

بهینه‌سازی و ارزیابی فنی-اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌گذاری با بهره‌گیری از چرخه ارگانیک رانکین

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، کرمان، ایران،
amin.saleh@stu.vru.ac.ir

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، کرمان، ایران،
v.ghamari@stu.vru.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، کرمان، ایران، h.hajabdollahi@vru.ac.ir

امین صالح

وحید قمری

حسن حاج عبداللهی*

چکیده

هدف اصلی این پژوهش تحلیل اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌گذاری با استفاده از چرخه ارگانیک رانکین (CCHP-ORC) است به گونه‌ای که تأمین نیاز انرژی ساختمان برای اقلیم سرد در مدت یک سال با یک استراتژی جدید که طول سال به ۲۴ بخش پانزده روز تقسیم می‌شود، بررسی می‌گردد. محرک اولیه سیستم، توربین گاز در نظر گرفته شده که بخشی از حرارت و برق مورد نیاز ساختمان را تأمین می‌کند. حرارت مازاد محرک اولیه بازیابی شده و جهت تولید برق به چرخه ارگانیک رانکین داده می‌شود. بهینه‌سازی سیستم مورد بررسی توسط الگوریتم ژنتیک صورت پذیرفته که مجموعاً ۲۹ پارامتر طراحی، شامل ظرفیت توربین گاز، ظرفیت چیلر جذبی و الکتریکی، نسبت سرمایه‌گذاری الکتریکی، ظرفیت جوش‌آور پشتیبان و ۲۴ بار جزئی برای توربین گاز در کل سال و کمینه هزینه کل سالانه به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. نتایج بیان می‌کند که هزینه سالانه و هزینه انتشار آلاینده در سیستم CCHP-ORC نسبت به سیستم CCHP به ترتیب ۲/۲٪ و ۱۴/۷٪ کمتر است. راندمان انرژی سیستم CCHP-ORC به میزان ۴۰/۹۳٪ درصد می‌باشد که نسبت به سیستم CCHP ۵/۹٪ درصد بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌گذاری، چرخه ارگانیک رانکین، هزینه سالانه، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، اقلیم سرد.

Thermo-economic optimization of combined cooling, heating and power generation system including organic rankine cycle

A. Saleh

Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, kerman, Iran

V. Ghamari

Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, kerman, Iran

H. Hajabdollahi

Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, kerman, Iran

Abstract

The main purpose of this study is the economic analysis of the system of combined cooling, heating and power- organic rankine cycle CCHP-ORC so that the supply of building energy needs for cold climates in one year with a new strategy that the year is divided into 24 parts of fifteen days. The prime mover is a gas turbine system that provides part of the heat and electricity needed by the building. Excess heat from the prime mover is recovered and given to organic rankine cycle to generate electricity. The study system was optimized by genetic algorithm with a total of 29 design parameters, including gas turbine capacity, absorption and electric chiller capacity, electric cooling ratio, auxiliary boiler capacity and 24 partial loads for gas turbines throughout the year and minimum total annual cost (TAC) Selected as the objective function. The results show that the annual cost and emission costs in the CCHP-ORC system are 2.2% and 14.7% lower than the CCHP system, respectively. The exergy efficiency of CCHP-ORC system is 40.93% which is 5.9% higher than CCHP system.

Keywords: Combined cooling heating and power generation system, Organic Rankine cycle, Annual cost, Optimization, Genetic algorithm, cold climate.

همزمان، یکی از فناوری‌هایی که قابلیت بازیابی حرارت اتلافی را دارد، چرخه ارگانیک رانکین است. این چرخه به دلیل استفاده از سیال ارگانیک که دمای نقطه جوش پایین‌تری برای تغییر فاز نسبت به آب دارد این چنین نامیده می‌شود. دمای حرارت اتلافی محرک اولیه می‌تواند تأثیر به‌سزایی در توان تولیدی این چرخه داشته باشد. از این رو فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی مرتبط با روش‌های انتخاب محرک اولیه (PM) و توان اسمی و همچنین برای انتخاب ظرفیت تجهیزات در سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌گذاری (CCHP) در

۱- مقدمه

اساسی‌ترین منابع انرژی در شرایط فعلی در کشور ما سوخت‌های فسیلی است. این منابع دارای عمر محدود و تأثیر بسزایی در آلودگی‌های زیست محیطی دارند. چون در شرایط حاضر امکان استفاده از منابع دیگر به طور کامل به جای سوخت‌های فسیلی وجود ندارد، پس بایستی نحوه بهره‌گیری و راه‌کارهای مؤثر در افزایش بهره‌وری از آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. زیرا باعث توسعه اقتصادی و کاهش آلودگی زیست محیطی می‌گردد. با بهره‌گیری از سیستم تولید همزمان می‌توان تا حدودی مصرف سوخت فسیلی و هزینه‌ها را کاهش داد. با توجه به حرارت اتلافی محرک اولیه در سیستم‌های تولید

¹ Prime mover

² Combined cooling, heating and power

هر دو روش فنی و اقتصادی وجود دارد [۳-۱].

در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با توجه به انتخاب محرک اولیه در موارد مشابه و چه غیر مشابه در بار-های جزئی ثابت و متغیر در طول سال نتایج فنی و اقتصادی مشابهی مشاهده نشد. انتخاب توان اسمی محرک اولیه در سیستم‌های تولید همزمان حرارت و برق (CHP¹) در دو شرایط بدون فروش و فروش به شبکه در تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط بدون فروش، فروش برق به شبکه مجاز نیست اما در شرایط مجاز به فروش، فروش برق به شبکه مجاز است. خرید برق از شبکه در دو شرایط مجاز است [۵ و ۴].

وانگ و همکاران به بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با انتخاب توربین گاز به عنوان واحد تولید توان (PGU²) پرداختند. آن‌ها برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم ازدحام جمعیت (PSO³) استفاده کردند. نتایج آن‌ها با توجه به تابع هدف که شامل تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست محیطی بود، نشان داد که سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه هزینه کمتری دارد [۶].

تیچی و همکاران با استفاده از الگوریتم ازدحام جمعیت سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش را با سیستم سنتی (خرید برق از شبکه، تولید حرارت توسط جوش‌آور پشتیبان و تأمین سرمایش توسط چیلر) مقایسه کردند. آن‌ها دو سیستم را از جنبه‌های مصرف انرژی (کاهش سوخت مصرفی)، اقتصادی (هزینه کل سالانه) و زیست محیطی (انتشار CO₂) بررسی کردند. هزینه کل سالانه برای سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی ۵۸ درصد کمتر است و نرخ بازگشت سرمایه ۱/۳ سال معین گردید [۷].

صنایع و همکاران با انتخاب نوع و تعداد محرک اولیه، توان اسمی و استراتژی عملیاتی تجهیزات، ظرفیت جوش‌آور پشتیبان و مخزن ذخیره، ظرفیت سرمایش چیلرهای الکتریکی و جذبی و همچنین نسبت سرمایش چیلر الکتریکی به عنوان ۹ متغیر طراحی سیستم CCHP را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش سه نوع محرک اصلی از جمله توربین گاز، موتور دیزل و موتور گازسوز مورد بررسی قرار گرفت. برای به دست آوردن حداکثر سود واقعی سالانه و راندمان انرژی به طور همزمان از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و الگوریتم چند هدفه (MOO⁴) استفاده شد. نتایج بیان کرد که در بار جزئی ۷۵، ۸۵ و ۸۰ درصد به ترتیب برای محرک توربین گاز، موتور دیزل و موتور گازسوز سیستم دارای بیشترین سود واقعی سالانه و راندمان انرژی است [۸].

حاج عبداللّهی و همکاران با در نظر گرفتن یک استراتژی جدید با عنوان نسبت سرمایش الکتریکی متغیر (VER⁵) و نسبت سرمایش الکتریکی ثابت (CER⁶) برای اقلیم‌های مختلف از جمله گرم، سرد و معتدل به کاهش هزینه‌های سالانه سیستم تولید همزمان انرژی

پرداختند. در استراتژی نسبت سرمایش الکتریکی متغیر سهم بار جزئی چیلر جذبی و الکتریکی در طول سال می‌تواند متغیر باشد، اما در استراتژی نسبت سرمایش الکتریکی ثابت، ثابت است. آن‌ها موتور گاز سوز را به عنوان محرک اولیه در نظر گرفتند. از روش بهینه‌سازی ذرات برای انتخاب تجهیزات بهینه سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با استفاده از حداکثر سود نسبی سالانه (RAB⁷) به عنوان یک تابع هدف جدید استفاده کردند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که استراتژی نسبت سرمایش الکتریکی متغیر، در مقایسه با استراتژی نسبت سرمایش الکتریکی ثابت در کلیه اقلیم‌های مورد مطالعه سود بیشتری خواهد داشت [۹].

محسنی و همکاران [۱۰] به بررسی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش در مقیاس میکرو پرداختند. در این بررسی از چهار نوع فناوری به عنوان محرک اولیه استفاده شد. آن‌ها محرک‌های اولیه شامل پیل سوختی، میکرو توربین، موتور رفت و برگشتی و موتور استرلینگ که بر اساس پارامترهای موجود و شاخص‌های معتبر سیستم CCHP با یکدیگر مقایسه کردند. همچنین بر اساس تأمین تقاضای مصرف کننده بهینه‌ترین حالت را پیشنهاد نمودند. نتایج بیانگر کمترین مقدار صرفه‌جویی انرژی اولیه برای محرک اولیه موتور استرلینگ و بیشترین مقدار برای پیل سوختی بود.

وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با بهره‌گیری از مخزن ذخیره، انرژی خورشیدی و زمین گرمایی با محرک اولیه توربین گاز پرداختند. آن‌ها سیستم CCHP را از منظر انرژی، اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد سیستم CCHP نسبت به سیستم تولید جداگانه به میزان ۱۳/۷ انرژی کمتری مصرف کرده و انتشار آلاینده‌ها به میزان ۸ درصد کاهش می‌یابد [۱۱].

چهارطاقی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با توجه به محرک اولیه موتور گاز سوز به تأمین انرژی مورد نیاز یک سردخانه پرداختند. آن‌ها سیستم را از منظر انرژی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این سیستم CCHP تحت استراتژی تأمین گرما با امکان فروش برق به شبکه، منجر به کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملیاتی سیستم به ترتیب در حدود ۷۵/۸۵ و ۸۱/۳۴ درصد در مقایسه با سیستم سنتی می‌شود [۱۲].

فرزانه گرد و همکاران [۱۳] در یک پژوهش به بررسی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش بر حسب تأمین نیاز انرژی یک نمونه خانگی پرداختند. آن‌ها با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده یک الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن بهترین عملکرد سیستم CCHP براساس راندمان الکتریکی محرک اولیه به نحوی که هزینه سوخت محرک اولیه در حالت کمینه خود باشد، پیشنهاد کردند. سیستم پیشنهادی نسبت به نمونه خانگی ۵۷ درصد مصرف انرژی اولیه کمتری را دارد.

غفوریان و همکاران به بهینه‌سازی سیستم CCHP در ترکیب با آب شیرین‌کن اسمز معکوس (Reverse osmosis) پرداختند. در فرآیند

¹ Combined heating and power

² Power generation unit

³ Particle Swarm Optimization

⁴ Multi-objective optimization

⁵ Variable electric cooling ratio

⁶ Constant electric cooling ratio

⁷ Relative annual benefit

این مطالعه یک توربین گاز به عنوان محرک اولیه در نظر گرفته شده است. حرارت بازیابی شده ناشی از دمای گازهای خروجی اگزوز آن ممکن است کل یا بخشی از حرارت مورد نیاز ساختمان و چیلر جذبی جهت تولید سرمایش را تأمین کند. در صورت کمبود نیاز حرارت جوش‌آور پشتیبان باقی مانده نیاز را تأمین می‌کند. همچنین در سیستم از یک چیلر الکتریکی جهت تأمین بخشی از سرمایش مورد نیاز ساختمان بکارگیری می‌شود. حرارت بازیابی شده اضافی به چرخه ارگانیک رانکین جهت تولید توان داده می‌شود. در این مدل‌سازی سیستم مجاز به فروش و خرید برق از شبکه است. سوخت استفاده شده برای محرک اولیه و جوش‌آور پشتیبان گاز طبیعی است. راندمان شبکه انتقال برق ۸۲ درصد در نظر گرفته شده است [۱۷]. شکل ۱ طرحواره سیستم تولید همزمان بررسی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۳- تجزیه و تحلیل انرژی

۳-۱- فرضیات حاکم بر سیستم

- ✓ چرخه ارگانیک رانکین فقط از حرارت بازیابی اضافی استفاده می‌کند.
- ✓ جوش‌آور پشتیبان، چیلر جذبی یا الکتریکی می‌تواند خاموش باشد.
- ✓ سیستم مجاز به خرید از شبکه و فروش به شبکه است.
- ✓ نسبت سرمایش الکتریکی یعنی نسبت سرمایش تولیدی چیلر الکتریکی به تقاضای کل در طول سال ثابت است.
- ✓ ۹۰ درصد حرارت اگزوز توسط مبادله‌کن بازیابی می‌شود.

۳-۲- معادلات حاکم بر سیستم CCHP-ORC

حرارت کل مورد نیاز که مجموع حرارت مورد نیاز گرمایش ساختمان و چیلر جذبی برای تأمین سرمایش است از رابطه زیر بدست می‌آید [۹]:

$$\dot{H}_{dmn,tot} = \dot{H}_{dmn} + (1-\alpha) \times \frac{\dot{Q}_{dmn}}{COP_{ch,ab}} \quad (1)$$

که \dot{H}_{dmn} حرارت مورد نیاز ساختمان، \dot{Q}_{dmn} سرمایش مورد نیاز ساختمان، $COP_{ch,ab}$ ضریب عملکرد چیلر جذبی و α نسبت بار سرمایش الکتریکی می‌باشد و از رابطه زیر حاصل می‌گردد [۹]:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{ch,el}}{\dot{Q}_{dmn}} \quad (2)$$

برق کل مورد نیاز که مجموع برق مورد نیاز ساختمان و چیلر الکتریکی برای تأمین نیاز سرمایش ساختمان است از رابطه زیر بدست می‌آید [۹]:

$$\dot{E}_{dmn,tot} = \dot{E}_{dmn} + \alpha \times \frac{\dot{Q}_{dmn}}{COP_{ch,el}} \quad (3)$$

\dot{E}_{dmn} برق مورد نیاز ساختمان و $COP_{ch,el}$ ضریب عملکرد چیلر الکتریکی می‌باشد. این نیاز توسط برق تولیدی محرک اولیه، چرخه ارگانیک رانکین و خرید برق از شبکه تأمین می‌شود.

۳-۲-۱- چیلر جذبی، چیلر الکتریکی و جوش‌آور

پشتیبان

با توجه به قانون اول ترمودینامیک، گرما لازم برای چیلر جذبی، برق مورد نیاز چیلر الکتریکی و سوخت مصرفی جوش‌آور پشتیبان به

بهینه‌سازی از تابع چند هدفه (انرژی، اقتصادی و زیست محیطی) تحت عنوان سود سالانه نسبی و محرک اولیه موتور گاز سوز استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر سود سالانه بیشتر و کاهش انتشار آلاینده‌ها در سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم جداگانه است [۱۴].

حقیقی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی انرژی و اقتصادی سیستم CCHP با محرک اولیه گردآور خورشیدی سهموی پرداختند. از این رو آن‌ها سیستم را در سه حالت عملیاتی تابش خورشید، تابش خورشید و ذخیره انرژی و ذخیره انرژی بررسی کردند. هزینه هر واحد انرژی تولید شده برای حالت‌های فوق‌الذکر به ترتیب ۱۱/۴۴ (\$/GJ)، ۱۰/۲۷ (\$/GJ) و ۱۵/۴۷ (\$/GJ) بدست آمد [۱۵].

سیستم‌های چیلر ترکیبی که چیلرهای الکتریکی و جذبی را با هم ترکیب می‌کنند می‌توانند نقش مهمی در عملکرد سیستم CCHP داشته باشند. از این رو هیون گوک و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مدل‌سازی و مقایسه سیستم CCHP با چیلر ترکیبی و سیستم CCHP با چیلر جذبی از منظر زیست محیطی و مصرف انرژی اولیه پرداختند. سیستم با چیلر ترکیبی ۱/۵ تا ۲ کیلووات در سال انتشار آلاینده و ۵/۶ گیگاوات مصرف انرژی اولیه کمتری را نسبت به سیستم با چیلر جذبی دارد [۱۶].

در این بررسی به مدل‌سازی و ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با بهره‌گیری از چرخه ارگانیک رانکین (CCHP-ORC) پرداخته می‌شود. محرک اولیه سیستم CCHP-ORC یک توربین گاز است. تأمین نیاز انرژی ساختمان در تحقیقات گذشته با استراتژی‌های مختلف از جمله تعداد ۱۲ ماه در سال، ساعات یک روز به طور ثابت برای کل سال و تقسیم طول سال به چهار فصل مشاهده شد. در این پژوهش تأمین نیاز برق، حرارت و سرمایش برای اقلیم سرد در مدت یک سال با یک استراتژی جدید که طول سال به ۲۴ بخش پانزده روز تقسیم می‌شود، بررسی می‌گردد. محرک اولیه چرخه ORC فقط حرارت اتلافی سیستم است. ظرفیت توربین گاز، ظرفیت چیلر جذبی و الکتریکی، نسبت سرمایش الکتریکی، ظرفیت جوش‌آور جوش‌آور پشتیبان و ۲۴ بار جزئی برای توربین گاز در کل سال به عنوان ۲۹ پارامتر طراحی در نظر گرفته می‌شود. کد محاسباتی سیستم در نرم افزار MATLAB توسعه داده شده و از نرم افزار حل‌گر معادلات مهندسی (EES) جهت تعیین خواص ترمودینامیکی چرخه ارگانیک رانکین استفاده می‌گردد. مدل‌سازی انجام شده به کمینه‌سازی هزینه کل سالانه (TAC) سیستم منجر شده و نتایج بهینه‌سازی سیستم با و بدون چرخه ارگانیک رانکین با یکدیگر مقایسه می‌شود. همچنین راندمان انرژی سیستم با توجه به تابع هدف و پارامترهای بهینه محاسبه و بررسی می‌گردد.

۲- نحوه عملکرد سیستم CCHP-ORC

هسته اصلی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش یک محرک اولیه است که برق و حرارت را همزمان تولید می‌کند. استراتژی عملیاتی سیستم توسط الگوریتم به صورت بهینه انتخاب می‌شود. در

¹ Combined cooling, heating and power- Organic Rankine Cycle

² Engineering Equation Solver

³ Total annual cost

ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۸]:

$$\dot{H}_{ch,ab} = \frac{\dot{Q}}{COP_{ch,ab}} \quad (4)$$

$$\dot{E}_{ch,el} = \frac{\dot{Q}}{COP_{ch,el}} \quad (5)$$

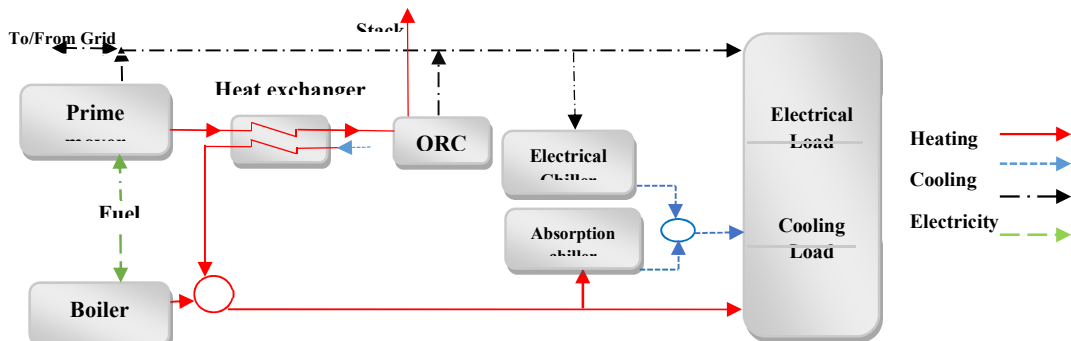
$$\dot{m}_{f,b} = \frac{\dot{H}}{LHV_f \times \eta_b} \quad (6)$$

می‌کند [۹]:

$$\dot{m}_{f,nom} = \frac{\dot{W}}{\eta_{GT,nom} LHV_f} \quad (11)$$

۳-۲-۳- راندمان و ضریب عملکرد تجهیزات سیستم

راندمان محرک اولیه، جوش‌آور پشتیبان و ضریب عملکرد چیلرها با توجه به بار جزئی به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آید [۸]:



شکل ۱- طرحواره سیستم تولید همزمان برق، گرما و سرمایش - چرخه ارگانیک رانکین

$$\eta_{pm,PL} = \frac{-0.002551 \times (PL)^2 + 1.135(PL) + 11.71}{100} \quad (12)$$

$$\eta_{b,PL} = 0.0951 + 1.525(PL) - 0.6249(PL)^2 \quad (13)$$

$$\frac{COP_{ab,PL}}{COP_{ab,nom}} = \frac{PL}{0.75(PL)^2 + 0.0195(PL) + 0.213} \quad (14)$$

$$\frac{COP_{el,PL}}{COP_{el,nom}} = 1.819(PL) - 0.819(PL)^2 \quad (15)$$

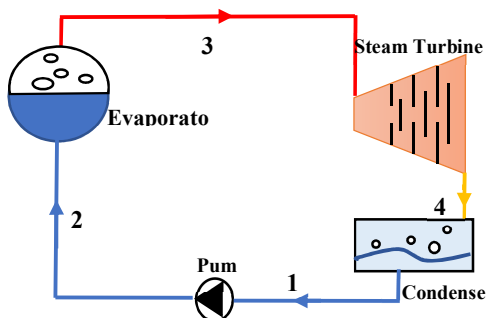
که \dot{H} و \dot{Q} به ترتیب بار سرمایش چیلر و بار گرمایی جوش‌آور پشتیبان است. همچنین LHV ارزش پایین حرارتی سوخت و η_b راندمان نامی جوش‌آور پشتیبان بوده که در جدول ۱ به همراه برخی پارامترها آمده است.

جدول ۱- راندمان و ضریب عملکرد نامی تجهیزات [۹ و ۸]

پارامتر	مقدار
راندمان نامی جوش‌آور پشتیبان (%)	۹۰
ارزش پایین حرارتی (kJ/kg)	۴۹۱۹۱
ضریب عملکرد نامی چیلر جذبی	۰/۷
ضریب عملکرد نامی چیلر الکتریکی	۳

۳-۳- چرخه ارگانیک رانکین

در سیستم تولید همزمان گرما دور ریز بازیابی شده به عنوان محرک اولیه به چرخه ارگانیک رانکین داده می‌شود. توان تولیدی این چرخه بخشی از برق مورد نیاز را تأمین می‌کند یا ممکن است به فروش برسد. شکل ۲ طرحواره این چرخه را نشان می‌دهد. تجهیزات چرخه ارگانیک رانکین شامل: توربین بخار، پمپ، تبخیرکن و چگالنده است. عملکرد این چرخه با توجه به شرایط زیر انجام می‌شود:



شکل ۲- طرحواره چرخه ارگانیک رانکین

- ✓ فشار نقطه ۲، ۱۵۰۰ کیلو پاسکال است.
- ✓ سیال در نقطه ۱ کاملاً مایع است.
- ✓ کیفیت بخار در خروجی تبخیرکن ۱۰۰ درصد است.
- ✓ آفت فشار در چگالنده ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۲- توربین گاز به عنوان محرک اولیه

برق تولیدی توربین گاز، کل یا بخشی از برق مورد نیاز را تأمین می‌کند. برق تولیدی توسط آن با توجه به بار جزئی از رابطه زیر بدست می‌آید [۸]:

$$\frac{\dot{E}_{GT,PL}}{\dot{m}_{f,PL} LHV_f} = \frac{-0.002551(PL)^2 + 1.135(PL) + 11.71}{100} \cdot \eta_{GT,nom} \quad (7)$$

گرما قابل بازیابی از گرمای اگزوز محرک اولیه بخشی یا کل گرما مورد نیاز را تأمین می‌کند. گرما قابل بازیابی تابعی از بار جزئی از معادله زیر پیروی می‌کند [۸]:

$$\frac{\dot{Q}_{ex,PL}}{\dot{m}_{f,PL} LHV_f} = 0.0061(PL) + 0.3868 \quad (8)$$

$\eta_{GT,nom}$ بازده نامی و $\dot{m}_{f,PL}$ مصرف سوخت محرک اولیه تابع بار جزئی به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند [۸]:

$$\eta_{GT,nom} = 1.22(-9.2 \times 10^{-8} E_{nom}^2 + 0.001724 E_{nom} + 18.1) / 100 \quad (9)$$

$$\frac{\dot{m}_{f,PL}}{\dot{m}_{f,nom}} = 0.4772 \exp(0.007565(PL)) - 0.2123 \exp(-0.02677(PL)) \quad (10)$$

که $\dot{m}_{f,nom}$ مصرف سوخت نامی توربین گاز از معادله زیر پیروی

جدول ۲- پارمترهای طراحی و محدوده آن‌ها

پارامترها	محدوده پایین	محدوده بالا	گام
بار جزئی محرک اولیه (%)	۲۰	۱۰۰	۱۰
ظرفیت توربین گاز (kW)	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۰۰
ظرفیت چیلر الکتریکی (kW)	۰	۸۰۰۰	۱۰۰
ظرفیت چیلر جذبی (kW)	۰	۸۰۰۰	۱۰۰
ظرفیت جوش‌آور پشتیبان (kW)	۰	۶۰۰۰	۱۰۰
نسبت سرمایه‌اش الکتریکی (%)	۰	۱۰۰	۱۰

در این پژوهش هدف از مدل‌سازی به حداقل رساندن هزینه کل سالانه است. این هزینه شامل هزینه اولیه تجهیزات سیستم، هزینه میزان مصرف سوخت، هزینه انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید، هزینه خرید برق از شبکه و سود حاصل از فروش برق به شبکه می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید [۹]:

$$TAC (\$/year) = \sum_{i=1}^5 (CRF \phi C_{inv})_i + \sum_{j=1}^Z \left[\frac{\dot{E}_{b,j} \times \phi_{c,b} + \dot{E}_{s,j} \times \phi_{c,s}}{3600 \times \dot{m}_{CO_2,j} \times \psi_{em}} + \dot{m}_{f,j} \times \phi_{f,j} \times LHV_f + \tau_j \right] \quad (23)$$

در معادله (۲۳) C_{inv} و i به ترتیب تعداد و هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات سیستم (توربین گاز، چرخه ارگانیک رانکین، چیلر جذبی، چیلر الکتریکی، جوش‌آور پشتیبان) است. تابع هزینه اولیه تجهیزات سیستم CCHP-ORC در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- تابع هزینه اولیه تجهیزات سیستم (۱۸ و ۲۰)

تجهیز	تابع هزینه
توربین گاز	$(-0.014 \times \dot{E}_{nom} + 600) \times \dot{E}_{nom}$
چیلر جذبی	$540 \times (\dot{Q}_{ch,nom})^{0.872}$
چیلر الکتریکی	$482 \times (\dot{Q}_{ch,nom})^{0.93} - 159.7 (\dot{Q}_{nom,ch})$
جوش‌آور پشتیبان	$205 \times (\dot{Q}_{b,nom})^{0.87}$
توربین بخار	$6000 \times (\dot{W}_{st})^{0.7}$
چگالنده	$1773 \times \dot{m}_{sc}$
تبخیرکننده	$1773 \times \dot{m}_{sc}$
پمپ	$705.48 \times \dot{W}^{0.71} \times \left(1 + \frac{0.2}{(1-\eta_{pump})} \right)$

ضریب سالانه کننده CRF از معادله ۲۰ پیروی می‌کند:

$$CRF = i_{eff} \frac{(1+i_{eff})^N}{(1+i_{eff})^N - 1} \quad (24)$$

که در آن i_{eff} نرخ تورم و N عمر کارکرد تجهیزات به ترتیب ۱۲ درصد و ۲۰ سال است. ϕ ضریب تعمیر و نگهداری سیستم به میزان ۱/۰۵، Z تعداد روز در سال، τ_j ساعات کارکرد سیستم در هر ۱۵ روز، $\phi_{c,s}$ قیمت فروش برق به شبکه، $\phi_{c,b}$ قیمت خرید برق از شبکه، $\phi_{f,j}$ قیمت خرید سوخت و ψ_{em} هزینه انتشار آلاینده است. برخی پارامترهای اقتصادی در جدول ۴ آمده است.

✓ راندمان آیزنتروپیک توربین بخار و پمپ ۸۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.
 ✓ سیال کاری چرخه R134a است.
 ✓ دمای خروجی توربین ۲۹۸/۱۵ کلوین است.
 موازنه انرژی با توجه به خواص ترمودینامیکی نقاط مختلف چرخه برای توربین بخار، پمپ، تبخیرکن و چگالنده بدست می‌آید.
 همانطور که در شکل ۲ نشان داده است، کار توربین بخار از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۹]:

$$\dot{W}_{ST} = \dot{m}_{sc} (h_3 - h_4) \quad (16)$$

همچنین راندمان آیزنتروپیک توربین بخار با توجه به کار واقعی و آیزنتروپیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_{ST} = \dot{W}_{ST,ac} / \dot{W}_{ST,is} \quad (17)$$

موازنه انرژی برای چگالنده بخار از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۹]:

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{sc} (h_4 - h_1) \quad (18)$$

کار پمپ از معادله زیر حاصل می‌گردد [۱۹]:

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{sc} (h_2 - h_1) \quad (19)$$

با توجه به گرما دریافتی چرخه ORC و فرضیات حاکم بر تبخیرکن موازنه انرژی برای این تجهیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q}_{Waste} = \dot{m}_{sc} (h_3 - h_2) \quad (20)$$

۴-۳- راندمان اگزرژی

برای کنترل اثرات ناکارآمدی ترمودینامیکی در سیستم، قانون دوم به عنوان بازده اگزرژی تعریف شد. بازده اگزرژی (راندمان قانون دوم) اندازه گیری واقعی عملکرد سیستم انرژی را از نظر ترمودینامیکی فراهم می‌کند. بازده اگزرژی (ϵ) به عنوان نسبت بین محصول و اگزرژی سوخت به شرح زیر تعریف می‌شود [۱۸ و ۸]:

$$\epsilon = \frac{\dot{X}_p}{\dot{X}_f} \quad (21)$$

که \dot{X}_p و \dot{X}_f به ترتیب اگزرژی محصولات و سوخت می‌باشند. این محصولات نشان دهنده نتیجه مطلوب تولید شده توسط سیستم است. تعریف محصول باید با هدف خرید و استفاده از سیستم مطابقت داشته باشد. پس معادله اگزرژی برای سیستم تولید همزمان برق، گرما و سرمایش از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۸ و ۸]:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^Z \left(\dot{E}_{dnn} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{hot}} \right) \dot{H}_{dnn} \right) \times \tau_i}{\sum_{i=1}^Z \left(\dot{m}_i LHV_f + \dot{E}_s \right) \times \tau_i} \quad (22)$$

T_c و T_{hot} دمای سرمایش و گرما مورد نیاز به ترتیب ۲۷۸/۱۵ و ۲۶۳/۱۵ کلوین در نظر گرفته می‌شود.

۴- پارامترهای طراحی، تابع هدف و قیدها

ظرفیت توربین گاز، ظرفیت چیلر جذبی و الکتریکی، نسبت سرمایه‌اش الکتریکی، ظرفیت جوش‌آور پشتیبان و ۲۴ بار جزئی برای توربین گاز در کل سال به عنوان ۲۹ پارامتر طراحی در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۲ پارامترهای طراحی، محدوده و گام آن‌ها آمده است.

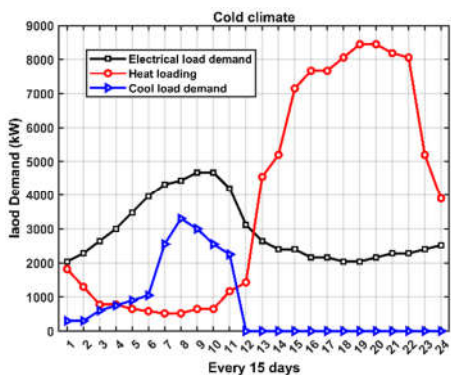
جدول ۴- برخی پارامترهای اقتصادی [۸ و ۹ و ۱۱]

پارامتر	قیمت واحد
خرید برق از شبکه (\$/kW.h)	۰/۰۷۱۶۶۷
گاز طبیعی (\$/kW.h)	۰/۰۱۰۵۴
جریمه انتشار آلاینده CO2 (\$/kg)	۰/۰۲۰۸۶
فروش برق به شبکه (\$/kW.h)	۰/۰۲۳۴۳۳

شامل ۱۸۰ اتاق به مساحت زیر بنایی ۱۴۰ مترمربع در استان همدان (اقلیم سرد) انجام و بررسی می‌شود. تأمین نیاز برق، گرما و سرمایش در مدت یک سال با یک استراتژی جدید که طول سال به ۲۴ بخش پانزده روز تقسیم می‌شود. شکل ۱ نیاز برق، گرما و سرمایش را نشان می‌دهد.

۲-۶- اعتبار سنجی چرخه ارگانیک رانکین

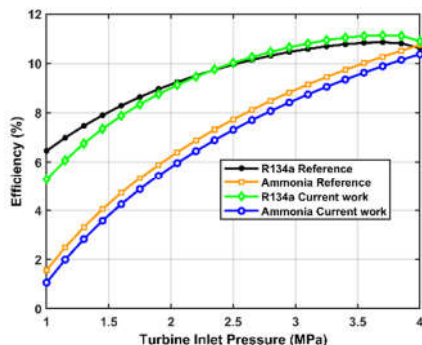
جهت اعتبار سنجی بر مدل‌سازی انجام شده کد محاسباتی چرخه ارگانیک رانکین با توجه به پارامترهای ورودی یکسان و دو سیال کاری در مقایسه با مرجع [۱۹] نتایج آن قابل قبول بدست آمد. شکل ۲ اعتبار سنجی مدل با مرجع را نشان می‌دهد. بازده و عملکرد تجهیزات در بارهای جزئی مختلف با توجه به روابط ۱۲ تا ۱۵ در شکل ۳ آمده است. این شکل بیان می‌کند که با افزایش بار جزئی راندمان جوش‌آور پشته‌بان و محرک اولیه و همچنین ضریب عملکرد چیلر الکتریکی افزایش می‌یابد. ضمناً چیلر جذبی در بار جزئی حدود ۵۰ درصد بیشتری ضریب عملکرد را دارد و در بار جزئی بالا ضریب عملکرد آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱- نیاز برق، گرما و سرمایش

۳-۶- الگوریتم ژنتیک

منظور از طراحی و بهینه‌سازی دستیابی به اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین طرح ممکن برای سیستم‌ها است. در این پژوهش بهینه‌سازی سیستم با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک هدفه انجام می‌شود. تعداد کروموزوم‌ها ۱۰۰، احتمال آمیختن ۸۰ درصد، احتمال جهش ۲/۵ درصد و اعمال نخبه‌گرایی با احتمال ۱۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- اعتبار سنجی چرخه ORC و مرجع [۱۹]

قیده‌های در نظر گرفته برای جوش‌آور پشته‌بان، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی به ترتیب به شرح زیر است:

$$PL_{b,j} \leq 1 \quad \forall j=1,2,3,\dots,Z \quad (25)$$

$$PL_{cl,ch} \leq 1 \quad \forall j=1,2,3,\dots,Z \quad (26)$$

$$PL_{ab,ch} \leq 1 \quad \forall j=1,2,3,\dots,Z \quad (27)$$

همچنین باید عنوان کرد که در این بررسی فروش برق به شبکه مجاز بوده و این مقدار می‌تواند مثبت، منفی و یا صفر باشد. مقدار منفی نشان دهنده خرید برق از شبکه است.

۵- هزینه عملیاتی سیستم و دوره بازگشت سرمایه

درصد کاهش هزینه عملیاتی سیستم CCHP-ORC در مقایسه با سیستم بدون ORC با توجه به معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$CR = \frac{\text{Cost}^{\text{CCHP}} - \text{Cost}^{\text{CCHP-ORC}}}{\text{Cost}^{\text{CCHP}}} \times 100 \quad (28)$$

هزینه‌های عملیاتی شامل قیمت خرید و فروش برق از شبکه و قیمت خرید سوخت است. علاوه بر این، $\text{Cost}^{\text{CCHP-ORC}}$ و $\text{Cost}^{\text{CCHP}}$ به ترتیب هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های CCHP و بدون ORC را شامل می‌شوند و از معادله به دست می‌آیند:

$$\text{Cost} = \text{Cost}_{c,s} + \text{Cost}_{c,b} + \text{Cost}_{\text{fuel}} \quad (29)$$

محاسبه دوره بازپرداخت یک روش تقریبی و سریع برای مقایسه اقتصادی پروژه‌ها است و شامل زمان لازم برای جبران سرمایه‌گذاری اولیه با درآمد سالانه است. بنابراین درآمد سالانه سیستم CCHP-ORC و CCHP از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$\text{NPWB} = 0.2 \times \text{TAC} + C_s + (\text{Cost}^{\text{CCHP}} - \text{Cost}^{\text{CCHP-ORC}}) \quad (30)$$

$$\text{NPWB} = 0.2 \times \text{TAC} + C_s \quad (31)$$

از این‌رو با توجه به سرمایه‌گذاری و درآمد سالیانه، دوره بازگشت سرمایه از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$\text{PB} = \frac{C_{\text{inv}}}{\text{NPWB}} \quad (32)$$

۶- بحث و نتایج

کد محاسباتی سیستم در نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است. خواص ترمودینامیکی سیال کاری چرخه ارگانیک رانکین از نرم‌افزار حل‌گر معادلات مهندسی استخراج شده و به عنوان ورودی در مدل‌سازی سیستم در نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌گردد. نسبت بار سرمایش الکتریکی (سرمایش تولیدی چیلر الکتریکی به تقاضای کل) برای کل سال ثابت است.

۱-۶- مطالعه موردی

مدلسازی و بهینه‌سازی سیستم برای مجتمع مسکونی فرضی

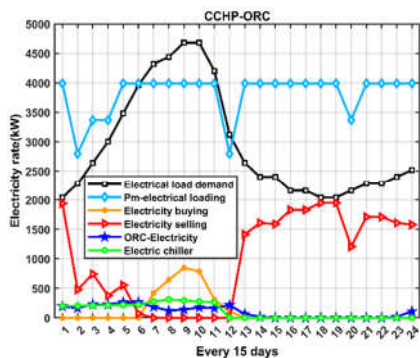
جدول ۶- پارامترهای بهینه برای سیستم CCHP-ORC

پارامترها	مقدار
ظرفیت توربین گاز (kW)	۳۹۹۲/۱
ظرفیت چیلر الکتریکی (kW)	۱۰۷۰/۹
ظرفیت چیلر جذبی (kW)	۲۷۰۸/۷
ظرفیت جوش‌آور پشتیبان (kW)	۳۸۰۹/۵
نسبت سرمایه‌اش الکتریکی (%)	۲۶/۶۷

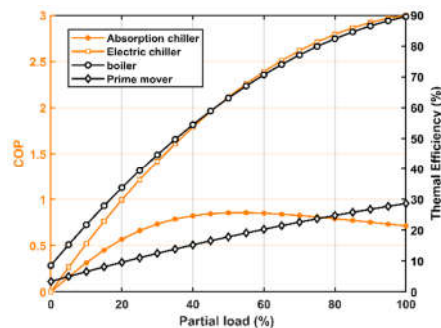
جدول ۷- پارامترهای بهینه برای سیستم CCHP

پارامترها	مقدار
ظرفیت توربین گاز (kW)	۴۸۶۵/۱
ظرفیت چیلر الکتریکی (kW)	۲۲۰۴/۷
ظرفیت چیلر جذبی (kW)	۱۶۳۷/۸
ظرفیت جوش‌آور پشتیبان (kW)	۳۳۳۸/۱
نسبت سرمایه‌اش الکتریکی (%)	۵۳/۳۳

با توجه به شکل ۵ بخش اعظم نیاز برق توسط محرک اولیه تأمین می‌شود. در بازه‌ی زمانی که نیاز برق در کمترین میزان بوده، بیشترین میزان فروش برق مشاهده می‌شود. مجموع سود حاصل از فروش برق به شبکه به میزان $۲/۹۰۴ \times 10^5$ دلار در سال بوده که به میزان ۵۸/۶ درصد کمتر از سیستم بدون چرخه ORC است. در اوج بار نیاز برق، فروش برق به شبکه وجود نداشته اما برق از شبکه خریداری شده است. در بازه زمانی که توان تولیدی چرخه ORC صفر بوده، دلیل آن این است که کل حرارت بازیابی شده جهت تأمین نیاز حرارت مصرف می‌شود. کل توان تولیدی توسط چرخه ORC در سال به میزان ۲۵۵۱/۱ کیلووات است. اعم تولید توان چرخه ORC در بازه زمانی ابتدایی سال تولید می‌گردد، به دلیل اینکه حرارت کمتری مورد نیاز ساختمان است. میزان بیشترین خرید برق در ۹ آیین پانزده روز مشاهده می‌گردد. مجموع هزینه خرید برق از شبکه در سال به میزان $۸/۷۵ \times 10^4$ دلار بوده که حدود ۱/۳ برابر نسبت به سیستم بدون چرخه ORC است. مجموع برق مصرفی چیلر الکتریکی $۵۴۹۶/۴$ کیلووات در سال است. در بازه‌ی زمانی که نیاز سرمایه‌اش وجود ندارد برقی توسط چیلر الکتریکی مصرف نمی‌شود. در بازه زمانی ۷ تا ۹ آیین ۱۵ روز است که کاهش توان تولیدی چرخه ORC مشاهده می‌شود به دلیل اینکه بخش بیشتر حرارت بازیابی شده توسط چیلر جذبی جهت تولید سرمایه‌اش و همچنین بخشی از حرارت جهت تأمین نیاز حرارت ساختمان مصرف می‌گردد.



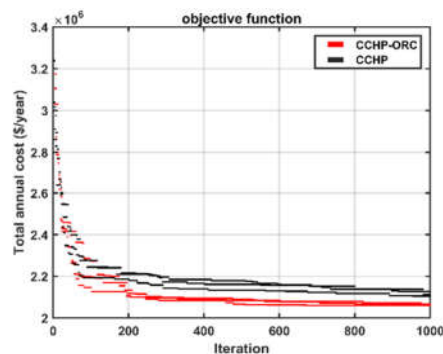
شکل ۵- میزان برق مورد نیاز/تولیدی/مصرفی



شکل ۳- بازده و عملکرد تجهیزات بر اساس بار جزئی

۴-۶- نتایج بهینه سیستم CCHP-ORC و CCHP

مقدار بهینه تابع هدف، هزینه تجهیزات اولیه، هزینه سوخت مصرفی و هزینه انتشار آلاینده در جدول ۵ به تفکیک آمده است. همچنین شکل ۴ روند همگرایی تابع هدف طی ۳ بار اجرای کد را نشان می‌دهد.



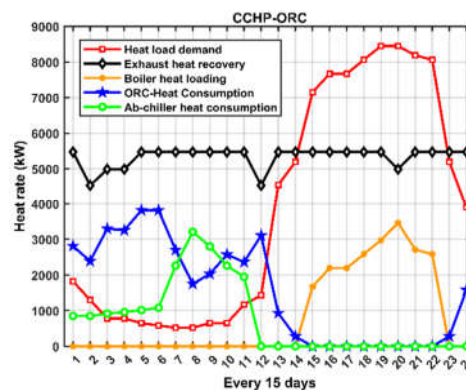
شکل ۴- روند همگرایی تابع هدف

جدول ۵- نتایج بهینه پارامترهای عملکردی سیستم

CCHP	CCHP-ORC	هزینه
$۲/۱۱۱۴ \times 10^6$	$۲/۰۶۵۹ \times 10^6$	هزینه کل سالانه (\$/year)
$۳/۳۶۰۶ \times 10^6$	$۳/۵۰۹۷ \times 10^6$	هزینه اولیه تجهیزات سیستم (\$)
$۱/۵۳۹۷ \times 10^6$	$۱/۳۴۱۱ \times 10^6$	هزینه سالانه سوخت مصرفی (\$)
$۴/۹۸۶۷ \times 10^5$	$۴/۳۴۳۴ \times 10^5$	هزینه سالانه انتشار آلاینده (CO2)

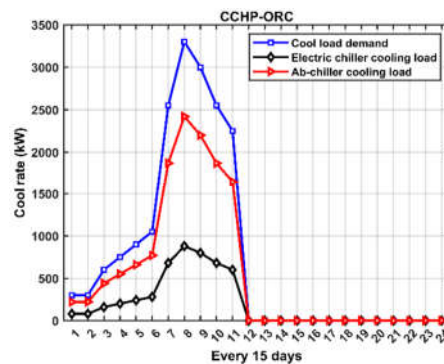
با توجه به جدول ۵ TAC، هزینه سوخت مصرفی و هزینه انتشار آلاینده‌ها به ترتیب به میزان ۲/۲، ۱۴/۸ و ۱۴/۷ برای سیستم با ORC نسبت به سیستم بدون ORC کاهش یافته است. با افزودن چرخه ORC به سیستم هزینه اولیه تجهیزات به میزان ۴/۴ درصد افزایش یافت. پارامترهای بهینه برای سیستم با و بدون چرخه ORC به ترتیب در جدول ۶ و ۷ آمده است. با توجه رابطه ۲۸ هزینه عملیاتی سیستم CCHP-ORC، ۳/۴۷ درصد کمتر از CCHP است. دوره بازگشت سرمایه در سیستم CCHP-ORC، ۴/۶ سال و برای سیستم CCHP، ۳/۹۵ سال است. همچنین سیستم CCHP-ORC در استان فارس نسبت به استان همدان هزینه کل سالانه و CR آن به ترتیب ۷/۳ و ۶/۷ درصد کمتر است.

نیاز حرارت ساختمان، حرارت بازیابی محرک اولیه، حرارت مصرفی چیلر جذبی، حرارت تولیدی جوش‌آور پشتیبان و حرارت مصرفی چرخه ORC در شکل ۶ نشان داده است. با توجه به شکل ۶ میزان حرارت دریافتی چرخه ORC زمانی که سرمایه‌گذاری بیشتری مورد نیاز است، کاهش می‌یابد به دلیل اینکه چیلر جذبی در بار جزئی حرارت بیشتری مصرف می‌کند. همچنین در بازه‌ی زمانی انتهای سال که حرارت بیشتری مورد نیاز است، تقریباً حرارتی توسط چرخه ORC دریافت نمی‌شود. از ۱۴ تا ۲۲ امین روز کمبود نیاز حرارت توسط جوش‌آور پشتیبان تأمین می‌گردد. مجموع حرارت تولید شده توسط آن ۱۸/۲۵ درصد از کل حرارت مورد نیاز در سال است و مابقی نیاز توسط حرارت بازیابی شده از محرک اولیه تأمین می‌شود. در بازه‌ی زمانی که سرمایه‌گذاری می‌یابد بار جزئی محرک اولیه بالاترین حد خود را دارد که علاوه بر تأمین حرارت مورد نیاز چیلر جذبی، باقیمانده حرارت اتلافی آن به چرخه ORC جهت تولید توان داده می‌شود.



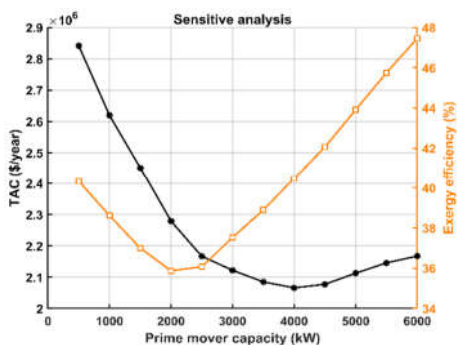
شکل ۶- میزان حرارت مورد نیاز/تولیدی/مصرفی

با توجه به شکل ۷ در سیستم CCHP-ORC سرمایه‌گذاری مورد نیاز ساختمان توسط سرمایه‌گذاری تولیدی دو چیلر تأمین شده و نسبت سرمایه‌گذاری الکتریکی ۲۶/۶۷ درصد انتخاب شده است. به دلیل حرارت زیاد محرک اولیه کل حرارت مورد نیاز چیلر جذبی توسط آن تأمین می‌گردد و درصد سرمایه‌گذاری بیشتری توسط چیلر جذبی تولید می‌شود. اما در سیستم CCHP سرمایه‌گذاری بیشتری توسط چیلر الکتریکی تولید می‌شود و میزان نسبت سرمایه‌گذاری الکتریکی ۵۳/۳۳ در نظر گرفته می‌شود، چون که برق تولیدی توسط محرک اولیه بیشتر است.



شکل ۷- میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز/تولیدی

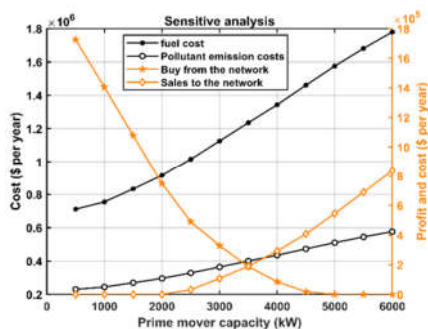
راندمان اگزرژی با توجه به راندمان قانون دوم ترمودینامیک برای سیستم تولید همزمان از معادله (۲۲) محاسبه می‌گردد. با توجه به مقدار بهینه تابع هدف و پارامترهای طراحی بهینه برای سیستم CCHP-ORC و CCHP راندمان قانون دوم به ترتیب به میزان ۴۰/۹۳ و ۳۸/۶۴ درصد بدست آمده است. آنالیز حساسیت با توجه به ظرفیت محرک اولیه برای سیستم CCHP-ORC در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش ظرفیت محرک اولیه، هزینه کل سالانه به عنوان تابع هدف کاهش می‌یابد که این امر ناشی از کاهش سوخت مصرفی جوش‌آور و هزینه خرید برق از شبکه است. در ظرفیت بالاتر از ۴۰۰۰ کیلووات هزینه سالانه افزایش می‌یابد که مسبب آن افزایش مصرف سوخت محرک اولیه و هزینه انتشار آلاینده‌ها است. با افزایش ظرفیت محرک اولیه تا ۲۰۰۰ کیلووات راندمان اگزرژی کاهش یافته که ناشی از مصرف سوخت حداکثری در جوش‌آور پشتیبان بوده و بخش اعظم نیاز برق از شبکه خریداری می‌گردد. همچنین در ظرفیت‌های بالاتر محرک اولیه حرارت اتلافی بازیابی شده به چرخه ORC داده شده و توان بیشتری توسط سیستم تولید می‌گردد.



شکل ۸- تأثیر ظرفیت محرک اولیه بر راندمان اگزرژی و هزینه کل

سالانه سیستم CCHP-ORC

با توجه به شکل ۹ با افزایش ظرفیت محرک اولیه هزینه مصرف سوخت، هزینه انتشار آلاینده‌ها و سود فروش حاصل از برق به شبکه در سال افزایش یافته و هزینه خرید برق از شبکه در سال کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تأثیر ظرفیت محرک اولیه بر میزان سود و هزینه سیستم

CCHP-ORC

توان تولیدی چرخه ORC وابسته به حرارت بازیابی شده از محرک اولیه است. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش ظرفیت محرک اولیه، حرارت بیشتری نیز بازیابی شده و مجموع توان تولیدی توسط این چرخه در

۷- نتیجه گیری

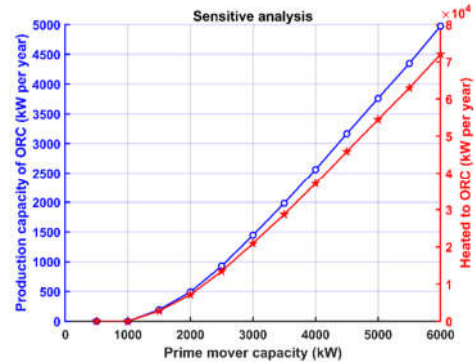
در این مطالعه مدلسازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌ش با بکارگیری چرخه ارگانیک رانکین در نرم افزار MATLAB انجام شد. هدف از انجام این پژوهش بررسی هزینه کل سالانه در سیستم CCHP-ORC بوده و نهایتاً با سیستم CCHP مقایسه شد. تأمین نیاز برق، حرارت و سرمایه‌ش برای اقلیم سرد در مدت یک سال با یک استراتژی جدید که طول سال به ۲۴ بخش پانزده روز تقسیم می‌شود، صورت پذیرفت. استراتژی عملیاتی سیستم توسط الگوریتم به صورت بهینه انتخاب می‌شود. محرک اولیه سیستم توربین گاز در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با اضافه کردن چرخه ارگانیک رانکین به سیستم CCHP هزینه کل سالانه، هزینه سوخت مصرفی و هزینه انتشار آلاینده‌ها به ترتیب به میزان ۲/۲، ۱۴/۸ و ۱۴/۷ درصد کاهش یافت. با افزودن چرخه ORC به سیستم هزینه اولیه تجهیزات به میزان ۴/۴ درصد افزایش یافت. همچنین میزان سود حاصل از فروش برق به شبکه ۵۸/۶ درصد کاهش یافت. کل توان تولیدی توسط چرخه ORC در سال به میزان ۲۵۵۱/۱ کیلووات حاصل شد. اعم تولید توان چرخه ORC در بازه زمانی ابتدایی سال تولید گردید، به دلیل اینکه حرارت کمتری مورد نیاز ساختمان است. محرک اولیه کل حرارت مورد نیاز چیلر جذبی را تأمین نموده و درصد سرمایه‌ش بیشتری توسط چیلر جذبی تولید می‌شود. در سیستم CCHP سرمایه‌ش بیشتری توسط چیلر الکتریکی تولید می‌شود، چون که برق تولیدی توسط محرک اولیه بیشتر بود. با توجه به مقدار بهینه تابع هدف و پارامترهای بهینه برای سیستم CCHP-ORC و CCHP راندمان قانون دوم به ترتیب به میزان ۴۰/۹۳ و ۳۸/۶۴ درصد بدست آمد. هزینه عملیاتی سیستم CCHP-ORC، ۳/۴۷ درصد کمتر از سیستم CCHP بود.

۸- نمادها

Q	سرمایش (kW)
H	گرما (kW)
E	برق (kW)
COP	ضریب عملکرد
h	آنتالپی (kJ/kg)
C _{inv}	هزینه اولیه تجهیزات (\$)
C _f	هزینه سوخت مصرفی (\$)
TAC	هزینه کل سالانه (\$/year)
T	دما (K)
X	اگرژی (kW)
LHV	ارزش پایین حرارتی سوخت (kJ/kg)
m	دبی جریان (kg/s)
η	علائم یونانی راندمان (%)
φ	ضریب استهلاک
ψ	ضریب قیمت جریمه انتشار آلاینده (\$/kW.h)
∅	ضریب قیمت خرید و فروش (\$/kW.h)
τ	ساعات کارکرد سیستم در ۱۵ روز (h)

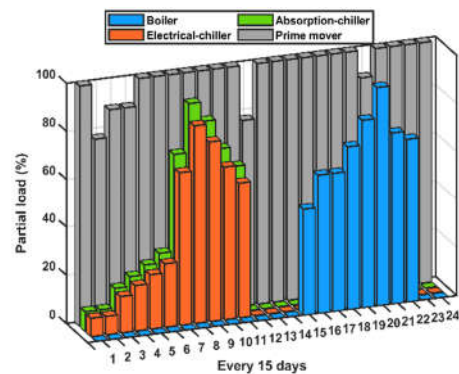
زیرنویس‌ها

سال افزایش می‌یابد. همچنین چرخه ORC از ظرفیت محرک ۱۰۰۰ کیلووات به بعد وارد جریان سیستم می‌شود.

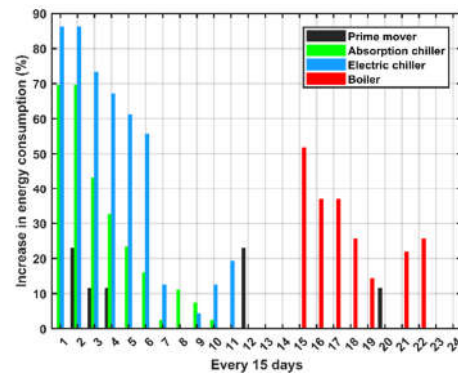


شکل ۱۰- تأثیر ظرفیت محرک اولیه بر توان تولیدی چرخه ORC

شکل ۱۱ بار جزئی بهینه برای تجهیزات سیستم را نشان می‌دهد. درصد مصرف انرژی تجهیزات در بار جزئی بهینه، نسبت به بار جزئی با بارده و ضریب عملکرد حداکثری، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ برای جوش‌آور پشتیبان، محرک اولیه و چیلر الکتریکی با کاهش بار جزئی درصد مصرف انرژی افزایش می‌یابد. درصد مصرف انرژی در بار جزئی حدود ۵۰ درصد برای چیلر جذبی کمترین میزان مصرف انرژی را دارد که با توجه شکل ۱۲ در ۱۱ آمین پانزده روز رخ می‌دهد. همچنین این شکل بیان می‌کند که توسط چیلر جذبی در بار جزئی کمتر و بیشتر از ۵۰ درصد انرژی بیشتری مصرف می‌شود.



شکل ۱۱- بار جزئی بهینه تجهیزات سیستم CCHP-ORC



شکل ۱۲- درصد مصرف انرژی در بار جزئی بهینه برای تجهیزات سیستم CCHP-ORC

- CCHP systems based on particle swarm optimization algorithm. *Energy Policy*; Vol. 38: pp. 6240-6250, 2010.
- [8] Sanaye S, Hajabdollahi H. 4E analysis and multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA. *P I Mech Eng E-J Pro*, Vol. 228, N.1, pp. 43-60, 2014.
- [9] Hajabdollahi H, Ganjehkaviri A, Nazri Mohd Jaafar M. Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 75, pp. 468-480, 2015.
- [۱۰] محسنی م.، دانایان م.، کرباسیون م.، مقایسه عملکرد محرک‌های مختلف در سیستم‌های تولید سه‌گانه توان، حرارت و برودت در مقیاس میکرو برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۲۰۳-۲۱۱، ۱۳۹۶.
- [11] Wang J, Qi X, Ren F, Zhang G, Wang J. Optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems considering the uncertainties of load demands and renewable energy sources. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 281, 125357, 2021.
- [12] Chahartaghi M, Soltani M, Hashemian S.M, Faghhi Shojaei A. Technical and economic evaluations of combined cooling, heating and power (CCHP) system with gas engine in commercial cold storages. *Energy Conversion and Management*, Vol. 214, 112877, 2020.
- [۱۳] فرزانه گرد م.، فرهنکی م.، دیمی دشت بیاض م.، الگوریتم بهینه‌سازی فنی-اقتصادی سیستم تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق با موتور احتراق داخلی در یک ساختمان خانگی نمونه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۱۷۹-۱۸۸، ۱۳۹۶.
- [۱۴] غفوریان م.، نیازمند ح.، برآورد کاهش هزینه‌ها در عملکرد یک سیستم هیبرید CCHP و آب شیرین کن اسمز معکوس نسبت به سیستم‌های مجزای سنتی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۳، ص ۱۸۷-۱۹۶، ۱۳۹۶.
- [15] Haghghi M. A., Mohammadi Z., Pesteei S. M., Chitsaz A., & Parham K. "Exergoeconomic evaluation of a system driven by parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power generation; a case study. *Energy*, Vol. 192, 116594, 2020.
- [16] Hyeunguk, A., Donghyun R.s, and James D. Freihaut. "Performance assessment of hybrid chiller systems for combined cooling, heating and power production. *Applied Energy*. Vol. 225, pp. 501-512, 2018.
- [۱۷] معرفت م.، شفیع پ.، ارزیابی چندمعیاره سیستم CCHP تحت استراتژی‌های عملکرد مختلف برای یک ساختمان اداری در تهران با تکنیک AHP. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ش. ۸، ص ۳۷-۴۸، ۱۳۹۳.
- [18] Bejan A, Tsatsaronis G and Moran M. Thermal design and optimization". *New York: Wiley*, 1996.
- [19] Somayaji C, Mago P.J. "Second law analysis and Optimization of Organic Rank Cycle. *ASME Power*, Atlanta, GA, USA, May 2006.
- [20] Lian Z.T, Chua K.J, Chou S.K. A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration. *Applied Energy*. Vol.87, pp. 84-95, 2010.
- [۲۱] حاج عبداللہی ح.، قمری ح.، مدلسازی و بهینه‌سازی فنی اقتصادی سیستم‌های هیبریدی تولید سرمایش، گرما، توان و آب شیرین. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۲۶۷-۲۷۶، ۱۴۰۰.
- [22] Abbasi M., Chahartaghi M., Hashemian SM. Energy, exergy, and economic evaluations of a CCHP system by using the internal combustion engines and gas turbine as prime movers. *Energy Conversion and Management*. Vol. 173, pp. 359-374, 2018.

تقاضا	dmm
کل	tot
چیلر	ch
چیلر جذبی	ab
چیلر الکتریکی	el
توربین گاز	GT
محرک اولیه	pm
آگزوز	ex
چگالنده	con
اضافی	weste
برق	e
فروش برق به شبکه	s
خرید برق از شبکه و جوش آور	b
توربین بخار	ST
چرخه بخار	sc
بار جزئی	pl
پمپ	pump
سوخت	f
نامی	nom
واقعی	ac
آیزنتروپیک	is
تولید	p
محیط	0
سرمایه‌گذاری اولیه	inv
مؤثر	eff
تعداد تجهیز، تعداد ۱۵ روز در سال	j
انتشار	em

۹- مراجع

- [1] Kwak H, Byun G, Kwan Y, et al. Cost structure of CGAM cogeneration system. *Int J Energy Res*, Vol. 28, pp. 1145-1158, 2004.
- [2] Balli O, Aras H and Hepbasli A. Exergoeconomic analysis of a combined heat and power (CHP) system. *Int J Energy Res*, Vol. 3, pp. 273-289, 2008.
- [3] Haghifam M.R., Manbachi M., Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems, Electrical Power and Energy Systems, *Electrical Power and Energy Systems, Elsevier*, Vol.33, N.3, pp. 385-393, 2011.
- [4] Sanaye S., Meybodi Aghaei M., Shokrollahi S. Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems, *Applied Thermal Engineering, Elsevier*, Vol.28, N.10, pp.1177-1188, 2008.
- [5] Sanaye S and Ardali M. Estimating the power and number of microturbines in small-scale combined heat and power systems. *Apply Energy*, Vol. 86, pp. 895-903, 2009.
- [6] Wang J, Zhai Z, Jing Y, et al. Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system. *Apply Energy*, Vol. 87, pp. 3668-3679, 2010.
- [7] Tichi S, Ardehali M and Nazari M. Examination of energy price policies in Iran for optimal configuration of CHP and