



تحلیل انرژی و انرژی چرخه رانکین آلی استفاده شده برای بازیابی گرمای اتلافی از صنعت سیمان

مجتبی ماموریان^۱، سیدامیر حسین اکبری^{۲*}، یوسف جوانشیر^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران

چکیده

امروزه محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی جهان را تحت تاثیر خود قرار داده و ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه، ۵۷۰ میلیون بشکه نفت از ۱۴۶۳ میلیون بشکه نفت اختصاص داده شده در بخش‌های مسکونی، صنعتی و حمل نقل را هدر می‌دهد. صنعت سیمان به عنوان یکی از متقاضیان پر مصرف انرژی، حدود ۱۴٪ از انرژی بخش صنعتی کشور را مصرف نموده که حدود ۴۰٪ از این انرژی در طول فرآیندهای تولید اتلاف می‌شود. بنابراین، این پژوهش به منظور بازیابی گرمای اتلاف شده از صنعت سیمان توسط چرخه رانکین آلی صورت گرفته و توسط نرم افزار حل گر معادلات مهندسی EES شبیه‌سازی شده است. همچنین، به جهت جلوگیری از خوردگی مبادله‌کن‌های گرمایی و کنترل فرآیند تبخیر سیال آلی، از یک حلقه روغن حرارتی استفاده شده است. اتانول با توان تولیدی خالص ۶۲۱۳ kW، بازده حرارتی ۲۲/۹۱٪ و بازده انرژی ۲۴/۱۸٪ نسبت به R123، R1233zd(E)، R1234ze(Z) و R600a بهترین عملکرد را دارا است و به عنوان سیال عامل مناسب انتخاب شده است. با افزایش هر ۱۰۰ kPa فشار ورودی به توربین بخار، بازده‌های حرارتی و انرژی به ترتیب ۲/۷٪ و ۲/۶۷٪ افزایش می‌یابند و نیز با افزایش این شاخص شدت جریان جرمی ورودی به تبخیر کننده، ۶/۵٪ کاهش می‌یابد. افزایش هر یک درجه دمای چگالنده، به طور تقریبی موجب کاهش ۰/۶۵٪ بازده حرارتی و ۰/۶۶٪ بازده انرژی می‌شود.

کلمات کلیدی

صنعت سیمان، بازیابی گرمای اتلاف شده، چرخه رانکین آلی، تغییرات اقلیمی، حلقه روغن حرارتی.

Energy and exergy analysis of the organic Rankine cycle used for recovering waste heat from the cement industry

Mojtaba Mamourian¹, Seyed Amir Hossien Akbari^{2*}, Yousef Javanshir²

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Industries, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran

Abstract

The limitation of global fossil fuel resources has had a significant impact in recent years. Iran wastes 570 million barrels of oil out of the allocated 1463 million barrels for the residential, industrial, and transportation sectors. The cement industry, as one of the high-energy consumers, accounts for approximately 14% of the country's industrial energy consumption, with about 40% of this energy being lost during production processes. This study aims to recover the waste heat from the cement industry using the Rankine cycle and simulate it using the Engineering Equation Solver (EES) software. Additionally, a thermal oil loop has been employed to prevent corrosion of heat exchangers and control the organic fluid evaporation process. Ethanol has been selected as the suitable working fluid, with a net power production capacity of 6213 kW, a thermal efficiency of 91.22%, and an exergy efficiency of 18.24%, outperforming R123, R1233zd(E), R1234ze(Z), and R600a. Increasing the turbine's inlet pressure by 100 kPa increases thermal and exergy efficiencies by 2.7% and 2.67%, respectively, while decreasing the mass flow rate into the evaporator by 5.6%. Increasing the condenser temperature by one degree results in approximately a 5.6% reduction in thermal efficiency and a 5.5% reduction in exergy efficiency.

Keywords

cement industry, waste heat recovery, organic rankine cycle, climate change, thermal oil loop.

* سید امیر حسین اکبری، sahakbari@yahoo.com

۱- مقدمه

با این حال، همواره در کنار مسئله‌ی محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، بحث زیست‌محیطی 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 [۵]. این پدیده، جهان را از نظر تنش آب و هوایی تحت تاثیر قرار داده است، که بنابر گزارش مرکز ملی و پیش‌خشکسالی ایران^۲؛ میانگین دمای هوای ایران در ۳۰ سال گذشته $1/68^{\circ}\text{C}$ افزایش یافته است و این مسئله ممکن است خساراتی از جمله خشکسالی، باران‌های اسیدی و افزایش سطح دریاها را به همراه داشته باشد [۴]. شاید ماهیت روبه توسعه بودن ایران، این تقاضای روزافزون را توجیه نماید؛ اما تلفات انرژی در طول فرآیند تولید تا عرضه انرژی در ایران بیش از ۵۷۰ میلیون بشکه نفت گزارش شده است و با وجود این اتلاف انرژی، تقاضا برای تامین برق از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ سالانه رشد سریع ۵/۳۶ درصدی را تجربه کرده است. حدود ۴۹۰/۵۰ میلیون بشکه نفت وارد بخش نیروگاه‌های حرارتی می‌شود که از این میزان ۱۹/۱۸ میلیون بشکه نفت تبدیل به برق شده و ۳۱۰/۷۰ میلیون بشکه نفت هدر می‌شود. در بخش صنعتی مصرف ۳۵۷/۹۹ میلیون بشکه نفت گزارش شده است. این بخش توانایی صرفه جویی در ۱۰۰ میلیون بشکه نفت را با خود به همراه دارد که از این میزان، ۶۷٪ مربوط به صنعت آهن و فولاد و ۱۷٪ آن مربوط به صنعت سیمان می‌باشد [۲].

در پژوهش جاری برای جلوگیری از اتلافات انرژی و دستیابی به انرژی پاک در صنعت سیمان، فناوری چرخه رانکین آلی^۳ یا به اختصار ORC مورد ارزیابی قرار گرفته شده است؛ که در بخش‌های بعدی به طور کامل تشریح

رشد جمعیت، علاقه به شهرنشینی و توسعه فناوری موجب شده است تا در سالیان اخیر کشورهای جهان با چالش‌هایی جدی برای تامین انرژی روبه‌رو شوند [۱]. ایران به عنوان یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان از نظر ذخایر انرژی‌های تجدیدناپذیر مانند نفت و گاز، به دلیل مصارف ناکارآمد انرژی در بخش‌های مسکونی، صنایع و حمل‌ونقل با خطر ناتوانی برای پاسخگویی به تقاضای این نیاز روبه‌رو است [۲]. طبق گزارش‌های ثبت شده توسط پروژه تحلیل تجارت جهانی^۱ در سال ۲۰۱۱، ایران برای پاسخ‌گویی به تقاضای انرژی، سالیانه ۵۰۰ مگاتن دی‌اکسیدکربن را وارد جو می‌کند [۳]. با توجه به منابع عظیم نفت و گاز، این دو سوخت فسیلی بیش از ۹۹ درصد انرژی مورد نیاز کشور را تامین می‌کنند [۱]. به عنوان مثال، بخش مسکونی به عنوان بزرگ‌ترین مشترک پرمصرف انرژی، حدود ۴۰۸ میلیون بشکه نفت را به خود اختصاص داده است و بعد از آن صنایع تولیدکننده آهن و فولاد، سیمان، شیشه‌سازی و... حدود ۳۵۷ میلیون بشکه نفت را به خود اختصاص نموده‌اند، جدول ۱ مصرف نهایی انرژی در بخش‌های مختلف را برای ایران نمایش می‌دهد [۴ و ۲].

جدول ۱: مصرف نهایی انرژی بخش‌های مختلف در سال ۲۰۱۸ [۲]

بخش	به ازای میلیون بشکه نفت
مسکونی، تجاری	۴۸۸/۷۲
صنعت	۳۷۵/۳۲
حمل و نقل	۳۵۷/۹۹
پتروشیمی	۱۶۴/۷۹
کشاورزی	۵۷/۸۹
دیگر صنایع	۴/۴۶
مصارف نامشخص	۱۳/۹۶
مجموع	۱۴۶۳/۳۴

^۱ Global Trade

^۲ National Drought Warning and Monitoring Center of Iran

^۳ Organic Rankine Cycles

خواهد شد.

یکی از متقاضیان پرمصرف انرژی، حدود ۷٪ انتشار گاز دی‌اکسیدکربن جهان را به خود اختصاص داده است و به ازای هر یک کیلوگرم سیمان، ۰/۸۲ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود. مقدار گرمای آزاد شده از این صنعت به محیط ممکن است تا ۴۰٪ انرژی مصرف شده در فرآیند تولید برسد و نیز این انرژی مصرفی معمولاً ۳۰ الی ۴۰ درصد هزینه تولید را شامل می‌شود [۹ و ۱۰].

جدول ۲: دمای گازهای صنعتی در فرآیندهای مختلف [۸]

صنعت	فرآیند تولید	دما (°C)
سیمان	گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن	۲۰۰ الی ۴۵۰
	هوای خنک‌کننده کلینکر	۲۰۰ الی ۳۰۰
آهن و فولاد	کوره قوس الکتریک	۲۵۰
	کارخانه نورد	۳۰۰ الی ۳۵۰
شیشه	ذوب شیشه ظرف	۱۴۰ الی ۲۰۰
	ذوب فایبرگلاس	۱۴۰ الی ۱۶۰
سرامیک	گازهای کوره	۲۰۰ الی ۳۰۰

تولید سیمان در ایران ۱۵٪ از کل مصرف انرژی و ۱۸٪ از کل مصرف گاز دی‌اکسیدکربن در صنعت سیمان مربوط به تولید کلینکر می‌شود و متوسط مصرف انرژی برای تولید سیمان در ایران ۸۴۰ کیلوکالری به ازای هر کیلوگرم کلینکر گزارش شده است [۱۱]. فرآیند تولید سیمان اساساً شامل استخراج و تهیه مواد خام، پیش‌گرم کردن مواد خام، پختن مواد در کوره، خنک‌سازی کلینکر و آسیاب‌نهایی می‌باشد [۱۰]. مطابق شکل ۲، مواد اولیه توسط گازهای تخلیه شده از کوره دوار در یک مبادله‌کن حرارتی بازیاب، پیش‌گرم شده و پس از آن در کوره دوار پخته می‌شوند. این ماده پخته شده که کلینکر نام دارد، توسط جریان هوا خنک‌شده و پس از آن به جهت تولید سیمان آسیاب می‌شود [۱۱ و ۱۲].

۲- بازیابی گرمای اتلاف شده از صنعت سیمان توسط ORC

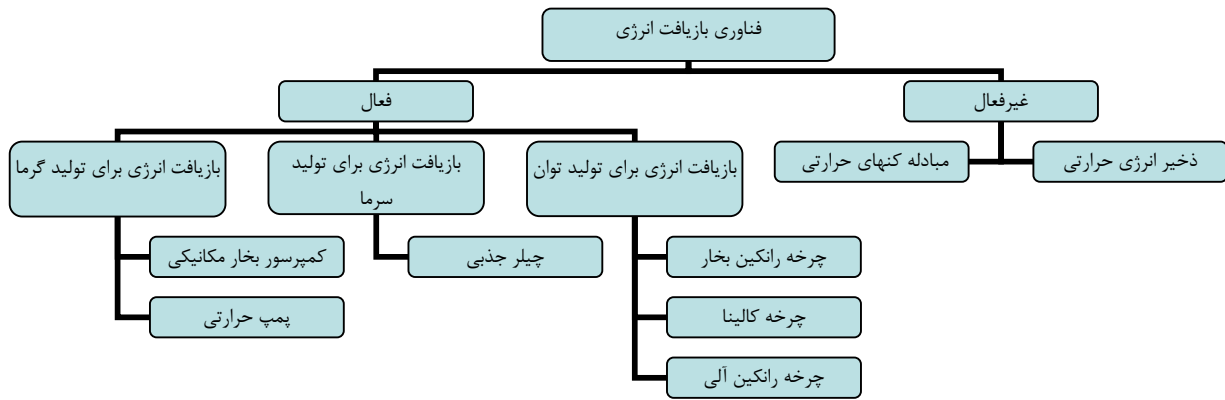
۲-۱- بازیابی گرمای اتلاف شده

منظور از گرمای اتلاف شده از صنایع، بخشی از انرژی هزینه‌شده برای فرآیندهای صنعتی می‌باشد که عمدتاً از طریق انتقال حرارت رسانش، همرفت و تابش بلا استفاده به محیط دفع می‌شود. این اتلافات انرژی را می‌توان در سه محدوده‌ی دمابالا (بیش از ۴۰۰°C)، دما متوسط (محدوده دمای ۲۰۰°C الی ۴۰۰°C) و دماب پایین (کمتر از ۲۰۰°C) دسته‌بندی کرد [۶]. به جهت استفاده از گرمای اتلاف‌شده در صنایع، فناوری‌های مختلفی ارائه شده‌اند که می‌توان آن‌ها را تحت دو عنوان غیرفعال و فعال طبقه‌بندی کرد؛ اگر این گرمای از دست رفته به جهت پیش‌گرمایش فرآیندهای صنعتی استفاده گردد، حالت غیرفعال رخ می‌دهد و اگر از گرمای اتلاف شده به جهت تولید برق و یا افزایش دما استفاده شود، حالت فعال اتفاق افتاده است [۷].

مطابق شکل ۱، فناوری غیرفعال شامل: ذخیره انرژی گرمایی^۱ و مبادله‌کنهای گرمایی از جمله صفحه‌ای، صرفه‌جو، پیش‌گرم‌کن هوا و انواع احیاگرها می‌باشد و پمپ‌های گرمایی^۲، چرخه رانکین آلی و مولد ترموالکتریک^۳ فناوری فعال را تشریح می‌کنند. همچنین، حالت فعال در دسته‌های تولید گرما، تولید سرما و تولید برق طبقه‌بندی می‌شود.

فرآیندهای صنعتی، انرژی را با کمیت‌ها و کیفیت‌های متفاوتی به محیط دفع می‌کنند. به عبارت دیگر مطابق جدول ۲، گرماهای هدر رفته از صنایع در طیف وسیعی از دماها قرار دارند [۶ و ۸]. صنعت سیمان به عنوان

۱ thermal energy storage
۲ heat pumps
۳ organic Rankine cycles



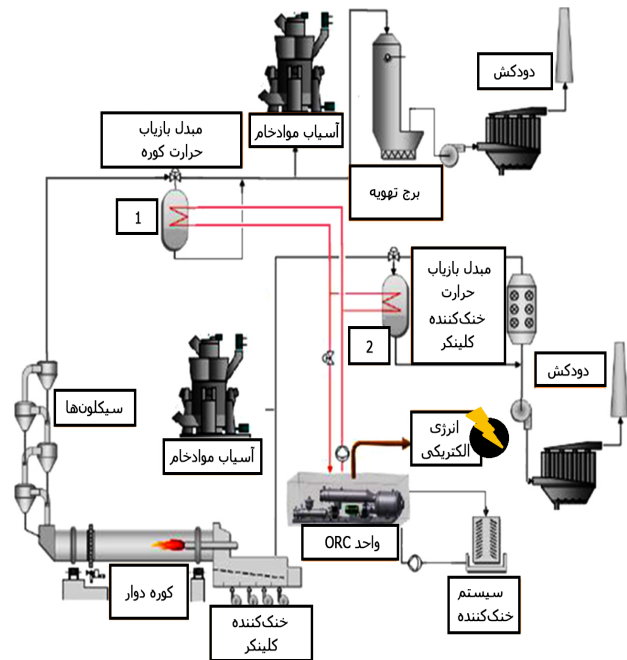
شکل ۱: طبقه‌بندی فناوری‌های بازیافت انرژی.

جدول ۳: داده‌های واقعی برای دمای هوای استفاده شده در فرآیند خنک‌سازی کلینکر و گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن [۱۳]

گاز داغ خروجی از پیش‌گرم‌کن		هوای استفاده شده برای خنک‌سازی کلینکر		تولید کلینکر (ton/d)
T_i (°C)	\dot{m} (kg/s)	T_i (°C)	\dot{m} (kg/s)	
۳۷۵/۰۰	۷۶/۷۱	۲۸۰/۰۰	۵۷/۵۳	۳۰۰۰
۳۸۵/۰۰	۷۶/۵۰	۳۶۰/۰۰	۳۳/۱۶	۳۰۰۰
۳۴۰/۰۰	۱۲۶/۵۶	۳۲۰/۰۰	۸۶/۲۰	۵۰۰۰
۳۴۰/۰۰	۱۵۹/۰۰	۳۰۰/۰۰	۱۲۶/۱۰	۶۳۰۰

علاوه بر وابستگی صنعت سیمان به نفت و گاز، این صنعت احتیاج شدیدی به برق دارد. انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیند تولید سیمان ۱۱۰ الی ۱۲۰ کیلووات ساعت در هر تن گزارش شده است که تقریباً ۴۰٪ از این انرژی مورد نیاز، مربوط به فرآیند آسیاب می‌باشد [۱۴]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بازیابی گرمای اتلاف شده از صنعت سیمان ممکن است ۲۰ الی ۳۰ درصد انرژی الکتریکی این صنعت را تامین کند. سه فناوری تعریف شده برای تولید برق توسط بازیابی گرمای اتلاف شده مطابق شکل ۱ عبارت است از: چرخه رانکین بخار، چرخه کالینا و چرخه رانکین آلی، که می‌توانند بخشی از این نیاز را رفع کنند. استفاده از چرخه رانکین بخار، رایج‌ترین روش برای بازیابی گرمای اتلاف شده می‌باشد. همچنین طبق تحقیق‌های صورت گرفته، این چرخه قدرت برای محدوده دماهای بیش از ۶۰۰°C مناسب است.

بنابراین در صنعت سیمان، انرژی تحت دو حالت خنک‌سازی کلینکر و نیز گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن به محیط دفع می‌شود. جدول ۳ اطلاعاتی مربوط به محدوده دماهای فرآیند خنک‌سازی کلینکر و گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن را بر اساس تولید هر تن در روز نمایش می‌دهد.



شکل ۲: فرآیند تولید برق از گرمای اتلافی صنعت سیمان [۱۲].

جدول ۴: پروژه‌های منتخب بازیابی حرارت اتلافی در صنعت سیمان [۱۷]:

توان تولیدی	فناوری بازیافت انرژی	وضعیت	مشتری	مکان
۸ مگاوات	اورکان انرژی - چرخه رانکین آلی	اعطا شده	کارخانه سیمان پرتلند	آلمان - اوریته
۲ مگاوات	اورمات - چرخه رانکین آلی	از سال ۱۹۹۹ تا به الان فعال است	سیمان هایدلبرگ	آلمان - لانگفورد
۳/۶ مگاوات	توربودن - چرخه رانکین آلی	-	صنعت سیمان جیوانی روسی	ایتالیا - پدروبا
۲ مگاوات	توربودن - چرخه رانکین آلی	در حال ساخت	صنعت سیمان جیوانی روسی	ایتالیا - پیاجنزا
۷/۲ مگاوات	توربودن - چرخه رانکین آلی	در حال ساخت	گروه سیکلی	پرتغال - اوتائو - ستوبال
۵ مگاوات	توربودن - چرخه رانکین آلی	از سال ۲۰۱۴ تا به الان فعال است	سی ار اچ	اسلوواکی - روهوژنیک
۴ مگاوات	توربودن - چرخه رانکین آلی	از سال ۲۰۱۲ تا به الان فعال است	هولسیم	رومانی - آلسد

شرکت اورمات^۲ و توربودن^۳ سازندگان اصلی از نظر واحدهای نصب شده و توان ثبت شده به شمار می‌آیند [۱۸].

۲-۲- چرخه رانکین آلی

چرخه رانکین آلی، به عنوان یک فناوری برجسته برای تولید برق در محدوده دماهای پایین، نظر محققین را به خود جلب کرده است [۸]. این چرخه مانند چرخه رانکین بخار، چهار فرآیند تراکم، جذب گرما، انبساط و دفع گرما را طی می‌کند [۱۹]. علاوه بر بازدهی در محدوده دماهای پایین، ویژگی دیگری که این چرخه را نسبت به چرخه رانکین بخار متمایز می‌سازد، انتخاب سیال عامل آن است [۹]. در دسترس پذیری، پایداری در دماهای بالا، ارزان قیمت، غیرسمی و اشتعال ناپذیر بودن، ویژگی‌هایی است که موجب می‌شود آب به عنوان بهترین سیال عامل در چرخه‌های بخار شناخته شود؛ اما این سیال فقط در محدوده دماهای بالا کاربرد دارد و در محدوده دماهای پایین ممکن است در طی فرآیند انبساط، قطرات آب تشکیل شده موجب تخریب پره‌های توربین شوند [۱۸]. این امر را می‌توان در طول فرآیند انبساط توربین مطابق شکل ۳ تشریح کرد. در شکل ۳-الف، آب به عنوان سیال عامل پس از فرآیند انبساط، در ناحیه دو

با این حال مطابق جدول ۳، دمای گرمای اتلافی از صنعت سیمان در محدوده دماهای ۲۰۰ الی ۴۰۰ درجه سلسیوس ثبت شده است که چرخه رانکین بخار در این محدوده دما عملکرد مناسبی ندارد؛ اما در محدوده دماهای متوسط، چرخه کالینا و چرخه رانکین آلی می‌توانند ۲۰ الی ۴۰ درصد عملکرد بهتری را ارائه دهند. چرخه کالینا به علت استفاده از سیال مخلوط آب و آمونیاک دارای ساختار پیچیده، هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری بالایی است [۹ و ۱۵]. چرخه رانکین آلی بر خلاف چرخه کالینا در هزینه‌های عملیاتی و نگهداری منعطف‌تر است که این موضوع سبب شده تا این چرخه نسبت به چرخه کالینا به صورت تجاری بیشتر در دسترس باشد [۱۳ و ۱۶]. بنابراین، استفاده از گرمای اتلاف شده در صنعت سیمان توسط چرخه رانکین آلی می‌تواند طیف وسیعی از فرصت‌ها را برای این صنعت فراهم نماید که در بخش‌های آینده به آن پرداخته می‌شود [۱۳]. جدول ۴ برخی از تولیدکنندگان سیمان در قاره‌ی اروپا را بر اساس واحدهای نصب شده چرخه رانکین آلی نمایش می‌دهد (این جدول بنابر گزارش‌های دفتر انتشارات اتحادیه اروپا^۱ در سال ۲۰۱۹ تهیه شده است) [۱۴]. تجاری‌سازی فناوری چرخه رانکین آلی از ابتدای دهه ۱۹۸۰ آغاز شد و در حال حاضر با رشد تقریباً تصاعدی روبه‌رو است.

^۱ Publications Office of the European Union

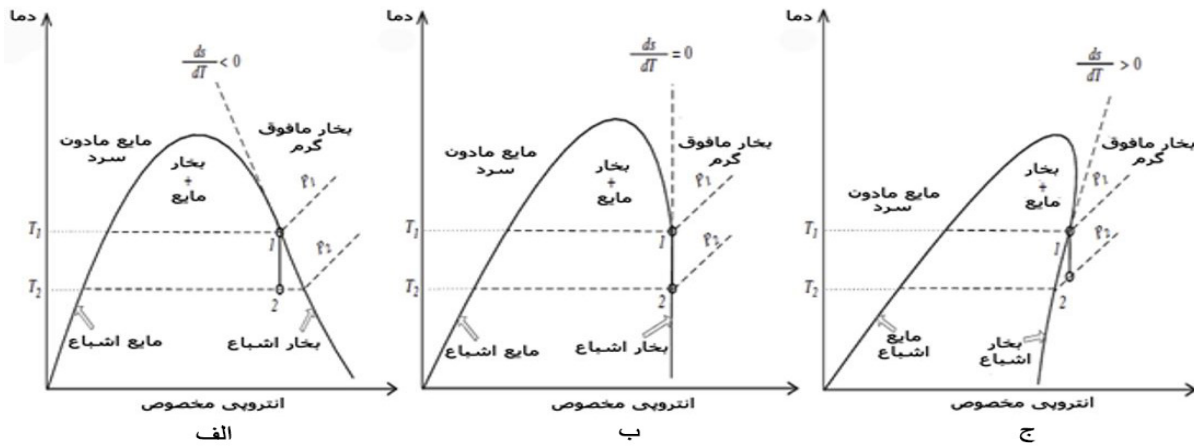
^۲ ORMAT-US

^۳ Turboden-Italy

کاهش می‌یابد [۱۸].

بنابراین، انتخاب سیال عامل مناسب برای بهره‌وری از چرخه رانکین آلی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. دیگر تفاوت‌های موجود میان چرخه رانکین بخار و چرخه رانکین آلی در جدول ۵ مقایسه شده‌اند.

فازی قرار گرفته است و به تعبیر دیگر، شیب تغییرات انتروپی ویژه نسبت به تغییرات دما در طول فرایند انبساط منفی است و این دسته از سیالات که به عنوان سیال مرطوب^۱ شناخته می‌شوند، به علت جلوگیری از خوردگی پره‌های توربین، حتماً باید به صورت سیال مافوق گرم وارد توربین شوند.



شکل ۳: فرآیند انبساط تک انتروپی در نمودارهای دما-انتروپی ویژه، به ترتیب از راست به چپ برای سه سیال مرطوب، تک‌انتروپی و خشک [۹].

جدول ۵: ارزیابی چرخه رانکین بخار با چرخه رانکین آلی [۱۵]

چرخه رانکین آلی	چرخه رانکین بخار	عنوان
مواد آلی به عنوان سیال	آب به عنوان سیال عامل	
عامل	عامل	
پایین	بالا	دمای جوش در فشار ثابت
پایین	بالا	دمای بحرانی
پایین	بالا	فشار بحرانی
اشتعال پذیر	غیرقابل اشتعال	اشتعال پذیری
ممکن است بر روی محیط زیست تاثیر بگذارد	بر روی محیط زیست تاثیری ندارد	اثرات زیست‌محیطی
ممکن است سمی باشد	غیرسمی	سمیت
گران قیمت	ارزان قیمت	هزینه
ممکن است در دسترس نباشد	همواره در دسترس و موجود می‌باشد	قابلیت دسترسی

همچنین، شکل ۳-ب و شکل ۳-ج به ترتیب سیال تک‌انتروپی^۲ و خشک^۳ را نمایش می‌دهند [۹]. سیالات خشک و تک‌انتروپی برعکس سیالات مرطوب پس از فرآیند انبساط خارج از ناحیه دوفازی قرار می‌گیرند و این مسئله عدم نیاز به مافوق گرم شدن (حداکثر به صورت بخار اشباع) سیال عامل در چرخه بخار را به جهت جلوگیری از تخریب پره‌های توربین توجیه می‌کند. این مسئله موجب می‌شود تا طول عمر پره‌های توربین در چرخه رانکین بخار از ۱۵ تا ۲۰ سال، به ۳۰ سال افزایش یابد. همچنین به علت کاهش تنش حرارتی ناشی از عدم مافوق گرم کردن سیال عامل، علاوه بر توربین، در دیگ‌بخار نیز هزینه‌های تعمیر و نگهداری

۱ Wet Fluid
 ۲ Isentropic Fluid
 ۳ Dry Fluid

۳-۲- انتخاب سیال عامل

چرخه رانکین آلی را می‌توان بر اساس ترکیب شیمیایی سیال به انواع خالص و مخلوط طبقه‌بندی کرد [۱۹ و ۱۳]. سیالات آلی خالص مانند الکل‌ها، اترها، دی‌اکسیدگوگرد، مبردهای طبیعی (دی‌اکسیدکربن، آمونیاک و هیدروکربن‌ها) و مبردهای غیرطبیعی (هیدروفلوئورها، هیدروفلوئوروالفین‌ها و هیدروکلروفلوروالفین‌ها) به علت پایداری شیمیایی بالا و خواص شناخته شده‌ی ترموفیزیکی، بیش‌تر از سیالات مخلوط مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۰]. سیالات مخلوط از دو یا چند سیال خالص تشکیل شده‌اند، بر اساس رفتارشان در فرآیند تغییر فاز تبخیر، به دو گروه آزئوتروپیک و زئوتروپیک دسته‌بندی می‌شوند. در مخلوط آزئوتروپیک، شیب دما در طول فرآیند تغییر فاز ثابت است و رفتاری مشابه با سیال خالص دارند [۱۹ و ۲۱]. به تعبیر دیگر، دمای نقطه حباب (نقطه جوش) این مخلوط‌ها با دمای نقطه شبنم در فشار ثابت برابرند. در مقابل، سیال زئوتروپیک در فرآیند تغییر فاز، شیب دمای غیر صفر دارد [۲۱]. علاوه بر مطالب ذکر شده، انتخاب سیال عامل مناسب برای ORC را می‌توان در چهار مرحله مطابق شکل ۴ تشریح کرد. از آغاز دوران تجاری‌سازی فناوری چرخه رانکین آلی در سال ۱۸۵۳، سیالاتی همچون آمونیاک، دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، تتراکلریدکربن، متیل فرمات و غیره به عنوان سیالات عامل نسل اول و به جهت کارایی بهتر پیشنهاد شده‌اند؛ این نسل از سیالات به علت مسائل امنیتی از قبیل اشتعال‌پذیری، سمی بودن و نیز دردسترس نبودن توسعه نیافتند [۲۱]. نسل دوم سیالات در سال ۱۹۳۰ معرفی شدند. این نسل از سیالات متشکل از کلروفلوئوروکربن‌ها (CFC) و هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها (HCFCs) می‌باشند [۲۰ و ۲۱]. در سال ۱۹۷۴ برای اولین بار گزارشی توسط دو دانشمند به نام‌های رولند^۱ و مولینا^۲

در مورد تخریب لایه اوزون توسط CFC منتشر شد [۲۲]. دیگر بررسی‌ها نشان می‌دهند که یک اتم کلر می‌تواند ۱۰۰ هزار مولکول اوزون را از بین ببرد و هرچه محتوای کلر یک ترکیب بیش‌تر باشد، تاثیر آن بر لایه اوزون بیش‌تر خواهد بود [۲۳]. در نتیجه این گزارشات، توافق‌نامه بین‌المللی با عنوان معاهده مونترال در سال ۱۹۸۷ به جهت حفظ لایه اوزون شکل گرفته و این معاهده بر حذف تدریجی CFCs به علت پتانسیل تخریب لایه اوزون^۳ (ODP) بالا تا پایان سال ۲۰۱۰ استمرار داشت [۲۲]. در نهایت، در سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۰ هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها به علت ODP پایین، بیش‌تر از CFCs مورد توجه قرار گرفتند و نیز HCFCs، HFCs، دی‌اکسیدکربن و آمونیاک در این بازه زمانی پیشنهاد شدند [۲۲ و ۲۰]. پس از نگرانی‌ها درباره‌ی تخریب لایه اوزون، بحث تغییرات آب و هوایی یا گرمایش زمین جامعه جهانی را در بر گرفت. همانطور که در قسمت مقدمه توضیح داده شد، انتشار روز افزون گازهای گلخانه‌ای نقش اصلی را در گرمایش زمین ایفا می‌کند و دی‌اکسیدکربن، CFCs، HCFCs، متان و اکسید نیتروژن نمایندگان اصلی گازهای گلخانه‌ای در جو هستند. همانند ODP که معیاری برای ارزیابی تخریب لایه اوزون است، معیار منتخب برای ارزیابی گرمایش زمین تحت عنوان پتانسیل گرمایش زمین^۴ (GWP) شناخته می‌شود [۲۳]. با این حال، نسل چهارم سیالات از سال ۲۰۱۰ به بعد، با در نظر گرفتن عواملی همچون؛ GWP کمتر از ۱۵۰، ODP صفر، بازده حرارتی مناسب و ایمنی (از نظر اشتعال‌پذیری و سمی بودن) و پایداری مولکولی بالا انتخاب می‌شوند [۲۰]. که نمایندگان نسل چهارم سیالات عامل شامل: مبردهای طبیعی، HFCs و سیالات مخلوط می‌شوند.

علی‌رغم تلاش‌های فراوانی که از جانب دیگر محققان

^۱ Rowland

^۲ Molina

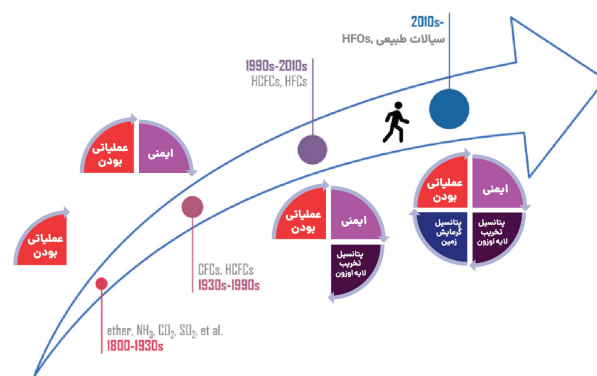
^۳ Ozone depletion potential

^۴ Global warming potential

در زمینه انتخاب سیال عامل برای ORC شکل گرفته است، سیالات عامل سازگار با محیط زیست در ORC عملکرد ضعیفی را با خود به همراه دارند [۲۰]. به تعبیر دیگر، تقریباً هیچ سیال عامل خالصی وجود ندارد که علاوه بر مسائل زیست محیطی، بتواند راندمان حرارتی مناسبی را ارائه دهد. طبق این امر، سیالات مخلوط می‌توانند گزینه مناسبی برای پاسخگویی به نیاز مورد نظر باشند [۲۱].

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند که، $R1234ze(Z)$ ، $R1234ze(E)$ و $R1336mzz(E)$ را معرفی کردند، $R1234ze(Z)$ و $R1234ze(E)$ عملکرد مشابهی $R245fa$ از نظر بازده حرارتی و نیز $R1234ze(Z)$ شبیه‌ترین رفتار را در مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای نسبت به $R245fa$ ایفا می‌کند [۲۵]. در سال ۲۰۲۰، هرات^۲ و همکاران به بررسی ۷ سیال عامل مناسب برای چرخه رانکین آلی با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی پرداختند، آن‌ها در این پژوهش متوجه شدند که با افزایش فشار چگالنده، بازده حرارتی افزایش یافته و نیز با افزایش دمای چگالنده بازده حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین، بنزن به عنوان سیال عامل، بازدهی قابل توجهی در طیف وسیعی از دماها را نسبت به $R245fa$ نشان می‌دهد [۲۸]. در سال ۲۰۲۱ هاشویی^۳ و همکاران، به طراحی چرخه رانکین آلی که از منبع حرارتی خورشیدی (متمرکزکننده سهموی^۴) و از ذخیره انرژی تغذیه می‌کند، پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از تولوئن، سیلکوهگزان، بنزن، هگزامتیل دی‌سیلوکسان، ان-پنتان و ان-هگزان به عنوان سیال عامل استفاده کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تولوئن بهترین عملکرد را نسبت به دیگر سیالات با چشم‌پوشی از تراکم خلاء دارا است [۲۷]. با توجه به هدف اصلی این پژوهش، بازیابی گرمای اتلاف شده از صنایع می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های انرژی و جلوگیری از تغییرات اقلیمی ایفا کند. بنابراین، در سال ۲۰۱۳ کامپانا^۵ و همکاران، به بازیابی گرمای اتلاف شده از صنایع توسط چرخه رانکین آلی پرداختند و این فناوری را به عنوان بهترین فرصت در حال حاضر تلقی کردند. در این پژوهش، ظرفیت تولید توان توسط ORC با در نظر گرفتن صنایع پرمصرف انرژی در اروپا مانند صنعت سیمان، صنعت فولاد

در زمینه انتخاب سیال عامل برای ORC شکل گرفته است، سیالات عامل سازگار با محیط زیست در ORC عملکرد ضعیفی را با خود به همراه دارند [۲۰]. به تعبیر دیگر، تقریباً هیچ سیال عامل خالصی وجود ندارد که علاوه بر مسائل زیست محیطی، بتواند راندمان حرارتی مناسبی را ارائه دهد. طبق این امر، سیالات مخلوط می‌توانند گزینه مناسبی برای پاسخگویی به نیاز مورد نظر باشند [۲۱].



شکل ۴: مراحل انتخاب سیال عامل آلی.

با این حال، در سال ۲۰۱۷ جوانشیر و همکاران، به بررسی انتخاب سیال عامل مناسب برای چرخه ترکیبی برایتون-رانکین آلی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود، با در نظر گرفتن خصوصیات زیست محیطی از قبیل ODP و GWP و نیز مسائل امنیتی مانند اشتعال پذیری و قابلیت سمی بودن، ۲۳ سیال عامل (تر، خشک و تک‌انترپی) را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که ایزوبوتان (R-۶۰۰a)، اتانول و R۱۱ بهترین عملکرد را از نظر بازده حرارتی دارند [۲۹]. در سال ۲۰۱۹ جینگ یانگ^۱ و همکاران، به جایگزینی سیال $R245fa$ که یک سیال رایج در فناوری چرخه رانکین آلی است توسط HFOs پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود سه سیال عامل

^۱ Jingye Yang

^۲ Herath

^۳ Haoshui

^۴ Parabolic Collector

^۵ Campana

پیشنهادی می‌باشد [۱۰]. در سال ۲۰۱۹ موریرا^۲ و همکاران، به بازیابی گرمای اتلافی از کارخانه تولید سیمان در ایالت میناس گریس^۴ برزیل توسط چرخه رانکین آلی پرداختند. آن‌ها ظرفیت تولید روزانه کلینکر در این کارخانه را، ۳۰۰۰ الی ۶۳۰۰ تن اعلام کردند و نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیان می‌کند که با راه‌اندازی چرخه رانکین آلی: ۱- توان تولیدی تخمینی برای این کارخانه ۸۰ مگاوات گزارش شده است. ۲- در این کارخانه، از انتشار ۲۲۱۰۶۹ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در سال جلوگیری می‌شود. ۳- از نظر توان تولیدی، بازده حرارتی و بازدهی اگزرژی، R141b، R11 و R123 بهترین عملکرد را دارا است [۱۳]. در سال ۲۰۲۱ احمد سلیمان و همکاران، به بازیابی گرمای اتلاف‌شده از کارخانه سیمان در کشور مصر توسط چرخه رانکین آلی پرداختند. آن‌ها یک چرخه رانکین بخار و چرخه ترکیبی بخار-رانکین آلی را برای بازیابی گرمای اتلافی مورد تحلیل انرژی و اگزرژی قرار دادند. نتایج به حاصل آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که، اسپروپنتان به عنوان سیال عامل، قابلیت تولید انرژی ۴۴۸۳ کیلووات ساعت را دارا است اما سیکلوپنتان به علت دسترس پذیری و ارزان قیمت بودن، به عنوان سیال عامل پیشنهاد شد [۹].

۲-مدل سازی چرخه رانکین آلی

این پژوهش در ادامه و توسعه‌ی تحقیقات موریرا و همکاران صورت گرفته و شکل ۵، پیکربندی استفاده شده در مقاله موریرا و همکاران را نمایش می‌دهد. این شکل که به عنوان پیکربندی اول در این پژوهش شناخته می‌شود، از اجزاء پمپ گریز از مرکز^۵ (PP 01)، یک واحد صرفه‌جو^۶ (ECO)، دو واحد تبخیر کننده^۷ (EVA 01 و EVA 02)،

(کارخانه نورد) و صنعت شیشه‌سازی (کوره‌های شناور) ۲۷۰۵ مگاوات برآورد شده است. همچنین، نصب ORC منجر به صرفه جویی ۱/۹۵ میلیارد یورو در هزینه‌های انرژی شده و ۸/۱ میلیون تن انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد [۱۲]. در سال ۲۰۱۳ سیلوین کویلین^۱ و همکاران، انواع چرخه رانکین آلی را از نظر منابع حرارتی مختلف مانند خورشیدی، زمین گرمایی و بازیابی گرمای اتلاف‌شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت بازیابی گرمای اتلاف‌شده مبادله‌کن گرمایی نباید به صورت مستقیم در فرآیند جذب گرما ایفای نقش کند، آن‌ها علت این امر را تحت سه عنوان بیان کردند: ۱- در شرایط گذرا (به عنوان مثال در هنگام راه‌اندازی)، اگر دمای سیال عامل به بیش از دمای قابل تحمل آن برسد، ممکن است پایداری شیمیایی سیال عامل مختل شود. ۲- کنترل پذیری و پایداری سامانه‌ها در صورت تبخیر مستقیم دشوار است. ۳- به علت وجود گوگرد گازهای حاصل از احتراق دودکش، اگر دمای این گازها به دمای شبنم برسد، ممکن است مبادله‌کن گرمایی دچار آسیب شود؛ بنابراین آن‌ها در پژوهش خود استفاده از حلقه انتقال حرارت میانی که توسط روغن‌های حرارتی کار می‌کند را پیشنهاد دادند [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ زینب فرگانی^۲ و همکاران، به بهینه‌سازی چند معیاره مبتنی بر اگزرژی یک چرخه رانکین آلی، به جهت بازیابی گرمای اتلاف‌شده از صنعت سیمان پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از سیکلوهگزان، بنزن و تولوئن به عنوان سیال عامل استفاده کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که، سیکلوهگزان بهترین سیال عامل از نظر ترمودینامیکی و بهترین از نظر زیست‌محیطی بهترین نامزد

^۱ Sylvain Quoilin

^۲ Zineb Fergani

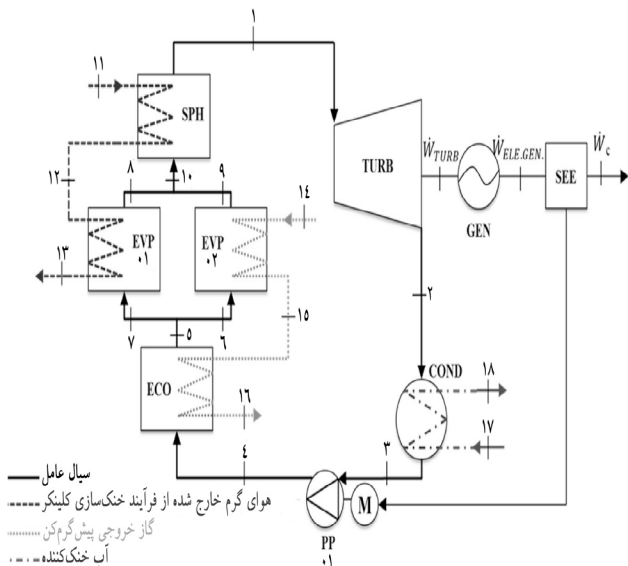
^۳ Moreira

^۴ Minas Gerais

^۵ Centrifugal Pump

^۶ Economiser

Evaporators



شکل ۵: پیکربندی اول [۱۳].

مبادله کن گرمایی مافوق گرم کن^۱ (SPH)، توربین بخار^۲ (TURB)، چگالنده^۳ (COND)، ژنراتور الکتریکی^۴ (GEN)، پست الکتریکی^۵ (SEE) و یک موتور الکتریکی^۶ (M) برای پمپ گریز از مرکز تشکیل شده است. همچنین، جدول ۶ داده‌های مربوط به طراحی چرخه رانکین آلی و جدول ۷ داده‌های مربوط به گرمای اتلاف‌شده از صنعت سیمان (گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن و هوای داغ خارج شده از فرآیند خنک‌سازی کلینکر) را بر اساس اطلاعات داخل مقاله موریرا و همکاران برای پیکربندی اول به اشتراک می‌گذارد [۱۳].

جدول ۶: داده‌های مربوط به پیکربندی اول [۱۳]

جدول ۷: داده‌های مربوط به گرمای اتلافی از صنعت سیمان [۱۳]

مقدار	واحد	متغیر
داده‌های هوای داغ از فرآیند کلینکر:		
۷۹/۰۰	%	نسبت مولی نیتروژن
۲۱/۰۰	%	نسبت مولی اکسیژن
۱۱۴/۰۰	°C	دمای هوای ورودی به سوپرهیتر
۴۸/۱۵	°C	دمای هوای خروجی از اواپراتور یک
داده‌های گاز خروجی از دودکش:		
۲۶/۳۰	%	نسبت مولی دی‌اکسیدکربن
۶۴/۵۸	%	نسبت مولی نیتروژن
۴/۴۹	%	نسبت مولی اکسیژن
۴/۱۸	%	نسبت مولی بخار آب
۳۱۰/۰۰	°C	دمای گاز ورودی به اواپراتور دو
۲۲۸/۰۰	°C	دمای گاز خروجی از صرفه‌جو
۸۸/۰۳	kg/s	شدت جریان جرمی گاز خروجی از دودکش

مقدار	واحد	متغیر
۷۰/۰۰	%	بازده تک‌انتهایی پمپ
۸۵/۰۰	%	بازده تک‌انتهایی توربین
۴۵/۰۰	°C	دمای کندانسور
۲۶/۷۵	-	نسبت تراکم پمپ
۰/۱۰۱	MPa	فشار محیط
۲۲/۰۰	°C	دمای محیط
۳۵	°C	دمای چگالنده
۱۰۰	%	کیفیت بخار ورودی به سوپرهیتر
۰/۱۰۱	MPa	فشار گازهای خروجی از کارخانه سیمان

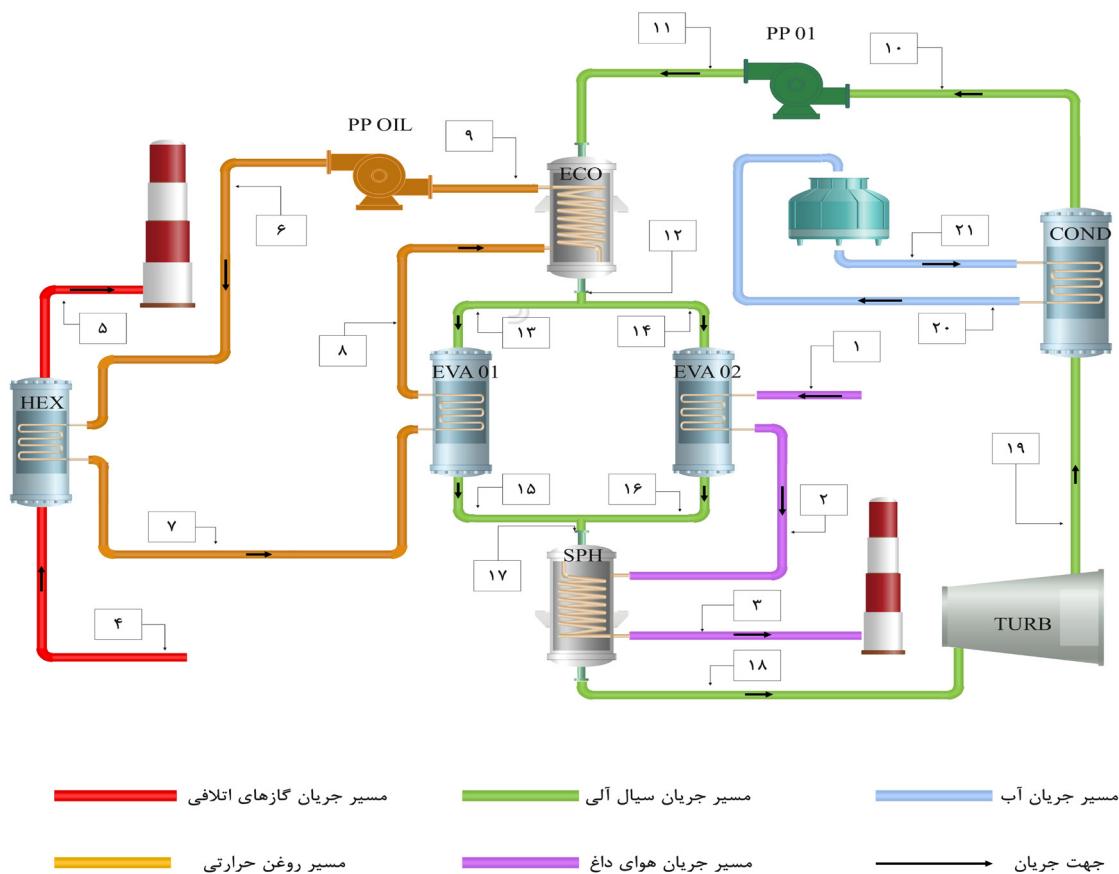
ابتکار در این پژوهش، استفاده از حلقه روغن حرارتی با سیال عامل Therminol 66 به جهت جلوگیری از تبخیر مستقیم بوده و شکل ۶ به عنوان پیکربندی دوم، طرح

- ۱ Superheater
- ۲ Steam Turbine
- ۳ Condenser
- ۴ Electric Generator
- ۵ Electrical Substation
- ۶ Electric Motor

فرضیات حاکم در مدلسازی عبارتند از:

- ۱- صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در تمام چرخه.
- ۲- تمامی فرآیندها پایا و آدیاباتیکی هستند.
- ۳- صرف نظر از افت فشار درون لوله‌ها و مبادله‌کن‌های گرمایی.
- ۴- هوای داغ و گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن به عنوان گاز ایده‌آل.

توسعه یافته از پیکربندی اول را به تصویر می‌کشد. به جهت ارزیابی این پیکربندی، از قانون اول ترمودینامیک (برای اندازه‌گیری کمیت انرژی در فرآیندها)، قانون دوم ترمودینامیک (برای محاسبه کیفیت انرژی در فرآیندها) و نیز از روابط انرژی (برای محاسبه کار از دست رفته) استفاده شده است. علاوه بر جداول ۶ و ۷ که به عنوان داده‌های این پیکربندی شمرده می‌شوند. جدول ۸، داده‌های شرایط جدید ایجاد شده را نمایش می‌دهد. همچنین، شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش توسط نرم‌افزار حل‌گر معادلات مهندسی^۱ (EES) صورت گرفته و جدول ۹ سیالات عامل موجود در کتابخانه این نرم‌افزار که توسط محققان پیشنهاد شده‌اند را به اشتراک می‌گذارد.



شکل ۶: پیکربندی دوم

آهنگ \dot{Q}_{cv} آهنگ کار مبادله شده، \dot{W}_{cv} در این رابطه، محاسبه آنتالپی مخصوص است. اگرمای مبادله شده و مقدار گرمای جذب شده در پیکربندی اول و دوم به ترتیب مطابق روابط (۳) و (۴) می‌باشد.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_1(h_1 - h_4) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_1(h_{18} - h_{11}) \quad (4)$$

توان خالص خروجی از پیکربندی اول و دوم به ترتیب مطابق روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{TURB} + \dot{W}_{PP01} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{TURB} + \dot{W}_{PP01} + \dot{W}_{OilP} \quad (6)$$

بازده حرارتی برای هر دو پیکربندی مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{th} = \left(\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{net}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

جدول ۸: داده‌های ورودی گازهای خروجی از فرآیند تولید سیمان

متغیر	واحد	مقدار
دمای کمینه حلقه روغن	°C	۱۵۰
بازده تک‌انترویی پمپ روغن	%	۷۰/۰۰
فشار کمینه حلقه روغن	kPa	۱۶۰
نسبت تراکم حلقه روغن	-	۲/۵
بازده مبادله کن گرمایی	%	۷۵
کیفیت سیال خروجی از صرفه‌جو	%	۰

۳-۱- تحلیل قانون اول ترمودینامیک

قانون پیوستگی در شرایط پایا برای حجم کنترل مطابق رابطه (۱) است [۱۳ و ۳۱]:

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

که در آن، شدت جریان جرمی بوده و اندیس‌های i و e به ترتیب ورودی و خروجی را تعریف می‌کنند. قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل مطابق رابطه (۲) است.

$$\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e = 0 \quad (2)$$

جدول ۹: سیالات آلی منتخب در مقالات

منبع	شرایط زیست محیطی		شرایط بحرانی			نوع سیال	جرم مولکولی (kg/kmol)	سیال عامل
	اشتعال پذیری و قابلیت سمیت بر اساس استاندارد ASHRAE	GWP	ODP	فشار بحرانی (bar)	دمای بحرانی (°C)			
[۱۹ و ۲۰ و ۲۴]	غیرسمی و اشتعال پذیر	۳	۰	۴۰/۱	۱۴۴/۹	-۷/۰	۵۶/۱	R-600a
[۲۹ و ۳۰]	سمی و اشتعال ناپذیر	۷۷	۰/۰۲	۳۶/۶	۱۸۳/۶	۲۷/۸۳	۱۵۲/۹	R-123
[۲۵]	غیرسمی و اشتعال ناپذیر	۱	۰	۳۵/۷	۱۶۵/۶	۱۷/۹۲	۱۳۰/۰۵	R-1233zd(E)
[۲۵ و ۲۰]	غیرسمی و اشتعال پذیر	۱	۰	۳۵/۳	۱۵۳/۷	۱۵/۷	۱۱۴/۰۴	R1234ze(Z)
[۲۸ و ۲۹]	غیرسمی و اشتعال پذیر	-	-	۸۲/۱۵	۲۳۹/۴	۷۸/۴۲	۳۲/۰۴۲	Ethanol

۲-۳- تحلیل قانون دوم ترمودینامیک

بازده اگزرژی (η_{ex}) برای پیکربندی اول و دوم به ترتیب مطابق روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود.

(۸)

$$\eta_{ex} = \left[\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1(ex_1 - ex_4)} \right] \cdot 100$$

(۹)

$$\eta_{ex} = \left[\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_1(ex_{18} - ex_{11})} \right] \cdot 100$$

در روابط (۸) و (۹) اگزرژی جریانی است که مطابق رابطه (۱۰) می‌توان آن را محاسبه کرد.

(۱۰)

$$ex_i = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)$$

تخریب اگزرژی (Ed) ناشی از بازگشت ناپذیری‌ها در پیکربندی اول و دوم را می‌توان به ترتیب با معادلات (۱۱) و (۱۲) بیان کرد.

(۱۱)

$$\dot{E}_d = \dot{m}_1(ex_1 - ex_4) - \dot{W}_{net}$$

(۱۲)

$$\dot{E}_d = \dot{m}_1(ex_{18} - ex_{11}) - \dot{W}_{net}$$

۳- نتایج و بحث

در بخش جاری، ابتدا به اعتبارسنجی این پژوهش پرداخته شده و در ادامه نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی مورد بحث قرار گرفته شده است.

۴-۱- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر نسبت به تحقیق موریرا و همکاران، نتایج به دست آمده برای پیکربندی اول، توسط دو سیال عامل R141b و R123 در جدول ۱۰ مقایسه شده‌اند. نحوه اعتبارسنجی بدین صورت است که، تمامی فرضیات و داده‌های استفاده شده در پژوهش موریرا

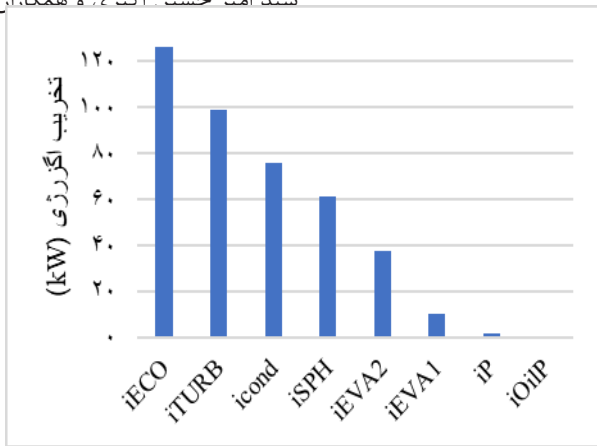
و همکاران، در پژوهش جاری استفاده گردیده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که، بیش‌ترین اختلاف میان نتایج موریرا و همکاران و پژوهش حاضر حدود ۶/۷٪ است، می‌توان اظهار نمود که پژوهش جاری از اعتبار قابل قبولی برخوردار است.

۴-۲- تحلیل ترمودینامیکی

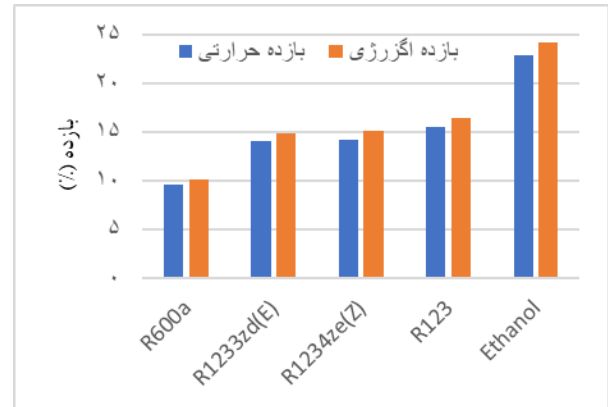
شکل ۷ عملکرد سیالات منتخب را بر روی بازده حرارتی و بازده اگزرژی نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، اتانول با بازده حرارتی ۲۲/۹۱٪ و بازده اگزرژی ۲۴/۱۸٪ بهترین عملکرد را نسبت به دیگر سیالات دارا است. همچنین شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب عملکرد سیالات منتخب را بر روی توان خالص تولیدی و تخریب اگزرژی کل نمایش می‌دهند. از نظر توان تولیدی، اتانول با ۶۲۱۳ kW بیشترین توان خالص را تولید کرده است و از نظر تخریب اگزرژی کل، با ۴۱۱/۸ kW کمترین مقدار اگزرژی تخریب شده را به خود اختصاص داده است. بنابراین، به علت عملکرد قابل توجه اتانول نسبت به دیگر سیالات در این پژوهش به عنوان سیال منتخب در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج پژوهش حاضر با تحقیق موریرا و همکاران

عنوان	نتایج پژوهش حاضر	نتایج موریرا [۱۳] و همکاران	درصد خطا (%)
سیال عامل R141b			
\dot{W}_{net} (kW)	۴۴۴۸	۴۷۶۸	۶/۷
\dot{m}_1 (kg/s)	۵۴/۷۵	۵۴/۷۹	۰/۰۷
سیال عامل R123			
\dot{W}_{net} (kW)	۴۱۸۱	۴۳۷۶	۴/۴
\dot{m}_1 (kg/s)	۷۷/۸۵	۷۷/۳۸	۰/۱۶

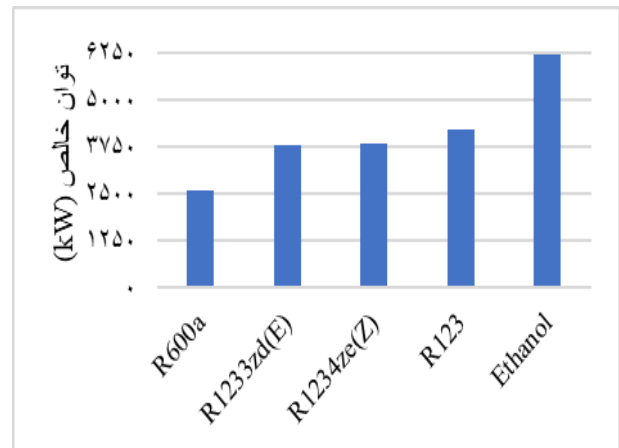


شکل ۱۰: تخریب انرژی اجزاء توسط سیال عامل اتانول.

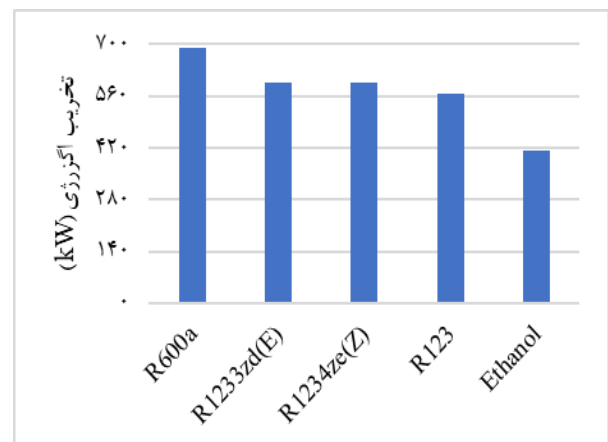


شکل ۷: بازده گرمایی و بازده انرژی سیالات منتخب.

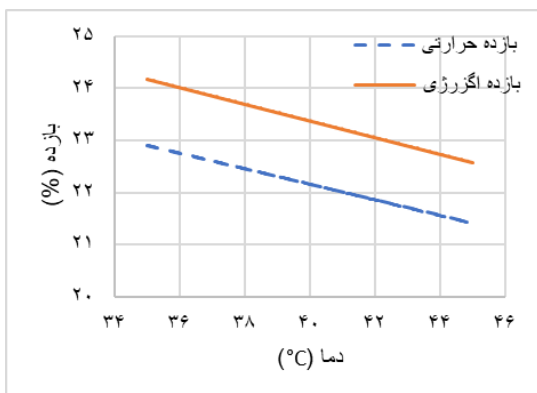
چگالنده به عنوان یکی از اجزاء اصلی چرخه رانکین آلی، تاثیر قابل توجهی بر روی بازده انرژی، بازده گرمایی و توان خالص تولیدی می‌گذارد. با ثابت بودن گرمای وارد شده بر چرخه رانکین آلی، شکل ۱۱ تاثیر تغییرات دمای چگالنده بر روی بازده گرمایی و بازده انرژی را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش هر یک از دمای چگالنده، به طور تقریبی بازده گرمایی ۰/۱۶۵٪ و بازده انرژی ۰/۱۶۶٪ درصد کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۱۲ تاثیر تغییرات دمای چگالنده بر روی توان خالص را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش هر یک از دمای چگالنده، به طور تقریبی توان خالص ۰/۱۶۵٪ کاهش می‌یابد. هرچند که این افزایش دما مطابق شکل ۱۳ موجب کاهش تخریب انرژی در صرفه‌جو می‌شود؛ اما در دیگر اجزاء، تخریب انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۸: توان خالص سیالات منتخب.



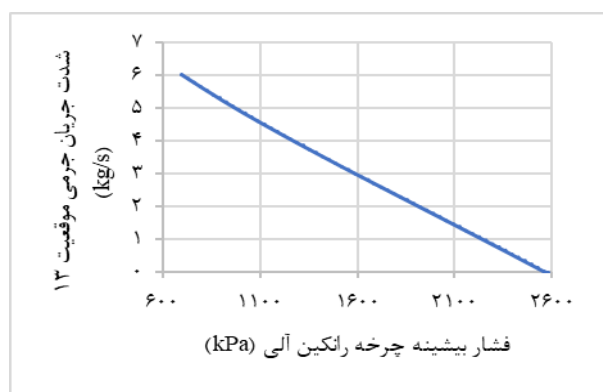
شکل ۹: انرژی تخریب شده کل سیالات منتخب.



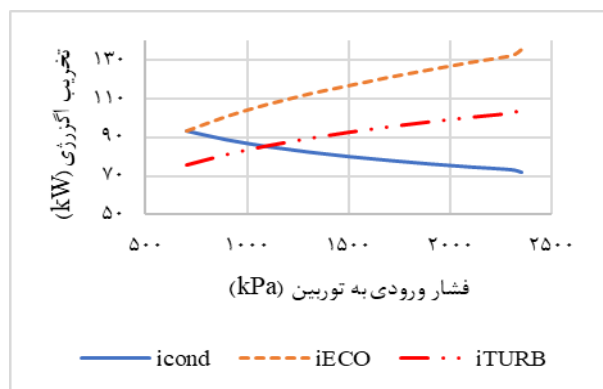
شکل ۱۱: تاثیر دمای چگالنده بر روی توان بازده گرمایی و انرژی.

شکل ۱۰ تخریب انرژی برای اجزاء به‌کار رفته توسط اتانول را نمایش می‌دهد. صرفه‌جو، توربین بخار و چگالنده به ترتیب بیشترین تخریب انرژی را به دنبال خود دارند. طبق این امر، این سه دستگاه بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

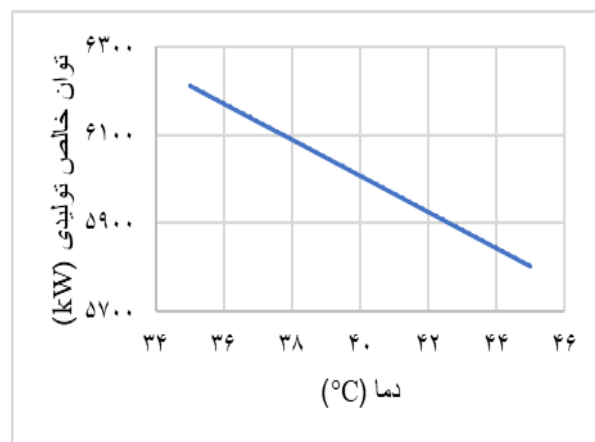
با افزایش فشار سیال ورودی به توربین بخار، تخریب اگزرژی در چگالنده کاهش می‌یابد. بنابراین، هر چند با افزایش فشار سیال ورودی به توربین بخار تخریب اگزرژی در توربین بخار و صرفه‌جو افزایش یافته است؛ اما بازده اگزرژی و بازده حرارتی به ترتیب به علت کاهش تخریب اگزرژی کل و افزایش توان خالص تولیدی مطابق شکل ۱۷ افزایش می‌یابند. به طور خلاصه، با افزایش هر ۱۷ kPa فشار ورودی و ورودی به توربین بخار، توان خالص ۲/۷٪، بازده حرارتی ۲/۷٪ و بازده اگزرژی ۲/۶۷٪ به طور تقریبی افزایش می‌یابند.



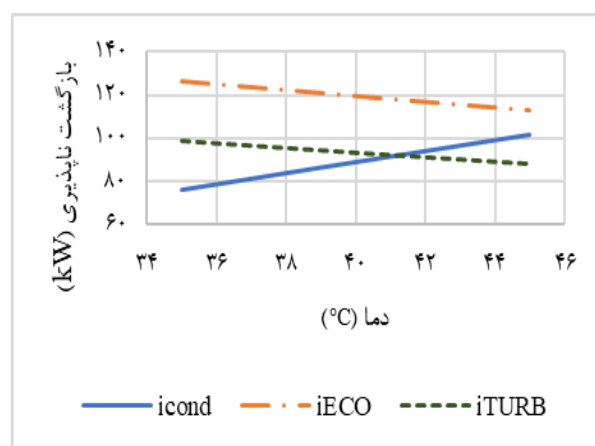
شکل ۱۴: تغییرات فشار سیال ورودی به توربین بخار بر روی شدت جریان جرمی موقعیت ۱۳.



شکل ۱۵: تغییرات فشار سیال ورودی به توربین بخار بر روی توان خالص.



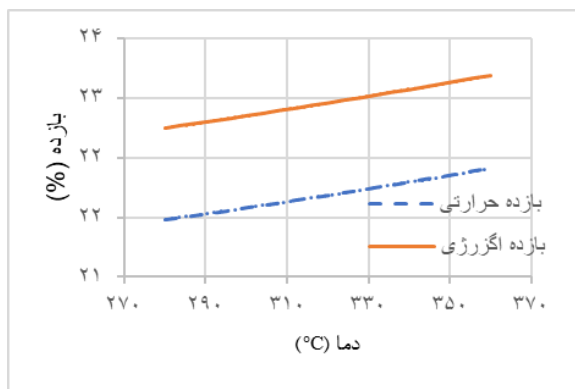
شکل ۱۶: تاثیر دمای چگالنده بر روی توان خالص.



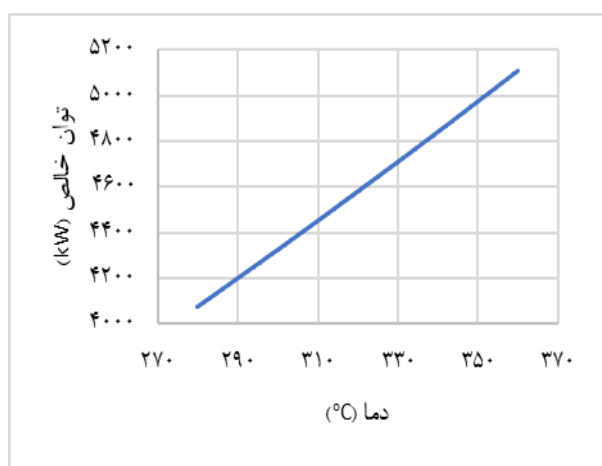
شکل ۱۷: اثر تغییرات دمای چگالنده بر روی بازگشت ناپذیری اجزاء.

شکل ۱۴ تغییرات فشار سیال ورودی به توربین بخار بر روی شدت جریان جرمی موقعیت ۱۳ (سیال آلی ورودی به EVA 01) را نمایش می‌دهد. با افزایش هر ۱۰۰ kPa فشار ورودی به توربین بخار، شدت جریان جرمی موقعیت ۱۳ به علت ناتوانی در تامین گرمای مورد نیاز توسط حلقه روغن حرارتی به طور تقریبی ۶/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، با افزایش فشار سیال ورودی به توربین بخار، اختلاف آنتالپی ورودی و خروجی افزایش یافته و به دنبال آن توان خالص و تخریب اگزرژی به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ افزایش می‌یابند. علاوه بر توربین بخار، این افزایش فشار موجب افزایش اختلاف دما در دو جریان صرفه‌جو شده و در نتیجه تخریب اگزرژی مطابق شکل ۱۶ افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این شکل،

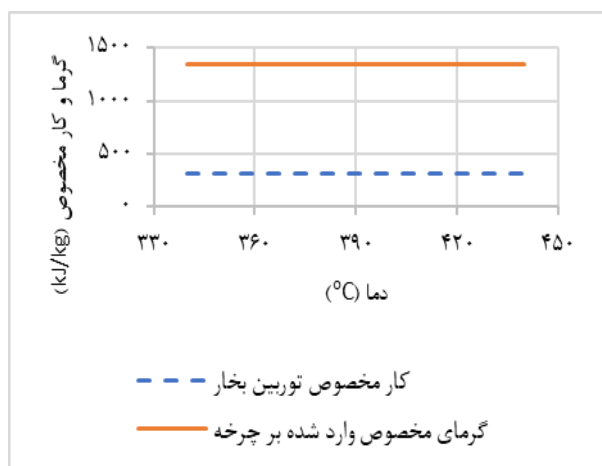
طور تقریبی ۳/۵٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸: تغییرات دمای هوا استفاده شده برای خنک‌سازی کلینکر بر روی بازده حرارتی و آگزرژی.

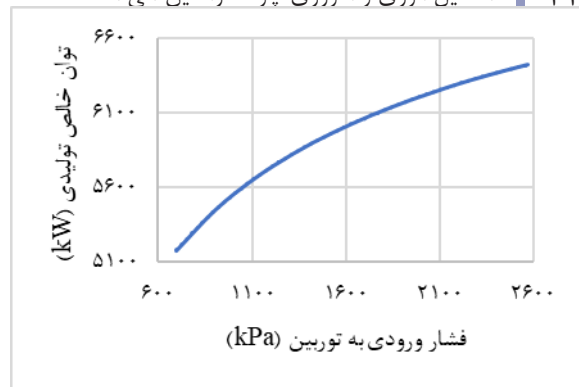


شکل ۱۹: تغییرات دمای هوا استفاده شده برای خنک‌سازی کلینکر بر روی توان خالص.

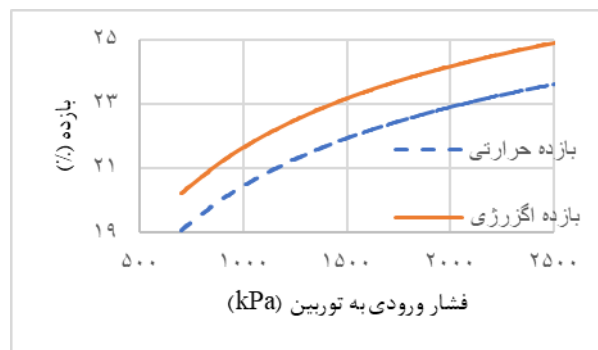


شکل ۲۰: تغییرات دمای گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن بر روی گرما و کار مخصوص.

۲۲ | تحلیل انرژی و آگزرژی چرخه رانکین آلی استفاده شده ...

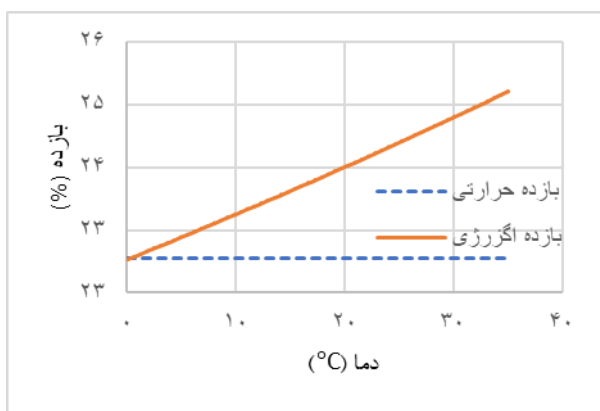


شکل ۱۶: تغییرات فشار ورودی به توربین بخار بر روی تخریب آگزرژی.

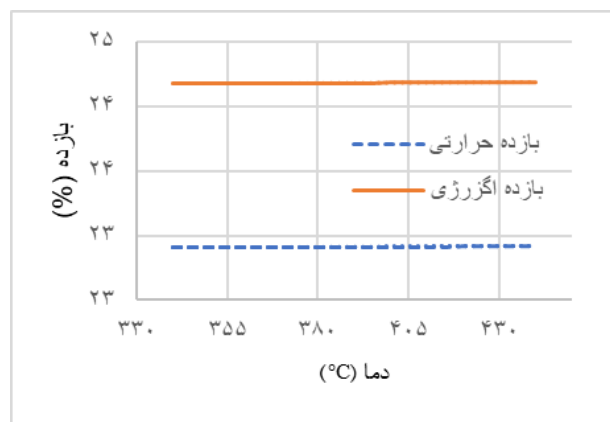


شکل ۱۷: تغییرات فشار ورودی به توربین بخار بر روی بازده حرارتی و آگزرژی.

در پیکربندی دوم، سیال آلی خروجی از صرفه‌جو به صورت مایع اشباع و سیال آلی خروجی از تبخیرکننده‌ها به صورت بخار اشباع می‌باشند. با این حال مطابق شکل ۱۸ با افزایش هر 10°C دمای هوای استفاده شده برای خنک‌سازی کلینکر، بازده حرارتی و بازده آگزرژی به ترتیب ۳۷٪ و ۳۵٪ (به میزان تقریبی) افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش هر 10°C دمای این شاخص، توان خالص تولیدی مطابق شکل ۱۹ به طور تقریبی ۳٪ افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۲۰ با افزایش دمای گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن، کار مخصوص توربین و گرمای مخصوص وارد شده بر چرخه از پیش‌گرم‌کن، کار مخصوص توربین و گرمای مخصوص وارد شده بر چرخه روند ثابتی را طی می‌کنند. بنابراین با افزایش این شاخص، بازده حرارتی و بازده آگزرژی مطابق شکل ۲۱ تقریباً ثابت می‌ماند؛ اما این افزایش دما موجب افزایش شدت جریان جرمی ورودی به توربین بخار شده و در نتیجه مطابق شکل ۲۲، با افزایش هر 10°C دمای گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن، توان خالص تولیدی به



شکل ۲۳: تغییرات دمای محیط بر روی بازده حرارتی و بازده انگرژی.

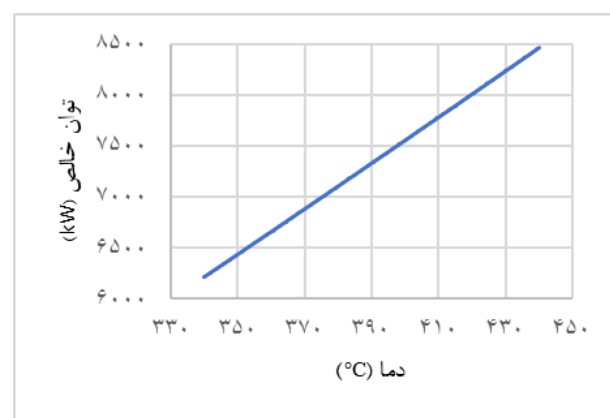


شکل ۲۱: تغییرات دمای گازهای خروجی از پیش گرم کن بر روی بازده حرارتی و بازده انگرژی.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور بازیابی گرمای اتلاف شده از صنعت سیمان توسط چرخه رانکین آلی صورت گرفته است. به منظور کنترل فرآیند تبخیر و جلوگیری از خوردگی مبادله کن‌های گرمایی، از حلقه روغن حرارتی با سیال عامل Therminol 66 برای تبادل حرارت میان گازهای خروجی از پیش گرم کن و چرخه رانکین آلی استفاده شده است. از میان سیالاتی همچون Ethanol, R123, R1233ze(E), R600a و R1234ze(Z)، اتانول با تولید توان خالص kW ۶۲۱۳، بازده حرارتی ۲۲/۹۱٪ و بازده انگرژی ۲۴/۱۸٪ بهترین عملکرد را نسبت به دیگر سیالات پیشنهادی دارا است. همچنین اثر شاخص‌های موثر بر چرخه رانکین آلی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج مهم به شرح زیر می‌باشند:

- با افزایش هر یک درجه دمای چگالنده، توان خالص و بازده حرارتی به مقدار تقریبی ۰/۶۵٪ و بازده انگرژی به مقدار تقریبی ۰/۶۶٪ کاهش می‌یابند.
- با افزایش هر ۱۰۰ kPa فشار سیال ورودی به توربین بخار، شدت جریان جرمی سیال آلی ورودی به تبخیر کننده یک، حدود ۰/۶۵٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۲۲: تغییرات دمای گازهای خروجی از پیش گرم کن بر روی توان خالص.

شکل ۲۳ اثر تغییرات دمای محیط بر روی بازده حرارتی و بازده انگرژی را نمایش می‌دهد. نتایج بیان می‌کنند که با افزایش هر یک درجه دمای محیط، بازده حرارتی ثابت و بازده انگرژی به طور تقریبی ۰/۲٪ افزایش می‌یابد.

125500.

[3] Khabbazan, M. M. and C. Von Hirschhausen, The implication of the Paris targets for the Middle East through different cooperation options. *Energy Economics*, 2021. 104: p. 105629.

[4] Zamanipour, B., H. Ghadaksaz, I. Keppo and Y. Saboohi, Electricity supply and demand dynamics in Iran considering climate change-induced stresses. *Energy*, 2023. 263: p. 126118.

[5] Caro, D., Greenhouse gas and livestock emissions and climate change. 2019.

[6] Jouhara, H., N. Khordehghah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan and S. A. Tassou, Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018. 6: p. 268-289.

[7] Brückner, S., S. Liu, L. Miró, M. Radspieler, L. F. Cabeza and E. Lävemann, Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 2015. 151: p. 157-167.

[8] Peris, B., J. Navarro-Esbrí, F. Molés and A. Mota-Babiloni, Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. *Energy*, 2015. 85: p. 534-542.

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

[10] Fergani, Z., D. Touil and T. Morosuk, Multi-criteria exergy based optimization of an Organic Rankine Cycle for waste heat recovery in the cement industry. *Energy Conversion and Management*, 2016. 112: p. 81-90.

[11] Ansari, N. and A. Seifi, A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. *Energy Policy*, 2013. 58: p. 75-89.

[12] Campana, F., M. Bianchi, L. Branchini, A. De Pascale, A. Peretto, M. Baresi, et al., ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. *Energy Conversion and Management*, 2013. 76: p. 244-252.

[13] Moreira, L. and F. Arrieta, Thermal and economic

همچنین طبق این افزایش فشار، بازده حرارتی و بازده انرژی به ترتیب $2.2/7\%$ و $2.2/67\%$ درصد افزایش می‌یابند.

• با افزایش هر 10°C دمای هوای استفاده شده برای خنک‌سازی کلینکر، بازده حرارتی و بازده انرژی به ترتیب 0.37% و 0.35% افزایش می‌یابند.

• با افزایش هر 10°C دمای گازهای خروجی از پیش‌گرم‌کن، بازده حرارتی و بازده انرژی تقریباً ثابت‌اماتوان خالص تولیدی $3/5\%$ افزایش می‌یابد.

• با افزایش هر 10°C دمای محیط، بازده حرارتی ثابت و بازده انرژی 0.2% افزایش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ex	انرژی، kJ/kg
h	انتالپی مخصوص، kJ/kg
m	شدت جریان جرمی، kg/s
P	فشار، kPa
Q	آهنگ انتقال گرما، kW
s	انرژی مخصوص، kJ/kg.K
T	دما، $^\circ\text{C}$
W	آهنگ کار میداده شده، kW

علائم یونانی

η بازده، %

زیرنویس

cv	حجم کنترل
e	خروجی
ex	انرژی
i	ورودی
net	خالص
OilP	پمپ حلقه روغن
PP01	پمپ چرخه رانکین آلی
Turb	توربین
th	حرارتی

۷- منابع و مراجع

[1] Ghadaksaz, H. and Y. Saboohi, Energy supply transformation pathways in Iran to reduce GHG emissions in line with the Paris Agreement. *Energy Strategy Reviews*, 2020. 32: p. 100541.2.

[2] Souhankar, A., A. Mortezaee and R. Hafezi, and R. Hafezi, Potentials for energy-saving and efficiency capacities in Iran: An interpretive structural model to prioritize future national policies. *Energy*, 2023. 262: p.

- [24] Shi, L., G. Shu, H. Tian and S. Deng, A review of modified Organic Rankine cycles (ORCs) for internal combustion engine waste heat recovery (ICE-WHR). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 92: p. 95-110.
- [25] Yang, J., Z. Ye, B. Yu, H. Ouyang and J. Chen, Simultaneous experimental comparison of low-GWP refrigerants as drop-in replacements to R245fa for Organic Rankine cycle application: R1234ze (Z), R1233zd (E), and R1336mzz (E). *Energy*, 2019. 173: p. 721-731.
- [26] Hemadri, V.B. and P. Subbarao, Thermal integration of reheated organic Rankine cycle (RH-ORC) with gas turbine exhaust for maximum power recovery. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021. 23: p. 100876.
- [27] Yu, H., H. Helland, X. Yu, T. Gundersen and G. Sin, Optimal design and operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 2021. 244: p. 114494.
- [28] Herath, H., M. Wijewardane, R. Ranasinghe and J. Jayasekera, Working fluid selection of organic Rankine cycles. *Energy Reports*, 2020. 6: p. 680-686.
- [29] Javanshir, A. and N. Sarunac. Effect of the working fluid on performance of the ORC and combined Brayton/ORC cycle. in *Energy Sustainability*. 2017. American Society of Mechanical Engineers.
- [30] Satanphol, K., W. Pridasawas, and B. Suphanit, A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery. *Energy*, 2017. 123: p. 326-339.
- [31] Cengel, Y.A., M.A. Boles, and M. Kanoğlu, *Thermodynamics: an engineering approach*. Vol. 5. 2011: McGraw-hill New York.
- assessment of organic Rankine cycles for waste heat recovery in cement plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. 114: p. 109315.
- [14] Liu, Z., X. Wang, Q. Zhang and C. Huang, Empirical mode decomposition based hybrid ensemble model for electrical energy consumption forecasting of the cement grinding process. *Measurement*, 2019. 138: p. 314-324.
- [15] Zeb, K., S. M. Ali, B. Khan, C. A. Mehmood, N. Tareen, W. Din, et al., A survey on waste heat recovery: Electric power generation and potential prospects within Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. 75: p. 1142-1155.
- [16] Pantaleo, A. M., J. Fordham, O. A. Oyewunmi, P. De Palma and C. N. Markides, Integrating cogeneration and intermittent waste-heat recovery in food processing: Microturbines vs. ORC systems in the coffee roasting industry. *Applied energy*, 2018. 225: p. 782-796.
- [17] Marmier, A., *Decarbonisation options for the cement industry*. 2023.
- [18] Quoilin, S., M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef and V. Lemort, Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013. 22: p. 168-186.
- [19] Shahrooz, M., P. Lundqvist, and P. Neksa, Performance of binary zeotropic mixtures in organic Rankine cycles (ORCs). *Energy Conversion and Management*, 2022. 266: p. 115783.
- [20] Bahrami, M., F. Pourfayaz, and A. Kasaeian, Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for Organic Rankine Cycle (ORC) applications. *Energy Reports*, 2022. 8: p. 2976-2988.
- [21] Xu, W., R. Zhao, S. Deng, L. Zhao and S. S. Mao, Is zeotropic working fluid a promising option for organic Rankine cycle: A quantitative evaluation based on literature data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. 148: p. 111267.
- [22] Ciconkov, R., Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions. *International Journal of Refrigeration*, 2018. 86: p. 441-448.
- [23] Bolaji, B. and Z. Huan, Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 18: p. 49-54.