تولید همزمان معرفی شده است که بازده حرارتی بالایی را به ارمغان می‌آورد. انرژی اتلافی در سیستم تولید چندگانه بازیابی شده و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی اتلافی توسط سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده فراهم می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که ترکیب چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری-رانکین بر اساس سیال عامل گوگرد دی‌اکسید در مقایسه با مطالعات قبلی که از واحد سرمایه‌گذاری برای تولید ظرفیت سرمایه‌گذاری در سیستم تولید چندگانه استفاده کرده‌اند، عملکرد زیر سیستم سرمایه‌گذاری را بهبود می‌دهد و تا به حال در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته است که جنبه نوآورانه تحقیق حاضر می‌باشد. به علاوه، تحلیل فراگیر ترمودینامیکی و اقتصادی به همراه ارزیابی پارامتریک روی سیستم پیشنهادی صورت گرفته است. ورودی‌های سیستم یکپارچه برق برای فشرده‌سازی هوا و سوخت برای فرآیند احتراق است. از طرف دیگر، خروجی‌های این چرخه گرمایش تولید شده از اینترکولر، افتراکولر و مبدل حرارتی دوم، بار خنک‌کننده در واحد اواپراتور و برق در توربین‌های گاز و گوگرد دی‌اکسید است. هدف این تحقیق ارزیابی تحلیل کامل ترمودینامیکی و اقتصادی برای سیستم نوین ترکیبی تولید همزمان با ذخیره‌سازی انرژی هوا بر اساس چرخه سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید است.

### توصیف سیستم

شماتیک سیستم تولید همزمان ترکیب شده با ذخیره‌سازی انرژی هوا بررسی شده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای محیط توسط کمپرسور کم فشار متراکم می‌شود و سپس قبل از مرحله تراکم با فشار بالا در داخل خنک کن توسط روغن حرارتی خنک می‌شود. پس از آن، هوا وارد یک پس خنک کن می‌شود که در آنجا تا دمای نزدیک به محیط خنک می‌شود. در مرحله تخلیه، روغن حرارتی برای گرم کردن هوا قبل از ورود به محفظه احتراق استفاده می‌شود. متان برای افزایش دمای ورودی توربین گاز استفاده می‌شود. گاز خروجی وارد توربین گاز می‌شود و تا فشار محیط منبسط می‌شود. سپس با عبور از یک فوق گرم کن گرمای مورد نیاز سیستم تولید همزمان را تامین کند. گوگرد دی‌اکسید قبل از ورود به مبدل حرارتی یک به فشارهای بالاتر پمپ می‌شود. سپس گوگرد دی‌اکسید گرم شده وارد سمت دیگر فوق گرم کن می‌شود تا عملکرد سیستم بهبود یابد. کسری از گوگرد دی‌اکسید با خروج از توربین در مبدل حرارتی اول



شکل ۱: شماتیک سیستم پیشنهادی

جدول ۲: روابط مدل سازی اجکتور

روابط	پارامترهای اجکتور
$\mu = \frac{m_{sf}}{m_{pf}}$	نسبت جاب جرم اجکتور
$\pi_{eje} = \frac{p_{ex}}{p_{sf}}$	نسبت افزایش فشار اجکتور
$\eta_{sf} = \frac{h_{pf} - h_{noz}}{h_{pf} - h_{noz, is}}$	راندمان ایزنتروپیک نازل متحرک
$h_{pf} - h_{noz} = \frac{1}{2} v_{noz}^2$	تعالد انرژی بین بخش نازل و سیال اولیه
$V_{mf} = \frac{v_{noz}}{1 + \mu}$	حفظ تکانه در بخش اختلاط
$h_{out} = \frac{h_{pf} + h_{sf} \mu}{1 + \mu}$	تعالد انرژی برای اجکتور
$\eta_{mix} = \frac{v_{mf, s}^2}{v_{mf}^2}$	راندمان اختلاط
$h_{out} - h_{mf} = \frac{1}{2} v_{mf, is}^2$	معادله تعادل انرژی بین بخش اختلاط و خروجی
$\eta_{dif} = \frac{h_{out, is} - h_{mf}}{h_{out} - h_{mf}}$	کارایی دیفیوزر

جدول ۱: داده های اولیه

مقدار	پارامتر
۸۰	بازده ایزنتروپیک کمپرسور (/)
۷۵	بازده ایزنتروپیک توربین (/)
۷۰	بازده ایزنتروپیک پمپ (/)
۰/۰۹	دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kg/s)
۱۵	دما ورودی کمپرسور هوای شماره یک (c)
۱۰۱	فشار ورودی کمپرسور هوای شماره یک (kPa)
۰/۰۹	دبی جرمی ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kg/s)
۴۰	دما ورودی کمپرسور هوای شماره دو (c)
۳۱۹	فشار ورودی کمپرسور هوای شماره دو (kPa)

با تحلیل ترمودینامیکی کامل صورت گرفته روی سیستم برای

محاسبه بازده انرژی و اگزرژی سیستم از روابط زیر استفاده می شود

$$\eta_{energy} = \frac{W_{GT} + W_{ST} + Q_{evap} + Q_{IC} + Q_{AC} - W_{SC} - W_{SC}}{W_{air Comp1} + W_{air Comp2} + m_{36} LHV} \quad (۴)$$

$$\eta_{exergy} = 1 - \frac{E_{dist, total}}{W_{air Comp1} + W_{air Comp2} + m_{36} e_{36}} \quad (۵)$$

در این روابط  $E_{dist, total}$  نابودی اگزرژی کل سیستم و

ارزش حرارتی پایین سوخت است.

**تحلیل اقتصادی**

آمده با مرجع معرفی شده وجود دارد که دقت بالای اعتبارسنجی صورت گرفته را نشان می دهد.

جدول ۳: توابع هزینه اجزای سیستم.

نرخ هزینه	اجزای سیستم
$z = \left( \frac{39.5 \times m_2}{0.9 - \eta_{comp}} \right) \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$	کمپرسور هوا
$z = \left( \frac{46.08 \times m_{11}}{0.995 - \frac{P_{10}}{P_{11}}} \right) (1 + \exp(0.018 \times T_{11} - 26.4))$	محفظه احتراق
$z = \left( \frac{479.34 \times m_{12}}{0.92 - \eta_{tur}} \right) \ln \left( \frac{P_{11}}{P_{12}} \right) (1 + \exp(0.036 \times T_{12} - 54.4))$	توربین گازی
$z = 2143 \times (A_{heat\ exchanger})^{0.5}$	مبدل حرارتی
$z = 4750 \times (W_{Turb})^{0.75}$	توربین گوگرد دی اکسید
$z = 200 \times (W_{pump})^{0.65}$	پمپ
$z = 4122 \times (A_{vapor,gen})^{0.6}$	ژنراتور حرارتی بخار
$Z = (16/14 \times 989 \times m_{20}) \left( \frac{T_{24}}{P_{24}} \right)^{0/05} p_{21}^{0.75}$	اجکتور

جدول ۴: اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی با کار فانی و همکاران [۲۸].

نتایج مرجع	نتایج به دست آمده	پارامتر
۱۵	۱۵	دمای ورودی کمپرسور هوا ۱ (c)
۱۴۷/۲۵	۱۴۷/۶	دمای خروجی کمپرسور هوا ۱ (c)
۳۱۹/۳۹	۳۱۹/۴	فشار ورودی کمپرسور هوا ۲ (kPa)
۱۰۱۰	۱۰۵۴	فشار خروجی کمپرسور هوا ۲ (kPa)
۱۳/۸۹	۱۲/۸۵	کار کمپرسور هوا ۱ (kw)
۱۴/۸۸	۱۵/۴۵	کار کمپرسور هوا ۲ (kw)

**نتایج**

در این مطالعه با معرفی سیستم نوین تولید چندگانه به همراه ذخیره ساز انرژی هوا که با سیستم سرمایه گذاری مبتنی بر گوگرد دی اکسید ترکیب شده است شاهد عملکرد مطلوب سیستم پیشنهادی

تحلیل ترمودینامیک، که به طور گسترده در سیستم های انرژی استفاده می شود، عملکرد اقتصادی و ترمودینامیکی را به طور همزمان ارزیابی می کند. این رویکرد هزینه ها را به گونه ای بررسی می کند که صرفه اقتصادی در اجزای سیستم را مشخص می کند. این امر به شناسایی مناطق برای بهبود، بهینه سازی و تخصیص مقرون به صرفه منابع کمک می کند [۲۱]. در حالی که سرمایه گذاری بیشتر می تواند عملکرد ترمودینامیکی را در سیستم های تبدیل انرژی افزایش دهد، متعادل کردن هزینه های سرمایه گذاری با افزایش بهره وری نقش مهمی دارد [۲۲]. در بررسی قبلی، پارامترهای انرژی و انرژی برای هر نقطه حالت تعیین شد. علاوه بر این، ایجاد معادلات هزینه برای حفظ تعادل هزینه در بین اجزای مختلف سیستم مهم است. رابطه زیر برای محاسبه نرخ سرمایه گذاری و نگهداری سرمایه استفاده می شود [۲۳].

$$Z_k = CRF \times \frac{\varphi_r}{(N \times 3600)} \times PEC_k \quad (6)$$

جایی که فاکتورهای  $\varphi$ ،  $N$  و  $PEC$  به ترتیب ضریب تعمیر و نگهداری، زمان کارکرد در یک سال و هزینه سرمایه گذاری قطعه هستند. همچنین پارامتر  $CRF$  ضریب بازیابی سرمایه را نشان می دهد که با رابطه زیر تعریف می شود.

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

به صورتی که  $i$  نرخ بهره و  $n$  دوره عملکرد را بیان می کند. در نهایت، هزینه کل سیستم از تقسیم هزینه سالانه بر کل ساعات کار در طول یک سال به دست می آید که ۷۴۴۶ ساعت در سال در نظر گرفته می شود [۲۴]:

$$Z_{Total} = (TOC \times \varphi \times CRF) / t \quad (8)$$

که در این رابطه  $TOC$  نشان دهنده مجموع هزینه های عملیاتی است. در مطالعه حاضر با استفاده از توابع هزینه به روز که در جدول ۳ نشان داده شده است، تحلیل اقتصادی کارآمدی برای بهبود توجیه اقتصادی به کارگیری سیستم پیشنهادی صورت می گیرد [۲۵]، [۲۶]، [۲۷].

**اعتبار سنجی**

در مطالعه حاضر آرایش جدیدی از سیستم تولید چندگانه با زیر سیستم سرمایه گذاری اجکتوری با سیال عامل جدید گوگرد دی اکسید بررسی شده است. برای اعتبار سنجی سیستم پیشنهادی، نتایج حاصل با نتایج کار فانی و همکاران [۲۸] مقایسه شده است و همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است اختلاف ناچیزی بین نتایج به دست



بهبود کارایی سیستم پس از شناسایی بیشترین نابودی انرژی صورت گرفته در میان اجزای سیستم، با افزایش دمای ورودی به عضو با بیشترین نابودی انرژی، مقدار نابودی انرژی بیشینه را کاهش می‌دهیم که تاثیر بیشتری جهت افزایش بازده سیستم در مقایسه با روش های قبلی دارد. همان طور که نتایج حاصل از محاسبه نابودی انرژی اجزای سیستم در جدول ۶ نشان داده شده است، نابودی انرژی کل سیستم ۴۹۱۸۹ کیلووات محاسبه شده و بیشترین نابودی انرژی در توربین گوگرد دی‌اکسید رخ می‌دهد و کمپرسور هوا یک کمترین نابودی انرژی را میان اجزای سیستم پیشنهادی دارد.

جدول ۶: نابودی انرژی اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (kw)
نابودی انرژی افرتر کولر	۹/۶
نابودی انرژی ذخیره ساز هوا فشرده	۴۱/۴۱
نابودی انرژی محفظه احتراق	۲۵/۶۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا یک	۱/۹
نابودی انرژی کمپرسور هوا دو	۲/۰۶
نابودی انرژی اواپراتور	۱۹۵۷
نابودی انرژی اجکتور	۹۰
نابودی انرژی محفظه اختلاط	۳/۱۲
نابودی انرژی کمپرسور گوگرد دی‌اکسید	۹۶۱/۸
نابودی انرژی توربین گوگرد دی‌اکسید	۳۰۲۵۵
نابودی انرژی توربین گازی	۲/۳۹
نابودی انرژی مبدل حرارتی یک	۷۷۰۲
نابودی انرژی مبدل حرارتی دو	۹۶۹۶
نابودی انرژی مبدل حرارتی سه	۴۰/۳۵
نابودی انرژی مبدل حرارتی چهار	۳۴۹/۵

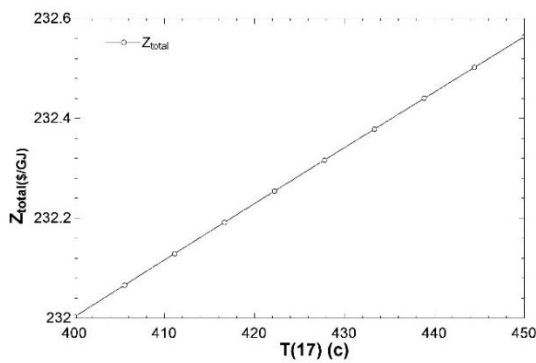
برای گسترش کاربرد سیستم پیشنهادی در صنایع مختلف تجاری، صنعتی و مسکونی برای فراهم کردن الکتریسیته، گرمایش و سرما به صورت همزمان در محل مصرف انرژی و حذف هزینه ناشی از انتقال الکتریسیته از نیروگاه تا محل مصرف و امکان ذخیره‌سازی انرژی و فروش انرژی مازاد به شبکه که دستاورد مهم مطالعه حاضر در زمینه تولید الکتریسیته و جلوگیری از قطع برق در زمان اوج مصرف و برق رسانی پایدار محسوب می‌شود، از سیال عامل جدید گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری استفاده می‌شود و به کارگیری اجزای ترمودینامیکی با توابع هزینه کارآمد و به روز توجیه اقتصادی سیستم را بهبود می‌دهد و طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی روی سیستم هزینه کل سیستم پیشنهادی مقدار ۲۳۲ دلار بر گیگا ژول محاسبه می‌شود و بازگشت سرمایه در کار حاضر ۱۸ سال حاصل می‌شود که

هستیم. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، انرژی و اقتصادی بررسی شده و همچنین انتشار دی‌اکسید کربن چرخه در مرحله بهره‌برداری تعیین می‌شود. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام می‌شود. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل سیستم در این بخش نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خواص ترمودینامیکی سیالات عامل با استفاده از نرم افزار EES محاسبه می‌شوند. با داشتن خواص ترمودینامیکی هر جریان می‌توان شاخص‌های عملکرد سیستم را محاسبه کرد. مطالعه حاضر امکان تولید همزمان الکتریسیته، گرمایش و سرما را فراهم می‌کند و با استفاده از ذخیره‌ساز هوای فشرده قابلیت تامین انرژی در زمان پیک مصرف را فراهم می‌کند و کاربرد گسترده‌ای در اماکن مسکونی، تجاری و صنعتی دارد. با تحلیل ترمودینامیکی صورت گرفته روی سیستم پیشنهادی بازده انرژی ۲۱ درصد و بازده انرژی ۵۵ درصد گزارش می‌شود و نشان‌دهنده کارکرد مناسب سیستم و آرایش بهینه اجزای ترمودینامیکی سیستم است. استفاده از سیال عامل گوگرد دی‌اکسید باعث می‌شود که بیشترین توان خروجی سیستم پیشنهادی توسط توربین گوگرد دی‌اکسید تولید شود و بازده سیستم رشد چشمگیری پیدا کند. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی سیستم در جدول ۵ نشان داده شده است.

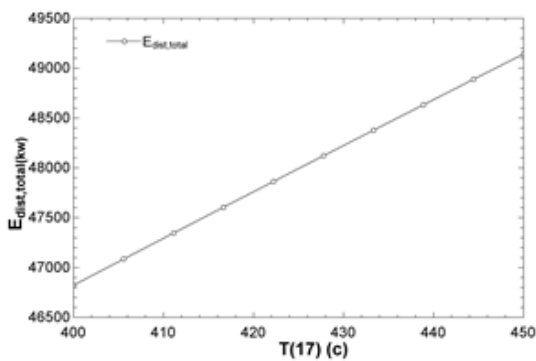
جدول ۵: نتایج تحلیل ترمودینامیکی سیستم

پارامتر	مقدار
راندمان انرژی (%)	۲۱
راندمان انرژی (%)	۵۵
کار توربین گازی (kw)	۲۲/۸
کار کمپرسور گوگرد دی‌اکسید (kw)	۹۹۵/۴
کار توربین گوگرد دی‌اکسید (kw)	۴۶۹۵۹
کار پمپ گوگرد دی‌اکسید (kw)	۶۴۳/۸
کار کمپرسور هوا ۱ (kw)	۱۲/۸۵
کار کمپرسور هوا ۲ (kw)	۱۵/۴۵

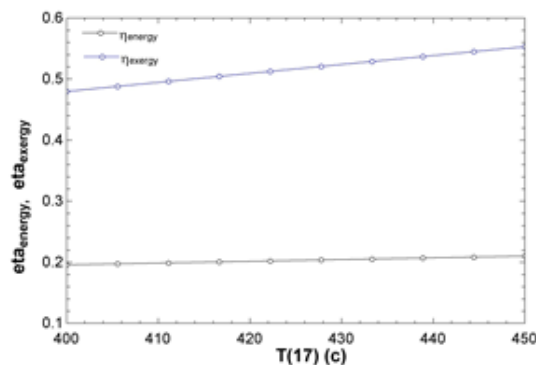
برای بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی بیشترین نابودی انرژی در بین اجزای ترمودینامیکی سیستم را محاسبه نموده و با ارایه روش هایی برای کاهش نابودی انرژی بیشینه در سیستم بازده سیستم افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم تولید چندگانه افزایش دادن دمای بیشینه و کاهش دمای کمینه می‌باشد. در کار حاضر برای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: تاثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد دی اکسید روی عملکرد سیستم (الف) هزینه (ب) نابودی انرژی (ج) بازده انرژی و انرژی.

### ۱-۲-۱- تاثیر تغییرات راندمان ایزنتروپیک کمپرسور

#### روی عملکرد سیستم

افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور مطابق نمودار ۳ باعث بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی می شود. بازده انرژی و انرژی سیستم تحت تاثیر افزایش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور، افزایش می یابد. وقتی که از کمپرسور با راندمان ایزنتروپیک بالا استفاده می کنیم نابودی انرژی در سیستم کاهش می یابد و قابلیت انجام کار بهبود می یابد.

نشان دهنده قابلیت مناسب تجاری سازی و توجیه اقتصادی بالای کار حاضر است. طبق نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی سیستم مورد مطالعه که در جدول ۷ نشان داده شده است، اجکتور بیشترین سهم از نرخ هزینه بین اجزای سیستم را دارد و کمترین نرخ هزینه در سیستم متعلق به کمپرسورها می باشد.

جدول ۷: نرخ هزینه اجزای سیستم

پارامتر	مقدار (\$/GJ)
هزینه محفظه احتراق	۵۵۳
هزینه کمپرسور هوا یک	۱۲۵
هزینه کمپرسور هوا دو	۱۴۹/۴
هزینه کمپرسور گوگرد دی اکسید	۸۴۱۷۴۸
هزینه اجکتور	۳۱۰۶۴۷۳۶۵
هزینه توربین گازی	۳۲۹/۲
هزینه مبدل حرارتی یک	۵۱۵۱۵
هزینه مبدل حرارتی دو	۵۹۲۹۴
هزینه مبدل حرارتی سه	۱۸۳۷۷
هزینه مبدل حرارتی چهار	۳۲۴۳
هزینه مبدل حرارتی بخار	۱۰۲۸۷
هزینه پمپ	۱۳۳۸۹
هزینه توربین گوگرد دی اکسید	۱۵۱۵۷۳۸۴

### ۱-۱- تحلیل پارامتریک سیستم پیشنهادی

تحلیل پارامتریک روشی قابل اعتماد برای تعیین کیفیت عملکرد یک سیستم در شرایط مختلف برای به دست آوردن درک جامع از سیستم است. در سیستم مورد مطالعه، تأثیر پارامترهای اصلی طراحی مانند راندمان ایزنتروپیک کمپرسور و دمای ورودی توربین گوگرد دی اکسید بر عملکرد سیستم پیشنهادی ارزیابی شده است.

### ۱-۲- تاثیر تغییرات دمای ورودی توربین گوگرد

#### دی اکسید روی عملکرد سیستم

طبق نمودار ۲ وقتی که دمای ورودی توربین گوگرد دی اکسید از ۴۰۰ درجه سانتی گراد تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد افزایش می یابد، بازده انرژی و انرژی سیستم بهبود می یابد. هزینه کل سیستم تحت تاثیر افزایش دمای ورودی توربین گوگرد دی اکسید افزایش می یابد. هنگامی که دمای ورودی توربین گوگرد دی اکسید افزایش می یابد، تخریب انرژی در سیستم رشد یافته و قابلیت انجام کار کاهش می یابد.

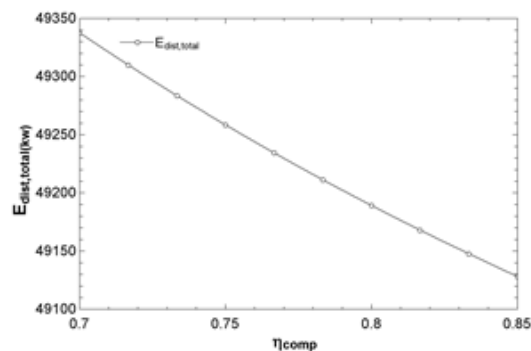


اقتصادی بررسی شده است. بررسی دقیق در مورد هر جزء سیستم برای یافتن نقاط مهم و نقص سیستم انجام شده است. با تغییر پارامترهای طراحی، تأثیر تغییر آن‌ها بر عملکرد سیستم در ادامه بررسی شد. در مطالعه حاضر با به کارگیری گوگرد دی‌اکسید در سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری شاهد بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته قبلی هستیم و آرایشی نوین از سیستم تولید چندگانه آرایه شده است که با زیر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوا ترکیب شده است. نتایج پایه مدل‌سازی ترمودینامیکی نشان داد که بازده انرژی و اکسرژی سیستم به ترتیب ۲۱ و ۵۵ درصد است. با به کارگیری توابع هزینه به روز و کارآمد برای اجزای سیستم و با تحلیل اقتصادی با داده‌های اقتصادی اولیه فرض شده، نتایج پایه تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که نرخ کلی هزینه سیستم ۲۳۲ دلار بر گیگاژول محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی صورت گرفته نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی کارکرد مناسبی داشته و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و می‌تواند گام شایان توجهی در توسعه صنعتی و ذخیره‌سازی انرژی اتلافی سیستم‌های انرژی بردارد.

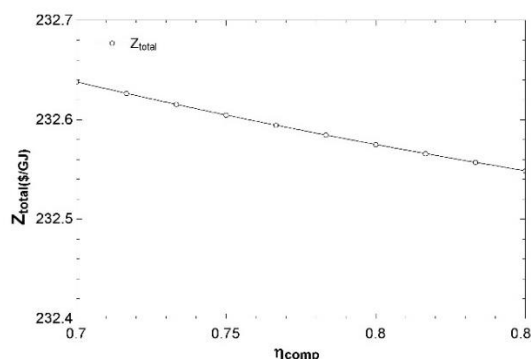
فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، $m^2$
C	هزینه، (\$) )
D	قطر، (m)
Ex	اکسرژی، (W)
h	آنتالپی، (kJ/kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی، (kg/s)
S	آنترپی، (kJ/kg.K)
T	دما، (c)
p	فشار، (kPa)
n	زمان
علائم یونانی	
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\emptyset$	نسبت اکیووالانس
LHV	اکسرژی سوخت

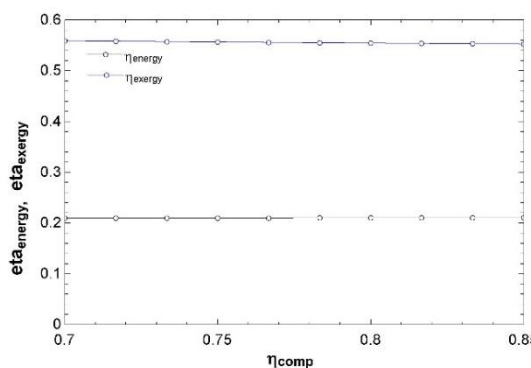
کار مصرفی توسط کمپرسور با افزایش راندمان ایزنتروپیک آن کاهش می‌یابد و در نتیجه به تجهیزات کوچکتر در سیستم نیاز داریم و هزینه کل سیستم کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: تأثیر تغییرات بازده ایزنتروپیک کمپرسور روی عملکرد سیستم (الف) نابودی اکسرژی (ب) هزینه (ج) بازده انرژی و اکسرژی.

نتیجه‌گیری

یک زیر سیستم یکپارچه جدید ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده همراه با یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر سیستم سرمایه‌گذاری اجکتوری گوگرد دی‌اکسید در این مطالعه پیشنهاد و بررسی شده است. سیستم پیشنهادی با استفاده از رویکردهای انرژی، اکسرژی و

## منابع

- [9] Qing H, Lijian W, Qian Z, Chang L, Dongmei D, Wenyi L. Thermodynamic analysis and optimization of liquefied air energy storage system. *Energy*. 2019 Apr 15;173:162-73.
- [10] He Q, Liu H, Hao Y, Liu Y, Liu W. Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis. *Renewable energy*. 2018 Nov 1;127:835-49.
- [11] Mozayeni H, Wang X, Negnevitsky M. Exergy analysis of a one-stage adiabatic compressed air energy storage system. *Energy Procedia*. 2019 Feb 1;160:260-7.
- [12] Guo H, Xu Y, Zhang Y, Liang Q, Tang H, Zhang X, Zuo Z, Chen H. Off-design performance and an optimal operation strategy for the multistage compression process in adiabatic compressed air energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*. 2019 Feb 25;149:262-74.
- [13] He Y, Chen H, Xu Y, Deng J. Compression performance optimization considering variable charge pressure in an adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*. 2018 Dec 15;165:349-59.
- [14] Chen LX, Xie MN, Zhao PP, Wang FX, Hu P, Wang DX. A novel isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system on the base of volatile fluid. *Applied Energy*. 2018 Jan 15;210:198-210.
- [15] Li R, Wang H, Zhang H. Dynamic simulation of a cooling, heating and power system based on adiabatic compressed air energy storage. *Renewable energy*. 2019 Aug 1;138:326-39.
- [16] Yao E, Wang H, Wang L, Xi G, Maréchal F. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. *Energy conversion and management*. 2017 Apr 15;138:199-209.
- [17] Chen S, Arabkoohsar A, Yang Y, Zhu T, Nielsen MP. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating, and power system with subcooled compressed air energy storage considering off-design characteristics. *Applied Energy*. 2023.
- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Jan;136:1-9.
- [2] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jul;135(7):1-21.
- [3] Yadegari M, Khoshnevis AB. Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems. *The European Physical Journal Plus*. 2020 Jun 1;135(6):534.
- [4] Yadegari M, Ghassemi M. Investigation of the Effects of Temperature, Mass Flow Rate of the Injected Fuel, Pore Diameter, Porosity and Ambient Pressure on the Amount of Pollutants in the Combustion Chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*. 2022 Mar 1;23(1):122-46.
- [5] Yadegari M. An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *The European Physical Journal Plus*. 2021 Oct 11;136(10):1019.
- [6] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Aug;42:1-5.
- [7] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022 Sep 13;137(9):1042.
- [8] Mamorian, Akbari, Seydamirhossein, Javanshir. Energy and exergy analysis of organic Rankine cycle used to recover waste heat from cement industry. *Science and technology in mechanical engineering*. 2023.

- working fluid. Desalination. 2017 Nov 15;422:113-23.
- [24] Razmi AR, Janbaz M. Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). Energy Conversion and Management. 2020 Jan 15;204:112320.
- [25] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. Energy conversion and management. 2018 Dec 1;177:339-49.
- [26] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SM. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. Energy. 2017 Apr 1;124:625-39.
- [27] Cavalcanti EJ. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017 Jan 1;67:507-19.
- [28] Sadreddini A, Fani M, Aghdam MA, Mohammadi A. Exergy analysis and optimization of a CCHP system composed of compressed air energy storage system and ORC cycle. Energy conversion and management. 2018 Feb 1;157:111-22.
- Thermal Engineering. 2021 Mar 25;187:116562.
- [18] Roushenas R, Razmi AR, Soltani M, Torabi M, Dusseault MB, Nathwani J. Thermo-environmental analysis of a novel cogeneration system based on solid oxide fuel cell (SOFC) and compressed air energy storage (CAES) coupled with turbocharger. Applied Thermal Engineering. 2020 Nov 25;181:115978.
- [19] Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. Fundamentals of engineering thermodynamics. John Wiley & Sons; 2010 Dec 7.
- [20] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. International journal of hydrogen energy. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [21] Yilmaz C, Kanoglu M, Abusoglu A. Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant. International journal of hydrogen energy. 2015 Oct 26;40(40):14021-30.
- [22] Noaman M, Saade G, Morosuk T, Tsatsaronis G. Exergoeconomic analysis applied to supercritical CO2 power systems. Energy. 2019 Sep 15;183:756-65.
- [23] Nemati A, Sadeghi M, Yari M. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic