



تخمین آلاینده‌گی و صرفه اقتصادی سیستم تولید همزمان برق حرارت و برودت (CCHP) در شرایط ایده‌آل و واقعی از دو دیدگاه محلی و سراسری

سید سروش ساداتی^۱، سینا احمدی^۱، محمد مصطفی غفوریان^۲ و حمید نیازمند^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۳ استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

در پژوهش حاضر، پس از بهینه‌سازی ظرفیت تجهیزات سیستم CCHP با روش سه معیاره سود سالیانه نسبی، به بررسی آلاینده‌های تولیدی CO_2 ، CH_4 ، CO ، NO_x و SO_x پرداخته شده است. طراحی سیستم با فرض قابلیت عملکرد در نقاط خارج از طراحی و امکان فروش الکتریسیته به شبکه انجام گردیده است. عملکرد سیستم در دو شرایط واقعی (تحت تأثیر شرایط محیطی دما و فشار) و ایده‌آل و نیز برای دو سناریوی تولید آلاینده‌ها در محل مصرف (حالت محلی، Local) و کل آلاینده‌های تولیدی (حالت سراسری، Global) ارزیابی شده است. فرآیند بهینه‌سازی، یک موتور احتراق داخلی با ظرفیت نامی ۲۴۴۰ kW را به عنوان محرک اولیه، برای مطالعه موردی هتل، پیشنهاد می‌دهد که علی‌رغم کاهش عمده آلاینده‌های تولیدی CO_2 ، CO ، NO_x و SO_x در حالت سراسری، باعث افزایش ۹۲/۵٪ و ۰/۷۹٪ و ۸۴/۱ درصدی آلاینده‌های CH_4 ، CO و NO_x نسبت به سیستم سنتی، در محل مصرف می‌شود. از طرفی، عملکرد اقتصادی واحد تولید توان سیستم با تغییر در شرایط محیطی، نشان دهنده آن است که اگر شرایط واقعی محیطی در بازدهی موتورگازسوز در نظر گرفته نشود، درآمدهای محاسبه شده سیستم اطمینان لازم را نخواهد داشت.

کلمات کلیدی: سیستم‌های تولید همزمان برق حرارت و برودت؛ سیستم سنتی؛ آلاینده

Estimating Pollution and Economic Costs of CCHP System in Ideal and Real Conditions in terms of Local and Global Approach

S.S. Sadatifar¹, S. Ahmadi¹, M.M. Ghafurian², H. Niazmand^{3,*}

¹ Master Student of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

² PhD Student in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

³ Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Abstract

In present paper, after optimizing the capacity of the CCHP system equipment using the three-yearly relative annual benefit method, the CO_2 ، CH_4 ، CO ، NO_x and SO_x emissions are studied. Optimization is carried out, assuming operation in the off-design points and ability to sell electricity to the network. The performance of the system will be evaluated in real conditions (under the influence of ambient temperature and pressure) and ideal, as well as two views on the production of pollutants at the place of consumption (Local) and total emissions (Global). Optimization process suggests an internal combustion engine with a nominal capacity of 2440 kW as a prime mover for the case study of the hotel, which despite the significant reduction of CO_2 ، CO ، NO_x and SO_x emissions in global mode, increases the CH_4 ، CO and NO_x in comparison with the traditional system at local mode by 92.5%, 0.79% and 84.1%. On the other hand, the economic performance of the power unit of the CCHP system with a change in environmental conditions indicates that if the actual performance of the gas engine in the system is not considered, the system incomes will not have the required certainty.

Keywords: Combined Cooling Heating and Power System (CCHP); Traditional System; Pollutant.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۱۰۳؛ فکس: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۵۵

آدرس پست الکترونیک: niazmand@um.ac.ir

۱- مقدمه

کاهش منابع انرژی فسیلی و افزایش خطر زیست محیطی این نوع از سوخت‌ها، باعث شده که پژوهشگران به دنبال راهکارهای اقتصادی جدید، با هدف کاهش مصرف سوخت فسیلی و آلاینده‌های تولیدی باشند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، یکی از راهکارهایی است که به شرط پیشرفت تکنولوژی و نیز اقتصادی شدن آن، می‌تواند در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و نیز سایر آلاینده‌های سمی بسیار مؤثر باشد، ولی نیاز به انرژی الکتریکی، گرما و سرمایه مصرف‌کننده‌ها به‌حدی زیاد است که بر اساس گزارش‌های اداره کل اطلاعات انرژی آمریکا (EIA)، تا سال ۲۰۱۵، منابع انرژی تجدیدپذیر تنها ۱۲/۵٪ از تولید و مصرف انرژی در جهان را به خود اختصاص داده‌اند و پیش بینی می‌شود با روند رشد کنونی، این مقدار در سال ۲۰۵۰ به ۱۸٪ برسد [۱]؛ بنابراین با توجه به گزارش EIA، در سال‌های پیش‌رو، سوخت‌های فسیلی کماکان پیش‌تاز تأمین انرژی بشر خواهند بود. به نظر می‌رسد که در کنار نیاز به توسعه تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر، تکنولوژی‌های مرسوم نیز، باید به گونه‌ای بهبود یابند که علاوه بر افزایش بازدهی کل، مصرف سوخت را نیز کاهش داده و آلاینده کمتری تولید کنند. نکته حائز اهمیت این است که تکنولوژی‌های مرسوم، به دلیل اینکه از نظر تجاری در جایگاه مناسبی قرار گرفته‌اند، پس احتمال سودآور بودن آن‌ها در صورت بهینه‌سازی اقتصادی، بالا خواهد بود. یکی از راهکارهایی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است، تولید همزمان برق، حرارت و برودت (CCHP) است [۲]. این سیستم‌ها با تولید غیر متمرکز و مستقل برق، گرمایش و سرمایش، با بهره‌وری دقیق از انرژی‌های اتلافی، باعث جلوگیری از تلفات توزیع و انتقال در شبکه سراسری، کاهش مصرف سوخت، افزایش رقابت در تولید برق، به همراه کاهش آلاینده‌های تولیدی می‌شوند [۳].

تاکنون مطالعات گسترده‌ای روی عملکرد سیستم‌های CCHP صورت گرفته است که در بیشتر آن‌ها به طراحی، بهینه‌سازی [۴، ۵] و تحلیل [۶] سیستم‌های CCHP پرداخته شده است. به عنوان مثال، کاردونا و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۷] به بهینه‌سازی و تعیین ظرفیت سیستم‌های CCHP با

روش ماکزیمم مستطیل MRM^۱، بدون در نظر گرفتن آنالیز اقتصادی، انرژی و زیست محیطی پرداختند. غائبی و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۸]، عملکرد یک سیستم CCHP را از نظر اقتصادی و انرژی بررسی نمودند. آن‌ها با معرفی مفهومی به نام R-curve به بررسی تأثیر استفاده از چیلر جذبی بر راندمان سیستم پرداختند، اما هیچ گونه تحلیل آلاینده‌گی در مورد سیستم خود انجام ندادند. ابراهیمی و کشاورز در سال ۲۰۱۳ [۹]، برای تعیین ظرفیت نامی بهینه واحد تولید توان و بویلر و انتخاب استراتژی عملکرد برای یک سیستم CCHP Micro خانگی، تابعی چند هدفه معرفی کردند. توابع هدف استفاده شده برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی این سیستم، پارامترهای نسبت صرفه جویی در انرژی سوخت FESR^۲، راندمان، نرخ بازگشت سرمایه و کاهش در میزان تولید CO₂، CO و NO_x بود. کاهش در میزان آلاینده‌ها، فقط به عنوان یک معیار در تابع هدف بوده و میزان تولید این آلاینده‌ها بررسی نشده است. صنایع و خاکپای در سال ۲۰۱۴ [۱۰]، با استفاده از روش سود سالیانه نسبی RAB^۳ و الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی و تعیین ظرفیت اجزای سیستم CCHP پرداختند. آنان از میزان انتشار CO₂، به عنوان یک معیار در آنالیز زیست محیطی، استفاده نمودند، اما هیچ‌گونه ارزیابی جهت میزان تولید آلاینده‌های سیستم انجام ندادند. کیوونگ وو و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۱]، به بررسی تأثیر نوع ساختمان (هتل، بیمارستان، مغازه و اداره) در پیاده‌سازی سیستم CCHP در شش منطقه آب‌وهوایی ژاپن با استفاده از روش تصمیم‌گیری با معیارهای انرژی، اقتصادی و زیست محیطی پرداختند. معیار آن‌ها در تحلیل زیست محیطی، میزان کاهش در انتشار آلاینده CO₂ به صورت سراسری در سیستم CCHP نسبت به سیستم‌های سنتی بود. آن‌ها نشان دادند که سیستم‌های CCHP در هتل و بیمارستان عملکرد مطلوب‌تری دارند؛ همچنین دریافتند که عملکرد بهتر سیستم در زمینه انرژی، الزاماً نیز به معنای عملکرد بهتر زیست محیطی نمی‌باشد. معرفت و شفیع در سال ۲۰۱۴ [۱۲]، به ارزیابی چندمعیاره سیستم تولید همزمان و انتخاب مناسب‌ترین حالت عملکرد سیستم با

¹ Maximum Rectangle Method

² Fuel Energy Saving Ratio

³ Relative Annual Benefit

همانطور که مطالعات نشان می‌دهد، در بهینه‌سازی سیستم‌های CCHP، معیار محیط زیست بیشتر از نظر انتشار کربن‌دی‌اکسید مورد ارزیابی قرار گرفته است و در بعضی از پژوهش‌ها فقط با سه نوع آلاینده انجام شده است که بیشترین سهم را از کل آلاینده‌های تولیدی در فرایند احتراقی دارد؛ همچنین در هیچکدام از پژوهش‌ها، ارزیابی تولید انتشار آلاینده‌های سیستم در محل مصرف و مقایسه آن با حالت سراسری (به طور کلی) مشاهده نمی‌شود. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد که به تأثیر تغییرات شرایط محیطی بر عملکرد اقتصادی و نیز زیست محیطی سیستم توجه ویژه‌ای نشده است. از این رو در این پژوهش، در گام نخست به بهینه‌سازی یک سیستم CCHP با سه معیار انرژی، اقتصادی و نیز زیست محیطی با پنج نوع آلاینده CO_2 ، CH_4 ، CO ، NO_x و SO_x به عنوان بیشترین سهم آلاینده تولیدی، پرداخته می‌شود تا عملکرد سیستم CCHP در تولید آلاینده‌ها و نیز کاهش آن با دو سناریوی سهم این آلاینده‌ها در محل مصرف (Local) و در کل (Global) ارزیابی شود. در حقیقت، نتایج این پژوهش نشان دهنده اثر روش سود سالیانه نسبی به عنوان یک روش جدید [۱۴] در طراحی سیستم CCHP در کاهش آلاینده‌های نام برده است و آلاینده‌ای مشخص خواهد شد که بیشترین اثر کاهشی را در این روش دارد؛ همچنین در انتها میزان تولید آلاینده‌ها در محل مصرف تعیین شده و با میزان کل آلاینده‌های تولیدی با فرض در نظرگیری آلاینده‌های تولیدی نیروگاه، مقایسه خواهد شد؛ همچنین اثر شرایط محیطی بر عملکرد سیستم، در مقایسه با سیستم سنتی ارایه می‌شود.

۲- توصیف سیستم

سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، یک سیستم CCHP است که انرژی گرمایش، سرمایش و الکتریسیته ساختمان را تامین می‌کند. در این سیستم انرژی الکتریسیته توسط موتور تولید می‌شود و از حرارت بازیافتی از آن جهت تامین گرمایش و یا در چیلر جذبی جهت تامین سرمایش استفاده خواهد شد؛ همچنین در صورتی که حرارت بازیافتی موتور کافی نباشد، می‌توان از بویلر جهت تولید گرمایش استفاده کرد و نیز با اتصال به شبکه سراسری برق، امکان خرید و فروش الکتریسیته وجود دارد. شماتیک این سیستم

استفاده از روش AHP^۱، تحت دو استراتژی تأمین بار الکتریکی و تأمین بار حرارتی، برای یک ساختمان اداری در تهران پرداختند. این ارزیابی چند معیاره از نظر انرژی، زیست محیطی و اقتصادی انجام شد. معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار آلاینده CO_2 ، کاهش هزینه عملکرد و نرخ بازگشت سرمایه به منظور ارزیابی سیستم CCHP به کار گرفته شد. در آنالیز زیست محیطی این پژوهش، میزان کاهش انتشار آلاینده CO_2 نیز به صورت سراسری نسبت به سیستم رایج بررسی شد. زنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۳]، به بهینه‌سازی چند هدفه سیستم CCHP ترکیب شده با پمپ حرارتی زمینی توسط الگوریتم ژنتیک پرداختند که نرخ کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید به عنوان یکی از اهداف این بهینه‌سازی در نظر گرفته شده بود. صنایع و غفوریان در سال ۲۰۱۶ [۱۴]، عملکرد سیستم‌های CCHP را با ظرفیت‌های مختلف، برای یک مجتمع مسکونی مدل‌سازی نمودند. مدل‌سازی آن‌ها شامل، تحلیل‌های انرژی، اقتصادی و زیست محیطی بود که ظرفیت تجهیزات را با تعریف تابعی جدید، تحت عنوان سود یکنواخت سالیانه نسبی REUAB^۲ و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه می‌کرد. در تحلیل زیست محیطی تحقیق آن‌ها، انتشار آلاینده‌ها به صورت سراسری (Global) و فقط به عنوان یک جریمه در تابع هدف در نظر گرفته شده بود. فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۵]، به بررسی عملکرد دو سیستم CCHP پرداختند که در یکی سرمایش به تنهایی توسط چیلر جذبی تأمین می‌شد و در دیگری از ترکیب چیلر جذبی و الکتریکی استفاده شده بود. عملکرد سیستم از نظر سه استراتژی نرخ ذخیره انرژی، کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید و کاهش هزینه‌های عملکرد از نظر دو موقعیت امکان و عدم امکان فروش الکتریسیته مازاد به شبکه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. لین و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۶]، با شبیه‌سازی دینامیکی به بهینه‌سازی ظرفیت تجهیزات سیستم CCHP با الگوریتم ژنتیک پرداختند. آنها در بهینه‌سازی خود معیارهای صرفه‌جویی انرژی، دوره برگشت سرمایه و کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید را به صورت چند هدفه به عنوان هدف بهینه‌سازی قرار دادند.

^۱ Analytic Hierarchy Process

^۲ Relative Equivalent Uniform Annual Benefit

$$\begin{cases} E_{dem} > E_{gen} \\ E_s = 0 \\ E_b = E_{dem} - E_{gen} \end{cases} \quad (۴)$$

در صورتی که الکتریسیته تولیدی بیشتر از میزان مورد نیاز باشد، سیستم قادر خواهد بود، مطابق روابط (۵)، مقدار اضافی را به شبکه سراسری برق بفروشد و نیاز به خرید الکتریسیته از شبکه سراسری را نخواهد داشت.

$$\begin{cases} E_{dem} < E_{gen} \\ E_s = E_{gen} - E_{dem} \\ E_b = 0 \end{cases} \quad (۵)$$

برای تأمین گرمایش مورد نیاز ساختمان (H_{dem})، از حرارت اتلافی واحد تولید توان (H_{gen}) استفاده می‌شود و در صورت بیشتر بودن گرمای تولیدی از میزان تقاضا، دیگر نیازی به بویلر پشتیبان نیست و گرمای اضافی (H_{extra}) در صورت نیاز به سرمایش در چیلر جذبی (C_{chp}) جهت تأمین سرمایش مصرف خواهد شد. در صورت عدم نیاز به سرمایش، این حرارت تلف می‌شود که به منظور فرآیند بهینه‌سازی مقدار این پارامتر به کمک یک قید، به حداقل مقدار می‌رسد. این استراتژی مطابق روابط (۶) بیان می‌شود.

$$\begin{cases} H_{dem} < H_{gen} \\ H_{extra} = H_{gen} - H_{dem} \\ H_{boil} = 0 \end{cases} \quad (۶)$$

اگر گرمای تولیدی توسط محرک اولیه، کمتر از میزان گرمای مورد نیاز باشد، مابقی گرما توسط بویلر پشتیبان (با فرض راندمان ۹۰٪)، تأمین خواهد شد که توسط رابطه (۷) ارزیابی می‌شود.

$$\begin{cases} H_{dem} > H_{gen} \\ H_{boil} = H_{dem} - H_{gen} \\ H_{extra} = 0 \end{cases} \quad (۷)$$

در صورتی که گرمای اضافی جهت تولید سرما از طریق چیلر جذبی (C_{chp})، به حدی نباشد که سرمای مورد نیاز (C_{dem}) را پوشش دهد، از بویلر پشتیبان (H_{boil}) جهت رفع کمبود میزان حرارت برای چیلر، استفاده می‌شود که طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} C_{chp} < C_{dem} \\ C_{short} = C_{dem} - C_{chp} \\ H_{boil} = C_{short} / COP_{chil} \\ C_{extra} = 0 \end{cases} \quad (۸)$$

شایان توجه است که ظرفیت نامی تجهیزات در سیستم CCHP توسط روش سه معیاره سود سالیانه نسبی در فرآیند

CCHP در مقایسه با سیستم سنتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدل ریاضی مربوط به استراتژی عملکرد این دو سیستم در ادامه ارائه شده است.

۲-۱- مدل ریاضی استراتژی عملکرد سیستم سنتی

در سیستم سنتی الکتریسیته مورد نیاز (E_{dem}) با خرید از شبکه سراسری (E_b) تأمین می‌شود. حرارت مورد نیاز (H_{dem}) با مصرف سوخت توسط بویلر (H_{boil}) و نیز سرمایش مورد نیاز (C_{dem}) توسط چیلر جذبی (C_{chil}) در محل مصرف، تأمین می‌شود. در زیر مدل ریاضی مربوط به سیستم سنتی برای سه بخش الکتریسیته، گرمایش و سرمایش ارائه شده است.

$$\begin{cases} E_b = E_{dem} \\ E_{gen} = 0 \\ E_s = 0 \end{cases} \quad (۱)$$

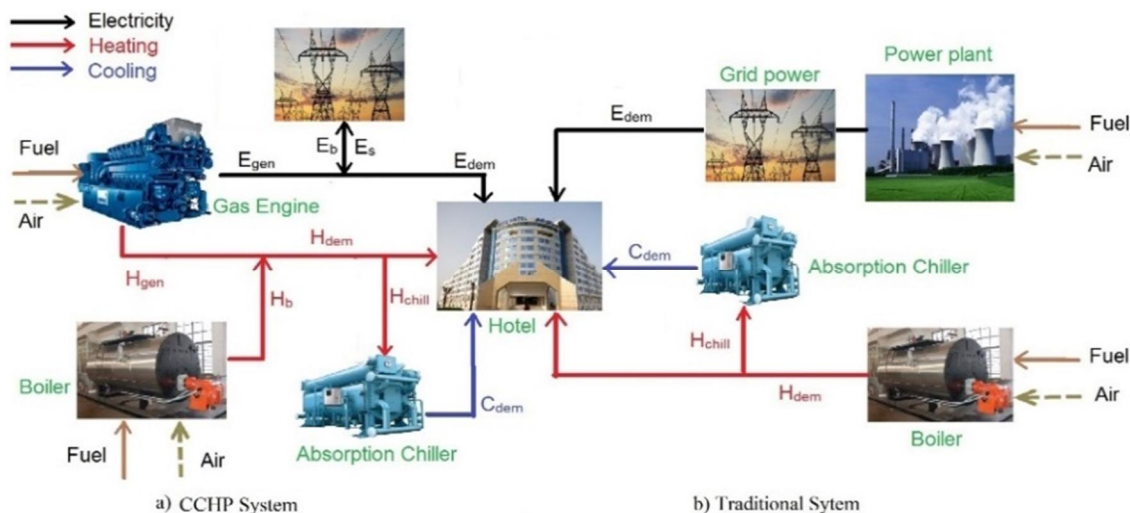
$$\begin{cases} H_{gen} = 0 \\ H_{boil} = H_{chil} + H_{dem} \\ H_{nom,tra} = \max(H_{boil}) \end{cases} \quad (۲)$$

$$\begin{cases} C_{chil} = C_{dem} \\ H_{chil} = C_{dem} / COP_{chil} \\ C_{nom,tra} = \max(C_{chil}) \end{cases} \quad (۳)$$

شایان توجه است که ماکزیمم گرمایش و سرمایش ضروری در طول سال، تعیین کننده ظرفیت نامی بویلر ($H_{nom,tra}$) و چیلر جذبی ($C_{nom,tra}$) در سیستم سنتی خواهد بود.

۲-۲- مدل ریاضی استراتژی عملکرد سیستم CCHP

در سیستم CCHP موتور احتراق داخلی (موتور گازسوز) به عنوان واحد تولید توان، وظیفه تأمین الکتریسیته مورد نیاز ساختمان را که شامل الکتریسیته روشنایی و الکتریسیته مورد نیاز تجهیزات الکتریکی می‌باشد، بر عهده دارد. اگر الکتریسیته تولیدی به وسیله محرک اولیه (E_{gen})، کمتر از میزان الکتریسیته مورد نیاز ساختمان باشد، کمبود الکتریسیته با خرید برق از شبکه سراسری (E_b)، تأمین خواهد شد. در این حالت، میزان الکتریسیته فروخته شده به شبکه (E_s)، مطابق روابط (۴) برابر با صفر می‌شود.



شکل ۱- شماتیکی از (a) سیستم تولید برق، حرارت و برودت در اتصال با شبکه در مقایسه با (b) سیستم سنتی

جدول ۱- اعتبارسنجی کار حاضر با مرجع [۱۵]

دو موتورگازسوز		یک موتورگازسوز	
کار حاضر	مرجع [۱۵]	کار حاضر	مرجع [۱۵]
۱۳۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۲۰
۱۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۲۰
۲۴۹/۴۱	۲۴۳/۸۱	۱۸۰/۶۵	۱۷۸/۵
-	۲/۶۴	-	۱/۱۹

در حالت ایده‌آل، بازده موتور گازسوز ($\eta_{nom.cchp}$) از رابطه (۹) بدست می‌آید [۱۸].

$$\eta_{nom.cchp}(E_{nom.cchp}) = \frac{E_{nom.cchp}}{2 \cdot 65 \times E_{nom.cchp} + 21 \cdot 4} \quad (9)$$

که $E_{nom.cchp}$ ظرفیت نامی و $\eta_{nom.cchp}$ بازده نامی موتور گازسوز است.

در حالت واقعی، با در نظر گرفتن فشار و دمای محیط که در هر ماه متغیر است، بازده موتور برای ماه‌های مختلف طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۹].

بهینه‌سازی تعیین خواهد شد. برای این منظور به مدل‌سازی ریاضی مربوط به تحلیل‌های سه‌گانه انرژی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم پرداخته می‌شود.

۳-۲- مدل ریاضی تحلیل انرژی سیستم CCHP

تحلیل انرژی واحد تولید توان سیستم CCHP، با تاثیر دو شرایط ایده‌آل و واقعی بر واحد تولید توان بررسی خواهد شد. در شرایط ایده‌آل عملکرد این واحد تحت تاثیر شرایط محیطی دما و فشار تغییر نمی‌کند؛ در حالی که در شرایط واقعی، تاثیر شرایط محیطی بر پارامترهای عملکردی این واحد در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور از داده‌های نیمه تجربی موثر بر عملکرد موتورگازسوز تحت شرایط محیطی استفاده می‌شود که در مراجع [۱۰، ۱۴] آورده شده‌اند.

در گام نخست، فرایند بهینه‌سازی سیستم CCHP با شرایط ایده‌آل با استفاده از تکنیک یکنواخت سالیانه اجرا شده تا اعتبارسنجی انجام گردد. نتایج اعتبارسنجی مربوط به این روش با مرجع [۱۷]، در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج کار حاضر با مرجع مورد نظر به خوبی تطابق دارد.

سپس، با توجه به اینکه شرایط واقعی (فشار و دمای محیط)، پارامترهای عملکردی موتور گازسوز (به عنوان واحد تولید توان) را تغییر می‌دهد، عملکرد واحد تولید توان سیستم CCHP با تغییر این شرایط محیطی بررسی می‌شود.

۲-۴- مدل ریاضی آلاینده‌های تولیدی سیستم

مدل ریاضی آلاینده‌های تولیدی سیستم، با در نظر گرفتن آلاینده‌های CO_2 ، CH_4 ، CO ، NO_x و SO_x ناشی از احتراق سوخت در محفظه موتور و بویلر و نیز آلاینده‌های تولیدی در نیروگاه تعریف می‌شود [۲۱]، به گونه‌ای که مقدار هر یک از این آلاینده‌ها در یک سال، برای سیستم سنتی و سیستم CCHP توسط روابط ۱۵ تا ۱۷ محاسبه خواهند شد. این روابط برای هر دو دیدگاه محلی و سراسری صادق است.

شایان توجه است که در دیدگاه محلی، فقط مقادیر آلاینده‌ها در محل مصرف (که توسط موتور، بویلر و چیلر در سیستم CCHP و تنها بویلر و چیلر در سیستم سنتی تولید می‌شود) مورد بررسی قرار می‌گیرند، ولی در دیدگاه سراسری، کل آلاینده‌هایی که برای تأمین بار الکتریکی، حرارتی و سرمایشی (هم در محل مصرف هم در محل نیروگاه) تولید می‌شوند.

$$m_{p,E} = \sum_{j=1}^{12} (f_{p,E} \times E_j) \times y_j \quad (15)$$

$$m_{p,H} = \sum_{j=1}^{12} (f_{p,H} \times H_j) \times y_j \quad (16)$$

$$m_{p,C} = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{f_{p,H} \times C_{chil,ab,j}}{COP_{chil,ab}} \right) \times y_j \quad (17)$$

p نوع آلاینده (SO_x و NO_x ، CO ، CH_4 ، CO_2)، m جرم آلاینده تولیدی در یک سال و f ضریب آلاینده در تحلیل زیست محیطی است که در جدول ۲ برای سوخت گاز طبیعی برای سیستم CCHP و سیستم سنتی ارائه شده است [۲۲].

۲-۵- مدل ریاضی تحلیل اقتصادی سیستم

مدل ریاضی تحلیل اقتصادی سیستم، برای دو شرایط محیطی ایده‌آل و واقعی در روابط ۱۵ تا ۲۰ ارائه شده است. این روابط هزینه‌های راه اندازی موتور، بویلر، چیلر و هزینه‌های مربوط به خرید سوخت، برق و فروش آن را بر حسب ظرفیت نامی تجهیزات ارزیابی می‌کنند. کلیه این هزینه‌ها توسط فاکتورهای بازافت سرمایه، نرخ بهره و نیز عمر تجهیزات در تکنیک یکنواخت سالانه، در طول یک سال، معادل سازی خواهند شد که در مراجع [۹، ۱۷] جزییات بیشتری مربوط به این تکنیک در تابع هدف ارائه شده است.

$$\begin{aligned} eta_{nom.cchp}(T, P, E_{nom.cchp}) &= \left(\frac{E_{nom.cchp}}{2 \cdot 65 \times E_{nom.cchp} + 21 \cdot 44} \right) \\ &\times \left(1 - 0 \cdot 01 \times \frac{T_{sur} - 25}{5 \cdot 5} \right) \\ &\times \left(1 - 0 \cdot 03 \times \frac{Z_{sur}}{303} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

T_{sur} دمای محیط و Z_{sur} ارتفاع از سطح دریا است. در واقع این رابطه، عملکرد خارج از نقاط طراحی واحد تولید توان با تغییر در شرایط محیطی را نشان می‌دهد. شاخص‌های فنی موتور گازسوز، از قبیل مقدار الکتریسیته تولیدی (E_{gen}) و گرمای تولیدی (H_{gen}) که تابع راندمان هستند، از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} E_{gen}(E_{nom.cchp}, eta_{nom.cchp}) &= E_{nom.cchp} \\ &\times eta_{nom.cchp} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} H_{gen}(E_{nom.cchp}, eta_{nom.cchp}) &= \frac{E_{nom.cchp}}{eta_{nom.cchp}} \\ &\times (1 - eta_{nom.cchp}) \end{aligned} \quad (12)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، گرما و الکتریسیته تولیدی از واحد تولید توان، به علت وابسته بودن به راندمان، با تغییر در شرایط محیطی، تغییر خواهند کرد؛ همچنین، با در نظر گرفتن رابطه (۱۳) برای محاسبه‌ی ضریب راندمان برای چیلر جذبی [۲۰]، مقدار سرمایش تولیدی توسط رابطه (۱۴) ارزیابی می‌شود.

$$\begin{aligned} COP_{chil}(C_{nom.cchp}) &= 10^{-8} \times C_{nom.cchp}^2 \\ &+ 7 \times 10^{-5} \times C_{nom.cchp} + 0 \cdot 6493 \end{aligned} \quad (13)$$

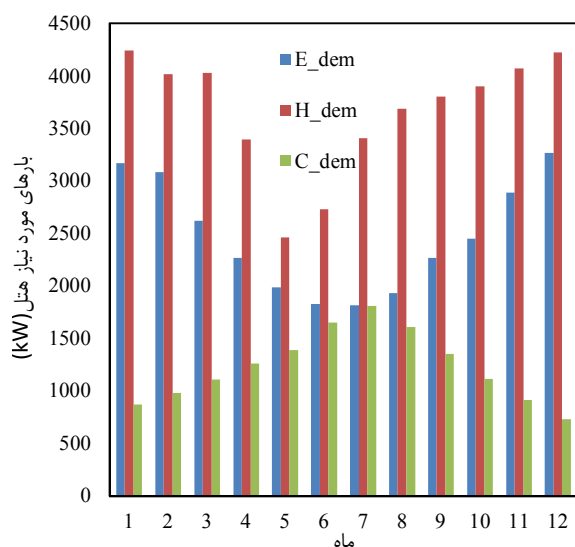
$$\begin{aligned} C_{cchp}(C_{nom.cchp}, T, P, E_{nom.cchp}) &= COP_{chil}(C_{nom.cchp}) \times H_{chil} \end{aligned} \quad (14)$$

که H_{chil} حرارت مورد نیاز چیلر جذبی، COP_{chil} ضریب عملکرد چیلر جذبی و C_{cchp} سرمایش تولیدی سیستم است.

۳- تابع هدف و پیاده‌سازی فرآیند بهینه‌سازی در مطالعه موردی

مطالعه موردی در مقاله پیش‌رو، مربوط به یک هتل در شهر تهران (با ارتفاع ۱۱۶۸ متر از سطح دریا)، با ۶ طبقه و هر طبقه ۱۵ اتاق به مساحت ۲۰ متر مربع است. نمودار بارهای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی مورد نیاز ساختمان در طول سال در شکل ۲ نمایش داده شده است.

ظرفیت بهینه تجهیزات سیستم CCHP، با روش یکنواخت سود سالیانه نسبی و الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود. روش یکنواخت سود سالیانه نسبی، مبتنی بر تکنیک یکنواخت سالیانه است که یکی از تکنیک‌های با ارزش تحلیل‌های اقتصادی است. در این روش، درآمدها و هزینه‌های سیستم به دریافت و پرداخت سالیانه تبدیل می‌شوند. از مزایای این تکنیک نسبت به دیگر تکنیک‌های اقتصادی، نتیجه یکسان محاسبات پروژه‌ها، با عمر متفاوت است. جدول ۳ تابع هدف و مدل ریاضی مربوط به این روش را نشان می‌دهد که جزئیات هزینه‌های اولیه، تعمیر و نگهداری و نیز هزینه اسقاطی تجهیزات از اطلاعات جدول ۱ مقاله [۱۴] استفاده شده است که همچنین برای جزئیات بیشتر می‌توان به مرجع [۲۱] مراجعه کرد که توسط نویسندگان ارایه شده است.



شکل ۲- بار الکتریکی، حرارتی و سرمایشی مورد نیاز ساختمان در طول یک سال

جدول ۲- فاکتور آلاینده‌های تولیدی برای یک سیستم CCHP با محرک اولیه موتور گازسوز، سیستم سنتی و نیز نیروگاه با محرک اولیه توربین گاز [۲۱ و ۲۲]

سیستم	نوع آلاینده	برای تولید الکتریسته $f_{P,E}(\text{lb}/\text{mmbtu})$	برای تولید حرارت $f_{P,H}(\text{lb}/\text{mmbtu})$
تولید همزمان (موتور گازسوز)	CO ₂	۱۲۱/۹	۱۱۷/۳
	CH ₄	۰/۲۵	۰/۰۰۲۶
	CO	۰/۵۱۷	۰/۰۸
	NO _x	۰/۴۵۲	۰/۰۱
	SO _x	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۵۷
سنتی (نیروگاهی)	CO ₂	۱۴۸	۱۱۷/۳
	CH ₄	۰/۰۰۲۸۷	۰/۰۰۲۶
	CO	۲/۵۸	۰/۰۸
	NO _x	۱۹۳/۸۳	۰/۰۱
	SO _x	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۵۷

$$\text{COST}_{\text{NGE}} = (-138 \cdot 71 \times \ln(E_{\text{nom}}) + 1727 \cdot 1) \times E_{\text{nom}} \quad (18)$$

$$\text{COST}_{\text{boil}} = 205 \times H_b^{0.87} \quad (19)$$

$$\text{COST}_{\text{Chil}} = 540 \times (C_{\text{nom}})^{0.872} \quad (20)$$

$$\text{COST}_{\text{NG}} = 0 \cdot 01054 \times (E_{\text{dem}} \text{ or } H_{\text{dem}}) \times y \quad (21)$$

$$\text{COST}_{b,e} = 0 \cdot 071667 \times E_b \times y \quad (22)$$

$$\text{INCOME}_{s,e} = 0 \cdot 071667 \times E_s \times y \quad (23)$$

جدول ۳- روابط مربوط به روش REUAC در فرآیند بهینه‌سازی سیستم CCHP [۲۱]

توضیحات	رابطه	توضیح
تابع هدف (سود یکنواخت سالیانه نسبی)	$EUAB_{trad} - EUAB_{CCHP}$	$REUAB \left(\frac{\$}{year} \right)$
درآمد یکنواخت سالیانه سیستم سنتی	$EUAB_{trad} = \sum_{j=1}^y [E_b \times \rho_{e,b} + m_f \times \rho_f + \sum_{p=1}^5 (m_{trad}^p \times \varepsilon_p)] \times y + \sum_{r=1}^4 [M + R - A]_r \times N_{c,r} \times n_r$	
درآمد یکنواخت سالیانه سیستم CCHP	$EUAB_{CCHP} = \sum_{j=1}^y [E_b \times \rho_{e,b} - E_s \times \rho_{e,s} + m_f \times \rho_f + \sum_{p=1}^5 (m_{CCHP}^p \times \varepsilon_p)] \times y + \sum_{r=1}^4 [M + R - A]_r \times N_{c,r} \times n_r$	
فکتور تبدیل هزینه اولیه سالیانه	$CRF \times COST$	R
هزینه سالانه اسقاطی	$SV \times \left[\frac{i}{(1+i)^k - 1} \right]$	A
فکتور باز یافت سرمایه	$\frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1}$	CRF

توضیحات:

۱. REUAB: سود یکنواخت سالیانه نسبی	۷. $\rho_{e,s}$: بهای فروش الکتریسیته	۱۳. R: فکتور تبدیل هزینه اولیه سالیانه
۲. EUAB: درآمد یکنواخت سالیانه	۸. $\rho_{e,b}$: بهای خرید الکتریسیته	۱۴. A: هزینه سالیانه اسقاط
۳. r: شمارنده نوع تجهیزات	۹. ρ_f : بهای سوخت گازی	۱۵. SV: هزینه اسقاط تجهیزات
۴. n: تعداد هریک از تجهیزات	۱۰. Nc: ظرفیت نامی تجهیزات	۱۶. COST: سرمایه اولیه تجهیزات
۵. ε_p : فکتور جریمه انتشار آلاینده	۱۱. k: دوره	۱۷. CRF: فکتور باز یافت سرمایه
۶. y: ساعات کاری سیستم	۱۲. M: هزینه تعمیر و نگهداری	۱۸. i: نرخ بهره

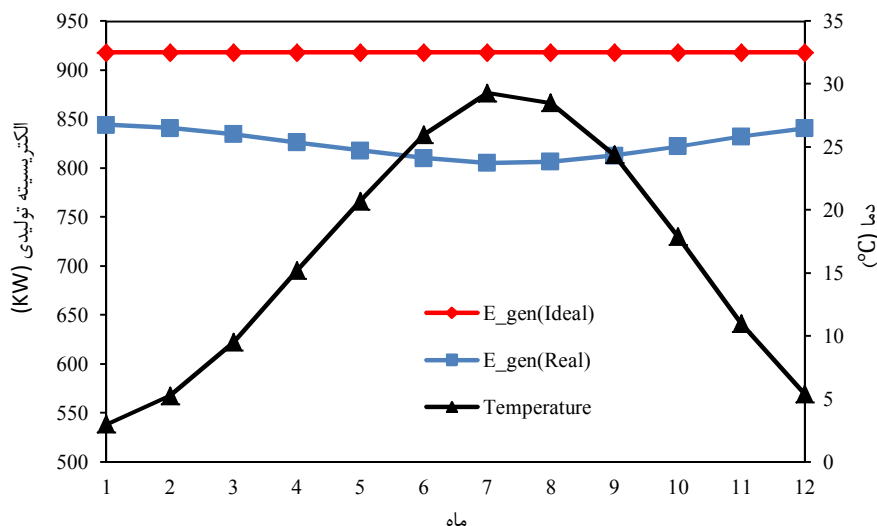
۴- بحث و نتایج

جدول ۴، نتایج بهینه‌سازی سیستم CCHP را با روش سود سالیانه نسبی برای هتل و در دو شرایط واقعی و ایده‌آل، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شرایط محیطی اثری بر ظرفیت نامی موتور گازسوز (۲۴۴۰ kW) نداشته، اما ظرفیت دیگر تجهیزات را تغییر داده است. علت این موضوع را می‌توان به سهم بالای ظرفیت واحد تولید توان در تغییر شرایط اقتصادی تابع هدف دانست که ترجیح می‌دهد با تغییر ظرفیت دیگر تجهیزات کمبودهای ناشی از کاهش الکتریسیته و گرمای تولید از موتور گازسوز را جبران نماید؛ زیرا که شرایط محیطی بر میزان حرارت و الکتریسیته تولیدی واحد تولید توان اثر مستقیم دارد.

جدول ۴- ظرفیت بهینه اجزای سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت در دو حالت واقعی و ایده‌آل با استفاده از روش REUAC

ایده‌آل	واقعی	
۲۴۴۰	۲۴۴۰	موتور گازسوز (kW)
۱۸۱۵	۸۲۰	بویلر پشتیبان (kW)
۱۸۰۸	۱۸۰۸	چیلر جذبی (kW)

در شکل ۳، میزان الکتریسیته تولیدی برای دو شرایط ایده‌آل و واقعی و تغییرات دمای محیط در طول سال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، درست است



شکل ۳- تغییرات دما و میزان الکتریسیته تولیدی توسط سیستم CCHP در دو حالت ایده‌آل و واقعی در طول سال

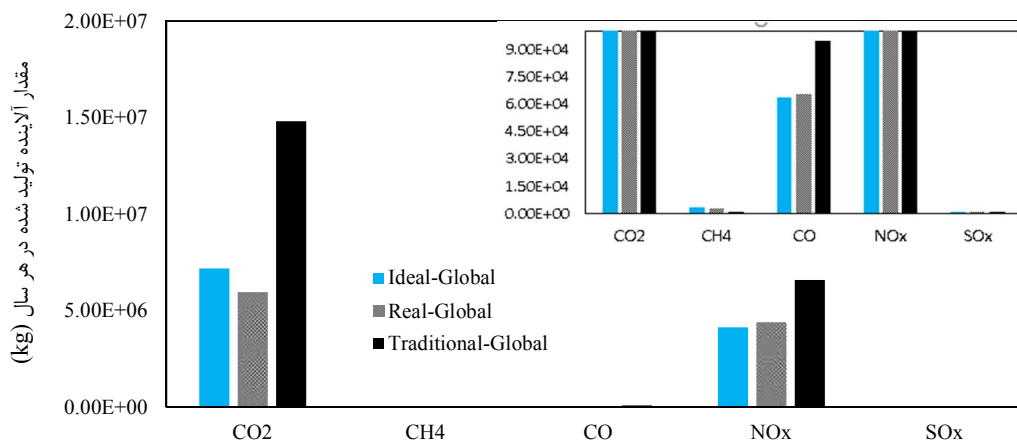
واقعی و نیز دو سناریوی سراسری و محلی، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. به منظور شفافیت موضوع، در ابتدا به مقایسه نتایج در دو حالت ایده‌آل و واقعی پرداخته می‌شود.

با مقایسه نتایج در دو شرایط ایده‌آل و واقعی در این دو شکل، مشاهده می‌شود که از ۵ نوع آلاینده مطرح شده، میزان سه آلاینده CO_2 ، CH_4 و SO_x در شرایط واقعی، $17/2\%$ ، $10/6\%$ و $16/7\%$ نسبت به میزان تولید این آلاینده‌ها در شرایط ایده‌آل، کمتر شده است که علت آن را می‌توان به کاهش ظرفیت بویلر کمکی مورد نیاز در شرایط واقعی دانست. در این حالت به دلیل ایده‌آل نبودن کارکرد موتور، میزان گرمای بیشتری از آن تأمین شده و در نتیجه سهم بیشتری در تأمین بار گرمایش هتل خواهد داشت که این تأثیر مستقیم بر ظرفیت بویلر پشتیبان می‌گذارد. هرچه ظرفیت بویلر کمتر باشد، سوخت مصرفی آن نیز کاهش یافته و به تبع آن، میزان تولید آلاینده‌ها کمتر می‌شود. این موضوع برای دو آلاینده‌ی دیگر نتیجه‌ای عکس دربردارد. زمانی که تأثیر شرایط محیطی بر کارکرد سیستم و موتور گازسوز در نظر گرفته شود، احتراق درون موتور نیز به صورت کامل انجام نمی‌پذیرد و باعث افزایش تولید گازهای CO و NO_x نسبت به زمانی خواهد شد که شرایط ایده‌آل و احتراق کامل انجام می‌پذیرد. این افزایش برای آلاینده CO در حدود $2/76\%$ و برای NO_x ، $5/67\%$ محاسبه شده است.

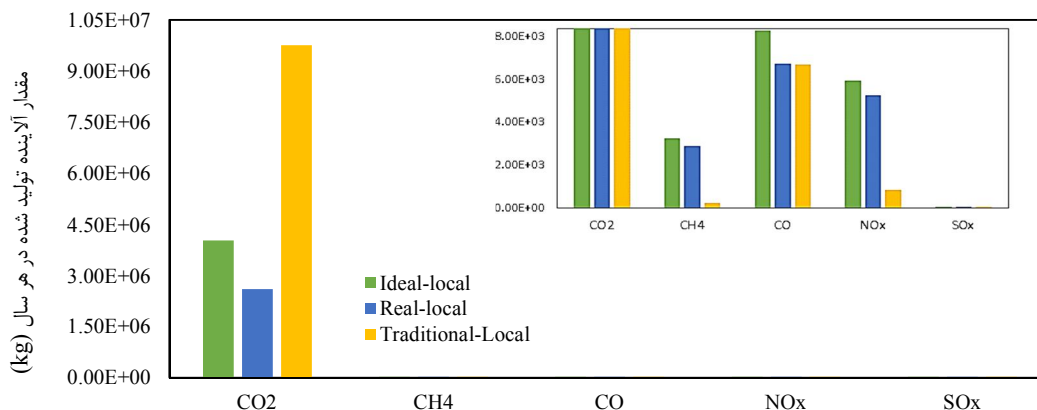
که تغییر شرایط محیطی ظرفیت بهینه موتور گازسوز را تغییر نمی‌دهد، ولی میزان الکتریسیته را به علت تغییر در بازده تغییر می‌دهد. از طرفی، علت عدم تغییر ظرفیت نامی موتور گازسوز در دو شرایط ایده‌آل و واقعی آن است که با این که در شرایط واقعی الکتریسیته موتور به طور میانگین حدود ۱۰ درصد نسبت به شرایط ایده‌آل کاهش یافته، اما از طرف دیگر حرارت بازیافت به طور میانگین ۱۸ درصد افزایش یافته است و از آنجا که بهینه‌سازی بر حسب معیار اقتصادی انجام شده است، می‌توان با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۲ پیوست شده، مشاهده کرد که نرم‌افزار با ثابت گرفتن ظرفیت موتور گازسوز بیشترین استفاده را از حرارت بازیافتی کرده است و ظرفیت بویلر را کاهش داده است و به دنبال آن الکتریسیته کسر شده را از شبکه خریداری کرده است؛ در حالی که اگر ظرفیت موتور را افزایش می‌داد، حرارت اتلافی افزایش می‌یافت و در صورت کاهش ظرفیت موتور باید جهت تأمین حرارت، ظرفیت بویلر را افزایش می‌داد که به صرفه نبوده است؛ همچنین ظرفیت چیلر جذبی به علت ثابت بودن بار سرمایشی و وجود تنها یک تجهیز جهت تأمین آن ثابت مانده است.

۴-۱- نتایج زیست محیطی

پس از فرایند بهینه‌سازی، نتایج مربوط به تولید انتشار آلاینده‌ها برای سیستم سنتی و CCHP، در دو شرایط ایده‌آل



شکل ۴- مقایسه میزان آلاینده‌های تولیدی در سیستم CCHP، در شرایط ایده‌آل و واقعی، به همراه سیستم سنتی، برای حالت سراسری



شکل ۵- مقایسه میزان آلاینده‌های تولیدی در سیستم CCHP، در شرایط ایده‌آل و واقعی، به همراه سیستم سنتی، برای حالت محلی

حالت سراسری، بسیار بیشتر از حالت محلی باشد؛ اما با کمی دقت در نتایج می‌توان مشاهده کرد که علی‌رغم اختلاف چشمگیر بین دو حالت سراسری و محلی برای چهار آلاینده نام برده شده، این اختلاف برای آلاینده CH₄ بسیار ناچیز (با مقدار ۲/۲۱٪) است. علت این تفاوت در مقادیر آلاینده‌ها را می‌توان این‌گونه بیان نمود که آلاینده CH₄ به علت ناکارآمد بودن شرایط احتراق و سرعت انتشار بالا در احتراق‌های کوچک (نظیر مصارف خانگی)، بسیار بیشتر از احتراق‌های بزرگ نظیر نیروگاه‌ها تولید می‌شود و عملاً نیروگاه تأثیر زیادی در تولید این نوع آلاینده ندارد؛ در نتیجه، میزان این آلاینده در حالت محلی و سراسری تفاوت چندانی نمی‌کند.

با مقایسه کلی نتایج در شرایط واقعی، مشاهده می‌شود که میزان آلاینده‌های تولیدی، علی‌الخصوص چهار آلاینده‌ی CO₂، CO، NO_x و SO_x، در سناریوی سراسری، بیشتر از میزان تولید آن‌ها در سناریوی محلی (محل مصرف) است، به طوری که مقدار آن‌ها به ترتیب ۵۶/۳٪، ۸۹/۷٪، ۹۹٪ و ۵۵/۸٪ بیشتر از مقادیر تولید شده در محل مصرف است. در سناریوی محلی، فقط میزان آلاینده‌های تولیدی ناشی از موتور گازسوز و بویلر کمکی در نظر گرفته می‌شود، اما در حالت سراسری میزان آلاینده‌های نیروگاه که کمبود برق تولیدی توسط سیستم را جبران می‌کند، نیز به آن اضافه می‌شود؛ در نتیجه امری بدیهی است که میزان آلاینده‌ها در

آلاینده‌های تولیدی این سیستم‌ها و نیز مشکل زیست محیطی سیستم حل خواهد شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک هکتار جنگل درخت کاج، توانایی جذب ۳۳۰۰ کیلوگرم کربن دی اکسید در سال را دارد [۲۳] و به عنوان یک نتیجه و تکیه بر این نکته، می‌توان با زیر کشت بردن حدود ۷۹۰ هکتار از این نوع درختان در محل نصب سیستم CCHP، بیشتر از ۹۹٪ میزان کل آلاینده‌های تولیدی سیستم CCHP با محرک اولیه موتورگازسوز (که مربوط به آلاینده CO₂ در حالت محلی است) را کاهش داد. این درحالی است که برای حالت سراسری، باید ۱۸۰۰ هکتار جنگل در محل تولید حامل‌های انرژی کشت نمود، تا ۵۷٪ کل آلاینده‌ها را (که مربوط به CO₂ می‌باشد)، کاهش دهد.

۴-۲- نتایج اقتصادی

به منظور تحلیل اقتصادی سیستم با تمرکز بر روابط جدول ۲، از تکنیک یکنواخت سالیانه استفاده شده است. شکل ۸ مجموع کل هزینه‌های سالیانه سیستم نامبرده (با موتور گاز-سوز ۲۴۴۰kW) را در مقایسه با سیستم سنتی نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً بیان شد، میزان الکتریسیته و حرارت تولیدی توسط موتور گازسوز در حالت ایده‌آل، در شکل‌های ۹ و ۱۰، و در حالت واقعی، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگر در فرآیند بهینه‌سازی شرایط محیطی در نظر گرفته نشود (تغییرات دما و فشار)، میزان الکتریسیته و حرارت تولیدی برای موتور گاز-سوز، در شرایط واقعی و ایده‌آل، متفاوت خواهد بود که این تفاوت باعث عدم اطمینان به نتایج اقتصادی و برآورد هزینه‌های سیستم می‌شود، زیرا همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در حالت ایده‌آل، سیستم تولید همزمان باعث کاهش ۱۹/۵۲٪ و در شرایط واقعی، ۲۰/۷۸٪ در هزینه، نسبت به سیستم سنتی خواهد شد که علت آن، کاهش در هزینه‌های مصرفی نظیر سوخت و الکتریسیته است.

۵- نتیجه گیری

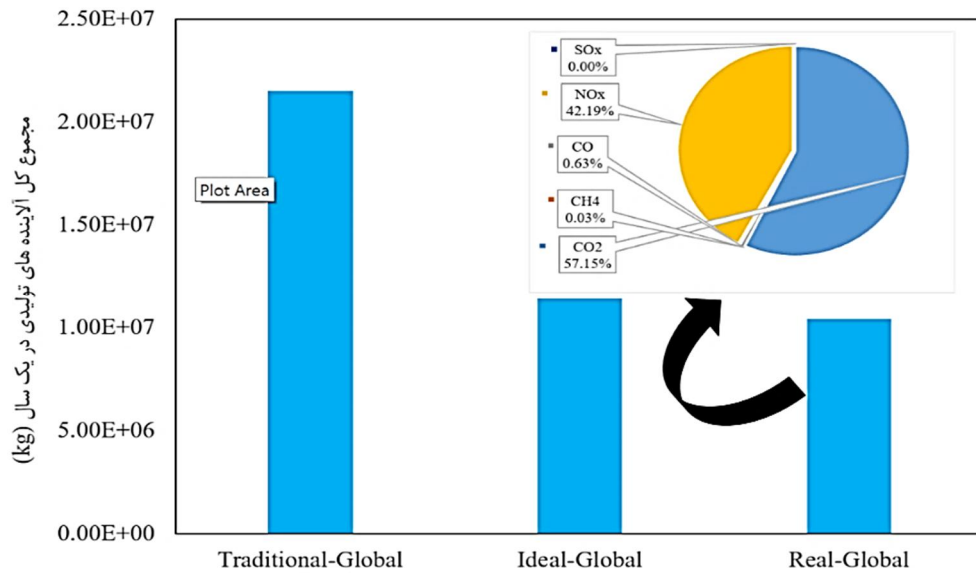
در این پژوهش، پس از فرآیند بهینه‌سازی سیستم CCHP، به بررسی انتشار پنج نوع آلاینده در دو حالت ایده‌آل (بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی) و واقعی (با در نظر گرفتن

نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵ نیز گواهی‌دهنده‌ی این موضوع می‌باشند که میزان تولید آلاینده CH₄ در سیستم‌های سنتی (نیروگاهی) بسیار پایین است.

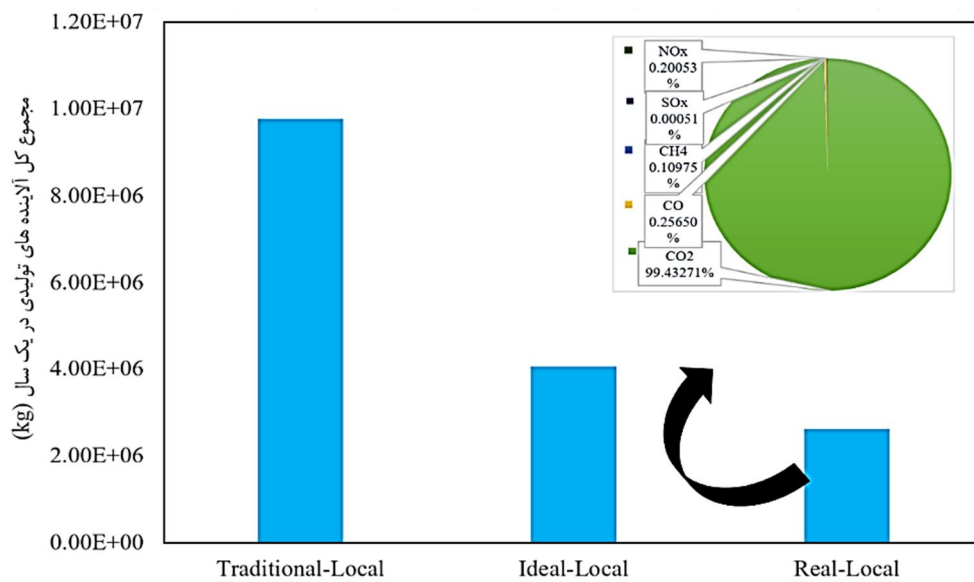
با مقایسه عملکرد انتشار آلاینده‌های سیستم CCHP، در دو حالت سراسری (شکل ۴) و محلی (شکل ۵) نسبت به سیستم سنتی (در شرایط واقعی)، مشاهده می‌شود که در حالت سراسری، میزان آلاینده‌های تولیدی CO₂، CO، NO_x و SO_x توسط سیستم CCHP به ترتیب ۵۹/۸٪، ۳۱٪، ۳۳/۴٪ و ۵۸/۶٪ کمتر از سیستم سنتی است، اما علی‌رغم توانایی سیستم در کاهش انتشار این چهار آلاینده‌ی تولیدی نسبت به سیستم سنتی، در کاهش آلاینده CH₄ موفق نبوده و آن را به میزان ۸۹/۳٪ افزایش داده است که دلیل این امر، همان طور که قبلاً ذکر شد، ناکارآمد بودن شرایط احتراق و سرعت انتشار بالا در احتراق‌های کوچک است. این عدم توانایی در سناریوی محلی، محدود به CH₄ نبوده و باعث افزایش آلاینده‌های CO و NO_x نیز شده است. دلیل این موضوع، وجود موتور گازسوز در محل مصرف است، زیرا بخش بزرگی از مقادیر این دو آلاینده، به وسیله موتورگازسوز تولید می‌شود و در نتیجه میزان آن‌ها در محل، نسبت به سیستم سنتی بیشتر شده است.

شکل ۶ و ۷، میزان کل آلاینده‌های تولیدی در سیستم CCHP، در حالت محلی و سراسری، برای در دو حالت ایده‌آل و واقعی نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، در شرایط ایده‌آل و حالت سراسری، حدود ۴۶/۹٪ و در حالت محلی ۵۸/۶٪ آلاینده کمتر از سیستم سنتی، تولید می‌شود. زمانی که شرایط محیطی در محاسبات در نظر گرفته شود، این میزان کاهش، ۵۱/۶٪ در حالت سراسری و ۷۳/۲٪ در حالت محلی نسبت به سیستم سنتی خواهد بود. دلیل بیشتر شدن این مقادیر در شرایط واقعی نسبت به شرایط ایده‌آل، افزایش حرارت اتلافی از موتور و در نتیجه نیاز به بویلر با ظرفیت کمتر و کاهش سوخت مصرفی توسط آن است.

نتیجه دیگری که می‌توان از این دو شکل گرفت، این است که در شرایط واقعی، ۵۷٪ از مجموع کل آلاینده‌های تولیدی سراسری سیستم CCHP را CO₂ تشکیل می‌دهد. این مقدار در محل مصرف به بیشتر از ۹۹٪ می‌رسد که اگر بتوان به طریقی فقط CO₂ تولید شده را از بین برد، بخش بزرگی از



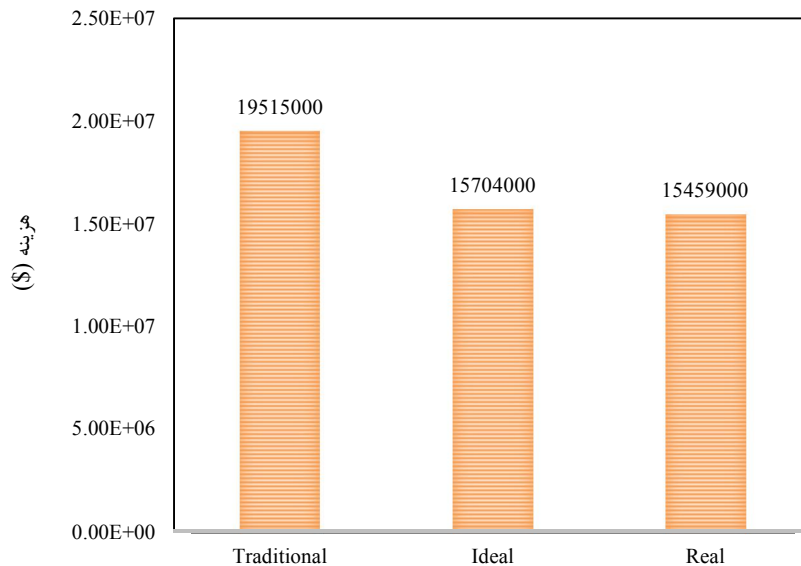
شکل ۶- میزان مجموع کل آلاینده‌های تولیدی و درصد آنها در سیستم CCHP در حالت سراسری



شکل ۷- میزان مجموع کل آلاینده‌های تولیدی و درصد آنها در سیستم CCHP در حالت محلی

زیاد می‌کند، اما به طور کلی، تأثیر بسزایی در کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد، به گونه‌ای که در حالت سراسری، آلاینده‌های CO₂، CO، NO_x و SO_x (در شرایط واقعی) به ترتیب ۵۹/۸٪، ۳۱٪، ۳۳/۴٪ و ۵۸/۶٪ کمتر از سیستم سنتی تولید می‌شود. از طرفی نتایج نشان داد که بخش عمده آلاینده‌های تولیدی سیستم (۵۷٪) کل آلاینده‌ها در حالت سراسری و بیشتر از ۹۹٪ کل آلاینده‌های تولیدی در حالت محلی)، تنها مربوط به

تغییرات دما و فشار محیط) در مقایسه با سیستم سنتی پرداخته شد. بهینه‌سازی با تابع هدف سه معیاره انرژی، اقتصادی و زیست محیطی تحت نام سود سالیانه نسبی و توسط الگوریتم ژنتیک انجام شد. سپس میزان آلاینده‌های تولیدی CO₂، CH₄، CO، NO_x و SO_x در سیستم CCHP، برای دو حالت سراسری و محلی، بررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم CCHP، آلاینده‌های NO_x و CO را در محل مصرف

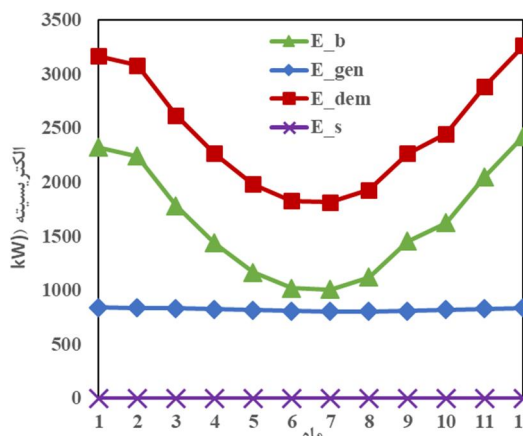


شکل ۸- مقایسه مجموع کل هزینه‌های سالانه سیستم CCHP نسبت به سیستم سنتی در شرایط واقعی و ایده‌آل

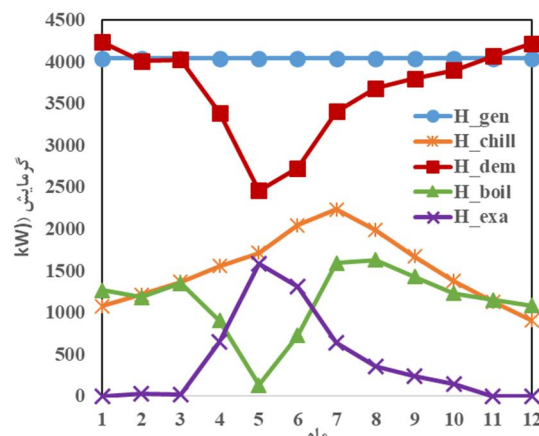
۶- پیوست

شکل ۱s و ۲s میزان الکتریسیته و حرارت تولیدی سیستم در شرایط ایده‌آل و شکل ۳s و ۴s در شرایط واقعی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم به طور کامل توانسته بارهای مورد نیاز را مطابق با استراتژی بیان شده پوشش دهد.

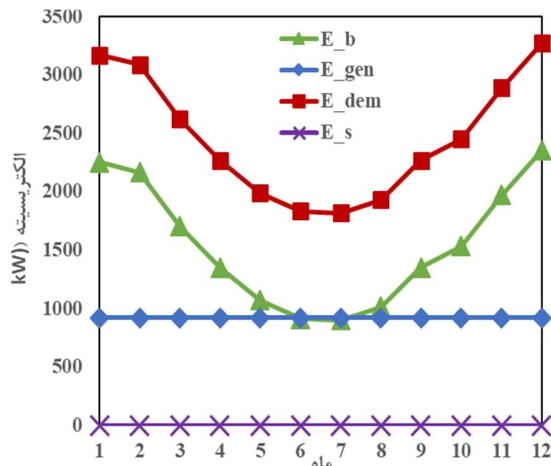
آلاینده CO_2 است که می‌توان با پوشش گیاهی مناسب، این بخش از آلاینده‌گی را به طور چشمگیری حذف نمود. نتایج اقتصادی نیز نشان داد که سیستم CCHP، باعث کاهش $20/78\%$ در هزینه‌ها نسبت به سیستم سنتی شده است. اگر در طراحی سیستم‌های CCHP اثر شرایط محیطی در نظر گرفته نشود، نتایج اقتصادی $1/56\%$ بیشتر محاسبه می‌شود که در ظرفیت‌های بالا مقدار خطای قابل توجهی را ایجاد می‌کند.



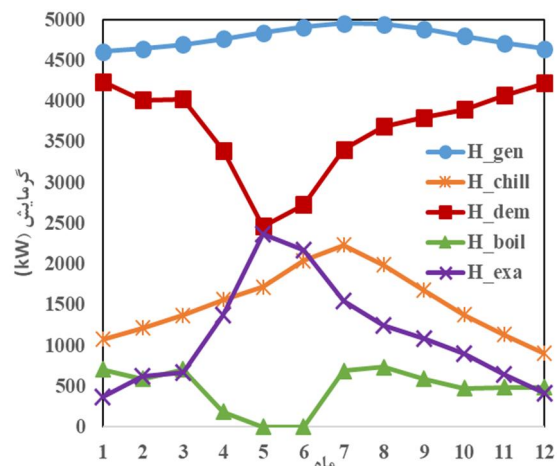
شکل ۱۰- میزان الکتریسیته تولیدی، مورد نیاز، خریداری شده و فروخته شده در شرایط ایده‌آل



شکل ۹- میزان حرارت تولیدی از موتور، مورد نیاز، تولیدی از بویلر پشتیبان و خروجی در شرایط ایده‌آل



شکل ۱۲- میزان الکتریسیته تولیدی، مورد نیاز، خریداری شده و فروخته شده در شرایط واقعی



شکل ۱۱- میزان حرارت تولیدی از موتور، مورد نیاز، تولیدی از بویلر پشتیبان و خروجی در شرایط واقعی

محلی	Local	فهرست علائم	علائم انگلیسی
جرم آلاینده تولیدی، kg	m	هزینه سالیانه اسقاط، \$/year	A
هزینه تعمیر و نگهداری، \$/year	M	سرما، kW	C
تعداد هر یک از تجهیزات	n	سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت	CCHP
ظرفیت نامی تجهیزات، kW	Nc	ضریب عملکرد	COP
فاکتور تبدیل هزینه اولیه سالیانه، \$/year	R	هزینه، \$	COST
سود یکنواخت سالیانه نسبی، \$/year	REUAB	فاکتور بازایافت سرمایه	CRF
هزینه اسقاط تجهیزات، \$/kW	SV	الکتریسیته، kW	E
ساعت کاری سیستم	y	درآمد یکنواخت سالیانه، \$/year	EUAB
فاکتور جریمه انتشار آلاینده، kg/\$	ε	راندمان، %	eta
بهای خرید و فروش، \$	ρ	ضریب تولید آلاینده، lb _s /mmbtu	f
	زیرنویس	سراسری	Global
جذبی	ab	حرارت، kW	H
خریداری شده	b	نرخ بهره، %	i
بویلر پشتیبان	boil	درآمد، \$	INCOME
چیلر	chil	دوره	k

- [8] Ghaebi H, Karimkashi S, Saidi MH (2012) Integration of an absorption chiller in a total CHP site for utilizing its cooling production potential based on R-curve concept. *Int J Refrig* 35(5): 1384-1392.
- [9] Ebrahimi M, Keshavarz A (2013) Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates. *Energy* 54: 291-301.
- [10] Sanaye S, Khakpaay N (2014) Simultaneous use of MRM (maximum rectangle method) and optimization methods in determining nominal capacity of gas engines in CCHP (combined cooling, heating and power) systems. *Energy*: 72: 145-158.
- [11] Wu Q, Ren H, Gao W, Ren J (2014) Multi-criteria assessment of combined cooling, heating and power systems located in different regions in Japan. *Appl Therm Eng* 73(1): 660-670.
- [12] Maerefat M, shafie P (2014) Multi-criteria evaluation of CCHP system under different operating strategies for an office building in Tehran using AHP method. *Modares Mechanical Engineering* 14(8): 37-48. (In persain)
- [13] Zeng R, Li H, Jiang R, Liu L, Zhang G (2016) A novel multi-objective optimization method for CCHP-GSHP coupling systems. *Energ Buildings* 112: 149-158.
- [14] Sanaye S, Ghafurian MM (2016) Applying relative equivalent uniform annual benefit for optimum selection of a gas engine combined cooling, heating and power system for residential buildings. *Energ Buildings* 128: 809-818.
- [15] Feng L, Dai X, Mo J, Shi L (2019) Performance assessment of CCHP systems with different cooling supply modes and operation strategies. *Energ Convers Manage* 192: 188-201.
- [16] Lin H, Yang C, Xu X (2020) A new optimization model of CCHP system based on genetic algorithm. *Sustain Cities Soc* 52: 101811.
- [17] Tavakoli Dastjerd F, Ghafurian MM, Shafiei Mayam MH (2016) Investigation of how to choose capacity of gas engine in optimization CCHP systems with GA; Case study: Water sports complex. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 48(1): 79-92. (In persain)
- [18] Ebrahimi M, Keshavarz A (2012) Climate impact on the prime mover size and design of a CCHP system for the residential building. *Energ Buildings* 54: 283-289.
- [19] Catalogue of CHP Technologies, US Environmental Protection Agency, (February 2014).
- مورد نیاز dem
اضافی (خروجی) extra
الکتریکی e
سوخت گازی f
تولیدی gen
گاز طبیعی NG
موتور گازسوز NGE
نامی nom
نوع آلاینده p
شمارنده نوع تجهیزات r
فروخته شده s
کمبود short
سیستم سنتی Trad

۸- مراجع

- [1] International Energy Outlook (IEO) 2016 and EIA, analysis of the impacts of the clean power plan. <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=527&t=1>
- [2] Ebrahimi M, Keshavarz A (2014) Combined cooling, heating and power, decision- making, design and optimization, chapters one and two, 1st edn.
- [3] Wu DW, Wang RZ (2006) Combined cooling, heating and power: A review. *Prog Energ Combust* 32(5): 459-495.
- [4] Haghifam MR, Manbachi M (2011) Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems. *Int J Elec Power* 33(3): 385-393.
- [5] Sanaye S, Meybodi MA, Shokrollahi S (2008) Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems. *Appl Therm Eng* 28(10): 1177-1188.
- [6] Ghasemzadeh H, Maerefat M, Azimi A (2013) Desing combined cooling, heating and power system for residential buildings in Tehran climate. *Modares Mechanical Engineering* 13(2): 109-122. (In persain)
- [7] Cardona E, Piacentino A (2003) A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas. *Appl Therm Eng* 23(13): 1665-1680.

- CCHP system for a hotel building. J Nat Gas Sci Eng 34: 305-317.
- [22] <https://greet.es.anl.gov/files/emission-factors-2014>, Accessed on 8 December 2018.
- [23] Vachnadze GS, Tiginashvili ZT, Tsereteli GV, Aptsiauri BN, Nishnianidze QG (2016) Carbon stock sequestered from the atmosphere by conditions of global warming. Ann Agrar Sci 14(2): 127-132.
- [20] Ghafurian MM, Niazmand H (2018) New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system. Int J Refrig 86: 89-106.
- [21] Sanaye S, Ghafurian MM, Tavakoli Dastjerd F (2016) Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based