

طراحی بهینه تجهیزات تأمین انرژی به روش هاب انرژی با در نظر گرفتن مشخصه کاری واحدهای CHP

رضا غفارپور^۱، علیمحمد رنجبر^۲

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت مقاله:

۹۵/۰۲/۰۷

چکیده:

ارائه نیروگاه‌های نسل جدید تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP) با بازده‌های بالا و اندازه‌های متنوع در دهه اخیر باعث شده است تا بسیاری از مراکز صنعتی و شهری جهان به تولید غیرمتمرکز توان الکتریکی با استفاده از گاز طبیعی روی بیاورند. در این مقاله، این دستاورد فناوری‌های جدید باهدف کاهش هزینه‌های تولید توان در یک دوره طولانی‌مدت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رشد روزافزون تمایل به استفاده از سیستم گرمایش ناحیه‌ای در سال‌های اخیر، در کنار پیشرفت‌های حاصل شده در زمینه فناوری مربوط به واحدهای CHP، باعث مطرح شدن هرچه‌بیش‌تر روش موسوم به «هاب انرژی» برای تأمین توان شده است. هاب انرژی روشی برای بهره‌برداری هم‌زمان از چند حامل مختلف انرژی برای تأمین بارهای موردنیاز الکتریکی، حرارتی و غیره است. در این روش، تمامی قابلیت‌های تجهیزات مختلف تأمین انرژی به‌طور بهینه برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، فرمول‌بندی جدید و جامعی برای طراحی بهینه تجهیزات تحت این روش معرفی می‌شود که برخلاف روش‌های معمول، مشخصه دقیق کاری واحدهای CHP را برای حل مسائل بهره‌برداری و طراحی بهینه به کار می‌گیرد. نتایج طراحی بر روی یک سیستم موردی ارائه شده و میزان کاهش در هزینه‌ها و تأثیر استفاده از مدل دقیق CHP در فرمول‌بندی مساله مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی:

هاب انرژی، تجهیزات تأمین انرژی، واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت، مشخصه کاری واحدهای CHP

مقدمه

در دهه‌های گذشته، باور عمومی بر بازده بالای تولید متمرکز انرژی در مقایسه با تولید پراکنده دلالت داشته است. با وجود اعتبار نسبی این مساله برای عصر حاضر، پیشرفت‌های موجود در طراحی توربین‌های گازی نسل جدید، تحولات عمده‌ای را در رویه عمومی تولید انرژی ایجاد کرده است. ارائه توربین‌های گازی امروزی در اندازه‌های متنوع (چند ده کیلووات تا چند صد مگاوات) و بازده‌های بالا یکی از دلایل گرایش به استفاده غیرمتمرکز از این ادوات در مراکز صنعتی و بخصوص در حالتی است که این توربین‌ها در واحدهای موسوم به تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP^۱) مورد استفاده قرار گیرند. در حالت کلی، یکی از عیوب جدی واحدهای تولید انرژی، اتلاف بخش بزرگی از انرژی به‌صورت گرماست. واحدهای CHP با فناوری خاص خود، این مقدار انرژی را به‌شکل کارآمدی برای تولید حرارت قابل استفاده برای مصارف مختلف به‌کار می‌گیرند و به‌همین دلیل، بازده کلی این واحدها به مقادیری بیش‌تر از ۷۰ الی ۹۰ درصد می‌رسد. این در حالی است که بازده کلی نیروگاه‌های متمرکز نوعی چیزی در حدود ۳۵ الی ۴۰ درصد است [۱۰]. موارد فوق‌الذکر باعث بکارگیری روزافزون واحدهای CHP مذکور و به‌طور کلی، واحدهای تولید انرژی گازی در سال‌های اخیر در بسیاری از نقاط جهان شده است.

یکی از فناوری‌های دیگری که از گاز طبیعی برای تأمین انرژی استفاده می‌کند و در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سیستم حرارتی متمرکز و یا به‌اصطلاح عام‌تر سیستم گرمایش ناحیه‌ای^۲ در بسیاری از مراکز صنعتی و حتی شهری است. در این فناوری، حرارت مورد نیاز بخش‌های مختلف از یک مجموعه به‌صورت متمرکز در واحدهای موسوم به کوره گرمایی (furnace) تولید شده و توسط شبکه‌ای از لوله‌های حاوی آب گرم یا بخار کم‌فشار به بخش‌های مختلف منتقل می‌شود [۵]. این شیوه تأمین بارهای حرارتی به‌دلیل بازده بالای کوره‌های گرمایی و فناوری پیشرفته عایق‌بندی بکاررفته، در مجموع بازده بالایی را در مقایسه با سیستم حرارتی پراکنده سنتی دارد و آلودگی کم‌تری را نیز به‌بار می‌آورد. استفاده از سیستم گرمایش ناحیه‌ای که امروزه در اندازه‌های بسیار متنوع (تا چند صد مگاوات) در دسترس است، رشد فزاینده‌ای را در مراکز مختلف جهان به خود اختصاص داده است [۱۹].

با جمع‌بندی موارد اشاره شده در بندهای قبلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مناسب‌ترین شیوه برای تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی مراکز صنعتی/شهری ترکیبی است از بهره‌برداری هم‌زمان از شبکه برق کشور در کنار استفاده از واحدهای CHP و کوره‌های گرمایی، یعنی دو حامل انرژی برق و گاز به‌صورت هماهنگ^۳ و با استفاده از مبدل‌های انرژی

1) Combined Heat and Power

2) District Heating System

3) Coordinated

متعدد به‌طور هم‌زمان برای تأمین دو بار الکتریکی و حرارتی به‌کار می‌روند. این روش که با اصطلاحی عمومی‌تر به «هاب هیبرید انرژی» یا «هاب انرژی» معروف است، مزایای بسیاری را به همراه دارد که خلاصه‌وار در ادامه آمده‌اند:

- ۱- افزایش بازده کلی مصرف انرژی به دلیل بازده بالای واحدهای CHP و سیستم گرمایش ناحیه‌ای
 - ۲- کاهش هزینه کل تأمین توان به دلیل بازده بالای واحدهای CHP و سیستم گرمایش ناحیه‌ای و همچنین استفاده از حامل انرژی وافر و نسبتاً ارزان‌تر گاز طبیعی کشور
 - ۳- کاهش هزینه کل تأمین توان به دلیل درجه‌های آزادی بیش‌تر روش هاب انرژی برای «بهره‌برداری بهینه». (در این روش از تمامی قابلیت‌های مبدل‌های مختلف انرژی به‌طور هم‌زمان برای بهره‌برداری بهینه استفاده می‌شود. این مورد در بخش‌های بعدی بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت)
 - ۴- کاهش تلفات خط انتقال به دلیل تولید محلی بخشی از توان الکتریکی مورد نیاز با استفاده از گاز طبیعی
 - ۵- کاهش آلودگی کل ناشی از تولید توان که تأثیر آن برای مراکز صنعتی واقع در مناطق غیرشهری محسوس‌تر خواهد بود زیرا تمرکز آلودگی ایجادشده در اثر استفاده از این روش در مناطق شهری را نیز باید در نظر داشت. البته از طرفی، قابل ذکر است که استفاده از فناوری‌های جدید مربوط به تجهیزات کاهش آلاینده‌ها و مقیاس‌های مورد بحث در روش هاب انرژی به لحاظ اقتصادی قابل توجیه‌تر خواهد بود.
 - ۶- کاهش وابستگی به سیستم تولید و انتقال برق کشور و افزایش امنیت تولید توان به دلیل اتکا به شبکه پایدارتر گاز طبیعی در مقایسه با شبکه برق
- طراحی بهینه بکارگیری تجهیزات ذکرشده پیش از هر چیز مستلزم وجود مدل کاملی برای در نظر گرفتن مشخصه‌های کاری این تجهیزات است. از طرفی، شبکه برق سراسری و برق تولیدی واحدهای CHP برای تأمین بارهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از طرفی، حرارت تولیدی کوره‌های گرمایی و واحدهای CHP برای تأمین حرارت به روش سیستم حرارت مرکزی استفاده می‌شود. برای داشتن برنامه‌ریزی دقیقی از بکارگیری این تجهیزات در ساعات مختلف شبانه‌روز و با در نظر گرفتن الگوهای مشخص بارهای الکتریکی و حرارتی، باید مدل ریاضی جامعی معرفی و مورد استفاده قرار گیرد که با استفاده از آن بتوان به طراحی «بهینه» مدنظر برای تجهیزات تأمین انرژی دست یافت. در این میان، تنها عیب این روش، هزینه نسبتاً بالای احداث واحدهای CHP است که درنهایت، در کنار کاهش حاصل‌شده در هزینه بهره‌برداری یک دوره طولانی‌مدت، جزو موارد مورد بحث در فرمول‌بندی مساله طراحی خواهد بود.

مروری بر کارهای پیشین

بهره‌برداری هم‌زمان از سیستم‌های برق و گاز در بعضی پژوهش‌های پیشین از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور مثال، تأثیر زیرساخت‌های گاز بر روی سیستم قدرت در [۲۱] و تأثیر متقابل شبکه گاز و امنیت شبکه برق در [۱۴] بررسی شده‌اند. بهره‌برداری بهینه توأم از زیرساخت‌های برق و گاز نیز شامل چند زمینه متفاوت پژوهشی است که از آن بین می‌توان به بحث‌های پخش بار بهینه [۸]، پخش بار اقتصادی [۱۶]، برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی [۱۵] اشاره کرد. با این وجود، یکی از پیچیده‌ترین مباحث در حوزه سیستم‌های چند حاملی انرژی^۱، مساله طراحی بهینه این سیستم‌ها می‌باشد. در این راستا، فرمول‌بندی جامعی از طراحی هم‌زمان زیرساخت‌های شبکه‌های برق و گازرسانی با رویکرد امنیت در [۲۵] ارائه شده است. در مرجع [۲۳] نیز مدلی طولانی‌مدت، چندناحیه‌ای و چندمرحله‌ای برای مساله طراحی بهینه توسعه سیستم‌های برق و گاز پیشنهاد شده است. اصطلاح «هاب انرژی» نیز برای اولین بار در حیطه طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های چندحاملی در [۷] مطرح شد که بعدها گستردگی بیشتری یافت.

هاب انرژی، موضوع تحقیقات فراوانی در سال‌های اخیر بوده است که از آن بین، بهره‌برداری بهینه و طراحی بهینه مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته‌اند. مساله بهره‌برداری بهینه با استفاده از مفهوم هاب انرژی در [۱۸] و با رویکردی مناسب برای مصارف مسکونی مورد مطالعه قرار گرفته است. در پژوهش مشابهی در [۴] نشان داده شده است که در آنتاریو کانادا، روش هاب انرژی در ادغام با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار^۲ می‌تواند کاهشی ۲۰ درصدی در هزینه انرژی و ۵۰ درصدی در سطح اوج بار به‌همراه داشته باشد. در [۱۳] نیز، یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه برای مساله بهره‌برداری بهینه معرفی شده است که توابع هدف آن را هزینه انرژی مصرفی و تلفات تشکیل می‌دهند.

بررسی کاملی از مساله طراحی بهینه سیستم‌های برق و گاز با استفاده از مفهوم هاب انرژی در [۲۴] و به شکل شبکه‌ای از هاب‌های به‌هم‌پیوسته ارائه شده است. در این مرجع، احداث خطوط انتقال جدید و مبدل‌های مختلف جزو پارامترهای مساله طراحی بهینه هستند. فرمول‌بندی متفاوتی با رویکرد کاهش آلودگی در [۱۷] مطرح شده و بر روی شبکه برق و گاز ایالت ویکتوریای استرالیا مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۲۰] روش جامعی برای طراحی شبکه‌های توزیع برق و گاز ارائه کرده است. در مرجع [۲۲] نیز علاوه بر برق و گاز، از هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی در طراحی هاب استفاده شده است. در این مرجع، هیدروژن تولیدی از طریق الکترولیز آب برای تولید توان در پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1) Multi-carrier Energy Systems

2) Demand Response

بکارگیری واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت در یک مرکز شهری موضوع مورد بحث در مرجع [۱] است که در ادغام با شبکه‌ای از سیستم گرمایش ناحیه‌ای و تعدادی میکروتوربین گازی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۲] نیز یک سیستم گرمایش ناحیه‌ای آب گرم به‌همراه یک واحد CHP اندازه بزرگ (۲۰۰ مگاوات) مورد استفاده قرار گرفته است و در مواقعی که حرارت مورد نیاز بیش از ظرفیت گرمایی CHP باشد، از حرارت تولیدی یک کوره گرمایی بزرگ برای گرم کردن آب بهره گرفته شده است.

ساختار مقاله

در این مقاله، ضرورت و مزیت‌های ویژه روش هاب انرژی برای تأمین توان مورد مطالعه قرار گرفته و مدل کاملی از مساله طراحی بهینه تجهیزات تحت مفهوم هاب انرژی ارائه شده است که در نهایت شامل تعیین نقطه کارهای بهینه تجهیزات در کل طول دوره برنامه‌ریزی نیز می‌باشد. مدل دقیق و کاملی از عملکرد و مشخصه‌های کاری واحدهای مختلف CHP در مدل طراحی بهینه هاب ادغام شده است. این مشخصه در بیش‌تر مقالات به شکل یک خط راست در نمودار توان خروجی الکتریکی-حرارتی واحدهای CHP مورد استفاده قرار گرفته است در حالی که این مشخصه در عمل، یک بازه کاری پیوسته با مرزهای مشخص شده به شکل یک چندضلعی است. فرمول‌بندی جدیدی با وجود مشخصه‌های مذکور برای واحدهای CHP ارائه شده است که مقدار بهینه خروجی الکتریکی و حرارتی در هر بازه زمانی را برای هر کدام از تجهیزات مشخص می‌کند. کلیت فرمول‌بندی در قالب یک مساله برنامه‌ریزی سهموی^۱ ارائه شده است به طوری که با روش‌های دقیق ریاضی قابل حل باشد. شبیه‌سازی‌ها در سناریوهای مختلف و با وجود تجهیزات نامزد متعدد و با در نظر گرفتن تابع هدف هزینه، بر روی یک سیستم موردی انجام شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

ادامه مقاله بدین شرح ارائه شده است: بخش بعدی، مدل کلی هاب انرژی را معرفی کرده و ضرورت بکارگیری مدل دقیق واحدهای CHP را شرح داده است. سپس فرمول‌بندی پیشنهادی برای مساله طراحی بهینه تجهیزات هاب با در نظر گرفتن مشخصه واحدهای CHP ارائه شده است. بخش‌های نهایی به جزئیات شبیه‌سازی و بحث بر روی نتایج پرداخته است. نتیجه‌گیری نهایی و فهرستی از علائم بکاررفته در مقاله نیز در پایان ارائه شده است.

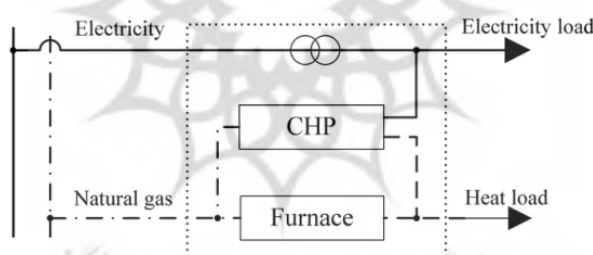
مدل کلی هاب انرژی

ایده هاب انرژی به شکل جامع آن اولین بار توسط گیدل و اندرسون در سال ۲۰۰۷ معرفی شد [۹، ۶]. هاب انرژی نظریه قدرتمندی است که برای نمایش فعل و انفعالات فناوری‌های مرتبط با تبدیل انرژی به کار می‌رود. هدف اصلی این نظریه، شکل‌گیری مدلی است که «برای پوشش دادن تمام انواع انرژی جامعیت کافی داشته و در عین حال، دقت لازم را

1) Quadratic Programming

برای در نظر گرفتن جزئیات سیستم‌های واقعی به کار گیرد» [۶]. شکل‌های مختلف انرژی می‌تواند شامل انرژی الکتریکی (AC و DC)، انرژی حرارتی (در دماهای مختلف) و انرژی شیمیایی (گاز طبیعی و هیدروژن) باشد.

در این مقاله، ساختار موجود در شکل (۱) برای پیاده‌سازی ایده هاب انرژی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این شکل، هاب انرژی از سمت ورودی به شبکه‌های برق و گاز طبیعی وصل است و از سمت خروجی نیز بارهای الکتریکی و حرارتی مورد نیاز را تأمین می‌کند. درون هاب نیز ادوات مختلف تبدیل توان شامل ترانسفورماتورهای توزیع، واحدهای CHP و کوره‌های گاز طبیعی قرار دارند. واحدهای CHP توسط انواع مختلف سوخت قابل بهره‌برداری هستند که از آن میان، گاز طبیعی رایج‌ترین منبع اولیه انرژی برای این واحدها محسوب می‌شود. تفاوت اصلی هاب انرژی و سیستم‌های سنتی تأمین انرژی در این است که انواع مختلف بار در یک هاب توسط حامل‌های مختلف انرژی تأمین می‌شوند که این مساله به دلیل وجود درجه‌های آزادی بیش‌تری، در حالت کلی باعث کاهش هزینه‌های کل تأمین توان می‌شود.



شکل (۱) ساختار مورد استفاده برای هاب انرژی [۲۴]

برای نمایش برهمبستگی^۱ بارهای الکتریکی و حرارتی تأمین شده توسط الکتریسیته و گاز طبیعی در درون یک هاب، معمولاً از ماتریس جفت‌شدگی^۲ استفاده می‌شود [۶]. ماتریس جفت‌شدگی C برای هاب انرژی نمایش داده شده در شکل (۱) در رابطه (۱) نشان داده شده است که در آن، هر کدام از درایه‌های ماتریس C نمایان‌گر بازده تبدیل هر کدام از حامل‌های انرژی (الکتریکی e یا گاز طبیعی g) به اشکال خروجی آن (الکتریکی e یا حرارتی h) هستند [۲۴].

$$\begin{pmatrix} P^{out,e} \\ P^{out,h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{e-e} & C_{g-e} \\ C_{e-h} & C_{g-h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P^{in,e} \\ P^{in,g} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در این مدل، C_{e-h} برابر با صفر بوده و دیگر درایه‌های ماتریس جفت‌شدگی را نیز می‌توان با استفاده از مقادیر بازده

1) Interdependence
2) Coupling

تبدیل انرژی مربوط به ادوات مختلف موجود در هاب به دست آورد (به مرجع [۲۴] مراجعه شود). در این مدل که توسط پژوهش‌های بسیاری برای طراحی هاب مورد استفاد قرار گرفته است، علاوه بر ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی که با یک بازده ثابت برای تبدیل انرژی مربوطه خود مدل‌سازی شده‌اند، برای مدل‌سازی عملکرد CHP نیز به شکل مشابهی عمل شده است T یعنی هر واحد CHP با یک بازده الکتریکی ثابت و یک بازده گرمایی ثابت مدل می‌شود، به طوری که کسر مشخصی از گاز ورودی به انرژی الکتریکی و کسر مشخصی نیز به انرژی حرارتی خروجی تبدیل می‌شود. این مدل که در عمل باعث سادگی زیادی در محاسبات می‌شود، متأسفانه قابلیت‌های بسیار وسیعی از واحدهای CHP را نادیده می‌گیرد. در حالت کلی، هر CHP قادر است هم‌زمان با تولید مقدار معینی از حرارت (یا توان الکتریکی)، مقادیر بسیار متنوعی از توان الکتریکی (یا حرارت) را تولید نماید درحالی که مثلاً در مدل رایج، هر مقدار از حرارت تولیدی فقط متناظر با تولید هم‌زمان مقدار مشخصی از انرژی الکتریکی (و نه یک بازه پیوسته از مقادیر مختلف) است.

در نظر گرفتن چنین بازه کاری منعطفی طبیعتاً باعث خواهد شد تا مدل واقعی‌تری از عملکرد این واحدها داشته باشیم و در نهایت، از تمامی قابلیت‌های آنها برای بهره‌برداری بهینه با استفاده از مفهوم هاب انرژی بهره بگیریم. این نکته اهمیت دوچندانی در راستای هدف مقاله حاضر پیدا می‌کند، زیرا مساله طراحی بهینه در اصل نیازمند تعیین نقطه‌های کاری بهینه تجهیزات در کل بازه برنامه‌ریزی و با در نظر گرفتن مشخصه‌های کاری آنها می‌باشد. برای این هدف، فرمول‌بندی جدیدی در بخش بعدی برای مساله طراحی بهینه هاب ارائه می‌شود که مدل کلی رابطه (۱) را برای در نظر گرفتن مشخصه کاری دقیق واحدهای CHP تعمیم می‌دهد.

فرمول‌بندی مساله طراحی بهینه هاب

در این بخش، مساله طراحی بهینه هاب انرژی با در نظر گرفتن مشخصه‌های کاری تجهیزات و طی روابط (۲) تا (۲۶) فرمول‌بندی می‌شود. هدف از این مساله، طراحی تجهیزات هاب با تابع هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه سرمایه‌گذاری در تجهیزات و هزینه بهره‌برداری کل است، با این شرط که توان‌های الکتریکی و حرارتی مورد نیاز در طول دوره برنامه‌ریزی تامین شود. مساله طراحی بهینه هاب مشخص خواهد کرد که کدام یک از تجهیزات نامزد هاب و کدام نوع از آنها و هر کدام به چه تعداد برای تأمین انرژی مورد استفاده قرار گیرند. تجهیزات نامزد برای هاب انرژی شامل ترانسفورماتور، کوره گرمایی و دو نوع واحد CHP متفاوت (با مشخصه‌های کاری مختلف) هستند. هر کدام از این تجهیزات نیز شامل چند نوع مختلف از حیث توان کاری و هزینه احداث می‌باشند که با اندیس‌های γ_{CHP_1} , γ_{Fur} , γ_{Tra} و γ_{CHP_2} نمایش داده می‌شوند. بدیهی است حل مساله طراحی بهینه شامل به دست آوردن مقادیر بهینه خروجی الکتریکی و حرارتی هر کدام از تجهیزات در هر کدام از بلوک‌های زمانی t و یا به عبارتی، حل مساله «بهره‌برداری بهینه» نیز خواهد بود.

تابع هدف

هدف یافتن ترکیبی از تجهیزات نامزد برای هاب است که کمترین مقدار را برای تابع هدف معرفی شده در رابطه (۲) به همراه داشته باشد.

$$\min_{\gamma} (TIC + TOC) \quad (2)$$

که در آن، TIC مجموع هزینه احداث تجهیزات و TOC هزینه توان الکتریکی و گاز مصرفی یا هزینه بهره‌برداری در طول دوره برنامه‌ریزی هستند که به ترتیب در روابط (۳) و (۴) معرفی شده‌اند.

$$TIC = \sum_{\gamma} IC_{\gamma} . u_{\gamma} \quad (3)$$

$$TOC = \frac{\sum_{\alpha} \sum_{t} P_{Tot,t}^{in,\alpha} . \lambda_t^{\alpha}}{IR(1+IR)^Y} \cdot \frac{1}{(1+IR)^Y - 1} \quad (4)$$

مطابق روال بیشتر مقالات، مساله طراحی در حالت کلی برای یک دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله ($Y = 10$) مطرح می‌شود اما بلوک‌های زمانی مدنظر برای بهینه‌سازی، برای بازه یک‌ساله تنظیم می‌شوند تا از حجم محاسبات کاسته شود. در این صورت، هزینه‌های بهره‌برداری سال‌های مختلف به معادل آن برای سال اول تبدیل می‌شوند. برای این کار، باید درصد افزایش سالانه قیمت حامل‌های انرژی که در رابطه (۴) با IR^1 نمایش داده شده است، مدنظر قرار گیرد. بدین منظور، روش معرفی شده در مرجع [۳] به کار گرفته شده است که طی آن، مجموع هزینه‌های برق و گاز مصرفی در یک سال (صورت رابطه (۴))، به عبارت موسوم به «Capital Recovery Factor» (مخرج در رابطه ۴) تقسیم شده است.

قید تعادل توان در ورودی و خروجی هاب

توان‌های ورودی به هاب، مطابق روابط (۵) و (۶)، باید با مجموع توان‌های ورودی تجهیزات (و یا به عبارتی، مبدل‌های انرژی) برابر باشد.

$$P_{Tot,t}^{in,e} - \sum_{\gamma Tra} P_{\gamma,t}^{in} = 0 \quad (5)$$

1) Interest Rate

$$P_{Tot,t}^{in,g} - \sum_{\substack{\gamma_{CHP} \\ \gamma_{Fur}}} P_{\gamma,t}^{in} = 0 \quad (۶)$$

خروجی‌های توان مبدل‌ها نیز باید توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز را تأمین کنند. روابط (۷) و (۸) به بیان این قيد پرداخته‌اند.

$$P_{Tot,t}^{out,e} - \sum_{\substack{\gamma_{CHP} \\ \gamma_{Tra}}} P_{\gamma,t}^{out,e} = 0 \quad (۷)$$

$$P_{Tot,t}^{out,h} - \sum_{\substack{\gamma_{CHP} \\ \gamma_{Fur}}} P_{\gamma,t}^{out,h} = 0 \quad (۸)$$

قيود کاری ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی

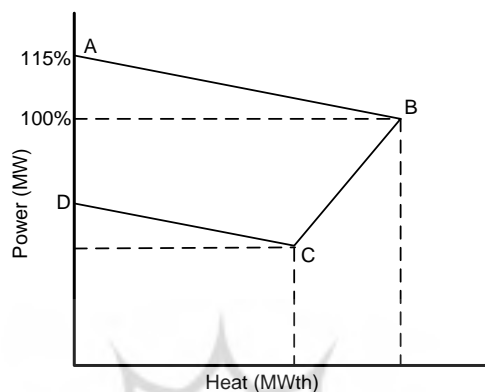
قيود کاری ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی نیز شامل بازده و محدوده توان کاری آنها هستند که به ترتیب در روابط (۹) و (۱۰) بیان شده‌اند.

$$P_{\gamma,t}^{out} = \eta_{\gamma} P_{\gamma,t}^{in} \quad \forall \gamma \in \gamma_{Tra}, \gamma_{Fur} \quad (۹)$$

$$P_{\gamma,\min}^{out} \cdot u_{\gamma} \leq P_{\gamma,t}^{out} \leq P_{\gamma,\max}^{out} \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{Tra}, \gamma_{Fur} \quad (۱۰)$$

مشخصه کاری واحد CHP نوع اول

همان‌طور که در مقدمه و بخش مدل هاب انرژی اشاره شد، مشخصه کاری واحدهای CHP شامل یک بازه کاری گسترده است، این امر بدین معنی است که مقادیر توان خروجی الکتریکی و حرارتی در این واحدها تا حدی مستقل از یکدیگر بوده و تنها مرزهایی برای مشخص کردن حدود کاری آنها وجود دارد. این مرزها به شکل یک چهارضلعی در مشخصه خروجی CHP در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل که مشخصه کاری واحد موسوم به CHP نوع اول در این مقاله را نمایش می‌دهد، مشخص است که این واحد می‌تواند گستره وسیعی از مقادیر مختلف توان الکتریکی و حرارتی را تولید کند. در این شکل، ضلع AB حدود کاری مربوط به بیش‌ترین مصرف سوخت را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تحت شرایط خاص و عدم دسترسی به شبکه می‌توان با کاهش حرارت تولیدی این واحدها، توان الکتریکی تولیدی را به اندازه ۱۵ درصد افزایش داد. ضلع BC حدود کاری مربوط به بیش‌ترین حرارت تولیدی و ضلع CD حدود کاری مربوط به کم‌ترین میزان از مصرف سوخت را مشخص می‌کند. در فرمول‌بندی مساله طراحی بهینه هاب، این مشخصه با استفاده از روابط خطی (۱۱) تا (۱۵) (برگرفته از مرجع ۱۱) توصیف شده است که در آنها، E توان الکتریکی و H توان حرارتی تولیدی واحد را نشان می‌دهد.



شکل ۲) مشخصه کاری توان‌های تولیدی CHP نوع اول [۱۱]

$$0 \leq E_{\gamma,t} \leq E_{\gamma}^A \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (11)$$

$$0 \leq H_{\gamma,t} \leq H_{\gamma}^B \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (12)$$

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^A - \frac{E_{\gamma}^A - E_{\gamma}^B}{H_{\gamma}^A - H_{\gamma}^B} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^A) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (13)$$

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^B - \frac{E_{\gamma}^B - E_{\gamma}^C}{H_{\gamma}^B - H_{\gamma}^C} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^B) \geq -(1 - u_{\gamma})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (14)$$

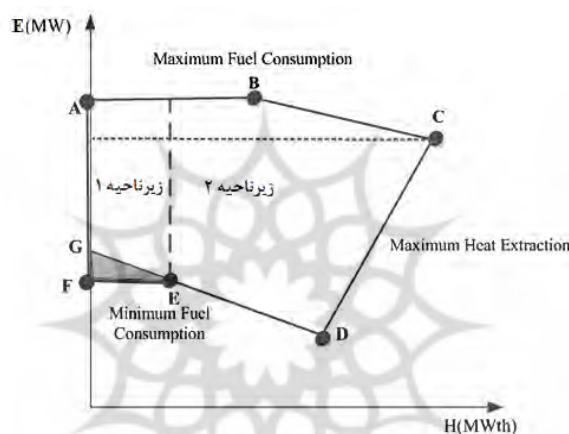
$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^C - \frac{E_{\gamma}^C - E_{\gamma}^D}{H_{\gamma}^C - H_{\gamma}^D} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^C) \geq -(1 - u_{\gamma})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (15)$$

روابط (۱۱) و (۱۲) وضعیت بکارگیری واحد CHP را در مساله وارد می‌کنند، به طوری که اگر $u_{\gamma} = 0$ باشد، توان-های خروجی متناظر با آن واحد CHP صفر خواهند بود. روابط (۱۳) تا (۱۵) نیز به ترتیب حدود کاری متناظر با ضلع‌های AB، BC و CD را مشخص می‌کنند. در این روابط، M عدد مثبت بزرگ دلخواهی است تا در مواقعی که $u_{\gamma} = 0$ است، مشکلی در برقراری روابط پیش نیاید.

مشخصه کاری واحد CHP نوع دوم

مشابه بخش قبلی، مشخصه کاری واحد CHP موسوم به نوع دوم در شکل (۳) نمایش داده شده است. مشکل این مشخصه کاری در این است که برخلاف واحد CHP نوع اول، نمی‌توان آن را با معادلات خطی تعریف کرد زیرا اگر مشابه بخش قبلی، نواحی منتهی به پاره‌خط‌های DE و EF را با نامعادلات خطی متناظر با امتداد این پاره‌خط‌ها مشخص کنیم، بعضی از قسمت‌های ناحیه کاری مانند بخش محصور در مثلث EFG - بدلیل این‌که پایین‌تر از امتداد خط DE قرار دارد -

در این معادلات از قلم خواهند افتاد. مشکل از اینجا پیش می‌آید که مشخصه مذکور در بخشی از شکل (در امتداد D-E- F) دارای فرورفتگی یا اصطلاحاً مقعر^۱ است. بنابه قوانین ریاضی، مسائل بهینه‌سازی شامل قیود و معادلات مقعر یا غیرمحدب را نمی‌توان با روش‌های شناخته‌شده ریاضی حل کرد درحالی‌که اهمیت مساله طراحی بهینه ایجاب می‌کند که با استفاده از روش‌های ریاضی به جواب بهینه مطلق (و نه بهینه محلی) مساله دسترسی داشته باشیم.



شکل ۳) مشخصه کاری توان‌های تولیدی CHP نوع دوم [۲]

برای رفع این مشکل، از تقسیم مشخصه کاری به دو ناحیه مجزا استفاده می‌شود به طوری که هر ناحیه را بتوان با استفاده از معادلات خطی توصیف کرد. مشخصه کاری CHP نوع دوم و تقسیم‌بندی ذکر شده توسط معادلات (۱۶) تا (۲۵) (برگرفته از مرجع [۲]) بیان شده‌اند. در این روش، با تعریف متغیرهای باینری $v_{1,\gamma,t}$ و $v_{2,\gamma,t}$ مشخص می‌شود که نقطه کار هر واحد CHP (در هر بازه زمانی) در کدام یک از زیرناحیه‌های مشخص شده در شکل (۳) قرار دارد. مثلاً اگر خروجی CHP در ناحیه ۱ باشد، $v_{1,\gamma,t} = 1$ و $v_{2,\gamma,t} = 0$ خواهد بود و اگر واحد CHP در ترکیب هاب حضور نداشته باشد، $v_{1,\gamma,t} = v_{2,\gamma,t} = u_\gamma = 0$ خواهد بود. این نکات تحت معادله (۱۶) در فرمول‌بندی مساله اعمال شده‌اند. معادلات (۱۷) و (۱۸) نیز مشخص می‌کنند که نقطه کار در کدام یک از دو زیرناحیه قرار دارد. با تقسیم‌بندی مذکور، در واقع، ناحیه کاری CHP با تقسیم‌بندی به دو زیرناحیه کاری محدب، خطی‌سازی می‌شود. مشابه روابط (۱۱) و (۱۲)، دو رابطه (۱۹) و (۲۰) وضعیت بکارگیری واحد CHP را بیان می‌کنند. روابط (۲۱) و (۲۲) به ترتیب ناحیه‌های زیرین خطوط AB و BC و رابطه (۲۳) ناحیه بالای خط CD را مشخص می‌کند. دقت شود که دو ضلع باقیمانده یعنی DE و EF باید با توجه به زیرناحیه کاریشان در فرمول‌بندی وارد شوند. برای این کار، رابطه (۲۴) مشخص می‌کند که وقتی $v_{1,\gamma,t} = 1$ است، مشخصه کاری

1) Concave

CHP با ناحیه بالای خط EF تعریف می‌شود. در حالی که وقتی $v_{2,\gamma,t} = 1$ است، محدوده کاری CHP طبق رابطه (۲۵) با ناحیه بالای خط DE مشخص می‌شود.

$$v_{1,\gamma,t} + v_{2,\gamma,t} = u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۱۶)$$

$$H_{\gamma,t} - H_\gamma^E \geq -(1 - v_{2,\gamma,t})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۱۷)$$

$$H_{\gamma,t} - H_\gamma^E \leq (1 - v_{1,\gamma,t})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۱۸)$$

$$0 \leq E_{\gamma,t} \leq E_\gamma^A \cdot u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۱۹)$$

$$0 \leq H_{\gamma,t} \leq H_\gamma^C \cdot u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۰)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^A - \frac{E_\gamma^A - E_\gamma^B}{H_\gamma^A - H_\gamma^B} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^A) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۱)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^B - \frac{E_\gamma^B - E_\gamma^C}{H_\gamma^B - H_\gamma^C} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^B) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۲)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^C - \frac{E_\gamma^C - E_\gamma^D}{H_\gamma^C - H_\gamma^D} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^C) \geq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۳)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^E - \frac{E_\gamma^E - E_\gamma^F}{H_\gamma^E - H_\gamma^F} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^E) \geq -(1 - v_{1,\gamma,t})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۴)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^D - \frac{E_\gamma^D - E_\gamma^E}{H_\gamma^D - H_\gamma^E} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^D) \geq -(1 - v_{2,\gamma,t})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (۲۵)$$

رابطه ورودی-خروجی واحدهای CHP

مقدار گاز مصرفی واحدهای CHP به صورت تابعی سهموی از توان الکتریکی و حرارتی تولیدی آنها و مطابق رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه، c_γ مقدار ثابتی است که فقط در صورت بکارگیری واحد CHP در معادله ظاهر می‌شود.

$$P_{\gamma,t}^{in} = a_\gamma E_{\gamma,t}^2 + b_\gamma E_{\gamma,t} + c_\gamma u_\gamma + d_\gamma H_{\gamma,t}^2 + e_\gamma H_{\gamma,t} + f_\gamma E_{\gamma,t} H_{\gamma,t} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1}, \gamma_{CHP_2} \quad (۲۶)$$

شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش، مدل ارائه شده بر روی یک سیستم موردی پیاده‌سازی شده و نتایج مساله طراحی بهینه برای آن ارائه

می‌شود. با توجه به اینکه مدل‌سازی ارائه‌شده در قالب مسائل برنامه‌ریزی مرکب عدد صحیح سهموی (MIQP^۱) طبقه‌بندی می‌شود، از روش بهینه‌سازی شاخه و حد^۲ برای حل آن بهره گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده و برای حل مساله بهینه‌سازی حاصل از حل‌کننده تجاری DICOPT استفاده شده است. تمامی نتایج به‌دست آمده، جواب بهینه مطلق مساله هستند که این نیز مرهون فرم سهموی مدل پیشنهادی است. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک رایانه شخصی با پردازنده core i5 ۲/۶ GHz و با حافظه داخلی ۴ Gb انجام پذیرفته است.

ورودی‌ها و فرضیات مساله

سناریو بندی: شبیه‌سازی‌ها تحت دو دسته سناریو کلی انجام شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در سناریو اول، فرض بر این است که شبکه برق و گاز به‌طور مستقل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، یعنی شبکه برق توسط ترانسفورماتور برای تأمین بارهای الکتریکی و شبکه گاز توسط کوره گرمایی برای تأمین بارهای حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سناریوهای بعدی نیز ایده هاب انرژی با بکارگیری انواع مختلف CHP برای طراحی تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد تا میزان کاهش در هزینه‌های کل مورد مطالعه قرار گیرد.

بلوک‌های زمانی: طراحی، برای یک مرکز صنعتی / شهری با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای تقاضای بار الکتریکی و حرارتی انجام می‌پذیرد. مقادیر بار الکتریکی و حرارتی به‌صورت ساعتی برای مدت یک شبانه‌روز در جدول (۱) ارائه شده‌اند. مقادیر ۲۴ ساعته برای قیمت حامل‌های انرژی نیز در جدول (۲) بر حسب ریال (R) بر مگاوات آمده‌اند. قابل توجه است که در این مقاله، برای کاهش تعداد واحدهای زمانی برنامه‌ریزی، روش معمول موسوم به منحنی گسسته‌سازی شده مدت‌زمان بار (DLDC^۳) مورد استفاده قرار نگرفته است. در روش مذکور، واحدهای زمانی مختلف، متناسب با اندازه تقاضای بار متناظرشان در چند بلوک زمانی مجزا طبقه‌بندی می‌شوند تا بدین طریق حجم محاسبات به اندازه قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد [۲۴]. در طراحی هاب انرژی، طبقه‌بندی بازه‌های زمانی باید به‌صورتی انجام پذیرد که ارتباط بین دو منحنی بار الکتریکی و حرارتی نیز در نظر گرفته شود زیرا تجهیزات طراحی‌شده باید قابلیت تأمین هم زمان هر دو بار را داشته باشند و اطلاع هم زمان از مقادیر آنها در هر ساعت از شبانه‌روز ضروری است. به‌همین دلیل، لازم است تا تعداد بلوک‌های خیلی بیش‌تری نسبت به روش DLDC در این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرند تا الگوی دقیق مصرف در ساعات مختلف شبانه‌روز برای طراحی به‌کار گرفته شود.

1) Mixed Integer Quadratic Programming

2) Branch and Bound

3) Discretized Load Duration Curve

علاوه بر ۲۴ بلوک زمانی شبانه‌روز، فصل‌های مختلف سال و تقسیم‌بندی مربوط به روزهای طول هفته و آخر هفته نیز جزو تقسیم‌بندی‌های مدنظر برای بلوک‌های زمانی است. طبیعتاً بارهای الکتریکی در فصل تابستان و بارهای حرارتی در فصل زمستان مقادیر بیش‌تری نسبت به سایر فصول دارند. مقدار بار مصرفی در روزهای آخر هفته نیز نسبت به روزهای طول هفته کمتر است. این دو نکته توسط ضرایب تعیین‌شده در بخش بالایی جدول (۳) اعمال شده‌اند. با توضیحات ارائه شده، تعداد بلوک‌های زمانی برنامه‌ریزی برای طول مدت یک سال برابر با $24 \times 2 \times 4 = 192$ است که در مقایسه با تعداد ساعات یک سال عدد بسیار کوچک‌تری است. مشابه مقادیر تقاضای بار، قیمت حامل‌های انرژی نیز متناسب با فصول سال و روزهای هفته مقادیر مختلفی دارند که ضرایب متناظر آنها نیز در بخش پایینی جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول (۱) مقادیر ۲۴ ساعته بارهای الکتریکی و حرارتی

ساعت	قیمت گاز		قیمت برق		ساعت	بار حرارتی		بار الکتریکی			
	$\left(\frac{KR}{MW}\right)$	$\left(\frac{KR}{MW}\right)$	$\left(\frac{KR}{MW}\right)$	$\left(\frac{KR}{MW}\right)$		(MW)	$(MWth)$	(MW)	$(MWth)$		
۱	۸۷۳	۵۱۹	۱۳	۱۰۲۳	۵۱۹	۱	۴	۹	۱۳	۱۷	۶
۲	۸۷۳	۵۱۹	۱۴	۱۰۲۳	۵۱۹	۲	۴	۹	۱۴	۱۶	۶
۳	۸۷۳	۵۱۹	۱۵	۱۰۲۳	۵۱۹	۳	۴	۹	۱۵	۱۵	۶
۴	۸۷۳	۵۱۹	۱۶	۱۰۲۳	۵۱۹	۴	۶	۹	۱۶	۱۴	۶
۵	۸۷۳	۵۱۹	۱۷	۱۰۲۳	۵۱۹	۵	۸	۹	۱۷	۱۶	۶
۶	۸۷۳	۵۱۹	۱۸	۱۰۲۳	۵۱۹	۶	۱۰	۹	۱۸	۱۹	۸
۷	۱۰۲۳	۵۱۹	۱۹	۱۳۲۳	۵۱۹	۷	۱۰	۸	۱۹	۲۰	۱۰
۸	۱۰۲۳	۵۱۹	۲۰	۱۳۲۳	۵۱۹	۸	۱۱	۶	۲۰	۲۲	۱۱
۹	۱۰۲۳	۵۱۹	۲۱	۱۳۲۳	۵۱۹	۹	۱۲	۶	۲۱	۲۴	۱۱
۱۰	۱۰۲۳	۵۱۹	۲۲	۱۳۲۳	۵۱۹	۱۰	۱۴	۶	۲۲	۲۲	۱۱
۱۱	۱۰۲۳	۵۱۹	۲۳	۸۷۳	۵۱۹	۱۱	۱۶	۶	۲۳	۱۸	۱۰
۱۲	۱۰۲۳	۵۱۹	۲۴	۸۷۳	۵۱۹	۱۲	۱۸	۶	۲۴	۱۰	۹

جدول (۳) ضرایب مربوط به فصول مختلف و روزهای هفته

	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	طول هفته	آخر هفته
بار الکتریکی	۰/۷	۱	۰/۹	۰/۸	۱	۰/۸
بار حرارتی	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۸۵	۱	۱	۰/۸
قیمت برق	۰/۸	۱	۰/۹	۰/۷	۱	۰/۸
قیمت گاز	۰/۸	۰/۷	۰/۹	۱	۱	۰/۸

تجهیزات نامزد: در این طراحی، محدودیتی برای تعداد تجهیزات نامزد برای تأمین توان وجود ندارد و هر کدام از تجهیزات در دو اندازه مختلف در دسترس هستند. تجهیزات تأمین توان شامل ترانسفورماتور، کوره گرمایی، CHP نوع اول

و CHP نوع دوم هستند که برای هر کدام نیز دو اندازه مختلف در نظر گرفته شده است. این تجهیزات به همراه کمینه و بیشینه توان کاری هر کدام، بازده‌های کاری (برای ترانسفورماتور و کوره گرمایی) و هزینه احداث هر کدام در جدول (۴) آمده‌اند. یادآوری می‌شود که در این مقاله، واحدهای CHP به صورت یک میدل با مقادیر ثابت بازده الکتریکی و حرارتی مدل‌سازی نشده و مدل کامل و منعطف‌تری برای تغییر نقطه کار در محدوده مجاز تعریف شده مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل، بازده واحد CHP به صورت مقدار گاز مصرفی مورد نیاز در نقاط کاری مختلف و تحت رابطه (۲۶) در مدل‌سازی مدنظر قرار گرفته است. این رابطه نشان می‌دهد بازده کاری واحدهای CHP در نقاط مختلف ناحیه کاری، مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد. مقادیر مربوط به ضرایب سوخت مصرفی واحدهای CHP (برگرفته از مقادیر موجود در [۲]) در جدول (۵) آمده‌اند. با مقایسه این ضرایب (بخصوص مقادیر b و f) از دو نوع مختلف CHP می‌توان استنتاج کرد که در واحدهای CHP نوع دوم، سهم بیش‌تری از گاز ورودی برای تولید برق (نسبت به واحدهای CHP نوع اول) استفاده می‌شود این در حالی است که واحدهای CHP نوع اول نیز در مقایسه با واحدهای نوع دوم، سهم بیش‌تری از گاز ورودی را به حرارت تبدیل می‌کنند. مقادیر مربوط به توان‌های کاری و یا به عبارتی، توان‌های نقاط گوشه از چندضلعی‌های مشخصه کاری واحدهای CHP در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

جدول ۴) مشخصات تجهیزات نامزد

جدول ۵) ضرایب مربوط به سوخت مصرفی واحدهای CHP	تجهیزات	هزینه	بازده	بیشینه توان	کمینه توان
		احداث (KR)	(%)	ورودی (MW)	ورودی (MW)
a					
b					
c					
d					
e					
f					
	ترانسفورماتور اندازه ۱	۲۰۰۰۰۰۰	۹۷	۵	۰/۱
	ترانسفورماتور اندازه ۲	۳۶۰۰۰۰۰	۹۸/۵	۱۰	۰/۲
	کوره گرمایی اندازه ۱	۲۵۰۰۰۰۰	۷۵	۷	۰/۰۷
	کوره گرمایی اندازه ۲	۴۰۰۰۰۰۰	۸۰	۱۰	۰/۱۲
	CHP نوع ۱ اندازه ۱	۲۰۰۰۰۰۰	-	-	-
	CHP نوع ۱ اندازه ۲	۴۵۰۰۰۰۰	-	-	-
	CHP نوع ۲ اندازه ۱	۳۷۰۰۰۰۰	-	-	-
	CHP نوع ۲ اندازه ۲	۵۸۰۰۰۰۰	-	-	-

جدول ۶) مقادیر توان نقطه کارهای مرزی مشخصه کاری (MW) در واحدهای CHP مختلف

	E^A	E^B	E^C	E^D	E^E	E^F	H^A	H^B	H^C	H^D	H^E	H^F
CHP نوع اول (اندازه ۱)	۵/۴۳	۴/۷۳	۰/۵۷	۰/۶۴	-	-	۰	۳/۹۶	۱/۲۱	۰	-	-
CHP نوع اول (اندازه ۲)	۱۰/۸۷	۹/۴۶	۱/۱۴	۱/۲۸	-	-	۰	۷/۹۲	۲/۴۲	۰	-	-
CHP نوع دوم (اندازه ۱)	۵/۰۵	۵/۰۵	۴/۴۶	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۷۵	۰	۱/۳۰	۵/۴۴	۰/۹۶	۰/۳۳	۰
CHP نوع دوم (اندازه ۲)	۱۰/۱	۱۰/۱	۸/۹۲	۱/۱۶	۱/۴۹	۱/۴۹	۰	۲/۶۰	۱۰/۸۸	۱/۹۲	۰/۶۵	۰

نتایج عددی

نتایج شبیه‌سازی برای طراحی بهینه تجهیزات تحت چهار سناریو مختلف در جدول (۷) نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، با بکارگیری واحدهای CHP تعداد بقیه تجهیزات مورد استفاده کاهش می‌یابد. مقادیر هزینه حاصل از این طراحی‌ها هم در سه ستون مجزا در جدول (۸) ارائه شده است. مشاهده می‌شود استفاده از واحدهای CHP تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری داشته است. این میزان تأثیر در استفاده از واحدهای CHP نوع دوم خیلی بیشتر بوده است. هزینه‌های کل در طراحی بدست آمده برای سناریو آخر از جدول (۸) نسبت به هزینه‌های مربوط به طراحی سناریو اول (بهره‌برداری جداگانه از شبکه‌های برق و گاز) حدود ۲۱ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌شود به دلیل استفاده از واحدهای CHP مختلف در سناریو آخر، نیاز به احداث کوره گرمایی نبوده و تنها از یک ترانسفورماتور با اندازه کوچک استفاده شده است.

اندازه شبیه‌سازی برای ۴ سناریو به ترتیب در حدود ۵/۰، ۹، ۱۷ و ۱۸ دقیقه است. دلیل طولانی‌تر بودن شبیه‌سازی‌ها برای موارد شامل CHP نوع دوم، وجود متغیرهای بیش‌تری برای مدل‌سازی این نوع CHP است که برای خطی‌سازی مشخصه کاری آن به کار رفته است. تعداد مراحل تکرار شبیه‌سازی سناریو آخر، ۳۱۰۲ تکرار می‌باشد.

جدول (۷) نتایج بهینه برای طراحی تجهیزات تحت سناریوی مختلف

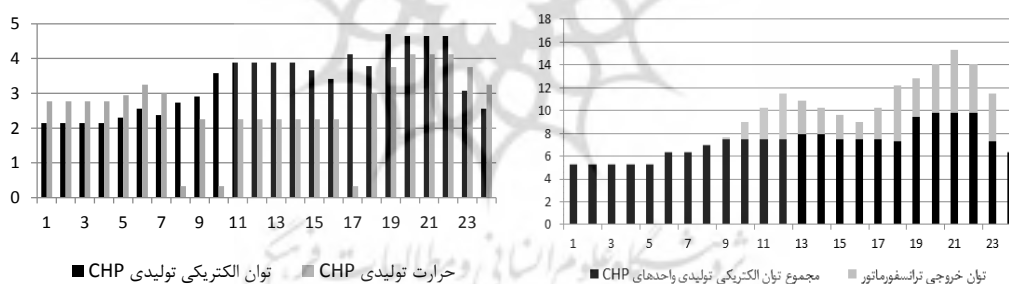
سناریو	ترانسفورماتور		کوره گرمایی		CHP نوع اول		CHP نوع دوم	
	اندازه ۱	اندازه ۲	اندازه ۱	اندازه ۲	اندازه ۱	اندازه ۲	اندازه ۱	اندازه ۲
بدون استفاده از CHP	۱	۲	۱	۱	-	-	-	-
استفاده از CHP نوع اول	۰	۱	۰	۱	۳	۰	-	-
استفاده از CHP نوع دوم	۰	۱	۰	۰	-	-	۳	۰
استفاده از هر دو نوع CHP	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۰

جدول (۸) هزینه‌های تولید توان در طراحی‌های مربوط به سناریوهای مختلف

سناریو	هزینه احداث (MR)	هزینه بهره‌برداری (MR)	هزینه کل (MR)
بدون استفاده از CHP	۱۵۷۰۰	۷۲۲۳۷۴	۷۳۸۰۷۴
استفاده از CHP نوع اول	۶۷۶۰۰	۵۸۰۴۹۱	۶۴۸۰۷۱
استفاده از CHP نوع دوم	۱۱۴۶۰	۴۴۹۰۱۵	۵۶۳۶۱۵
استفاده از هر دو نوع CHP	۹۷۶۰۰	۴۸۵۴۶۸	۵۸۳۰۶۸

سهام واحدهای CHP و ترانسفورماتور بکاررفته در این سناریو، در تأمین توان الکتریکی موردنیاز در طول یک شبانه-روز در شکل (۴) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، قسمت اعظم توان الکتریکی موردنیاز به‌طور پایه توسط

واحدهای CHP تولید می‌شود. دلیل اصلی این مساله نیز در حالت کلی، قیمت پایین‌تر حامل انرژی گاز طبیعی در مقایسه با برق می‌باشد. در شکل (۵) نیز مقایسه‌ای از برق و حرارت تولیدی یکی از واحدهای CHP حاضر در ترکیب بهینه بدست آمده برای سناریو آخر نمایش داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، توان الکتریکی تولیدی در بعضی ساعات، چندین برابر حرارت تولیدی بوده و در بعضی ساعات نیز کمتر از آن می‌باشد. این در حالی است که اگر از مقادیر ثابت بازده الکتریکی و حرارتی برای مدل‌سازی CHP استفاده می‌شد، توان الکتریکی و حرارت تولیدی هر ساعت، در تمامی ساعات از یک نسبت ثابت پیروی می‌کرد. این مساله بوضوح بیان می‌دارد که استفاده از مشخصه واقعی CHP در مدل‌ها، تا چه اندازه موجب تغییرات اساسی در نتایج نهایی مساله می‌شود. با ادغام این مشخصه در مدل‌ها، در واقع درجه‌های آزادی بیشتری (مازاد بر درجه‌های آزادی مطرح شده برای خود روش هاب انرژی) برای مساله بهره‌برداری و طراحی بهینه در دسترس خواهد بود تا بدین طریق، طراحی نهایی بهینه‌تر و موفق‌تری (و در عین حال، واقعی‌تری) شکل گیرد. سرعت پایین محاسبات نیز معلول وجود همین مساله در فرمول‌بندی پیشنهادی است.



شکل ۴) سهم توان الکتریکی تولیدی واحدهای CHP و (شکل ۵) توان الکتریکی و حرارتی تولیدی یکی از واحدهای CHP ترانسفورماتور در تأمین تقاضای بار تحت طراحی سناریو آخر (بر حسب مگاوات)

نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت در مراکز صنعتی / شهری به‌طور کیفی و کمی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار، از ایده هاب انرژی استفاده شد که در مقایسه با روش‌های سنتی بهره‌برداری از حامل‌های انرژی، مدل جامع‌تر و کامل‌تری را برای بهره‌گیری از تمامی امکانات زیرساخت‌های مختلف انرژی معرفی می‌کند. در این مقاله، برای اولین بار، مشخصه دقیق واحدهای CHP در مدل طراحی بهینه هاب ادغام شد تا طراحی واقعی و بهینه از تجهیزات مختلف انرژی شکل گیرد. نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم موردی نشان می‌دهد که طراحی

تحت روش هاب انرژی مزیت‌های بسیاری را از نظر کاهش هزینه‌ها به‌دنبال دارد. نتایج مقاله حاضر، ضرورت استفاده از واحدهای مدرن CHP (در کنار سیستم گرمایش ناحیه‌ای) را بیان می‌کند، به طوری که با بکارگیری این فناوری‌های نوین و با بهره‌گیری از روش جامع هاب انرژی، کاهش چشم‌گیری در هزینه‌های تأمین انرژی در طولانی مدت حاصل می‌شود. دلایل اصلی این مساله، قیمت نسبتاً پایین گاز طبیعی، بازده بالای واحدهای CHP و درجات آزادی بیش‌تر روش هاب انرژی برای بهره‌برداری بهینه از زیرساخت‌هاست. علاوه بر این نکات، مطالعات عددی صورت گرفته با روش‌های بهینه‌سازی ریاضی نشان می‌دهد که استفاده از مدل دقیق CHP در فرمول‌بندی مساله طراحی هاب، علاوه بر واقعی‌تر شدن طراحی، درجات آزادی بیش‌تری را برای هرچه بهینه‌تر بودن بهره‌برداری و طراحی نهایی به‌همراه دارد.

مقایسه نتایج طراحی تحت دو سناریوی بهره‌برداری جداگانه و بهره‌برداری به‌روش هاب انرژی نشان می‌دهد که در صورت بهره‌گیری از واحدهای CHP، با وجود افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری به میزان ۶۲۰ درصد، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در طول یک بازه ۱۰ ساله به‌اندازه ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر، به‌ازای سرمایه‌گذاری ۸۱/۹ میلیارد ریالی در احداث واحدهای CHP، صرفه‌جویی قابل‌توجهی به‌ارزش ۲۳۶/۹ میلیارد ریال در هزینه‌های بهره‌برداری حاصل می‌شود که نشان می‌دهد بعد از گذشت ۳ سال و نیم از دوره ۱۰ ساله بهره‌برداری، هزینه سرمایه‌گذاری انجام‌پذیرفته در احداث این واحدها توسط سود کل حاصل از تأمین توان به روش هاب انرژی تأمین می‌شود.

منابع

- [1] Adamek F., Arnold M. and Andersson G. 2014. "On decisive storage parameters for minimizing energy supply costs in multicarrier energy systems", Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol. 5, PP. 102-109.
- [2] Alipour M., Mohammadi B. -Ivatloo and Zare K. 2014. "Stochastic risk-constrained short-term scheduling of industrial cogeneration systems in the presence of demand response programs", Applied Energy, Vol. 136, PP. 393-404.
- [3] Bouffard F. and Galiana F. D. 2004. "An electricity market with a probabilistic spinning reserve criterion", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 19, PP. 300-307.
- [4] Bozchalui M. C., Hashmi S. A., Hassen H., Cañizares C. and Bhattacharya K. 2012. "Optimal operation of residential energy hubs in smart grids", Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 3, PP. 1755-1766.
- [5] Dincer I. and Rosen M. A. 2012. Exergy: energy, environment and sustainable development: Newnes.
- [6] Geidl M. 2007. "Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems", Ph.D. Thesis, TU Graz.
- [7] Geidl M. and Andersson G. 2006. "Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems", European transactions on electrical power, Vol. 16, PP. 463-477.

- [8] Geidl M. and Andersson G. 2007. "Optimal power flow of multiple energy carriers", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 22, PP. 145-155.
- [9] Geidl M., Koepfel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G. and Frohlich K. 2007. "Energy hubs for the future", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, p. 24.
- [10] Gu W., Wu Z., Bo R., Liu W., Zhou G., Chen W., et al. 2014. "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, PP. 26-37.
- [11] Guo T., Henwood M. and Van Ooijen M. 1996. "An algorithm for combined heat and power economic dispatch", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 11, PP. 1778-1784.
- [12] Klaassen R. and Patel M. K. 2013. "District heating in the Netherlands today: A techno-economic assessment for NGCC-CHP (Natural Gas Combined Cycle combined heat and power)", *Energy*, Vol. 54, PP. 63-73.
- [13] La Scala M., Vaccaro A. and Zobaa A. 2014. "A goal programming methodology for multiobjective optimization of distributed energy hubs operation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, PP. 658-666.
- [14] Li T., Eremia M. and Shahidehpour M. 2008. "Interdependency of natural gas network and power system security", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 23, PP. 1817-1824.
- [15] Liu C., Shahidehpour M., Fu Y. and Li Z. 2009. "Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 24, PP. 1523-1536.
- [16] Proietto R., Arnone D., Bertocini M., Rossi A., La Cascia D., Miceli R., et al. 2014. "Mixed heuristic-non linear optimization of energy management for hydrogen storage-based multi carrier hubs", in *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, 2014, PP. 1019-1026.
- [17] Qiu J., Z. Dong Y., Zhao J. H., Meng K., Zheng Y. and Hill D. J. 2015. "Low Carbon Oriented Expansion Planning of Integrated Gas and Power Systems", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 30, PP. 1035-1046.
- [18] Ramirez-Elizondo L. 2013. "Optimal Usage of Multiple Energy Carriers in Residential Systems: Unit Scheduling and Power Control", Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, TU Delft.
- [19] Rezaie B. and Rosen M. A. 2012. "District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements", *Applied Energy*, Vol. 93, PP. 2-10.
- [20] Saldarriaga C., Hincapie R. A. and Salazar H. 2013. "A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 28, PP. 4052-4063.
- [21] Shahidehpour M., Fu Y. and Wiedman T. 2005. "Impact of natural gas infrastructure on electric power systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, PP. 1042-1056.
- [22] Sharif A. 2012. "Modelling of a Natural-Gas-Based Clean Energy Hub," Ph.D. Thesis.
- [23] Unsihuay-Vila C., Marangon-Lima J., Perez-Arriaga I. J. and Balestrassi P. P. 2010. "A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 25, PP. 1154-1168.
- [24] Zhang X., Shahidehpour M. and Alabdulwahab A. 2015. "Optimal Expansion Planning of Energy Hub With Multiple Energy Infrastructures," In Press.
- [25] Zhang X., Shahidehpour M., Alabdulwahab A. S. and Abusorrah A. 2015. "Security-Constrained Co-Optimization Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Infrastructures," In Press.

فهرست علائم

اندیس ها

IR نرخ بهره (در این مقاله به درصد افزایش
سالانه قیمت حامل‌های انرژی اطلاق می‌شود)

λ_t^α قیمت حامل انرژی α در زمان t

IC_γ هزینه احداث مبدل γ

$\alpha = \{e, g\}$ نوع حامل انرژی ورودی (برق یا گاز)

$\beta = \{e, h\}$ نوع انرژی خروجی (الکتریکی یا حرارتی)

γ اندیس مشخص‌کننده هر کدام از تجهیزات نامزد برای هاب
(شامل انواع مختلف ترانسفورماتور γ_{Tra} ، واحد تولید برق و حرارت

γ_{CHP} و کوره گرمایی γ_{Fur})

t اندیس مربوط به بلوک‌های زمانی

متغیرها:

u_γ متغیر باینری مشخص‌کننده وضعیت بکارگیری

(یک) یا عدم به‌کارگیری (صفر) مبدل γ

$E_{\gamma,t}$ توان الکتریکی خروجی CHP در زمان t

$H_{\gamma,t}$ توان حرارتی خروجی CHP در زمان t

$P_{Tot,t}^{in,\alpha}$ توان کل ورودی حامل انرژی α به هاب در

زمان t

$v_{1,\gamma,t}$ متغیر باینری مشخص‌کننده این‌که نقطه کار

خروجی CHP در زیرناحیه ۱ از مشخصه کاری قرار دارد

(یک) یا نه (صفر)

$v_{2,\gamma,t}$ متغیر باینری مشخص‌کننده این‌که نقطه کار

خروجی CHP در زیرناحیه ۲ از مشخصه کاری قرار دارد

(یک) یا نه (صفر)

مجموعه ها

Tra مجموعه ترانسفورماتورهای مختلف نامزد برای هاب

Fur مجموعه کوره‌های گرمایی مختلف نامزد برای هاب

CHP_1 مجموعه واحدهای CHP مختلف نامزد برای هاب (CHP)

نوع اول)

CHP_2 مجموعه واحدهای CHP مختلف نامزد برای هاب (CHP)

نوع دوم)

پارامترها

$P_{Tot,t}^{out,\beta}$ توان کل خروجی هاب از نوع β در زمان t

$P_{\gamma,max}^{out}$ بیشینه توان خروجی مبدل γ (برای ترانسفورماتورها و

کوره‌های گرمایی)

η_γ بازده مبدل γ (برای ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی)

η_γ بازده مبدل γ (برای ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی)

ES انرژی مورد نیاز تأمین‌شده توسط واحدهای CHP در

شرایط عدم دسترسی به شبکه