تعیین اندازه بهینه تجهیزات سیستم تولید ترکیبی سرمایش، حرارت و قدرت

یاسر کیالاشکی[۱]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۹

چکیده:

سیستم ترکیبی سرمایش، حرارت و قدرت (CCHP)، یک فناوری کارا در کاهش مصرف انرژی اولیه و انتشار آلودگی‌های دی‌اکسید کربن از طریق تولید همزمان حرارت، سرما و برق از یک منبع سوختی یکسان است. در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی اقتصادی برای محاسبه اندازه‌های بهینه اجزای مختلف یک سیستم CCHP توسط نظریه برنامه‌ریزی ریاضی خطی توسعه داده شده است. سناریوهای امکان فروش برق به شبکه و عدم امکان فروش برق به شبکه برای ارزیابی عملکرد مدل در ساختمانی در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در صورت فروش برق، هم برق اضافی و هم حرارت اضافی از حالت بدون فروش برق باارزش‌تر هستند. این موضوع از طریق ترتیب فروش به شبکه و تغذیه به چیلر جذبی صورت می‌گیرد که درنتیجه، با فروش برق، اندازه‌های بهینه واحد CHP و و چیلر جذبی افزایش و اندازه بهینه چیلر الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه بهینه سیستم CCHP براساس موتور احتراق داخلی نسبت به دیگر فناوری ها بزرگترین است زیرا پایین‌ترین هزینه سرمایه‌ای را دارد.

کلمات کلیدی:

سیستم CCHP، مدل بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی، ساختمان

۱) کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف yaserkia@yahoo.com

مقدمه

انرژی یکی از تاثیرگذارترین عوامل در بخش‌های اقتصادی و اجتماعی یک کشور است. کاهش سریع نسبت ذخایر منابع انرژی فسیلی به تولید آن، افزایش مصرف انرژی (امنیت انرژی) و آلودگی‌های زیست‌محیطی (تغییر آب‌وهوایی) نگرانی‌های جدی و اصلی جهانی می‌باشد. در همین راستا، تقاضای جهانی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و سیستم‌ها و شکل‌های انرژی بدون آلودگی یا با آلودگی کمتر رشد کرده است. این نیاز، جهان را به سمت سیستم انرژی غیر متمرکز شامل سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (RE[1]) و فناوری کربن کم (LCT[2]) مانند تولید ترکیبی سرما، حرارت و برق (CCHP[3]) هدایت کرده است.

طبق اطلاعات آژانس بین‌المللی انرژی، بخش ساختمان در جهان در سال ۲۰۱۱ حدود ۳۴/۷ درصد مصرف انرژی کل را تشکیل می‌دهد که بزرگترین سهم را در مصرف انرژی کل جهان نسبت به بخش‌های اصلی دیگر (صنعت و حمل‌ونقل) دارد[۱۲]. همچنین طبق اطلاعات ترازنامه انرژی ایران، در سال ۱۳۹۰ بخش ساختمان ۳۷/۰۸ درصد مصرف انرژی کل ایران را تشکیل می‌دهد به طوری که در طول دو دهه، سهم ساختمان در مصرف انرژی نهایی در ایران به میزان ۲۱/۵۹ درصد رشد کرده است (جدول۱). یکی از مشکلات بخش انرژی ایران، میزان تلفات بالای انرژی در شبکه‌های توزیع و انتقال برق است به طوری که از مجموع ۵۶۱۸۱ مگاوات تولید برق در سال ۱۳۸۸ مقدار ۱۷/۰۴ درصد یعنی ۹۵۷۳ مگاوات در شبکه‌های توزیع و انتقال برق اتلاف گشته است[۳]. بنابراین یکی از راه‌حل‌ها برای حذف و یا حداقل کردن ناکارایی‌های شدید توزیع و انتقال برق در ایران، استفاده از سیستم‌های غیرمتمرکز تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد.

جدول ۱) درصد مصرف انرژی نهایی توسط بخش‌های مختلف در ایران[۵]

مصرف انرژی نهایی بخش‌ها(٪)	۱۹۹۰	۲۰۱۰	نسبت (٪)
ساختمان	۳۰/۵۰	۳۷/۰۸	۲۱/۵۹
صنعت	۲۸/۱۱	۲۴/۶۱	-۱۲/۴۳
حمل‌ونقل	۲۳/۹۵	۲۵/۵۵	۶/۶۷
کشاورزی	۷/۳۹	۳/۹۸	-۴۶/۲۰
مصارف دیگر	۱۷/۴۵	۱۲/۷۶	-۲۶/۸۵

1) Renewable Energy
2) Low Carbon Energy
3) Combined cooling, Heat and Power

هدف تعیین اندازه این است که یک سیستم به گونه‌ای طراحی شود که پارامترهای اصلی مانند اندازه اجـزای مختلـف سیستم تولید همزمان به طور بهینه تعریف شود. مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است. در مطالعه [۱۳] برای یک مجموعه فروشگاهها سیستم تولید همزمان مورد ارزیابی قرار گرفته شده است، یک مدل ریاضیاتی به منظور محاسبه اندازه بهینه سیستم CHP توسعه داده شده و ارزیابی‌ها براساس ملاحظات کارایی انرژی و ملاحظـات اقتصـادی انجـام شـد. در مقاله [۱۵] دو گزینه CHP معمول به نام موتور گازی و پیل سوختی برای ساختمان‌های مسکونی تحلیل شدند. برای هـر سیستم دو مود عملیاتی شامل عملیات هزینه-کمینه و عملیات آلودگی ـ کمینه با بکار بردن یک مـدل ارزیـابی و برنامـه-ریزی برای سیستم‌های CHP ساختمان مسکونی در نظر گرفته شد. نتایج بررسی نشان داد که سیستم پیل سوختی بـرای ساختمان مسکونی مورد بررسی، از هر دو نظر اقتصادی و زیست‌محیطی گزینه بهتری است. شکل‌بنـدی بهینـه تاسیسـات یک ساختمان تجاری مشخص، با انتخاب اندازه‌ها و تعـداد سیسـتم‌هـای تولیـد همزمـان و تجهیـزات کمکـی بـر اسـاس تقاضاهای سالانه برق، گرمایش و سرمایش می‌تواند محاسبه شود. هدف مقاله [۷] این است که سودبخشـی سیسـتم‌هـای CHP برای کاربرد ساختمان مسکونی را ارزیابی کند. یک سیستم CHP یکپارچه شامل یک محرک اولیه، یـک سیسـتم ذخیره انرژی الکتریکی، یک سیستم ذخیره حرارتی و یک بویلر اضافی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، یک تحلیل ترمو-اقتصادی انجام می‌شود. به منظور تعریف اندازه بهینه اجزای سیستم یکپارچه CHP، کد توسعه داده شده، سودبخشی و صرفه‌جویی انرژی اولیه نسبت به تولید جدا از هم برق و حرارت ارزیابی می‌کند.

تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که می‌تواند برای تعیین اندازه سیستم‌های انرژی به کار رود ماننـد روش حداکثرسـازی روش مستطیلی (MR)، برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، برنامـه‌ریـزی غیـر خطـی ترکیبـی عـدد صحیح (MINLP)، منطق فازی (FL)، و الگوریتم‌های ژنتیک (GA).

در مطالعه [۱۴]، یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط برای یافتن راه‌حل بهینه استفاده شـد. شـکل‌بنـدی بهینـه تجهیزات سیستم و مود عملیاتی بهینه براساس روش هزینه سالانه برای نصب سیستم تولیدهمزمان یک بیمارستان و یک گروه آپارتمان‌ها در سئول کره جنوبی محاسبه شد. [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی خطی قطعی[1] را توسـعه داد کـه ایـن مـدل هزینه‌های سالانه سیستم را با درنظر گرفتن اندازه سیستم کمینه می‌کند. تحقیق با درنظر گرفتن فنـاوری هـای پرکـاربرد شامل موتور احتراق داخلی، موتور استرلینگ و پیل‌های سوختی برای این نوع کاربرد انجام شد. نتیجه مطالعه این بـود کـه تقاضاهای برق و حرارتی ورودی‌های ضروری برای هر مدل انتخاب انـدازه هسـتند و فنـاوری هـای مختلـف انـدازه‌هـای مختلفی را در مدل ایجاد می‌کنند.

همچنین تکنیک NLP و MINLP در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی استفاده شده است. یک روش برنامـه‌ریـزی بهینـه برای تاسیسات تولید همزمان براساس نظریه برنامه‌ریزی ریاضیاتی غیر خطی عدد صحیح آمیخته در مطالعـه [۶] پیشـنهاد

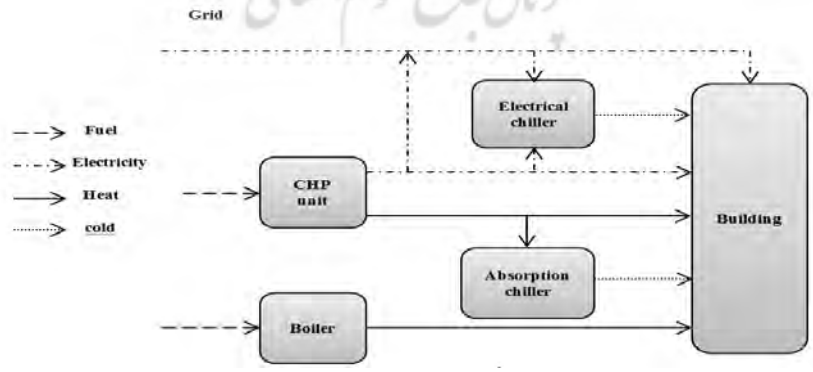
1) Deterministic

شده است. مقادیر بهینه ظرفیت‌های تجهیزات با درنظر گرفتن راهبرد عملیاتی محاسبه شده است. ثابت شده که اندازه بهینه و عملیات منطقی برای دستیابی به بیشترین مزیت‌های اقتصادی سیستم تولید همزمان بسیار مهم هستند. مقاله [۱۹] با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح آمیخته، اثر ذخیره حرارتی بلند مدت در عملیات بلند مدت سیستم CHP در یک شبکه حرارتی را تحلیل کرد. در مطالعه [۹] یک مدل بهینه‌سازی براساس روش برنامه‌ریزی غیرخطی، برای تحقیق بر روی راهبرد عملیاتی بهینه و مطالعه اقتصادی سیستم‌های CHP در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و مراکز بهداشتی به کار می‌رود. در پایان‌نامه [۱]، جهت استفاده از بیشینه از پتانسیل سیستم‌های CHP در ساختمان‌ها، مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیر خطی جهت انتخاب ظرفیت بهینه تعیین الگوی عملکردی بهینه سیستم میکروتوربین توسعه داده شده است.

مطالعات قبلی، برای ارزیابی سیستم CCHP چیلرهای الکتریکی و جذبی را به طور جدا از هم درنظر می‌گرفتند. در این مطالعه، یک سیستم CCHP که چیلر الکتریکی و جذبی را به طور همزمان در نظر می‌گیرد، معرفی می‌گردد و اندازه بهینه تجهیزات سیستم CCHP (شامل واحد CHP، بویلر، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی) محاسبه می‌شود. در این مقاله، تحلیل اقتصادی سیستم CCHP به صورت تفضیلی در یک ساختمان مسکونی در تهران انجام می‌شود. تقاضای سرمایش، گرمایش و برق برای یک ساختمان انجام شده است. مدل بهینه‌سازی با روش برنامه‌ریزی خطی توسعه داده شده است. سرانجام تحلیل حساسیت انجام می‌شود.

بیان مساله

در مدلسازی، ابتدا لازم است نمودار جریان انرژی ایجاد شود که در واقع بیانگر مدل مفهومی جریان انرژی است. نمودار جریان انرژی سیستم CCHP ساختمان که دارای تجهیزات مختلف، ممکن و جامع می‌باشد و در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱) نمودار جریان انرژی سیستم CCHP ساختمان

سیستم CCHP مورد بررسی شامل یک واحد CHP، یک بویلر کمکی، یک چیلر جذبی و یک چیلر الکتریکی است. واحد CHP با گاز طبیعی کار می‌کند تا با تقاضاهای حرارت و برق ساختمان مطابقت کند. برق روشنایی و تجهیزات از طریق ترکیب فعالیت مستقیم واحد CHP، برق خریداری شده از شبکه خارجی، به مصرف‌کننده ساختمان عرضه می‌شود. هر انرژی الکتریکی اضافی تولید شده توسط واحد CHP در تابستان در چیلر الکتریکی جهت تولید سرمایش استفاده می‌شود و مازاد آن در صورت امکان‌پذیری فروش به شبکه خارجی، فروخته می‌شود. در صورت ناکافی بودن برق تولیدی واحد CHP، برق از شبکه خریداری می‌شود. تقاضای حرارت ساختمان از طریق حرارت بازیافت شده حاصل از فعالیت واحد CHP و حرارت حاصل از بویلر کمکی تامین می‌شود. حرارت اضافی بازیافت شده توسط واحد CHP می‌تواند در تابستان در چیلر جذبی جهت تولید سرمایش استفاده شود. در صورت ناکافی بودن حرارت حاصل از واحد CHP، بویلر کمکی حرارت باقیمانده تقاضا را تامین می‌کند. تقاضای سرمایش توسط چیلر الکتریکی و چیلر جذبی مطابقت داده می‌شود. برق ورودی چیلر الکتریکی از واحد CHP یا خرید از شبکه، فراهم می‌شود و حرارت ورودی به چیلر جذبی نیز از سیستم بازیافت حرارت واحد CHP تامین می‌شود.

ارزیابی بر اساس بارهای ساعتی انجام می‌شود. بنابراین، همه پارامترها جز کارایی‌ها به مجموع در طول یک ساعت اشاره دارد. بعضی فرضیات موردنظر در این مطالعه به صورت زیر می‌باشد:

- کارایی‌های تجهیزات سیستم CCHP در بارهای جزئی مختلف مقادیر ثابتی هستند.
- همه تجهیزات سیستم CCHP می‌تواند به طور پیوسته از ۰ تا ۱۰۰ درصد کار کند.
- به دلیل اینکه سیاست‌ها و قیمت‌های برق ایران مشخص نیست، فرض می‌شود که برق اضافی تولید شده به شبکه فروخته نمی‌شود. اما در سناریوی دیگر فرض می‌کنیم که برق اضافی تولید شده می‌تواند به شبکه فروخته شود.

مدل ریاضیاتی

مدل ریاضیاتی مساله تعیین اندازه بهینه و راهبرد عملیاتی بهینه به صورت یک مدل کمینه‌سازی LP فرموله می‌شود. مقادیر بهینه ظرفیت تجهیزات به صورتی جستجو می‌شود که هزینه کل سالانه کمینه شود. هزینه سالانه انرژی به همراه هزینه سرمایه‌گذاری سالانه مقادیر اولیه تجهیزات، هزینه کل سالانه را به دست می‌دهد. در روابطی که در ادامه می‌آید علامت‌های **CHP**، **elechiller**، **abschiller** و **Boiler** به ترتیب نشان‌دهنده واحد (دستگاه) CHP یا تولید همزمان، چیلر الکتریکی، چیلر جذبی و بویلر کمکی است.

تابع هدف

تابع هدف مساله تعیین اندازه بهینه، کمینه‌سازی هزینه کل سالانه است که شامل هزینه سرمایه‌گذاری سالانه و هزینه

عملیاتی سالانه انرژی است:

$$\boldsymbol{Min}(\boldsymbol{C_{invest}} + \boldsymbol{C_{run}}) \quad (۱)$$

یا به عبارت دیگر:

$$\boldsymbol{Min}(\boldsymbol{C_{invest}^{CHP}} + \boldsymbol{C_{invest}^{elechiller}} + \boldsymbol{C_{invest}^{abschiller}} + \boldsymbol{C_{invest}^{Boiler}} + \boldsymbol{C_{run}^{CHP}} + \boldsymbol{C_{run}^{Boiler}} + \boldsymbol{C_{run}^{elechiller}} + \boldsymbol{C_{run}^{abschiller}} + \boldsymbol{C_{build}^{grid}} - \boldsymbol{I_{sale}^{grid}}) \quad (۲)$$

در رابطه بالا، $\boldsymbol{C_{invest}}$ و $\boldsymbol{C_{run}}$ به ترتیب نشان‌دهنده هزینه سرمایه گذاری سالانه و هزینه عملیاتی سالانه مربوط به تجهیزات مختلف سیستم تولید همزمان، $\boldsymbol{C_{build}^{grid}}$ هزینه برق خریداری شده از شبکه برای تجهیزات غیر تهویه مطبوع ساختمان و $\boldsymbol{I_{sale}^{grid}}$ درآمد حاصل از برق فروخته شده به شبکه برق است. به منظور گسترش دادن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اجزای سیستم در سال، سری‌های یکنواخت بازیافت سرمایه ($USCR$) استفاده می‌شود تا ارزش کنونی را به جریان پرداخت‌های سالانه مساوی در طول زمان و نرخ بهره مشخص تبدیل کند.

$$\boldsymbol{USCR} = \frac{\boldsymbol{i}(\boldsymbol{1}+\boldsymbol{i})^{\boldsymbol{N}}}{(\boldsymbol{1}+\boldsymbol{i})^{\boldsymbol{N}}-\boldsymbol{1}} \quad (۳)$$

$\boldsymbol{i}$ نرخ بهره و $\boldsymbol{N}$ طول عمر تجهیزات است. در معادلات زیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه واحد CHP، بویلر کمکی، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی توصیف می‌شود. این معادلات در واقع فرایند گسترش هزینه اولیه (براساس به حساب آوردن ارزش زمانی پول) در طول زمان عمر سیستم است. بنابراین:

$$\boldsymbol{C_{invest}^{CHP}} = \boldsymbol{C_{c}^{CHP}} \times \boldsymbol{C_{p}^{CHP}} \times \boldsymbol{USCR} \quad (۴)$$

$$\boldsymbol{C_{invest}^{Boiler}} = \boldsymbol{C_{c}^{Boiler}} \times \boldsymbol{C_{p}^{Boiler}} \times \boldsymbol{USCR} \quad (۵)$$

$$\boldsymbol{C_{invest}^{elechiller}} = \boldsymbol{C_{c}^{elechiller}} \times \boldsymbol{C_{p}^{elechiller}} \times \boldsymbol{USCR} \quad (۶)$$

$$\boldsymbol{C_{invest}^{abschiller}} = \boldsymbol{C_{c}^{abschiller}} \times \boldsymbol{C_{p}^{abschiller}} \times \boldsymbol{USCR} \quad (۷)$$

$\boldsymbol{C_c}$ نشان‌دهنده هزینه تجهیزات مختلف سیستم تولید همزمان در اندازه یک واحد و $\boldsymbol{C_p}$ بیانگر ظرفیت تجهیزات مختلف سیستم است. هزینه‌های راه‌اندازی شامل هزینه‌های عملیاتی و نگهداری است و برای چیلر جذبی هزینه راه‌اندازی فقط شامل هزینه‌های نگهداری است. این معادلات به صورت زیر هستند:

$$\boldsymbol{C_{run}^{CHP}} = \sum_{\boldsymbol{m=1}}^{\boldsymbol{12}} \sum_{\boldsymbol{d=1}}^{\boldsymbol{1}} \sum_{\boldsymbol{h=1}}^{\boldsymbol{24}} \frac{\boldsymbol{E_{sale}^{CHP}} + \boldsymbol{E_{build}^{CHP}} + \boldsymbol{E_{elechiller}^{CHP}}}{\boldsymbol{\eta_{e}^{CHP}}} \times \boldsymbol{P_{NG}} + \sum_{\boldsymbol{m=1}}^{\boldsymbol{12}} \sum_{\boldsymbol{d=1}}^{\boldsymbol{1}} \sum_{\boldsymbol{h=1}}^{\boldsymbol{24}} \left(\boldsymbol{E_{sale}^{CHP}} + \boldsymbol{E_{build}^{CHP}} + \boldsymbol{E_{elechiller}^{CHP}}\right) \times \boldsymbol{c_{m}^{CHP}} \quad (۸)$$

$$C_{run}^{Boiler} = \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\frac{H_{build}^{Boiler}}{\eta_{th}^{Boiler}\times\alpha}\times P_{NG} + \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(H_{build}^{Boiler}\right)\times c_m^{Boiler} \quad (۹)$$

$$C_{run}^{elechiller} = \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(E_{elechiller}^{grid}\right)\times P_{purch,ele} + \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(R_{build}^{elechiller}\right)\times c_m^{elechiller} \quad (۱۰)$$

$$C_{run}^{abschiller} = \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(R_{build}^{abschiller}\right)\times c_m^{abschiller} \quad (۱۱)$$

E_{sale}^{CHP} مقدار برق فروخته شده توسط سیستم CHP به شبکه، E_{build}^{CHP} مقدار برق داده شده از سیستم تولید همزمان به تجهیزات غیرتهویه مطبوع ساختمان، $E_{elechiller}^{CHP}$ مقدار برق داده شده از سیستم تولید همزمان به چیلر الکتریکی، η_e^{CHP} کارایی الکتریکی واحد CHP، P_{NG} قیمت گاز طبیعی، H_{build}^{Boiler} حرارت داده شده از بویلر کمکی به ساختمان، η_{th}^{Boiler} کارایی حرارتی بویلر، α ضریب تبدیل $\frac{m^3}{kWh}$ گاز طبیعی، $E_{elechiller}^{grid}$ برق خریداری شده از شبکه برای چیلر الکتریکی، $P_{purch,ele}$ قیمت برق خریداری شده از شبکه، $R_{build}^{elechiller}$ سرمایش عرضه شده از چیلر الکتریکی به ساختمان و $R_{build}^{abschiller}$ سرمایش عرضه شده از چیلر جذبی به ساختمان هستند. همچنین c_m نشان‌دهنده هزینه نگهداری یک واحد تولید مربوط به تجهیزات مختلف سیستم تولید همزمان است. هزینه برق خریداری شده از شبکه برای تجهیزات غیر تهویه‌مطبوع ساختمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_{build}^{grid} = \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(E_{build}^{grid}\right)\times P_{purch,ele} \quad (۱۲)$$

E_{build}^{grid} برق خریداری شده از شبکه برای تجهیزات غیرتهویه مطبوع ساختمان است. درآمد حاصل از فروش برق اضافی به شبکه به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$I_{sale,ele} = \sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{1}\sum_{h=1}^{24}\left(E_{sale}^{CHP}\right)\times P_{sale,ele} \quad (۱۳)$$

$P_{sale,ele}$ قیمت فروش برق به شبکه است.

محدودیت‌ها

محدودیت‌های مساله از دو بخش با نام‌های مشخصات عملکردی هر یک از تجهیزات و روابط جریان انرژی کل سیستم تشکیل می‌شود.

مشخصات عملکرد برای هر یک از تجهیزات به صورت زیر فرموله می‌شود:

واحد CHP

تولید برق و حرارت بازیافتنی از واحد CHP در هر زمانی نباید از حداکثر ظرفیت آن تجاوز کند. یا به عبارت دیگر:

$$\boldsymbol{E_{sale}^{CHP} + E_{build}^{CHP} + E_{elechiller}^{CHP} \leq C_p^{CHP}} \quad (۱۴)$$

$$\boldsymbol{H_{build}^{CHP} + H_{abschiller}^{CHP} \leq (E_{sale}^{CHP} + E_{build}^{CHP} + E_{elechiller}^{CHP}) \times HP \times \eta_{heat.rec}^{CHP}} \quad (۱۵)$$

H_{build}^{CHP} حرارت داده شده از واحد CHP به ساختمان، $H_{abschiller}^{CHP}$ حرارت داده شده از واحد CHP به چیلر جذبی، HP نسبت حرارت به قدرت سیستم CHP و $\eta_{heat.rec}^{CHP}$ کارایی سیستم بازیافت حرارت سیستم CHP هستند.

بویلر کمکی

تولید حرارت بویلر کمکی نباید از حداکثر ظرفیت آن تجاوز کند.

$$\boldsymbol{H_{build}^{Boiler} \leq C_p^{boiler}} \quad (۱۶)$$

چیلر الکتریکی

تولید سرمایش چیلر الکتریکی نباید از ظرفیت آن تجاوز کند.

$$\boldsymbol{R_{build}^{elechiller} \leq C_p^{elechiller}} \quad (۱۷)$$

$$\boldsymbol{\frac{R_{build}^{elechiller}}{E_{elechiller}^{chp} + E_{elechiller}^{grid}} = COP_{elechiller}} \quad (۱۸)$$

$COP_{elechiller}$ ضریب عملکرد چیلر الکتریکی است.

چیلر جذبی

تولید سرمایش چیلر الکتریکی نباید از ظرفیت آن تجاوز کند.

$$\boldsymbol{R_{build}^{abschiller} \leq C_p^{abschiller}} \quad (۱۹)$$

$$\boldsymbol{\frac{R_{build}^{abschiller}}{H_{abschiller}^{chp}} = COP_{abschiller}} \quad (۲۰)$$

$COP_{abschiller}$ ضریب عملکرد چیلر جذبی است. گروه دیگر از محدودیت‌ها، موازنه انرژی کل سیستم برای هر جریان انرژی است. در واقع، عرضه سرمایش، حرارت و برق از سیستم تولید همزمان و شبکه باید با تقاضاهای سرمایش، حرارت و برق ساختمان در هر ساعت از هر روز از ماه‌های مختلف سال مطابقت کند.

برق

$$E_{build}^{CHP} + E_{build}^{grid} \geq D_{ele} \quad (۲۱)$$

حرارت

$$H_{build}^{CHP} + H_{build}^{Boiler} \geq \frac{D_{heating}}{\eta_{th}^{heatingsystem}} + D_{hotwater} \quad (۲۲)$$

سرمایش

$$R_{build}^{abschiller} + R_{build}^{elechiller} \geq D_{cooling} \quad (۲۳)$$

در روابط بالا، D_{ele} تقاضای برق غیر تهویه مطبوع ساختمان، $D_{heating}$ تقاضای گرمایش ساختمان، $\eta_{th}^{heatingsystem}$ کارایی حرارتی سیستم گرمایشی ساختمان، $D_{hotwater}$ تقاضای آب گرم مصرفی ساختمان و $D_{cooling}$ تقاضای سرمایش ساختمان هستند.

معیار ارزیابی

در این مطالعه، نسبت صرفه‌جویی هزینه (CSR) به عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی اقتصادی استفاده می‌شود که سودبخشی سیستم $CCHP$ را بیان می‌کند و به صورت نرخ اختلاف هزینه کل انرژی سالانه بین $CCHP$ و سیستم سنتی به هزینه انرژی سالانه سیستم سنتی تعریف می‌شود و به صورت معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$CSR = \frac{C^{conv} - C^{CCHP}}{C^{conv}} \quad (۲۴)$$

در این رابطه، C^{conv} و C^{CCHP} به ترتیب هزینه انرژی سالانه سیستم سنتی و سیستم $CCHP$ هستند. هر دو هزینه انرژی عمدتا از ترکیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری (هزینه اولیه) و هزینه‌های راه‌اندازی تشکیل می‌شوند که تعریف آنها به صورت زیر است:

$$C^{conv} = C_{invest}^{Boiler} + C_{run}^{Boiler} + C_{build}^{grid} \quad (۲۵$$

$$C^{CCHP} = C_{invest}^{CHP} + C_{invest}^{elechiller} + C_{invest}^{abschiller} + C_{invest}^{Boiler} + C_{run}^{CHP} + C_{run}^{Boiler} + C_{build}^{grid} + C_{elechiller}^{grid} - I_{sale}^{grid} \quad (۲۶$$

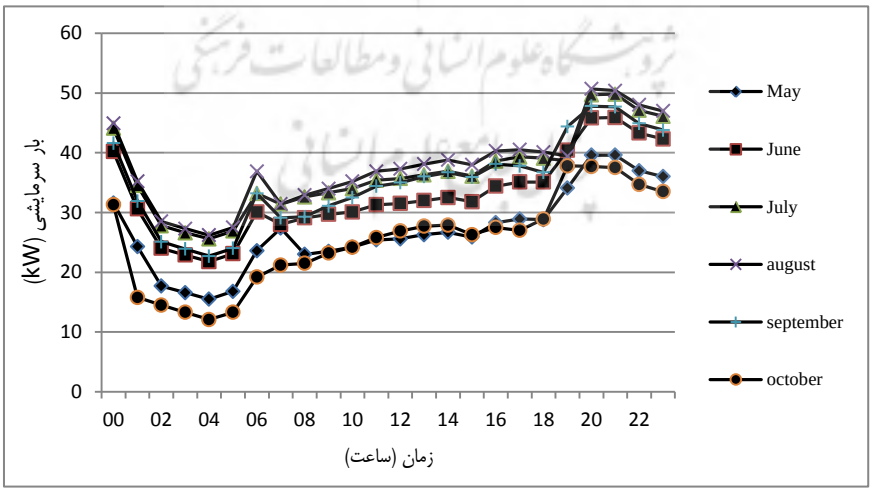
پارامترهای سرمایه‌گذاری بالا، هزینه‌های سرمایه‌گذاری شده سالانه هستند که با گسترش هزینه اولیه یک گزینه در طول عمر آن سیستم محاسبه می‌شود در حالی که ارزش زمانی پول را به شمار می‌آورد. این پارامترها در بخش‌های قبلی تعریف شده‌اند

نتایج و بحث یک مطالعه موردی

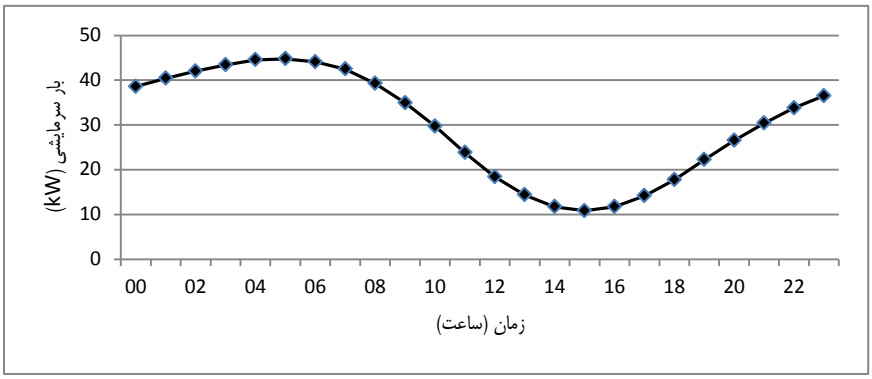
به منظور کاربرد مدل بهینه‌سازی پیشنهاد شده، به اطلاعات ساعتی مصرف انرژی ساختمان نیاز است. در این بخش، نرم‌افزار کریر نسخه ۴,۳ انتخاب شده است تا مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی یک ساختمان مسکونی در تهران را مورد تحلیل قرار دهد. همچنین باید بارهای الکتریکی غیر تهویه مطبوع و تقاضای آب گرم داخلی ساختمان محاسبه شود.

ساختمان مورد بررسی، ساختمان مسکونی سرو در شهر تهران، خیابان ولی عصر، خیابان سرو، پلاک ۴۸ واقع شده که متعلق به شرکت نفت می‌باشد. این ساختمان شامل ۵ طبقه و کاربری آن مسکونی می‌باشد. زیربنای هر طبقه از ساختمان موردنظر ۲۱۲ مترمربع و تعداد افراد مستقر در ساختمان حدودا ۲۵ نفر بوده و با توجه به بررسی‌ها، استفاده از ساختمان ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است.

با اعمال اطلاعات ساختمان ممیزی شده در نرم‌افزار، بارهای سرمایشی در ماههای مختلف سرمایش در ساعت‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین بار گرمایشی در یک روز از ماه ژانویه در شکل (۳) نشان داده شده است. برای محاسبه تقاضای انرژی آب داغ روش‌شناسی‌های مختلفی وجود دارد که در مقالات و گزارش‌های مختلفی تشریح شده است. در این مطالعه، از الگوریتم امروزی شرح داده شده در [۸] استفاده شده است. با استفاده از این روش‌شناسی در ساختمان مورد بررسی، تقاضای انرژی آب گرم مصرفی به صورت شکل (۴) نشان داده می‌شود. تقاضای الکتریکی روشنایی و تجهیزات به صورت مجموع نیازهای برق تک‌تک وسایل بر طبق پروفیل اشغال ساکنین تعریف می‌شود. نمودار پروفیل تقاضای برق به صورت شکل (۵) به دست می‌آید.

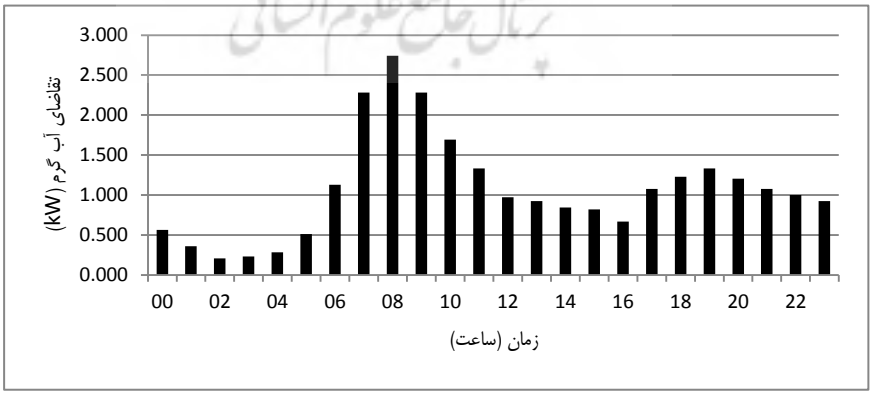


شکل ۲) بارهای سرمایشی در ساعت‌های مختلف یک روز ماه‌های سرمایش

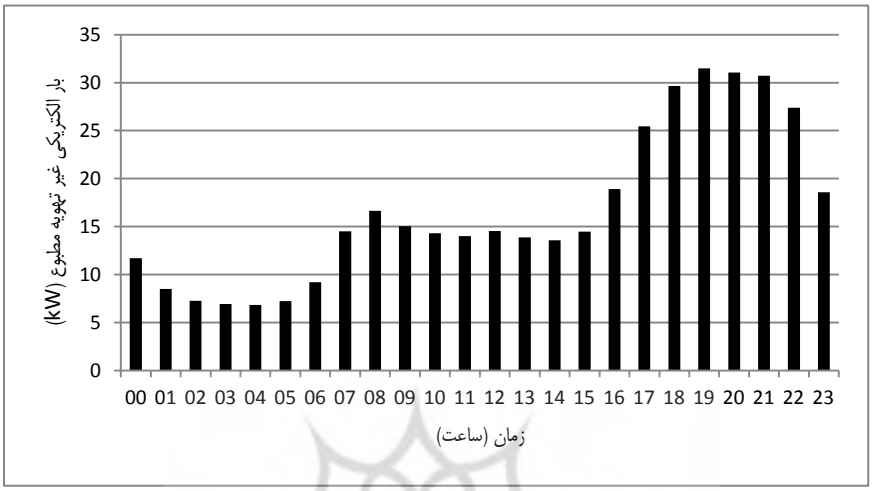


شکل ۳) بار گرمایشی در یک روز از ماه ژانویه

چهار فناوری مختلف برای واحد CHP در نظر گرفته شده است زیرا معمولا برای کاربردهای ساختمان مسکونی این چهار نوع سیستم معمول هستند. این فناوری‌ها شامل موتور استرلینگ (SE)، موتور احتراق داخلی (ICE)، پیل سوختیSOFC و پیل سوختی PEMFC هستند. دو موتور و دو پیل سوختی مذکور با مصرف سوخت (گاز طبیعی) به ترتیب انرژی مکانیکی و الکتریکی تولید می‌کنند. انرژی مکانیکی در دو موتور با ژنراتور تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. اطلاعات هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های نگهداری سیستم تولید همزمان و ویژگی‌های فنی سیستم‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. این اطلاعات از مقادیر متوسط از منابع مختلف [۱۰,۱۱,۱۶,۱۷] گرفته شده‌اند. تعرفه‌های گاز و برق، عوامل کلیدی در مطالعه اقتصادی برای سیستم‌های تولید همزمان هستند. قیمت‌های گاز و برق استفاده شده در مدل، براساس قیمت‌های متوسط انرژی در ایران در سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ استخراج شده‌اند[۴ و ۲]. قیمت‌های برق خریداری شده، گاز طبیعی و برق فروخته شده، به نرخ ثابت 0.15 $/kWh و 0.07 $/$m^3$ و 0.075 $/kWh در نظر گرفته می‌شوند. به منظور سادگی و همچنین فراهم کردن یک تصویر غیر عرضه‌کننده از اقتصاد سیستم‌های تولید پراکنده، تعرفه نرخ متوسط ثابت، قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.



شکل ٤) تقاضای انرژی آب گرم مصرفی



شکل ۵) بار الکتریکی غیر تهویه مطبوع

جدول ۲) مشخصات تجهیزات استفاده شده در مدل

تجهیزات	بازده	نسبت حرارت به قدرت	هزینه نگهداری ($/kWh)	هزینه سرمایه گذاری ($/kW)	عمر تجهیزات (سال)
موتور استرلینگ	۰,۲۵	۲,۸	۰,۰۰۲۵۲	۱۰۴۰	۲۰
پیل سوختی EMFC	۰,۴۵	۱,۱۱	۰,۰۰۹۴۵	۱۵۶۵	۳۰
پیل سوختی SOFC	۰,۵	۰,۹	۰,۰۰۹۴۵	۲۸۹۸	۳۰
موتور احتراق داخلی	۰,۴	۱,۲۵	۰,۰۰۴۶۶	۴۵۴	۲۰
بویلر کمکی	۰,۸	_	۰,۰۰۲۵۲	۶۶	۲۰
چیلر الکتریکی	۳	_	۰,۰۰۲۵۲	۱۴۹	۲۰
چیلر جذبی	۰,۷	_	۰,۰۰۲۵۲	۱۸۵	۲۰

به منظور ارزیابی مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، دو سناریوی شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا چگونگی عملکرد سیستم CCHP و مقدار هزینه‌های کلی سالانه مربوط به آن مشخص شود. جدول (۳) نتایج تعیین اندازه تجهیزات

مختلف سیستم CCHP برای تقاضا، با در نظر گرفتن چهار فناوری تولید همزمان را در سناریوی عدم امکان فروش برق به شبکه نشان می‌دهد. از جدول (۳) می‌توان دید که اندازه فناوی موتور احتراق داخلی نسبت به بقیه فناوری‌ها، بزرگترین است زیرا هزینه سرمایه‌گذاری آن کمترین است درحالی که به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری بالاترین برای فناوری پیل سوختی، اندازه آن کوچکترین است. این جدول همچنین هزینه سالانه و شاخص سودمندی را نشان می‌دهد. در صورت امکان فروش برق با قیمت ۰,۱ دلار به ازای کیلوات ساعت برق فروخته شده، اندازه تجهیزات در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۳) اندازه تجهیزات مختلف سیستم CCHP با در نظر گرفتن چهار فناوری تولید همزمان، در سناریوی عدم امکان فروش برق به شبکه

	موتور احتراق داخلی	موتور استرلینگ	پیل سوختی
واحد CHP	۲۰,۱	۹,۴	۶,۹
بویلر کمکی	۲۰,۲	۱۸	۳۷,۶
چیلر الکتریکی	۳۰,۶	۲۸,۹	۴۴,۵
چیلر جذبی	۲۰,۱	۲۱,۸	۶,۲
هزینه کلی سالانه	۱۲۷۰,۴	۱۵۴۶,۲	۱۶۴۶
شاخص سودمندی هزینه	۲۳,۲	۵,۹	۰,۵

جدول ٤) اندازه تجهیزات مختلف سیستم CCHP با در نظر گرفتن چهار فناوری تولید همزمان، در سناریوی فروش برق به شبکه

	موتور احتراق داخلی	موتور استرلینگ	پیل سوختی
واحد CHP	۳۶,۳	۱۲,۲	۷,۲
بویلر کمکی	–	۱۱,۲	۳۷,۳
چیلر الکتریکی	۱۵,۵	۲۳,۴	۴۴,۳
چیلر جذبی	۳۵,۲	۲۷,۳	۶,۴
هزینه کلی سالانه	۱۰۰۸	۱۵۲۸	۱۶۴۶
شاخص سودمندی هزینه	۳۹	۷,۶	۰,۵

نتایج جداول (۳) و (۴) نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن سناریوی فروش برق، شاخص سودمندی افزایش می‌یابد. این بدین دلیل است که فروش برق، تولید در محل بیشتری را اجازه می‌دهد و بنابراین، سیستم‌های با فناوری مختلف که کارایی الکتریکی بالاتری دارند می‌توانند برق اضافی بیشتری را به شبکه صنایع همگانی بفروشند.

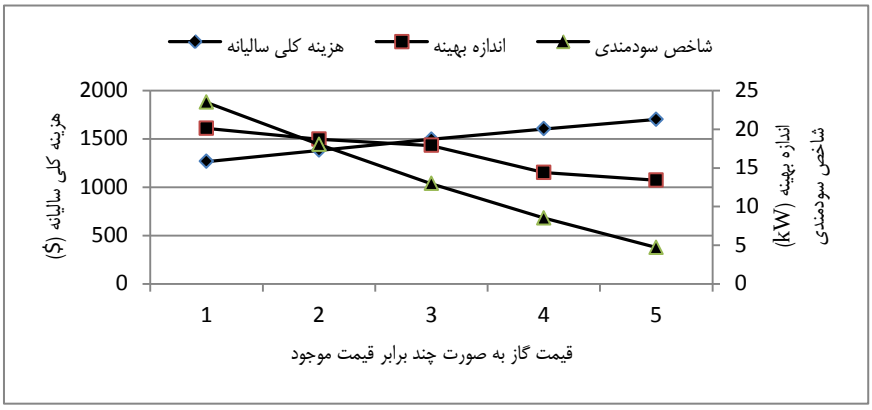
این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان بشدت به وجود امکان‌پذیری فروش برق به شبکه وابسته است بویژه در ساختمان‌های مسکونی که در مقایسه با دیگر بخش‌ها، تقاضای الکتریکی کمتری دارند. نکته دیگر این است که در صورت امکان فروش برق به شبکه نسبت به عدم فروش برق، هر اندازه‌ای از سیستم، شاخص سودمندی را افزایش نمی‌دهد. در واقع، در صورت امکان فروش برق، اندازه بزرگتر از اندازه بهینه، به دلیل افزایش اتلاف حرارت بدون استفاده، شاخص سودمندی کاهش می‌یابد. با اینکه هنوز در ایران امکان فروش برق وجود ندارد، ولی مسلما یکی از مشوق‌ها و انگیزه‌های توسعه سیستم‌های انرژی پراکنده و افزایش کارایی آنها، ایجاد چنین شرایطی است.

تحلیل حساسیت

یک تحلیل حساسیت انجام می‌شود تا اثرات پارامترهای کلیدی روی انتخاب سیستم‌های تولید همزمان را ارزیابی کند. ظرفیت بهینه سیستم‌های CCHP با استفاده از تحلیل حساسیت روی قیمت‌های گاز و برق، هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌ها، کارایی الکتریکی، قیمت برق فروشی و غیره انجام می‌شود. در ادامه، تحلیل روی فناوری موتور احتراق داخلی صورت می‌گیرد.

تحلیل حساسیت قیمت گاز طبیعی

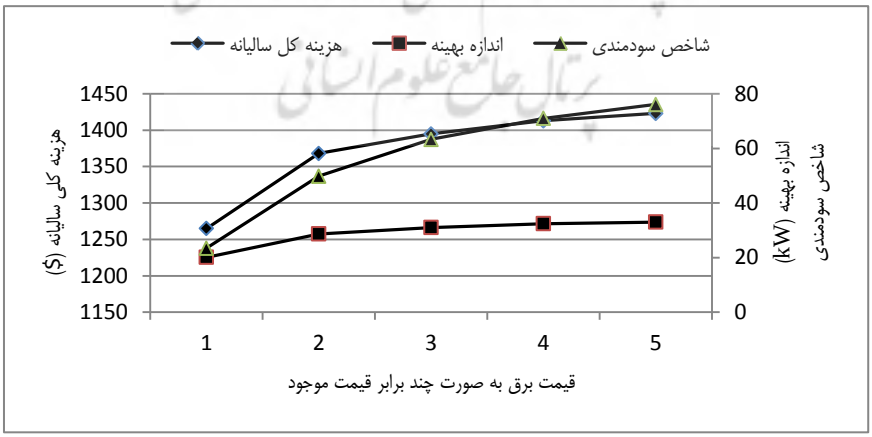
قیمت گاز طبیعی بسیار روی هزینه بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها تاثیر می‌گذارد و از آنجاییکه تقاضای جهانی برای انرژی رو به افزایش است و منابع انرژی محدود می‌شوند، این امر می‌تواند به تغییرات قیمت گاز طبیعی منجر شود. همچنین با توجه به اینکه در ایران چند برابر قیمت واقعی گاز طبیعی و برق، یارانه پرداخت می‌شود، یک تحلیل حساسیت مناسب قیمت این حامل‌های انرژی روی اندازه بهینه، هزینه کل سالانه و شاخص سودمندی سیستم‌های تولید همزمان می‌تواند برای کابرد این سیستم‌ها در ایران بسیار مفید باشد. شکل (۶) حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی سیستم‌های CCHP بر حسب قیمت‌های مختلف گاز طبیعی نسبت به قیمت کنونی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش قیمت گاز، هزینه‌های کلی سالانه افزایش می‌یابد و شاخص سودمندی بسیار افت می‌کند. در هر صورت، اثر تغییرات قیمت گاز روی اندازه واحد تولید همزمان بسیار کم است.



شکل ٦) حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی سیستم CCHP بر حسب قیمت‌های مختلف گاز طبیعی نسبت به قیمت کنونی

تحلیل حساسیت قیمت برق

قیمت برق عامل مهم دیگری است که به هزینه کل سیستم‌های انرژی تاثیر می‌گذارد و مزیت‌های اقتصادی نصب سیستم‌های تولید همزمان در ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. همچنین به سبب افزایش تقاضای برق، قیمت برق می‌تواند افزایش یابد و همانطوری که قبلا گفته شد، قیمت برق در ایران به دلیل یارانه، از قیمت واقعی تا چندین برابر قیمت واقعی کمتر است. شکل (۷) تحلیل حساسیت قیمت خرید برق را برای تقاضای مورد بررسی نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که با افزایش قیمت برق، هزینه سالانه افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان متوجه شد که با افزایش قیمت برق، اندازه بهینه سیستم نیز زیاد می‌شود. افزایش هزینه و اندازه بهینه به گونه‌ای است که دیده می‌شود شاخص سودمندی نیز بسیار افزایش می‌یابد.



شکل ۷) حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی سیستم CCHP بر حسب قیمت‌های مختلف برق نسبت به قیمت کنونی

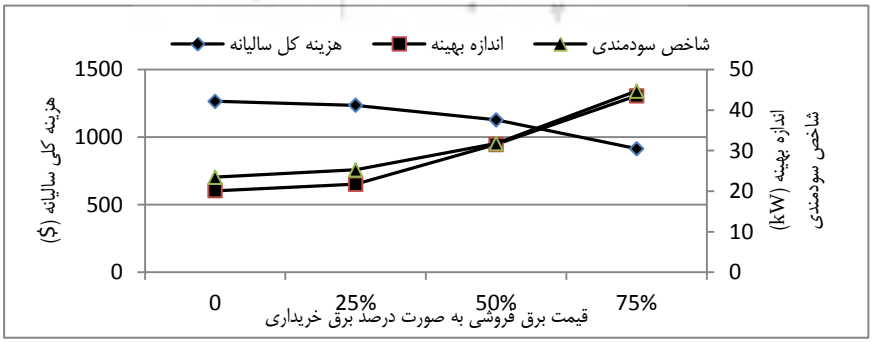
تحلیل حساسیت روی قیمت گاز و برق به طور همزمان

با توجه به اینکه با افزایش قیمت گاز و برق، شاخص سودمندی در مقابل هم تغییر می‌کند، مناسب است که تحلیل حساسیت روی قیمت گاز و برق به طور همزمان انجام شود. شکل (۸) حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی را بر حسب قیمت‌های مختلف حامل انرژی نسبت به قیمت کنونی نشان می‌دهد. این شکل بیان می کند که با افزایش قیمت گاز و برق به طور همزمان و با نسبت‌های برابر نسبت به قیمت کنونی، شاخص سومندی نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۸ حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی سیستم CCHP بر حسب قیمت‌های مختلف گاز و برق نسبت به قیمت کنونی به طور همزمان

تحلیل حساسیت قیمت برق فروشی

از آنجایی که بعضی از دولت‌ها اخیرا به منظور تشویق استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی و فناوری‌های کارا مانند سیستم تولید همزمان، برق اضافی تولیدی این سیستم‌ها را خریداری می‌کنند و ارزش آن رو به فزونی است. در شکل (۹) تحلیل حساسیت روی قیمت برق فروشی نشان داده شده است. از شکل می‌توان متوجه شد که با استفاده از قیمت بالاتر برق فروشی، هزینه‌های سالانه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و اندازه سیستم زیاد می‌شود. این امر بدین دلیل است که افزایش قیمت برق فروشی، تولید حرارت را خیلی باارزش‌تر و مناسب‌تر می‌کند و شاخص سودمندی افزایش می‌یابد.



شکل ۹) حساسیت هزینه سالانه، ظرفیت بهینه و شاخص سودمندی سیستم‌های CCHP بر حسب نسبت قیمت فروشی به قیمت برق خریداری کنونی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین اندازه بهینه سیستم‌های CCHP به کار رفت و از نظر اقتصادی مورد تحلیل قرار گرفت. مدل بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی توسعه داده شد. مدل می‌تواند ظرفیت بهینه تجهیزات سیستم CCHP (واحد CHP، بویلر، چیلر الکتریکی و چیلر جذبی) را اندازه‌گیری کند. یک تحلیل حساسیت انجام شد تا اثرات پارامترهای مختلف را روی پذیرش سیستم‌های CCHP در ساختمان بررسی کند. این مطالعه از طریق بهبود تغییرات ساعتی در تولید ترکیبی انرژی با درنظر گرفتن چیلر الکتریکی و جذبی به طور همزمان، نوآوری داشته است. نتایج زیر از تحلیل به دست آمد:

نتایج تعیین اندازه سیستم CCHP با فناوری های SE، ICE و PEMFC با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مورد توجه قرار گرفته است که PEMFC بالاترین هزینه کلی سالانه را در بین فناوری‌های مورد بررسی دارد. همچنین دیده می‌شود که شاخص سودمندی سیستم CCHP از ۲۳ درصد در حالت عدم امکان فروش برق، به تقریبا ۴۰ درصد در صورت فروش برق به شبکه، برای فناوری موتور احتراق داخلی می‌رسد. در صورت فروش برق به شبکه، با وجود زیاد شدن اندازه واحد CHP، اندازه چیلر الکتریکی کوچکتر و اندازه چیلر جذبی بزرگتر می‌شود. این امر بدین دلیل است که با شرایط فروش برق به شبکه، سیستم CCHP سعی می‌کند بیشتر برق را بفروشد و برای تقاضای سرمایش از حرارت سیستم CHP در چیلر جذبی استفاده کند و این برتری سیستم CCHP را بسیار خوب نشان می‌دهد که می‌تواند حرارت اتلافی را بسیار باارزش کند.

منابع

[۱] آرامی، میترا. (۱۳۹۰)، تحلیل جریان انرژی و آنالیز اقتصادی برای یک سیستم میکروCHP در ساختمان‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف.

[۲] شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، Www.ifco.org.

[۳] شرکت توانیر. (۱۳۸۹)، عملکرد سالانه، شرکت سهامی مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران.

[۴] شرکت توانیر. ۱۳۹۱، www.tavanir.org.ir.

[۵] وزارت نیرو. (۱۳۹۱)، ترازنامه انرژی ایران سال ۱۳۹۰.

[6] Beihong, Z., and Weiding, L., “An optimal sizing method for cogeneration plants”, Energy and Buildings, Vo. 38, No. 3, pp. 189–195, 2006.

[7] Bianchi, M., De Pascale, A., and Melino, F., “Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and Electric Energy Storage for residential application”, Applied Energy, Vol. 112, pp. 928–938, 2013.

[8] Burzynski, R., Crane, M., and Yao, R., (2010) "A review of domestic hot water demand calculation methodologies and their suitability for estimation of the demand for Zero Carbon houses", Proceedings of Conference: TSBE EngD Conference, TSBE Centre, University of Reading, Whiteknights Campus, RG6 6AF.

[9] Ezzatneshan, E., Arami, M., Parhizkar, T., Hosseni K., A., and Sattari, S., "Evaluation of optimum performance and economic analysis of micro CHP systems in different sectors in iran", International Journal of Energy & Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 1–10, 2014.

[10] Hashemi, R., A developed oflfine model for optimal operation of combined heating and cooling and power systems", Energy Conversion and Management IEEE transactions, Vol. 24, No. 1, pp. 222–229, 2009.

[11] Hawkes, A.D., and Leach, M.A., "On policy instruments for support of micro combined heat and power", Energy Policy, Vol. 36, pp. 2973–2982, 2008.

[12] Key world energy statistics. IEA (International Energy Agency). (2013).

[13] Kritsanawonghong, S., Gao, W., and Iamtrakul, P., "Feasibility Study of Optimal Sizing of Micro-Cogeneration System for Convenience Stores in Bangkok", Energy and Power Engineering, Vol. 6, pp. 69-81, 2014.

[14] Oh, S.D., Lee, H.J., Jung, J.Y., and Kwak, H.Y., "Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system", Energy, Vol. 32, No. 5, pp. 760–771, 2007.

[15] Ren, H., and Gao, W., "Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan", Energy and Buildings, Vol. 42, No 6, pp. 853–861, 2010.

[16] Ren, H., Gao, W., Zhou, W., and Nakagami, K., "Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan", Energy Policy, Vol. 37, No. 12, pp. 5484–5493, 2009.

[17] Sanaye, S., and Hajabdollahi, H., "4E analysis and multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA", P I Mech Eng E-J Pro, 2013, http://dx.doi.org/10.1177/0954408912471001.

[18] Shaneb, O.A., Coates, G., and Taylor, P.C., Sizing of residential -CHP systems", Energy and Buildings, 43, 1991-2001, 2011.

[19] Tveit, T., Savola, T., Gebremedhin, A., and Fogelholm, C., "Multi-period MINLP model for optimizing operation and structural changes to CHP plants in district heating networks with long-term thermal storage", Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 639–647, 2009.