

تحلیل انرژی و ترموآکونومیک و بهینه‌سازی یک سیستم CCHP با ذخیره‌سازی حرارتی برای استفاده در یک مجتمع مسکونی

کامیار گل باطن مفرد^{۱*}، غلامرضا صالحی^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

kgm1371@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی انرژی، دانشگاه صنعت نفت، محمودآباد، ایران

rezasalehi20@gmail.com

چکیده: در این پژوهش به بهینه‌سازی و تحلیل انرژی و ترموآکونومیک یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما با ذخیره‌سازی حرارتی به منظور استفاده در یک مجتمع مسکونی به مساحت ۱۴۷ هزار مترمربع، با محرک اصلی موتور احتراق داخلی گازسوز پرداخته شده است. بهینه‌سازی سیستم بر اساس کمیته‌سازی هزینه سالانه و در دو حالت استفاده و عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی و به روش جستجوی مستقیم انجام شده است. در حالت عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی، موتور با ظرفیت ۲۰۰۴ کیلووات و مدت کارکرد ۴۰۰۱ ساعت و در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی، موتور با ظرفیت ۲۰۰۴ کیلووات و مدت کارکرد ۵۲۶۸ ساعت و ظرفیت مخزن ۱۸/۹۳ مترمکعب انتخاب بهینه است. ارزیابی دو سیستم برای حالت‌های فروش و عدم فروش برق مازاد تولیدی به شبکه سراسری برق در نظر گرفته شده است. بهترین حالت کارکرد سیستم، استفاده از مخزن ذخیره حرارتی و فروش برق مازاد به شبکه است. در این حالت نسبت به حالت عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی، مصرف انرژی اولیه ۲۰/۸ درصد، انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن ۱۹/۵ درصد، هزینه عملکرد سیستم ۱۴/۳ درصد و میزان خرید برق از شبکه سراسری برق ۱۷ درصد کاهش یافته است. همچنین نرخ بازگشت سرمایه رشد ۳/۱ درصدی را نشان می‌دهد، اما باعث افزایش ۱۰/۷ درصدی هزینه سالانه سیستم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید همزمان برق حرارت سرما، ذخیره‌سازی حرارتی، تحلیل ترموآکونومیک، بازگشت سرمایه.

۱. مقدمه

در سه دهه اخیر، پس از افزایش عمده قیمت سوخت، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش کارایی انرژی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی، تمایل به استفاده از فناوری‌های جدید از جمله تولید همزمان برق و حرارت افزایش یافته است. در روش‌های معمول برای تأمین نیازهای الکتریکی و حرارتی، برق از شبکه توزیع سراسری برق و حرارت به وسیله سوزاندن سوخت در بویلر تأمین می‌شود. در این روش، انرژی قابل توجهی از طریق گازهای داغ خروجی دودکش، برج‌های خنک‌کن، کندانسورها، خنک‌کننده‌ها در موتورهای احتراق داخلی و... به هدر می‌رود که بیشتر این حرارت قابل بازیافت است و می‌تواند در تأمین انرژی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. از مزایای سیستم‌های تولید همزمان می‌توان به حرکت به سوی خصوصی‌سازی و تولید غیر متمرکز و مستقل برق و حرارت، جلوگیری از تلفات توزیع و انتقال در شبکه سراسری برق، افزایش کارایی تبدیل انرژی و استفاده از آن، کاهش مصرف سوخت و افزایش رقابت در تولید برق و توان نیروگاهی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی به خصوص دی‌اکسیدکربن و گازهای گلخانه‌ای اشاره کرد [۱].

پانتالو و همکاران [۲] به ارزیابی ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما مقیاس کوچک (۱۰۰ کیلووات) با محرک اولیه میکروتوربین و سوخت بیوگاز و گاز طبیعی پرداخته‌اند. در حالت تولید همزمان برق و حرارت، بازده حرارتی و الکتریکی با توجه به نسبت مخلوط گاز طبیعی و بیوگاز متغیر خواهند بود که با افزایش بیوگاز عملکرد سیستم کاهش می‌یابد؛ اما استفاده از آن از نظر اقتصادی مفید خواهد بود. در نتیجه مطالعه برای ایجاد تعادل بین بازده تبدیل انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه سوخت انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد ترکیب ۵۰ درصد گاز طبیعی و بیوگاز موجب بالاترین سودآوری خواهد شد. یلدریم و همکاران [۳] به تجزیه و تحلیل ترموآکونومیک^۱ یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت با ظرفیت تولید برق ۱۱/۵۲ مگاوات و تولید ۹ تن بر ساعت بخار ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، با محرک اولیه موتور دیزل پرداخته‌اند. بیشترین مقدار فاکتور انرژی‌آکونومیک^۲ ۹۰/۷۳ درصد برای پمپ و کمترین مقدار آن ۲۸/۲۱ درصد مربوط به خنک‌کننده هوای موتور است. بیشترین کمترین بازده انرژی به ترتیب مربوط به خنک‌کننده روغن روانکاری موتور و خنک‌کننده هوای موتور است. دنگ و همکاران [۴] تحلیل هزینه‌های انرژی بر مبنای تئوری ترموآکونومیک را برای یک سیستم

تولید همزمان برق، حرارت و سرما که از یک موتور و ژنراتور ابعاد کوچک و یک چیلر جذبی تشکیل شده است، انجام داده‌اند. نتایج بیانگر آن است که تئوری ترموآکونومیک یک ابزار قدرتمند و مؤثر برای ارزیابی عملکرد سیستم پیچیده است و همچنین اثبات می‌کند سیستم تولید همزمان مقیاس کوچک در استفاده از حرارت درجه‌پایین کارآمد است. هزینه واحد انرژی بی‌بعد (نسبت انرژی سوخت گاز مایع به انرژی تولیدی یا انرژی سرمایه‌گذاری) برای توان و قدرت خنک‌کننده سیستم تولید همزمان به ترتیب ۴/۱۵۵ و ۱۷/۱۹۴ خواهد بود. هزینه واحد انرژی محصول در تمام اجزای سیستم با افزایش تولید برق کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار آن مربوط به چیلر جذبی و کمترین آن مربوط به آب خنک‌کننده بدنه موتور است. فرخی و همکاران [۵] به بررسی سیستم تولید همزمان بر پایه موتور دیزل پرداخته‌اند. در این بررسی به جای مدل‌سازی مرسوم چرخه استاندارد هوا، چرخه استاندارد هوا و سوخت و همچنین فرایند احتراق شبیه‌سازی می‌گردد که باعث افزایش دقت نتایج خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد می‌توان از اتلاف گاز خروجی موتور برای گرم نمودن ۰/۱۷ کیلوگرم بر ثانیه آب از دمای ۲۵ تا ۶۸/۶۴ درجه سانتی‌گراد استفاده کرد. این کار بازده کلی سیستم را در حدود ۲۰ درصد و تا حدود ۸۰ درصد افزایش می‌دهد. البته مقدار تخریب انرژی در مبادله‌کن گرما به نسبت زیاد است که این مربوط به فرایند انتقال گرما و اختلاف دمای زیاد در مبادله‌کن گرما می‌باشد. چهارطاقی و علی‌زاده خارکشی [۶] یک سیستم تولید همزمان برای استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی ارائه داده‌اند که می‌تواند در کاربردهای ساختمانی مفید باشد. اجزای اصلی این سیستم شامل یک توده پیل سوختی پلیمری، مبدل سوخت، چیلر جذبی و تاک ذخیره حرارتی است. سیستم ارائه‌شده از دیدگاه‌های انرژی، انرژی و زیست‌محیطی مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیر دمای کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی و انرژی، درصد کاهش مصرف سوخت و درصد کاهش آلاینده‌گی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج ناشی از مدل‌سازی انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که قدرت تبرید سیکل جذبی ۱۲/۲۴ کیلووات، قدرت الکتریکی خروجی از پیل سوختی ۳۸/۶۳ کیلووات، توان حرارتی پیل ۳۹/۱۲ کیلووات و میزان بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل ۸۴/۲۱ کیلووات است. در نهایت، وقتی سیستم به ترتیب در حالت تولید برق به تنهایی، برق و حرارت و نیز برق و حرارت و سرما باشد، دارای راندمان‌های ۳۲/۶ درصد، ۶۵/۵ درصد و ۷۵/۸ درصد خواهد بود. عامری و همکاران [۷] یک سیستم تولید همزمان را از دو جنبه مورد بررسی قرار داده‌اند. در بخش اول، انرژی سیستم در تمام نقاط سیکل به دست آمده و با توجه به آن انرژی نابودی در هر جزء سیستم و

1. Thermoeconomic
2. Exergoeconomic

و ترموکانومیک یک سیستم تولید همزمان با ذخیره‌سازی حرارتی و ارزیابی آن با توجه به معیارهای ارزیابی از لحاظ انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد. بهینه‌سازی سیستم نیز در این راستا انجام شده است.

۲. مورد مطالعاتی

در این مقاله به طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما^(CCHP) به منظور استفاده در یک مجتمع مسکونی در شهر تهران پرداخته شده است. محاسبه بارهای حرارتی، برودتی و الکتریکی مجموعه مسکونی، توسط نرم‌افزار HAP 4.5^۲ انجام گرفته است. با توجه به اینکه نیاز سرمایشی توسط چیلر جذبی تأمین شود یا چیلر تراکمی، بارهای کل الکتریکی (رابطه ۳) و بارهای کل حرارتی (رابطه ۴) قابل محاسبه‌اند. برای این منظور پارامتر β را به صورت نسبت بار سرمایشی چیلر تراکمی به بار سرمایشی مورد نیاز تعریف شده است.

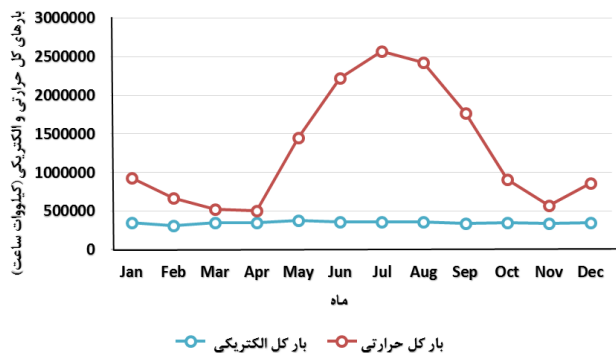
$$E_{dmn,t} = E_{dmn} + \frac{\beta \cdot Q_{dmn}}{COP_{ch,ele.}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{Q_{cooling,ele.}}{Q_{dmn}} \quad (2)$$

$$Q_{cooling,ele.} + Q_{cooling,abs.} = Q_{dmn} \quad (3)$$

$$H_{dmn,t} = H_{dmn} + \frac{(1-\beta)Q_{dmn}}{COP_{ch,abs.}} \quad (4)$$

در معادله (۳)، $Q_{cooling,abs.}$ سهم بار سرمایشی چیلر جذبی است. بار حرارتی کل مورد نیاز ($H_{dmn,t}$) شامل حرارت مورد نیاز چیلر جذبی و بار گرمایشی (گرمایش محیط و آب گرم مصرفی) مورد نیاز محل مصرف است. در شکل (۱)، بار کل حرارتی و بار کل الکتریکی مورد نیاز برای ماه‌های مختلف یک سال نشان داده شده است. مشخصات مجتمع مسکونی مورد مطالعه در جدول (۱) و شرایط محیطی اعمال‌شده در نرم‌افزار HAP 4.5 در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۱): بار حرارتی کل و بار الکتریکی کل مورد نیاز مجتمع مسکونی

همچنین کارایی انرژی هر جزء سیستم به دست می‌آید. با توجه به این تحلیل، محفظه احتراق، مبدل حرارتی و مولد بخار بازیافت حرارت به عنوان منابع اصلی نابودی انرژی معرفی می‌شوند. همچنین توربین و مبدل حرارتی نیز از نظر کارایی انرژی، به ترتیب بیشترین و کمترین راندمان انرژی را از خود نشان می‌دهند. در قسمت بعدی این مقاله، یک تحلیل ترموکانومیک بر روی یک سیستم تولید همزمان که برای یک ساختمان ۱۰ طبقه در تهران طراحی شده، صورت پذیرفته است. در این تحلیل، ابتدا تابع هدف برای این سیستم تولید همزمان به دست آورده شده و در ادامه با توجه به بالانسی که بین هزینه سوخت و هزینه تجهیزات صورت گرفته، ظرفیت بهینه برای توربین گاز و همچنین سیستم تبرید اجکتور بخار به دست آورده شده است.

برخی از تحقیقات به بررسی استفاده از ذخیره‌سازی حرارتی پرداخته‌اند. احمدی و حیدرنژاد [۸] به بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما با چرخه رانکین آلی همراه با ذخیره‌سازی حرارتی و تحلیل ترمودینامیکی و ترموکانومیک آن پرداخته‌اند. پنج پارامتر کلیدی، دمای ورودی توربین، فشار ورودی توربین، فشار عقب توربین، دمای تبخیرکننده و درجه حرارت بخار خروجی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری برای بررسی عملکرد سیستم انتخاب شده‌اند. راندمان حرارتی، راندمان انرژی و نرخ هزینه کل محصول به ترتیب در تابستان ۲۳/۶۶ درصد، ۹/۵۱ درصد و ۵۱۱۴/۵ دلار بر سال و در زمستان ۴۸/۴۵ درصد، ۱۳/۷۶ درصد و ۵۶۸۸/۱ دلار بر سال به دست آمده‌اند. همچنین این سه پارامتر به عنوان سه تابع هدف انتخاب شده‌اند و بهینه‌سازی چندهدفی سیستم مورد استفاده توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده است. صدرالدینی و همکاران [۹] به بررسی عملکرد سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه موتور احتراق داخلی با گرم‌کن‌های خورشیدی لوله‌خلاء (ETC) و مخزن ذخیره حرارتی به منظور استفاده در پژوهشگاه علوم و فناوری انرژی شریف در شهر تهران با دیدگاه ترموکانومیک پرداخته‌اند. میزان اتلاف حرارت و تخریب انرژی تجهیزات برای یک روز از گرم‌ترین و سردترین فصل سال به صورت ساعتی محاسبه شده است. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیک نشان‌دهنده صرفه اقتصادی استفاده از سیستم تولید همزمان در صورت افزایش قیمت حامل‌های انرژی به میزان ۱۵۰ درصد است. بازده متوسط سیستم در حالت تولید همزمان در تابستان از ۴۷ به ۶۰ درصد و در زمستان از ۵۶ به ۷۰ درصد رسیده است.

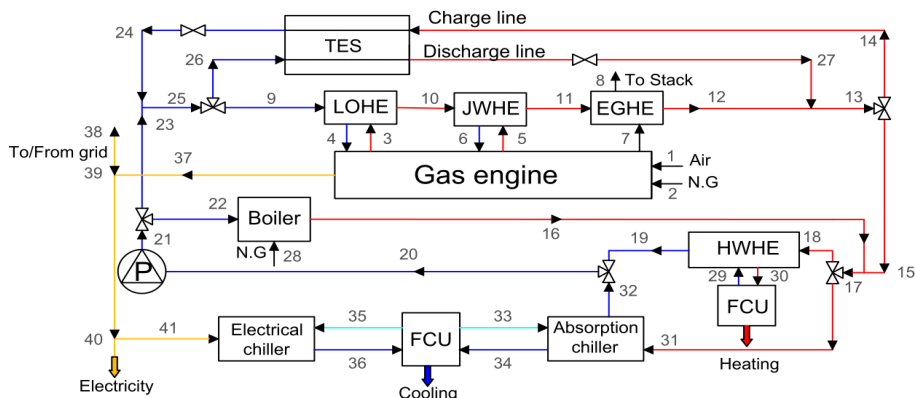
در مرور تحقیقات صورت‌گرفته مشاهده گردید که تحلیل‌های انجام‌شده در زمینه سیستم‌های تولید همزمان با ذخیره‌سازی حرارتی کامل نبوده است. بنابراین هدف از این مقاله، بررسی کامل ترمودینامیکی

جدول (۱): مشخصات مجتمع مسکونی مورد مطالعه

پارامتر	مشخصات
تعداد ساختمان‌ها	۱۵
تعداد طبقات هر ساختمان	۱۴
تعداد واحدها در طبقات	۷
تعداد کل واحدها	۱۴۷۰
مساحت هر واحد	۱۰۰ مترمربع
مساحت کل ساختمان‌ها	۱۴۷۰۰۰ مترمربع

جدول (۲): شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه [۱۰]

واحد	مشخصات	پارامتر
deg	۳۵/۷	عرض جغرافیایی
deg	-۵۱/۴	طول جغرافیایی
m	۱۲۱۹/۸	ارتفاع از سطح دریا
°C	۳۸/۹	دمای خشک طراحی تابستان
°C	۲۳/۹	دمای مرطوب همزمان تابستان
°C	۱۵	اختلاف دمای روزانه تابستان
°C	-۶/۷	دمای خشک زمستان
°C	-۸/۸	دمای مرطوب همزمان زمستان



شکل (۲): سیستم CCHP مورد بررسی

توسط موتور گازسوز تأمین نشود، برق مورد نیاز از شبکه سراسری برق خریداری می‌شود. این سیستم تقریباً مشابه با سیستم مورد استفاده در مرجع [۱۱] است که البته تغییراتی مانند اضافه شدن چیلر تراکمی برای مواقع اوج بار سرمایشی (به دلیل عدم قابلیت تغییر بار زیاد در چیلرهای جذبی) روی آن انجام گرفته است.

۳. بهینه‌سازی

۱.۳. تابع هدف

تابع هدف در این مقاله، تابع هزینه سالانه سیستم است. این هزینه شامل هزینه سوخت، هزینه جریمه انتشار گازهای آلاینده محیطیست، هزینه تعمیرات و نگهداری تمامی تجهیزات و مقدار سالانه‌سازی شده هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است. در این تحقیق از ضریب بازایافت اولیه (CRF) برای سالانه‌سازی هزینه‌ها استفاده می‌شود. با ضرب کردن CRF در کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، مقدار سالانه‌شده این هزینه بر حسب قیمت‌ها در سال مرجع به دست می‌آید. بنابراین، تابع هدف به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادشده در شکل (۲) نشان داده شده است. محرک اولیه سیستم، یک موتور احتراق داخلی گازسوز است که توسط سه مبدل حرارتی، از حرارت اتلافی روغن روانکاری موتور، آب خنک‌کننده بدنه موتور و گازهای خروجی از آگزوز موتور برای تولید آب داغ استفاده می‌کند. در این سیستم از یک مخزن ذخیره حرارتی برای ذخیره‌سازی آب داغ تولیدی مازاد استفاده شده و برای جبران نیاز حرارتی در مواقعی که بازیافت حرارت از موتور کافی نمی‌باشد، از یک بویلر کمکی استفاده شده است.

کارکرد موتور تا زمانی ادامه می‌یابد که مخزن ذخیره حرارتی به‌طور کامل پر شود. در این حالت موتور خاموش شده و نیاز حرارتی توسط مخزن ذخیره حرارتی تأمین می‌شود. برای فصل تابستان نیز نیاز سرمایشی مجموعه ابتدا توسط چیلر جذبی آب گرم تک‌اثره تأمین می‌شود و برای مواقع پیک مصرف، از یک چیلر تراکمی برای جبران نیاز سرمایشی استفاده می‌شود. برق تولیدی توسط موتور برای نیازهای الکتریکی مجموعه استفاده می‌گردد و در مواقعی که برق تولیدی بیشتر از نیاز الکتریکی باشد، در صورت امکان، قابلیت فروش برق به شبکه سراسری برق در نظر گرفته شده است. در مواقعی که نیاز الکتریکی

قانون تجربی در کاتالوگ‌های شرکت Jenbacher توصیه شده است [۱۴]:
 ۱. توان حرارتی سیستم تولید همزمان باید حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد تقاضای بیشینه حرارتی باشد. تجربه نشان داده است که سیستم‌های تولید همزمان قادرند ۵۰ تا ۷۰ درصد تقاضای کل حرارت سالانه را پوشش دهند. باقی این میزان، برای مواقعی که بار حداکثر وجود دارد، با بویلر کمکی پوشش داده می‌شود.

۲. هر موتور گازسوز باید حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال کار کند. تعیین اندازه سیستم‌های تولید همزمان، معمولاً بر اساس بار حرارتی انجام می‌گیرد و بار الکتریکی به‌عنوان یک محصول جنبی در نظر گرفته می‌شود. مفید بودن این امر به چند دلیل است: یکی اینکه انتقال و خرید و فروش انرژی الکتریکی بسیار ساده‌تر از انرژی حرارتی است و در مواقع ناهماهنگ بودن الگوی تولید با الگوی مصرف، می‌توان به‌سادگی و بدون تأخیر زمانی از شبکه برق گرفت یا به شبکه برق فروخت. دلیل دیگر این است که تقریباً در اکثر موارد، مقدار انرژی گرمایی تولیدی، بیشتر از انرژی الکتریکی است. نسبت گرما به برق در موتورهای درون‌سوز گرچه نسبت به توربین‌های گازی و سایر محرک‌های اولیه کمترین مقدار را دارد، باز هم اکثراً بزرگ‌تر از یک است. در جدول (۳) پارامترهای مورد استفاده برای محاسبه تابع هدف آورده شده است.

جدول (۳): پارامترهای مورد استفاده برای محاسبه تابع هدف

منبع	واحد	مقدار	پارامتر
[۱۵]	سال	۲۰	n
[۱۵]	kj/kg	۵۰۰۰۰	LHV
[۱۵]	-	۰/۷	$COP_{ch,abs.}$
[۱۵]	-	۳	$COP_{ch,ele.}$
[۱۵]	-	۰/۸	η_{boiler}
[۱۶]	$\$/kwh$	۰/۰۲	$cost_{NG}$
[۱۶]	$\$/kwh$	۰/۱	$cost_{ele}$
[۱۶]	$\$/kwh$	۰/۰۶	$cost_{ele,sell}$
[۱۷]	$\$/kg$	۰/۰۲۴	μ_{CO_2}
[۱۷]	$\$/kg$	۶/۸۵۳	μ_{NO_X}
[۱۷]	$\$/kg$	۰/۰۲۰۸۶	μ_{CO}
[۱۸]	-	۰/۱۲	i
[۱۹]	kg/Mwh	۴۳۰	$\zeta_{CO_2,ele}$
[۱۹]	kg/Mwh	۰/۷	$\zeta_{NO_X,ele}$
[۱۹]	kg/Mwh	۰/۸	$\zeta_{CO,ele}$
[۱۹]	kg/Mwh	۱۸۲/۰۴	$\zeta_{CO_2,th}$
[۱۹]	kg/Mwh	۰/۱۵۳۲	$\zeta_{NO_X,th}$
[۱۹]	kg/Mwh	۰/۱۲۷۴	$\zeta_{CO,th}$
[۱۸]	-	۰/۳	η_{shp}^{ele}
[۱۸]	-	۰/۸۲	η_{grid}
[۲۰]	-	۰/۴۵۲	η_{ele}

$$C_{ann} = CRF \times (C_{GE} + C_{boiler} + C_{ch,ele.} + C_{ch,abs.} + C_{TES}) + C_{OM,GE} + C_{OM,boiler} + C_{OM,ch,ele.} + C_{OM,ch,abs.} + C_{NG} + C_{emi} \quad (5)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، i نرخ بهره و n عمر تجهیزات سیستم است. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه موتور گازسوز، بویلر کمکی، چیلر تراکمی، چیلر جذبی [۱۲] و مخزن ذخیره حرارتی [۱۳] بر حسب دلار بر کیلووات به ترتیب توسط روابط (۷) تا (۱۱) تعیین می‌شود:

$$C_{GE} = -138.71 \times \ln(E_{nom}) + 1727.1 \quad (7)$$

$$C_{boiler} = 205 \times (H_b)^{-0.13} \quad (8)$$

$$C_{ch,ele.} = 482 \times (H_{ch,ele.})^{-0.07273} - 159.7 \quad (9)$$

$$C_{ch,abs.} = 540 \times (H_{ch,abs.})^{-0.1287} \quad (10)$$

$$C_{TES} = 4042 \times V_{TES}^{0.506} \quad (11)$$

در این رابطه‌ها، E_{nom} ظرفیت نامی موتور گازسوز، H_b ظرفیت بویلر کمکی، $H_{ch,ele.}$ ظرفیت چیلر تراکمی، $H_{ch,abs.}$ ظرفیت چیلر جذبی و V_{TES} حجم مخزن ذخیره حرارتی است. هزینه تعمیر و نگهداری موتور گازسوز بر حسب دلار بر کیلووات توسط رابطه (۱۲) تعیین می‌شود [۱۰]:

$$C_{OM,GE} = 0.1696(E_{nom})^{-0.2} (1 - 0.6875 \frac{E}{E_{nom}}) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، E بار جزئی موتور گازسوز است. هزینه تعمیر و نگهداری برای بویلر کمکی برابر ۰/۰۲۷ دلار بر کیلووات و برای چیلرهای جذبی و تراکمی ۰/۰۰۳ دلار بر کیلووات در نظر گرفته شده است [۱۲].

هزینه سوخت سیستم (رابطه ۱۳) و جریمه‌های ناشی از انتشار گازهای آلاینده (رابطه ۱۴) با توجه به میزان سوخت مصرف‌شده در موتور گازسوز و بویلر کمکی تعیین می‌شود؛ که H_{boiler} میزان کارکرد سالانه بویلر کمکی و E_{cchp} میزان کارکرد سالانه موتور گازسوز است.

$$C_{NG} = cost_{NG} \left(\frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \right) \quad (13)$$

$$C_{emi} = (\zeta_{CO_2,ele} \times \mu_{CO_2} + \zeta_{NO_X,ele} \times \mu_{NO_X} + \zeta_{CO,ele} \times \mu_{CO}) \times E_{cchp} + (\zeta_{CO_2,th} \times \mu_{CO_2} + \zeta_{NO_X,th} \times \mu_{NO_X} + \zeta_{CO,th} \times \mu_{CO}) \times H_{boiler} \quad (14)$$

۲.۳. روش انتخاب اجزای سیستم

سیستم‌های تولید همزمان را عموماً باید بر اساس نیاز هر سایت خاص و به‌طور جداگانه طراحی کرد. شرکت اتریشی Jenbacher از بزرگ‌ترین و شناخته‌شده‌ترین سازندگان موتورهای گازسوز در جهان است. رعایت دو

مخزن ذخیره حرارتی در جدول (۴) مقایسه شده‌اند.

جدول (۴): نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم CCHP		
پارامتر	واحد	CCHP با / بدون
ظرفیت الکتریکی موتور گازسوز	kw	۲۰۰۴
زمان کارکرد موتور گازسوز	hours	۵۲۶۸
ظرفیت بویلر کمکی	kw	۴۰۴۳
میزان کارکرد بویلر کمکی	kwh	$۷/۲۰۶ \times ۱۰^۶$
ظرفیت مخزن ذخیره حرارتی	m ³	۱۸/۹۳
ظرفیت چیلر جذبی	kw	۳۸۰۰
میزان کارکرد چیلر جذبی	kwh	$۸/۲۳۴ \times ۱۰^۶$
ظرفیت چیلر تراکمی	kw	۴۲۱۹
میزان کارکرد چیلر تراکمی	kwh	$۱/۰۹۶ \times ۱۰^۶$
حرارت دفع شده به محیط	kwh	$۵/۵۵۸ \times ۱۰^۵$
هزینه سالانه سیستم	Rials	$۵/۱۰۴۸ \times ۱۰^۱۰$

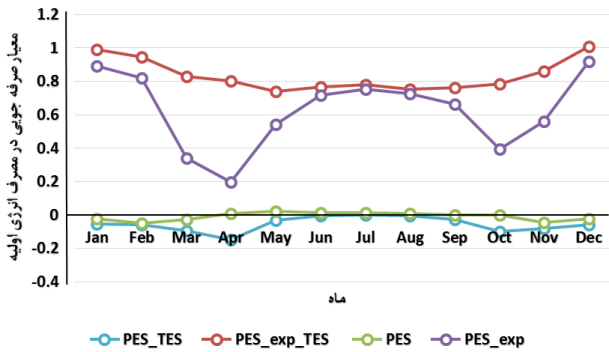
همان طور که مشاهده می‌شود، مدت زمان کارکرد موتور گازسوز در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی بیشتر است. دلیل این امر آن است که در این حالت، کارکرد موتور تابع وضعیت مخزن ذخیره حرارتی است و تا وقتی که مخزن به‌طور کامل پر نشده است، موتور به کار خود ادامه می‌دهد. ظرفیت مورد نیاز بویلر کمکی نیز در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی نسبت به حالت عدم استفاده از آن بیشتر است به دلیل آنکه وقتی مخزن ذخیره حرارتی پر می‌شود، موتور به حالت خاموش درمی‌آید و حرارت مورد نیاز فقط از طریق مخزن ذخیره حرارتی تأمین می‌شود؛ در نتیجه مواقعی رخ خواهد داد که حرارت ذخیره‌شده پاسخگوی نیاز حرارتی نیست و با توجه به خاموش بودن موتور، کمبود حرارت باید توسط بویلر کمکی جبران شود. اما میزان کارکرد سالیانه بویلر کمکی در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی در حدود یک گیگاوات ساعت کاهش یافته است. هزینه سالانه سیستم در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی ۱۰/۷ درصد بیشتر است که به دلیل اضافه شدن مخزن ذخیره حرارتی، کارکرد بیشتر موتور گازسوز و ظرفیت اولیه بیشتر بویلر کمکی خواهد بود. در تعیین ابعاد چیلر جذبی، فرض شده است این چیلر نیاز سرمایشی متوسط مجتمع مسکونی را برطرف کند و در مواقع اوج بار سرمایشی، چیلر تراکمی شروع به کار نماید.

در این پژوهش، بهینه‌سازی به روش جستجوی مستقیم^۱ انجام گرفته است. روش‌های مبتنی بر جستجوی مستقیم با شروع از یک نقطه تصادفی در فضای تصمیم قابل قبول و با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض به سمت فضای بهینه کلی حرکت کنند. در این روش‌ها ابتدا حدود متغیرهای تصمیم، ضرایب انبساط و انقباض و تعداد تکرارهای لازم جهت دستیابی به جواب بهینه مشخص می‌شود سپس با توجه به محدودیت‌های تابع هدف، جواب اولیه‌ای به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. با توجه به نقطه اولیه و نوع روش جستجو، نقاطی حول جواب اولیه تولید می‌شود، سپس مقدار تابع هدف برای هر یک از جواب‌های تولیدشده محاسبه گردیده و با تابع هدف مرتبط با جواب اولیه مقایسه می‌شود. چنانچه جوابی بهتر از جواب اولیه در بین مجموعه جواب‌های تولیدشده وجود داشت، مسیر حرکت مدل بهینه‌سازی از نقطه اولیه به نقطه‌ای خواهد بود که از مطلوبیت بیشتری از نظر تابع هدف برخوردار باشد. در این حالت، شبکه با استفاده از ضرایب انبساط افزایش می‌یابد و مدل فضای بیشتری را مورد جستجو قرار می‌دهد، اما اگر جواب بهتری در فضای اولیه مشخص شده پیدا نشد، با استفاده از ضریب انقباض و بر اساس نوع روش جستجو، تعداد نقطه دیگری که نزدیک‌تر به نقطه اولیه باشند، تولید می‌شود. این روند تولید مجموعه جواب‌ها با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار توقف تأمین شود. بهینه‌سازی با در نظر گرفتن بار حرارتی کل مورد نیاز مجتمع مسکونی و در دو حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی و عدم استفاده از مخزن حرارتی انجام شده است. در بهینه‌سازی سیستم در حالت عدم ذخیره‌سازی حرارتی، تعداد ساعات کارکرد موتور و ظرفیت موتور به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هزینه سالانه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند. در بهینه‌سازی سیستم همراه با ذخیره‌سازی حرارتی، تعداد ساعات کارکرد موتور، تابع سایر متغیرها (بار و شرایط تانک ذخیره و...) می‌باشد و ظرفیت موتور و ظرفیت مخزن ذخیره به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند. تابع هدف نیز همچنان هزینه سالانه سیستم است که کمینه می‌شود. حداکثر توان حرارتی قابل ذخیره در یک مخزن ذخیره حرارتی با توجه به اختلاف دمای آب سرد (T_{cold}) و آب گرم (T_{hot}) مخزن و حجم مخزن مطابق رابطه (۱۵) مشخص می‌گردد [۲۱].

$$H_{TES,max} = \frac{\rho_{water} \times V_{TES} \times c_{p,water} (T_{hot} - T_{cold})}{3600} \quad (15)$$

۳.۳. نتایج حاصل از بهینه‌سازی

نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای دو حالت استفاده و عدم استفاده از



شکل (۳): مقایسه معیار ارزیابی از لحاظ انرژی در ماه‌های مختلف

در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی، سیستم تولید همزمان مدت زمان بیشتری کار می‌کند و در نتیجه برق تولیدی بیشتر خواهد بود که در حالت عدم فروش برق به شبکه، مقدار صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، منفی خواهد شد؛ یعنی میزان سوخت مصرفی سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه بیشتر می‌شود. اما در صورت امکان فروش برق مازاد به شبکه در هر دو حالت استفاده و عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی، مقدار صرفه‌جویی در مصرف سوخت مثبت خواهد بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم تولید جداگانه است. استفاده از سیستم تولید همزمان در اکثر ماه‌های سال منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های عملکرد نسبت به سیستم تولید جداگانه می‌گردد.

۲.۴. معیار ارزیابی زیست‌محیطی

ارزیابی زیست‌محیطی سیستم تولید همزمان با استفاده از معیار درصد کاهش انتشار آلاینده دی‌اکسیدکربن (CDER) انجام شده که این معیار از رابطه (۲۰) قابل محاسبه است. برای ارزیابی زیست‌محیطی در سناریو فروش برق به شبکه، مقدار $CDE^{cchp-exp}$ جایگزین CDE^{cchp} در رابطه (۲۰) می‌شود [۱۸]. نتایج به‌دست‌آمده برای حالت‌های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$CDER = \frac{CDE^{shp} - CDE^{cchp}}{CDE^{shp}} \quad (20)$$

$$CDE^{shp} = \zeta_{CO_2,ele}^{shp} E_{grid}^{shp} + \zeta_{CO_2,th} \frac{H_{dmn,t}}{\eta_{boiler}} \quad (21)$$

$$CDE^{cchp} = \zeta_{CO_2,ele}^{cchp} E_{buy}^{cchp} + \zeta_{CO_2,th} \frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \zeta_{CO_2,ele} \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \quad (22)$$

۴. معیارهای ارزیابی سیستم تولید همزمان

به‌منظور ارزیابی جامع سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما نسبت به سیستم تولید جداگانه از نقطه‌نظر انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی، معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شده است. معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار آلاینده دی‌اکسیدکربن و کاهش هزینه عملکرد در چهار حالت، استفاده از سیستم ذخیره حرارتی، عدم استفاده از ذخیره حرارتی، با امکان فروش برق مازاد به شبکه و عدم فروش برق مازاد به شبکه، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱.۴. معیار ارزیابی از لحاظ انرژی

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی سیستم تولید همزمان از لحاظ مصرف انرژی، از معیار صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه (PES) استفاده شده است که از رابطه (۱۶) قابل محاسبه است. میزان مصرف انرژی اولیه PEC^2 در هر حالت با توجه به پارامترهای جدول (۳)، میزان کارکرد بویلر، میزان کارکرد موتور، میزان خرید یا فروش برق و بارهای حرارتی و الکتریکی کل تعیین می‌گردد. برای ارزیابی صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه در سناریو فروش برق به شبکه مقدار $PEC^{cchp-exp}$ جایگزین PEC^{cchp} در رابطه (۱۶) می‌شود [۱۸]. نتایج به‌دست‌آمده در ماه‌های مختلف برای چهار حالت، در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$PES = \frac{PEC^{shp} - PEC^{cchp}}{PEC^{shp}} \quad (16)$$

$$PEC^{shp} = \frac{E_{grid}^{shp}}{\eta_{ele}^{shp} \eta_{grid}} + \frac{H_{dmn,t}}{\eta_{boiler}} \quad (17)$$

$$PEC^{cchp} = \frac{E_{buy}^{cchp}}{\eta_{ele}^{shp} \eta_{grid}} + \frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \quad (18)$$

$$PEC^{cchp-exp} = \frac{E_{buy}^{cchp} - E_{sell}^{cchp}}{\eta_{ele}^{shp} \eta_{grid}} + \frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \quad (19)$$

1. Primary Energy Saving
2. Primary Energy Consumption

۱.۳.۴. نرخ بازگشت سرمایه

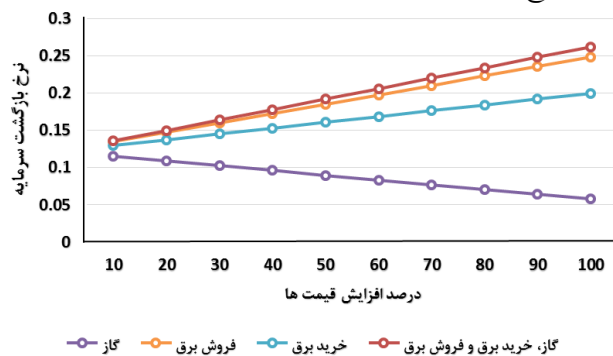
نرخ بازگشت سرمایه، نرخ سودی است که از طریق سرمایه‌گذاری در یک پروژه به دست می‌آید. با استفاده از این معیار، می‌توان توجیه‌پذیری اقتصادی یک طرح را در مقایسه با شرایط معمول سرمایه‌گذاری در کشور به دست آورد و در واقع ریسک سرمایه‌گذاری را نشان داد. به منظور توجیه‌پذیری اقتصادی یک طرح، می‌بایست نرخ بازگشت سرمایه بیش از نرخ بهره گردد. با توجه به قیمت اجزای سیستم تولید همزمان و همچنین قیمت برق و گاز طبیعی و روابط ارائه‌شده، می‌توان مدت زمان بازگشت سرمایه را محاسبه کرد [۲۲].

$$(28) \quad \text{نرخ بازگشت سرمایه} = \frac{\text{هزینه-درآمد کل}}{\text{هزینه کل}}$$

نرخ بازگشت سرمایه برای سیستم تولید همزمان بدون استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی و فروش برق به شبکه ۱۲/۱۹ درصد و مدت زمان بازگشت سرمایه ۸/۲ سال خواهد بود. برای سیستم تولید همزمان همراه با ذخیره‌سازی حرارتی و فروش برق به شبکه، نرخ بازگشت سرمایه و مدت زمان بازگشت سرمایه به ترتیب ۱۵/۲۸ درصد و ۶/۵ سال خواهند بود. نتایج، توجیه‌پذیری اقتصادی هر دو طرح را نشان می‌دهد.

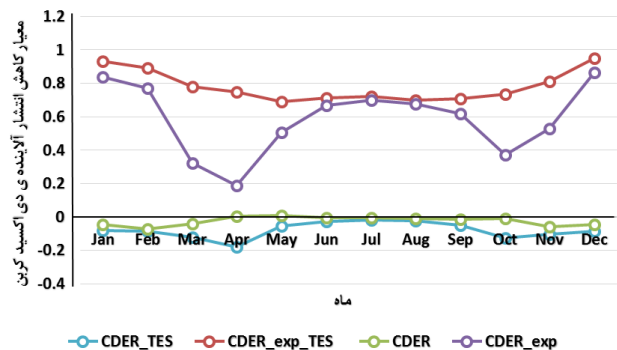
۲.۳.۴. آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت منجر به درک بهتر از تأثیر تغییر پارامترهای اساسی بر کارایی سیستم تولید همزمان می‌گردد. در این بخش، به بررسی عملکرد اقتصادی سیستم تولید همزمان بر اساس تغییر پارامترهای مهم اقتصادی شامل قیمت گاز، قیمت خرید برق از شبکه و قیمت فروش برق به شبکه پرداخته شده است. بدین منظور تأثیر تغییر پارامترهای فوق بر نرخ بازگشت سرمایه مورد توجه قرار گرفته است.



شکل (۶): تغییرات نرخ بازگشت سرمایه بر حسب قیمت گاز و برق در حالت عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی

$$(23) \quad CDE^{cchp-exp} = \zeta_{CO_2,ele}(E_{buy}^{cchp} - E_{sell}^{cchp}) + \zeta_{CO_2,th} \frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \zeta_{CO_2,ele} \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}}$$



شکل (۴): مقایسه معیار ارزیابی زیست‌محیطی در ماه‌های مختلف

۳.۴. معیار ارزیابی اقتصادی

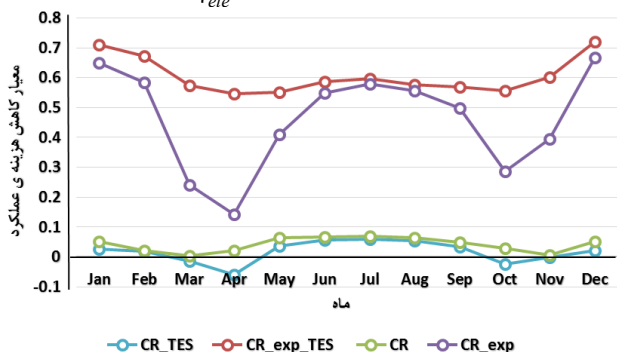
هزینه عملکرد، شامل خرید گاز طبیعی و برق از شبکه برای دو سیستم تولید همزمان و سیستم تولید جداگانه می‌شود. همچنین در حالت فروش برق به شبکه برای سیستم تولید همزمان، درآمد حاصل از فروش برق به شبکه نیز لحاظ شده است $(cost_{e,sell} E_{sell}^{cchp})$. درصد کاهش هزینه عملکرد (CR) از رابطه (۲۴) قابل محاسبه است [۱۸]. نتایج حاصل شده در ماه‌های مختلف در شکل (۵) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

$$(24) \quad CR = \frac{cost^{shp} - cost^{cchp}}{cost^{shp}}$$

$$(25) \quad cost^{shp} = cost_{ele} E_{grid}^{shp} + cost_{NG} \frac{H_{dmn,t}}{\eta_{boiler}}$$

$$(26) \quad cost^{cchp} = cost_{ele} E_{buy}^{cchp} + cost_{NG} \left(\frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \right)$$

$$(27) \quad cost^{cchp-exp} = cost_{ele} E_{buy}^{cchp} + cost_{NG} \left(\frac{H_{boiler}}{\eta_{boiler}} + \frac{E_{cchp}}{\eta_{ele}} \right) - cost_{ele,sell} E_{sell}^{cchp}$$



شکل (۵): مقایسه معیار ارزیابی اقتصادی در ماه‌های مختلف

که پانویس های i و e به ترتیب معرف جریان های ورودی و خروجی حجم کنترل می باشند. نرخ آگرژی یک جریان جرم با چشم پوشی از مؤلفه های پتانسیل و جنبشی آگرژی می تواند به شکل زیر نوشته شود [۲۶]:

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (30)$$

در معادله (۳۰)، h آنتالپی، s آنتروپی، T دما و پانویس 0 نشان دهنده محیط است.

برای محاسبه آگرژی شیمیایی سوخت های دارای فرمول شیمیایی C_nH_m روابط تجربی ارائه شده که برای سوخت های هیدروکربنی گازی در رابطه (۳۱) آورده شده است. مقدار آگرژی شیمیایی سوخت با استفاده از رابطه (۳۲) تعیین می شود که LHV ارزش حرارتی پایین سوخت است [۲۴].

$$\xi = 1.033 + 0.0169 \frac{m}{n} - \frac{0.0698}{n} \quad (31)$$

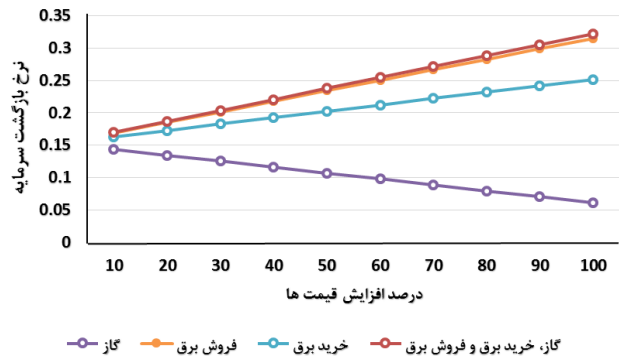
$$\xi = \frac{E_{ch}}{LHV} \quad (32)$$

مقدار آگرژی شیمیایی برای گاز طبیعی (متان) برابر $1/0.19$ است. آگرژی سوخت و محصول برای اجزای اصلی سیستم تولید همزمان در جدول (۵) مشخص شده است.

جدول (۵): نرخ آگرژی سوخت و محصول اجزای اصلی سیستم

CCHP		
نرخ آگرژی محصول	نرخ آگرژی سوخت	اجزای سیستم
$\dot{m}_9(h_{10} - h_9 - T_0(s_{10} - s_9))$	$\dot{m}_3(h_3 - h_4 - T_0(s_3 - s_4))$	مبدل حرارتی روغن روانکاری موتور (LOHE)
$\dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10} - T_0(s_{11} - s_{10}))$	$\dot{m}_5(h_5 - h_6 - T_0(s_5 - s_6))$	مبدل حرارتی آب خنک کننده موتور (JWHE)
$\dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11} - T_0(s_{12} - s_{11}))$	$\dot{m}_7(h_7 - h_8 - T_0(s_7 - s_8))$	مبدل حرارتی گازهای خروجی از آگروز موتور (EGHE)
$\dot{m}_3(h_3 - h_4 - T_0(s_3 - s_4)) + \dot{m}_5(h_5 - h_6 - T_0(s_5 - s_6)) + \dot{m}_7(h_7 - h_8 - T_0(s_7 - s_8)) + \dot{W}$	$\dot{m}_2 \times 1.019 \times LHV$	موتور گازسوز (GE)
$\dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10} - T_0(s_{11} - s_{10}))$	$\dot{m}_5(h_5 - h_6 - T_0(s_5 - s_6))$	مبدل حرارتی آب داغ (HWHE)
$\dot{m}_{20}(h_{21} - h_{20} - T_0(s_{21} - s_{20}))$	\dot{W}_{wp}	پمپ آب (wp)
$\dot{m}_{22}(h_{16} - h_{22} - T_0(s_{16} - s_{22}))$	$\dot{m}_{28} \times 1.019 \times LHV$	بویلر کمکی (boiler)

محصول (P) و سوخت (F) یک جزء با در نظر گرفتن نتیجه مطلوبی که به وسیله آن جزء تولید می شود و همچنین منابعی که برای تولید آن نتیجه صرف می گردند، تعیین می شوند. ارزیابی عملکرد و بهینه سازی طراحی سیستم های حرارتی، نیازمند به تعیین راندمان آگرژی تیک و یک روش مناسب تعیین هزینه برای هر یک از اجزای سیستم است. راندمان آگرژی تیک مطابق رابطه (۳۳) برای یک جزء به صورت نسبت محصول به سوخت تعریف می شود [۲۳].



شکل (۷): تغییرات نرخ بازگشت سرمایه بر حسب قیمت گاز و برق در حالت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی

شایان ذکر است که در این آنالیزها، هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری ثابت در نظر گرفته شده اند. نتایج آنالیز حساسیت نرخ بازگشت سرمایه با توجه به قیمت های گاز طبیعی، خرید برق و فروش برق برای دو حالت عدم استفاده از مخزن ذخیره حرارتی و استفاده از آن، به ترتیب در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده است. از دلایل عدم استقبال از سیستم های تولید همزمان در ایران می توان پایین بودن قیمت حامل های انرژی و همچنین نیاز به سرمایه گذاری اولیه نسبتاً زیاد اشاره کرد. همان طور که در بخش آنالیز حساسیت نشان داده شده است، با افزایش قیمت سوخت و برق، نرخ بازگشت سرمایه سیر صعودی خواهد داشت و با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از ذخیره سازی حرارتی نیز نرخ بازگشت سرمایه را افزایش خواهد داد.

۵. تحلیل آگرژی

آگرژی را می توان بالاترین مقدار کاری دانست که یک دستگاه می تواند بدون نقض قوانین ترمودینامیک تولید کند [۲۳]. در نبود اثرات هسته ای، مغناطیسی، الکتریکی و تنش سطحی، آگرژی کلی سیستم می تواند به چهار جزء تقسیم گردد. آگرژی فیزیکی، آگرژی جنبشی، آگرژی پتانسیل و آگرژی شیمیایی. در این مقاله از اثرات آگرژی جنبشی و پتانسیل چشم پوشی شده است. آگرژی فیزیکی، به عنوان ماکزیمم کار مفید تئوری یک سیستم در تعادل با محیط آن سیستم اطلاق می گردد. آگرژی شیمیایی مربوط به بخش ترکیب شیمیایی یک سیستم از تعادل شیمیایی آن است. آگرژی شیمیایی یکی از مهم ترین بخش های آگرژی در فرایند احتراق است [۲۴]. برای انجام آنالیز آگرژی، نیازمند بالانس جرمی و بالانس انرژی سیستم برای به دست آوردن نرخ دبی ها و نرخ انتقال حرارت در سطح کنترل هستیم. معادله بالانس آگرژی مطابق رابطه (۲۹) تعریف می شود [۲۵]:

$$\dot{E}_q + \sum_i \dot{m}_i e_i = \dot{E}_w + \sum_e \dot{m}_e e_e + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (29)$$

نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری ثابت است که عبارت است از [۲۷]:

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{CRF}{t} \times Z_k^{CI} \quad (۳۷)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{CRF}{t} \times Z_k^{OM} \quad (۳۸)$$

t ساعات کارکرد سالانه جزء k ام، Z_k^{CI} هزینه سرمایه‌گذاری ثابت جزء k ام و Z_k^{OM} هزینه تعمیرات و نگهداری جزء k ام می‌باشد. نرخ هزینه کلی جزء k ام از رابطه (۳۹) محاسبه می‌شود:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (۳۹)$$

فرایند هزینه‌گذاری اگزرژی، شامل معادلات بالانس هزینه‌ای است که معمولاً برای هریک از اجزای سیستم، به صورت جداگانه فرمول‌بندی می‌شوند. یک بالانس هزینه که برای جزء k ام سیستم به کار می‌رود، بیان می‌کند که هزینه کلی جریان‌های خروجی برابر است با هزینه کلی جریان‌های ورودی به اضافه هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری (رابطه ۴۰) [۲۷].

$$\sum_{j=1}^n \dot{C}_{j,k,in} + \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} = \sum_{j=1}^m \dot{C}_{j,k,out} \quad (۴۰)$$

مطابق رابطه (۴۱)، هزینه متوسط سوخت برای جزء k ام سیستم ($C_{F,k}$) نشان‌دهنده هزینه متوسطی است که تحت آن واحد اگزرژی سوخت برای جزء k ام سیستم فراهم می‌شود.

$$C_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (۴۱)$$

مقدار $C_{F,k}$ به موقعیت نسبی k ام جزء در سیستم و ارتباطات بین آن جزء و سایر اجزای سیستم بستگی دارد. به طور مشابه، هزینه واحد محصول $C_{P,k}$ عبارت است از هزینه متوسطی که تحت آن، هر واحد اگزرژی برای محصول جزء k ام تأمین شده است (رابطه ۴۲) [۲۷]:

$$C_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (۴۲)$$

نرخ هزینه $\dot{C}_{D,k}$ که مربوط به تخریب اگزرژی، $\dot{E}_{D,k}$ در جزء k ام سیستم است، یک هزینه مخفی است که تنها به وسیله یک تحلیل ترمواکونومیک می‌توان آن را آشکار کرد. این هزینه می‌تواند به وسیله هزینه سوخت اضافی که برای جبران تخریب اگزرژی و تولید همان نرخ جریان اگزرژی محصول ($\dot{E}_{P,k}$) مورد نیاز است، تخمین زده شود:

$$\dot{C}_{D,k} = C_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (۴۳)$$

برای اغلب تجهیزات که به خوبی طراحی شده باشند، هرچه میزان تخریب اگزرژی کاهش و یا به عبارتی راندمان افزایش یابد، هزینه تخریب اگزرژی ($\dot{C}_{D,k}$) کاهش یافته و در مقابل، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\dot{Z}_k^{CI}) افزایش می‌یابد؛ یعنی می‌توان گفت هرچه $\dot{C}_{D,k}$ بیشتر باشد، \dot{Z}_k کمتر خواهد بود و بالعکس [۲۷].

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})}{\dot{E}_{F,k}} \quad (۳۳)$$

نرخ تخریب اگزرژی در جزء k ام یک سیستم به وسیله رابطه (۳۴)

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} - \dot{E}_{L,k} \quad (۳۴)$$

در این رابطه، $\dot{E}_{L,k}$ اتلاف اگزرژی در جزء k ام سیستم را نشان می‌دهد که معمولاً وقتی مرز آن جزء از سیستم در دمای T_0 باشد، برابر صفر خواهد بود. علاوه بر ε_k و $\dot{E}_{D,k}$ ، ارزیابی یک جزء از سیستم بر مبنای نسبت تخریب اگزرژی ($y_{D,k}$) نیز صورت می‌گیرد که در واقع تخریب اگزرژی در جزء k ام را با اگزرژی سوخت تأمین‌شده برای کل سیستم ($\dot{E}_{F,tot}$) مقایسه می‌کند:

$$y_{D,k} = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (۳۵)$$

این نسبت همچنین بیان می‌کند که به واسطه تخریب اگزرژی در جزء k ام، راندمان اگزژیک کل سیستم چند درصد کاهش می‌یابد. $\dot{E}_{D,k}$ یک معیار مطلق برای ناکارآمدی‌های جزء k ام می‌باشد؛ در حالی که ε_k و $y_{D,k}$ معیارهای نسبی برای همان ناکارآمدی‌ها هستند. با این تفاوت که در ε_k ، تخریب اگزرژی در داخل یک جزء، به سوخت همان جزء مرتبط می‌گردد؛ در حالی که در $y_{D,k}$ ، تخریب اگزرژی در یک جزء، به سوخت کل سیستم مرتبط می‌شود [۲۳].

۶. تحلیل ترمواکونومیک

ترمواکونومیک یا اگزژواکونومیک شاخه‌ای از مهندسی است که با ترکیب تحلیل‌های اگزرژی و اصول اقتصاد، اطلاعاتی را برای طراحی سیستم فراهم می‌سازد که از طریق تحلیل‌های انرژی یا برآوردهای اقتصادی متعارف میسر نیست. اما این تحلیل در طراحی و عملکرد سیستم پرهزینه، بسیار ضروری است.

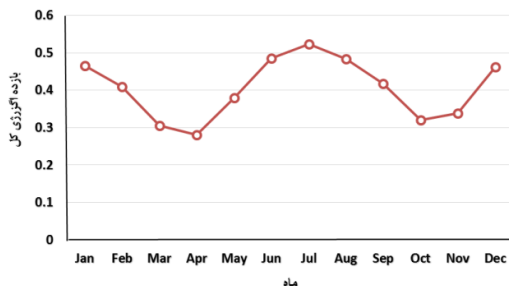
برای محاسبه هزینه‌ها در تحلیل اگزژواکونومیک نیاز به استفاده از بالانس هزینه‌هاست. بالانس هزینه‌ها برای کل سیستم در حالت پایدار به صورت رابطه (۳۶) بیان می‌گردد.

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (۳۶)$$

رابطه (۳۶) بیان می‌کند که نرخ هزینه مربوط به محصول سیستم (\dot{C}_P) برابر با نرخ کلی هزینه صرف‌شده برای تولید آن محصول است و این هزینه‌های صرف‌شده تحت عناوین نرخ هزینه سوخت (\dot{C}_F)، نرخ هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری کلی (\dot{Z}^{CI}) و هزینه‌های مربوط به نگهداری و عملکرد (\dot{Z}^{OM}) بیان می‌گردد [۲۷].

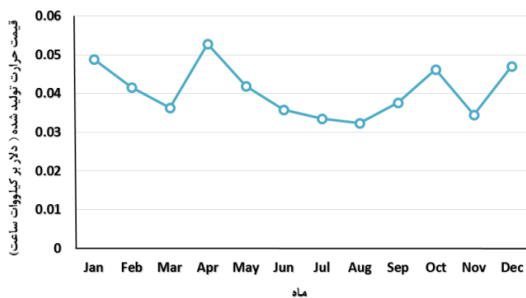
تفاوت اصلی بین تحلیل اقتصادی معمول و تحلیل ترمواکونومیک این است که این تحلیل در سطح اجزای سیستم صورت می‌گیرد و چگونگی توزیع هزینه در اجزای سیستم را نشان می‌دهد. اندیس CI

می‌شود. این مقادیر نشان‌دهنده بازده انرژی متوسط کل سیستم در ماه‌های مختلف سال هستند (شکل ۸).



شکل (۸): مقایسه بازده انرژی کل در ماه‌های مختلف

شایان ذکر است که در محاسبه این مقادیر در ساعتی که هم بویلر کمکی و هم موتور گازسوز خاموش‌اند، مقدار بازده انرژی صفر در نظر گرفته می‌شود. با مشخص بودن هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه سالانه، هزینه واحد انرژی سوخت (قیمت گاز طبیعی) و هزینه مربوط به برق تولیدی می‌توان هزینه مربوط به حرارت تولیدی را به دست آورد. با این فرضیات و انجام محاسبات، قیمت تمام شده حرارت تولیدی برای هر ساعت کارکرد سیستم در طول سال به دست می‌آید. مقادیر متوسط ماهانه قیمت حرارت تولیدی در شکل (۹) ارائه شده است. در ماه‌های جولای و آگوست ساعات روشن بودن سیستم نسبت به تقاضای حرارتی، شرایطی دارد که تولید حرارت از نظر اقتصادی بسیار مطلوب می‌باشد. عکس این امر در ماه‌های آوریل و اکتبر صادق است که در این ماه‌ها به دلیل کم بودن تقاضای حرارتی، تولید برق بسیار اندک انجام می‌شود و بنابراین تولید حرارت چندان اقتصادی نیست.



شکل (۹): مقایسه قیمت حرارت تولید شده در ماه‌های مختلف

اختلاف هزینه نسبی (r_k) بین هزینه متوسط واحد انرژی محصول و هزینه متوسط واحد انرژی سوخت، به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$r_k = \frac{C_{P,k} - C_{F,k}}{C_{F,k}} = \frac{I - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k}{C_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \quad (44)$$

این رابطه نشان می‌دهد که منابع واقعی هزینه در جزء k عبارت‌اند از: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\dot{Z}_k^{CI})، هزینه تخریب انرژی در آن جزء ($\dot{C}_{D,k}$)، هزینه‌های عملکرد و نگهداری (\dot{Z}_k^{OM}) و هزینه اتلاف انرژی ($\dot{C}_{L,k}$). از بین این منابع، دو مورد اول شاخص‌ترین بوده و برای محاسبه فاکتور انرژی‌کونومیک به کار می‌روند. فاکتور انرژی‌کونومیک (f_k) مطابق رابطه (۴۵)، نشان‌دهنده نسبت هزینه سرمایه‌گذاری هر جزء به مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تخریب انرژی و اتلاف انرژی آن جزء می‌باشد [۲۷].

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + C_{F,k}(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})} \quad (45)$$

متغیرهای ترموآکونومیک نظیر \dot{Z}_k^{CI} و $\dot{C}_{D,k}$ یک معیار مطلق برای اهمیت جزء k ارائه می‌دهند؛ در حالی که متغیرهای f_k و r_k یک معیار نسبی برای برآورد میزان کارایی اقتصادی یک جزء فراهم می‌آورند [۲۵]. نتایج حاصل از تحلیل انرژی و ترموآکونومیک اجزای اصلی سیستم تولید همزمان در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان بازگشت‌ناپذیری به ترتیب متعلق به موتور گازسوز و بویلر می‌باشد که این مسئله به دلیل واکنش‌های شیمیایی انجام گرفته در اثر احتراق است. کمترین مقدار فاکتور انرژی‌کونومیک مربوط به بویلر است، هرچند بیشترین هزینه تخریب انرژی مربوط به موتور گازسوز است، با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر موتور گازسوز نسبت به بویلر کمکی، مقدار فاکتور انرژی‌کونومیک در موتور گازسوز بیشتر به دست می‌آید.

مقادیر بازده انرژی کل برای تمام ۸۷۶۰ ساعت سال محاسبه شده است و در ۱۲ دوره یک ماهه میانگین گرفته

جدول (۶): نتایج حاصل از تحلیل انرژی و ترموآکونومیک

اجزای سیستم	نرخ تخریب (kW)	راندمان انرژی	نسبت تخریب انرژی	نرخ هزینه تخریب (Rials/h)	اختلاف هزینه نسبی	فاکتور انرژی‌کونومیک	نرخ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (Rials/h)
مبدل حرارتی روغن روانکاری موتور	۱/۷۹۱	۰/۵۹۵۳	۰/۰۰۰۳	۵۲	۰/۶۶۶۷	۰/۹۸۴۷	۳۵۱۹/۲
مبدل حرارتی آب خنک‌کننده موتور	۶/۳۴۰	۰/۵۹۵۲	۰/۰۰۱۱	۱۲۰	۰/۶۶۶۷	۰/۹۸۴۶	۷۸۱۲
مبدل حرارتی گازهای خروجی از آگروز موتور	۹۷/۷۰۷	۰/۶۸۸۲	۰/۰۱۷۲	۲۱۱۶	۰/۶۶۶۷	۰/۸۸۴۵	۱۶۲۱۲
موتور گازسوز	۸۸۴/۳۹۶	۰/۴۸۴۹	۰/۱۵۶۵	۷۰۷۴۴۰	۲/۳۳۷	۰/۶۵۹۵	۱۳۷۰۰۰۰
پمپ آب	۰/۴۹۵	۰/۷۰۰۳	۰/۰۱۸۵	۱۱۸۸	۶/۰۱۰۴	۰/۹۱۵۷	۱۲۰۳۶
بویلر کمکی	۷۶۲/۷۶۲	۰/۲۷۹۲	۰/۱۴۸۷	۶۱۰۰۰۰	۲/۳۸۷۴	۰/۵۲۹۹	۵۴۴۴۰۰
مبدل حرارتی آب داغ	۳/۸۲۸	۰/۸۰۱۰	۰/۰۰۵۹	۴۴۸	۰/۶۶۶۷	۰/۹۹۰۶	۴۸۶۸۰

۷. نتیجه‌گیری

همان گونه که گفته شد در این پژوهش، عملکرد سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه موتور احتراق داخلی گازسوز به‌همراه مخزن ذخیره‌سازی حرارتی با دیدگاه ترمواکونومیک مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا بهینه‌سازی سیستم به روش جستجوی مستقیم بر اساس بار کل حرارتی مجتمع مسکونی به‌منظور کمینه‌سازی هزینه سالانه سیستم در دو حالت استفاده و عدم استفاده از مخزن ذخیره‌سازی حرارتی انجام گرفته است و سپس ارزیابی هر دو سیستم برای حالت‌های فروش برق مازاد به شبکه و عدم فروش برق مازاد به شبکه با استفاده از معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و کاهش هزینه عملکرد سیستم صورت گرفته است. تحلیل اگزرژی و ترمواکونومیک برای اجزای اصلی سیستم و برای کل سال انجام گرفته و میزان بازده اگزرژی و تخریب اگزرژی آن‌ها محاسبه شده است. میزان متوسط بازده اگزرژی کل سیستم برای ماه‌های مختلف سال مقایسه شده است.

بهترین حالت کارکرد سیستم، استفاده از مخزن ذخیره‌سازی حرارتی و فروش برق مازاد به شبکه برق است که در این حالت نسبت به حالت عدم استفاده از مخزن ذخیره‌سازی حرارتی، مصرف انرژی اولیه ۲۰/۸ درصد، انتشار آلاینده دی‌اکسیدکربن ۱۹/۵ درصد، هزینه عملکرد سیستم ۱۴/۳ درصد و میزان خرید برق از شبکه سراسری برق ۱۷ درصد کاهش یافته است. همچنین نرخ بازگشت سرمایه رشد ۳/۱ درصدی را نشان می‌دهد، اما استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی منجر به افزایش ۱۰/۷ درصدی هزینه سالانه سیستم تولید همزمان می‌شود. متوسط سالیانه بازده اگزرژی کل سیستم برابر ۴۰/۶ درصد خواهد بود. آنالیز حساسیت نرخ بازگشت سرمایه نشان داد در صورت افزایش ۱۰۰ درصدی قیمت حامل‌های انرژی، منجر به افزایش ۱۱۵ درصدی نرخ بازگشت سرمایه خواهد شد.

فهرست علائم

برق فروخته‌شده به شبکه در حالت تولید همزمان	E_{sell}^{cchp}
برق تولیدی سیستم تولید همزمان	E_{cchp}
ظرفیت چیلر جذبی	$H_{ch, abs.}$
ظرفیت چیلر الکتریکی	$H_{ch, ele.}$
ظرفیت بویلر	H_b
میزان کارکرد بویلر	H_{boiler}
گاز طبیعی	NG
مخزن ذخیره‌سازی حرارتی	TES
آنتالپی	h
دما	T
آنترופی	s
نرخ هزینه سالیانه	\dot{Z}
معیار صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه	PES
میزان مصرف انرژی اولیه	PEC
معیار کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن	CDER
معیار کاهش هزینه عملکرد سیستم	CR
هزینه	Cost
نسبت تخریب اگزرژی	y_D
اختلاف هزینه نسبی	r_k
فاکتور اگزرژی‌کونومیک	f_k
علائم یونانی	
بازده اگزرژی	ε
بازده انرژی	η
نسبت بار سرمایه‌ی چیلر الکتریکی به بار سرمایه‌ی چیلر	β
فاکتور جریمه انتشار آلاینده‌ها	μ
فاکتور انتشار آلاینده‌ها	ζ
بالانویس‌ها	
سرمایه‌گذاری اولیه	CI
تعمیر و نگهداری	OM
تولید جداگانه	shp
فروش برق به شبکه سراسری برق	exp
زیرنویس‌ها	
الکتریسیته	ele
انتشار آلاینده‌ها	emi
سالیانه	ann
کل	Tot
مخزن ذخیره‌سازی حرارتی	st
تخریب	D
سوخت	F
محصول	P
شبکه سراسری برق	grid
موتور گازسوز	GE
مبدل حرارتی روغن روانکاری	LOHE
مبدل حرارتی آب خنک‌کننده موتور	JWHE
مبدل حرارتی گازهای خروجی از موتور	EGHE
مبدل حرارتی آب گرم	HWHE
پمپ آب	Wp
فن کوئل	FCU
ظرفیت نامی موتور گازسوز	E_{nom}
برق خریداری‌شده از شبکه در حالت تولید جداگانه	E_{grid}^{shp}
برق خریداری‌شده از شبکه در حالت تولید همزمان	E_{buy}^{cchp}

- [۱] «راهنمای جامع تولید همزمان برق و حرارت»، دفتر بهبود بهره‌وری و اقتصاد برق و انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۸.
- [2] Pantaleo, A., Camporeale, S., Markides, C., Mugnozza, G., Shah, N., "Energy Performance and Thermo-economic Assessment of a Microturbine-Based Dual-Fuel Gas-biomass Trigeneration System", Energy Procedia, Vol. 105, pp. 764-772, 2017.
- [3] Yildirim, U., Gungor, A., "An Application of Exergo-economic Analysis for a CHP System", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 42, pp. 250-25, 2012.
- [4] Deng, J., Wang, R., Wu, J., Han, G., Wu, D., Li, Sh., "Exergy Cost Analysis of a Micro-Trigeneration System Based on the Structural Theory of Thermoconomics", Energy, Vol. 33, Issue 9, pp. 1417-14, 2008.
- [5] Farrokhi, N., Pirkandi, J., Nosratollahi, M., "Thermoeconomic Performance Analysis of a Small-Scale CHP System Based on Diesel Engine", Modares Mechanical Engineering, Vol.16, pp. 375-383, 2016 (In Persian).
- [۶] چهارطاقی محمود، علی‌زاده خارکشی بهراد، «تحلیل انرژی و انرژی‌گری یک سیستم تولید همزمان کوچک بر پایه پیل سوختی پلیمری برای سرمایه‌گذاری»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۵، شماره ۴، صفحه ۳۴-۴۹، ۱۳۹۴.
- [۷] عامری محمد، تنها امیرعباس، کریمی‌علویچه سعید، «آنالیز انرژی و ترموآکونومیک یک سیکل تولید همزمان برای ساختمانی ده طبقه در تهران»، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، بیرجند، ۱۳۹۰.
- [8] Ahmadi Boyaghchi, F., Heidarnajad, P., "Thermoeconomic Assessment and Multi Objective Optimization of a Solar Micro CCHP Based on Organic Rankine Cycle for Domestic Application", Energy Conversion and Management, Vol.97, pp. 224-234, 2015.
- [9] صدرالدینی امیرحسین، فانی مریم، اشجاری محمدعلی، «تحلیل ترموآکونومیک عملکرد سامانه تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌گذاری به همراه انرژی خورشیدی و مخزن ذخیره حرارتی»، چهارمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ۱۳۹۳.
- [۱۰] سلطاندوست محمدرضا، «مراجعات سریع»، تهران، انتشارات یزدا، ویرایش دوم، ۱۳۹۳.
- [11] Ebrahimi, M., Keshavarz, A., *Combined Cooling, Heating and Power*, Elsevier, 2015.
- [12] Sanaye, S., Hajabdollahi, H., "4E Analysis and Multi-Objective Optimization of CCHP Using MOPSO", Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 228, No.1, pp. 43-60, 2014.
- [13] Martínez-Lera, S., Ballester, J., Martínez-Lera, J., "Analysis and Sizing of Thermal Energy Storage in Combined Heating, Cooling and Power Plants for Buildings", Applied Energy, Vol.106, pp.127-142, 2013.
- [14] Salehi, G., Taghdiri, E., Deldadeh, D., "Examining the Effect of Heat Storage in a Cogeneration System", World Renewable Energy Congress in Linköping, Sweden, 2011.
- [15] Sanaye, S., Hajabdollahi, H., "Comparison of Different Scenarios in Optimal Design of a CCHP Plant", Journal of Process Mechanical Engineering, Vol.230, No.4, pp.247-262, 2016.
- [16] Farahnak, M., Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Dashti, F., "Optimal Sizing of Power Generation Unit Capacity in ICE-driven CCHP Systems for Various Residential Building Sizes", Applied Energy, Vol.158, pp. 203-219, 2015.
- [17] Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M., Shakib, S., "Thermoeconomic Optimization of CCHP System with Rely the Time Value of Money, in Payback Period", Modares Mechanical Engineering, Vol.15, No.5, pp.245-254, 2015 (In Persian).
- [18] Maerefat, M., Shafie, P., "Design of CCHP System for Office Buildings in Tehran and Thermodynamical, Environmental and Economic Evaluation in Comparison to Conventional System", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 124-134, 2014 (In Persian).
- [19] Tavakoli Dastjerd, F., Ghafurian, M., Farahat, S., "Comparison of Selection Effect Environmental Optimization and Multi-Criteria Optimizations; Energy, Economic and Environmental in Performance of CCHP System", Modares Mechanical Engineerin, Vol. 15, No. 9, pp. 69-77, 2015 (In Persian).
- [20] Jenbacher Gas Engine Technical Tpecification, www.energo-motors.com
- [21] Ma, Zh., Glatzmaier, G., Turchi, C., Wagner, M., "Thermal Energy Storage Performance Metrics and Use in Thermal Energy Storage Design", Department of Energy under Contract, National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [۲۲] قاسم‌زاده حسن، معرفت مهدی، عظیمی عزیز، «طراحی سیستم تولید همزمان برق، گرما و سرما برای منازل مسکونی در اقلیم آب و هوایی تهران»، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳ شماره ۲ صفحه ۱۰۹-۱۲۲، ۱۳۹۲.
- [23] Kotas, T., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Pub Co, 1995.
- [24] Ameri, M., Ahmadi, P., Hamidi, A., "Energy, Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Steam Power Plant: A Case Study", International Journal of Energy Research Vol.33, pp. 499-512, 2009.
- [25] Ahmadi, P., Barzegar, H., Saidi, M., Dincer, I., "Thermodynamic Modeling of a SOFC-GT with a Heat Recovery Steam Generator", 5th International Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5) in Denizli, Turkey, 2010.
- [26] Balli, O., Aras, H., Hepbasli, A., "Exergetic Performance Evaluation of a Combined Heat and Power (CHP) System in Turkey", International Journal of Energy Research, Vol.31, pp. 849-866, 2007.
- [27] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Maran, M., *Thermal Design and Optimizatio*, Wiley-Interscience, 1995.