

طراحی بهینه سپهر انرژی برای بهره‌برداری توأم از سیستم‌های برق و گاز با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان

رضا غفارپور^۱، سعید مرادی^۲، علی محمد رنجبر^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

rghaffarpour@sbiau.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

saeidmoradi@chmail.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

amranjbar@sharif.edu

چکیده: افزایش تمایل جهانی برای تولید غیرمتمرکز انرژی با استفاده از گاز طبیعی، باعث فراگیرتر شدن ایده بهره‌برداری همزمان از چند حامل مختلف انرژی در سال‌های اخیر شده است. مهم‌ترین نظریه مطرح در این حیطه، «سپهر انرژی» است که در این مقاله برای تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی با استفاده از حامل‌های برق و گاز به کار گرفته شده است. برای این کار از ترانسفورماتورها، کوره‌های گرمایی، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP) و ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی استفاده شده است. برخلاف روال رایج، واحدهای CHP به شکل تبدیلی با بازده‌های ثابت الکتریکی و حرارتی مدل‌سازی نشده و مشخصه کاری کامل این واحدها، شامل ناحیه کاری عملی (FOR) و رابطه غیرخطی ورودی-خروجی در فرمول‌بندی مسئله استفاده شده‌اند. برای خطی‌سازی عملکرد غیرخطی واحدهای CHP، تقریب تکه‌ای-خطی از ناحیه کاری آن‌ها ارائه شده است تا مسئله در قالب برنامه‌ریزی خطی مرکب-عدد صحیح ارائه شود. شاخص قابلیت اطمینان نیز با ارائه مدلی از تغییر نقطه کار CHP در شرایط خروج تجهیزات در فرمول‌بندی مسئله گنجانده شده است. هدف، یافتن بهترین ترکیب از تجهیزات نامزد برای کاهش هزینه‌های کل و افزایش قابلیت اطمینان تأمین توان در یک دوره برنامه‌ریزی طولانی‌مدت است. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک سیستم موردی و با مطالعه تأثیر اعمال نامعینی قیمت انرژی بر نتایج ارائه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سپهر انرژی، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، منابع ذخیره انرژی، قابلیت اطمینان، تقریب تکه‌ای خطی، برنامه‌ریزی خطی مرکب عدد صحیح، نامعینی قیمت.

۱.۱. ضرورت و اهمیت مسئله

در دهه‌های گذشته، باور عمومی بر بازده بالای تولید متمرکز انرژی در مقایسه با تولید پراکنده دلالت داشته است. با وجود اعتبار نسبی این مسئله برای عصر حاضر، پیشرفت‌های موجود در طراحی توربین‌های گازی، تحولات عمده‌ای را در رویه عمومی تولید انرژی ایجاد کرده است. ارائه توربین‌های گازی 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 به‌خصوص 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 قابل‌استفاده برای مصارف مختلف به‌کار می‌گیرند و به‌همین دلیل، بازده کلی این واحدها به مقادیری بیشتر از ۶۵ تا ۹۰ درصد می‌رسد. این در حالی است که بازده کلی نیروگاه‌های متمرکز نوعی چیزی در حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است.

موارد فوق‌الذکر باعث به‌کارگیری روزافزون واحدهای CHP در سال‌های اخیر و در بسیاری مراکز صنعتی و حتی مراکز شهری متمرکز جهان شده است. به‌خصوص که استفاده روزافزون از سیستم گرمایش ناحیه‌ای^۲ به‌جای سیستم‌های حرارتی سنتی، امکان بهره‌گیری بهینه از حرارت تولیدی واحدهای CHP را امکان‌پذیر ساخته است. با توجه به وفور نعمت گاز طبیعی و شبکه گسترده انتقال گاز در کشورمان، بهره‌گیری از این فناوری‌ها اهمیتی دوچندان پیدا می‌کند. در این خصوص، روشی برای بهره‌برداری همزمان از سیستم‌های انرژی چندحامل در سال‌های اخیر معرفی شده است که مزایای بسیاری را از نقطه‌نظر بهره‌برداری بهینه به‌همراه دارد. نظریه موسوم به «سپهر انرژی»^۳ بیان می‌دارد که با بهره‌گیری از مبدل‌های مختلف انرژی می‌توان به‌طور همزمان، از چند حامل انرژی مختلف برای تأمین چندین بار استفاده کرد و به این طریق، صرفه‌جویی قابل‌توجهی را در هزینه‌های بهره‌برداری به‌وجود آورد. دلیل اصلی این مسئله، درجه‌های آزادی بیشتر سیستم‌های انرژی چندحامل در مقایسه با روش سنتی بهره‌برداری جداگانه از حامل‌های انرژی است. طراحی بهینه تجهیزات

در روش سپهر انرژی پیش از هر چیز، مستلزم وجود مدل کاملی برای در نظر گرفتن مشخصه‌های کاری تجهیزات مختلف است. از طرفی، شبکه برق سراسری و برق تولیدی واحدهای CHP برای تأمین بارهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از طرفی هم، حرارت تولیدی کوره‌های گرمایی و واحدهای CHP برای تأمین حرارت در سیستم گرمایش ناحیه‌ای استفاده می‌شود. این در حالی است که مقادیر توان الکتریکی و حرارتی تولیدی واحدهای CHP نیز از یکدیگر مستقل نیستند و از مشخصه‌های کاری موسوم به «ناحیه کاری عملی (FOR^۴)» تبعیت می‌کنند. برای داشتن برنامه‌ریزی دقیقی از به‌کارگیری بهینه این تجهیزات در ساعات مختلف شبانه‌روز و با در نظر گرفتن الگوهای مشخص بارهای الکتریکی و حرارتی و قیمت حامل‌های انرژی در ساعات مختلف، باید مدل ریاضی جامعی تهیه شده و به‌کار گرفته شود.

یک دسته دیگر از تجهیزاتی که می‌توانند نقش عمده‌ای در ترکیب سپهر انرژی ایفا کنند، ذخیره‌سازهای مختلف انرژی هستند. سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی، شامل انواع مختلف باتری‌های نسل جدید، علاوه بر بازده‌های شارژ و دشارژ بالا، تلفات حالت آماده‌به‌کار^۵ خیلی پایینی دارند. باتری‌های سدیم-سولفور، اسید سرب، نیکل-کادمیم، لیتیم-یون و... قیمت مناسبی به‌ازای واحد توان خروجی و حجم ذخیره‌سازی دارند، به‌طوری‌که استفاده از آن‌ها برای هموارسازی الگوی بار در مصارف صنعتی و شهری، صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی را در طولانی‌مدت به‌همراه دارد [۱]. این ذخیره‌سازها و ذخیره‌سازهای حرارتی که عموماً شامل مخزن‌های آب گرم هستند، در سمت خروجی سپهر جای می‌گیرند.

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های طراحی سیستم‌های انرژی، قابلیت اطمینان تأمین توان در شرایط خرابی و خروج تجهیزات تأمین انرژی است. در حالت کلی، در دسترس نبودن تجهیزات به‌دلیل خرابی یا تعمیرات دوره‌ای مسئله‌ای اجتناب‌ناپذیر است و طراحی سیستم تأمین توان باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که کمبود توان ناشی از خرابی تجهیزات را تا اندازه‌ای جبران کند. موضوع طراحی با شاخصه‌های قابلیت اطمینان در بحث سپهر انرژی موضوعیتی مضاعف پیدا می‌کند؛ چراکه مزیت اصلی مطرح برای روش سپهر انرژی، داشتن درجه‌های آزادی بیشتر در این شیوه از تأمین انرژی است. این درجات آزادی از استفاده همزمان از حامل‌های مختلف انرژی و تأمین توان با استفاده از تجهیزات متنوع ناشی می‌شوند و همان‌طور که باعث کاهش چشمگیر هزینه بهره‌برداری می‌شوند، در عین حال قابلیت‌های بسیاری را نیز برای

1. Combined Heat and Power
2. District Heating
3. Energy Hub

4. Feasible Operating Region
5. Standby Losses

افزایش قابلیت اطمینان تأمین توان به همراه دارند.

۲.۱. مروری بر کارهای پیشین

بهره‌برداری همزمان از سیستم‌های برق و گاز در بعضی پژوهش‌های پیشین، از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال، تأثیر زیرساخت‌های گاز بر روی سیستم قدرت در مرجع [۲] و تأثیر متقابل شبکه گاز و امنیت شبکه برق در مرجع [۳] 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 [۴]، پخش بار اقتصادی [۵]، برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی [۶] اشاره کرد. با وجود این، یکی از پیچیده‌ترین مباحث در حوزه سیستم‌های انرژی چندحامل، مسئله طراحی بهینه این سیستم‌هاست. در این خصوص، فرمول‌بندی جامعی از طراحی همزمان زیرساخت‌های شبکه‌های برق و گازسانی با رویکرد امنیت در مرجع [۷] ارائه شده است. در مرجع [۸] هم، مدلی طولانی‌مدت، چندناحیه‌ای و چندمرحله‌ای برای مسئله طراحی بهینه توسعه سیستم‌های برق و گاز پیشنهاد شده است. اصطلاح «سپهر انرژی» نیز برای اولین بار در حیطه طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های انرژی چندحامل در مرجع [۹] مطرح شد که بعدها گستردگی بیشتری یافت. سپهر انرژی، موضوع تحقیقات فراوانی در سال‌های اخیر بوده است که از آن بین، بهره‌برداری بهینه و طراحی بهینه مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. مسئله بهره‌برداری بهینه با استفاده از مفهوم سپهر انرژی در مرجع [۱۰] و با رویکردی مناسب برای مصارف مسکونی مورد مطالعه قرار گرفته است. در پژوهش مشابهی در مرجع [۱۱] نشان داده شده است که در آنتاریو کانادا، روش سپهر انرژی در ادغام با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند کاهشی ۲۰ درصدی در هزینه انرژی و ۵۰ درصدی در سطح اوج بار به همراه داشته باشد. در مرجع [۱۲]، مفهوم سپهر انرژی برای یک مصرف‌کننده مسکونی با یک سیستم مدیریت انرژی که از الگوریتم یادگیری تقویتی^۱ و روش تخمین مونت کارلو برای یافتن جواب زیربهینه مسئله بهره‌برداری بهینه استفاده می‌کند، ارائه شده است.

بررسی کاملی از مسئله طراحی بهینه سیستم‌های برق و گاز با استفاده از مفهوم سپهر انرژی در مرجع [۱۳] و به شکل شبکه‌ای از سپهرهای به هم پیوسته ارائه شده است. در این مرجع، احداث خطوط انتقال جدید و مبدل‌های مختلف جزو پارامترهای مسئله طراحی بهینه هستند. فرمول‌بندی متفاوتی با رویکرد کاهش آلودگی در مرجع [۱۴]

مطرح شده و بر روی شبکه برق و گاز ایالت ویکتوریای استرالیا مورد مطالعه قرار گرفته است. روش ارائه شده در مرجع [۱۵] نیز، اندازه بهینه واحدهای CCHP^۲، بویلر کمکی و مخزن حرارتی را در سپهر انرژی تعیین می‌کند.

تئوری مدل قابلیت اطمینان برای سیستم‌های انرژی چندحامل در مرجع [۱۶] معرفی شده است. در این مرجع، قابلیت اطمینان با به کارگیری نرخ‌های خرابی و بازسازی تجهیزات و در قالب یک فرایند مارکوف مدل‌سازی شده است. در مرجع [۱۷]، زیرساخت‌های برق و گاز در یک برنامه‌ریزی احتمالاتی برای تثبیت تغییرات ناشی از تولید بادی به کار گرفته شده‌اند. در مرجع [۱۸] نیز، مدلی ریاضی از عملکرد سپهر با استفاده از تئوری گراف و شبکه ارائه شده است که در آن، از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی الکتریکی و حرارتی استفاده شده است.

۳.۱. نوآوری‌ها

مقاله حاضر به طراحی بهینه تجهیزات تأمین و ذخیره انرژی در سپهر انرژی و با تابع هدف هزینه و قابلیت اطمینان پرداخته است. در این مقاله:

۱. مشخصه کامل کاری واحدهای CHP در فرمول‌بندی طراحی سپهر گنجانده شده است. «ناحیه کاری عملی» واحدهای CHP مشخص می‌کند که CHP به‌طور همزمان چه مقادیری از توان‌های الکتریکی و حرارتی را می‌تواند تولید کند. در مدل به کار گرفته شده، «ناحیه کاری عملی» شامل گستره وسیعی از دو متغیر مذکور است. این در حالی است که در مدل‌های استفاده شده برای طراحی سپهر، دو مقدار خروجی، کاملاً به یکدیگر وابسته‌اند و ناحیه کاری به جای یک گستره پیوسته دوبعدی، شامل یک خط راست است.
۲. رابطه گاز مصرفی واحدهای CHP که به شکل تابعی غیرخطی از دو متغیر انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی آن است، با استفاده از تکنیک تقریب‌زنی تکه‌ای-خطی^۳، خطی‌سازی شده است. در این مدل، بازده کاری CHP یک عدد ثابت نبوده و متناسب با مقادیر توان‌های الکتریکی و حرارتی خروجی، مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد. در این روش، ناحیه کاری واحدهای CHP با دقت بالایی به چندین ناحیه مجزا تقسیم‌بندی شده و فرمول‌بندی متناظر آن در قالب برنامه‌ریزی خطی مرکب-عدد صحیح^۴ ارائه شده است.
۳. قابلیت‌های مدل ارائه شده برای واحدهای CHP از نقطه نظر

2. Combined Cooling, Heat and Power
3. Piecewise linear approximation
4. Mixed integer linear programming

1. Reinforcement Learning Algorithm

طراحی بهینه سپهر انرژی برای بهره‌برداری توأم از سیستم‌های برق و گاز با... ۵

برای نمایش برهمبستگی^۱ بارهای الکتریکی و حرارتی تأمین‌شده توسط الکتریسیته و گاز طبیعی در درون یک سپهر (بدون در نظر گرفتن ذخیره‌سازهای انرژی)، معمولاً از ماتریس جفت‌شدگی^۲ استفاده می‌شود [۱۹]. ماتریس جفت‌شدگی C برای مبدل‌های انرژی موجود در ساختار سپهر 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.

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

که در آن، C_{e-h} برابر با صفر بوده و دیگر درایه‌های ماتریس جفت‌شدگی را نیز می‌توان با استفاده از مقادیر بازده تبدیل انرژی مربوط به ادوات مختلف موجود در سپهر به دست آورد (به مرجع [۱۳] مراجعه شود). در این مدل، هر واحد CHP با یک بازده الکتریکی ثابت و یک بازده گرمایی ثابت مدل‌سازی می‌شود، به طوری که کسر مشخصی از گاز ورودی به انرژی الکتریکی و کسر مشخصی نیز به انرژی حرارتی خروجی تبدیل می‌شود. این مدل‌سازی که در عمل باعث سادگی زیادی در محاسبات می‌شود، متأسفانه قابلیت‌های بسیار وسیعی از عملکرد 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. در نظر گرفتن چنین بازه کاری منعطفی طبیعتاً باعث خواهد شد تا مدل واقعی تری از عملکرد این واحدها داشته باشیم و در نهایت با استفاده از روش سپهر انرژی، از تمامی قابلیت‌های واحدهای CHP برای بهره‌برداری بهینه استفاده کنیم. برای نیل به این هدف، فرمول‌بندی جدیدی برای مسئله طراحی بهینه سپهر در بخش بعدی ارائه می‌شود که در آن، مدل کلی رابطه (۱) برای در نظر گرفتن مشخصه کاری واحدهای CHP تعمیم داده شده است.

در روش طراحی پیش‌رو فرض شده است که:

- بلوک‌های زمانی بهره‌برداری به صورت ۲۴ ساعته است و همچنین تقسیم‌بندی مربوط به چهار فصل سال و روزهای طول هفته و آخر هفته را هم در بر می‌گیرد. بدین ترتیب، تقاضای بار الکتریکی و حرارتی و قیمت حامل‌های انرژی، متناسب با این تقسیم‌بندی‌ها مقادیر مختلفی دارند. مقادیر هزینه‌های بهره‌برداری روزانه با استفاده از تقسیم‌بندی هشت‌گانه مذکور (چهار فصل \times تقسیم‌بندی

افزایش قابلیت اطمینان، با ارائه مدلی برای تغییر نقطه کار آن‌ها در شرایط خروج تجهیزات، در فرمول‌بندی قابلیت اطمینان گنجانده شده است. هدف از این کار، تعیین شیوه بهره‌برداری از بیشینه ظرفیت قابل استفاده این واحدها با توجه به اولویت تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی در این شرایط است.

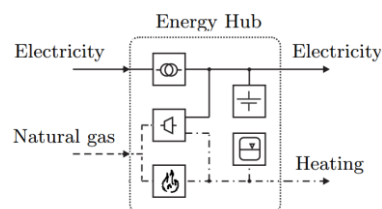
۴. نامعینی قیمت حامل‌های انرژی در طولانی‌مدت، به صورت مجموعه سناریوهایی در بازه‌های چندساله در فرمول‌بندی مسئله طراحی بهینه سپهر انرژی اعمال شده است. تأثیر نامعینی قیمت انرژی بر نتایج طراحی و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴.۱. ساختار مقاله

ادامه مقاله بدین شرح ارائه شده است: در بخش ۲ مدل کلی سپهر انرژی و ضرورت استفاده از مشخصه کامل کاری واحدهای CHP به همراه فرضیات طراحی شرح داده شده است. فرمول‌بندی پیشنهادی برای مسئله طراحی بهینه در بخش ۳ ارائه شده و در بخش ۴ به شاخص قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در بخش ۵ هم نامعینی قیمت و اعمال آن به فرمولاسیون طراحی بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۶ و نتیجه‌گیری نهایی نیز در بخش ۷ ارائه شده‌اند.

۲. مدل کلی سپهر انرژی و فرضیات طراحی

ایده سپهر انرژی به شکل جامع آن اولین بار توسط گیدل و اندرسون [۱۹ و ۲۰] در سال ۲۰۰۷ معرفی شد. سپهر 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 برای در نظر گرفتن جزئیات سیستم‌های واقعی به کار گیرد» [۱۹]. در مقاله حاضر، ساختار موجود در شکل (۱) برای پیاده‌سازی ایده سپهر انرژی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل (۱): ساختار مورد استفاده برای سپهر انرژی

هستند. در این رابطه، PC تابع جریمه ناشی از عدم تأمین توان در شرایط خروج تجهیزات است؛ بدین معنی که هرچه قابلیت اطمینان سپهر انرژی برای تأمین توان بیشتر باشد، مقدار PC کمتر خواهد بود.

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

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

مشابه روال بیشتر مقالات، مسئله طراحی در حالت کلی برای یک دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله 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 «نرخ بهره» را که در رابطه (۴) با IR^1 نمایش داده شده است، در محاسبات مدنظر قرار داد. بدین منظور، روش معرفی شده در [۲۱] به کار گرفته شده است که طی آن، مجموع هزینه‌های برق و گاز مصرفی در یک سال (صورت رابطه ۴)، از طریق عبارت موسوم به «ضریب بازگشت سرمایه» (CRF^2) (مخرج در رابطه ۴) برای یک بازه بازه برنامه‌ریزی ۱۰ ساله تعمیم داده می‌شود. برای اطلاعات کامل‌تر در این زمینه به مرجع [۲۲] مراجعه شود.

۲.۳. قید تعادل توان در ورودی و خروجی سپهر

توان‌های ورودی سپهر با مجموع توان‌های ورودی تجهیزات برابرند.

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

$$P_{Tot,t}^{in,g} = \sum_{\gamma_{Fur}} P_{\gamma,t}^{in} + \sum_{\gamma_{CHP}} P_{\gamma,t}^{in} \quad (6)$$

توان‌های خروجی تجهیزات نیز باید توان‌های موردنیاز را تأمین کنند.

$$L_t^e = \sum_{\gamma_{Tra}} P_{\gamma,t}^{out} + \sum_{\gamma_{CHP}} E_{\gamma,t} + \sum_{\gamma_{EES}} (S_{\gamma,t}^{dis} - S_{\gamma,t}^{ch}) \quad (7)$$

$$L_t^h = \sum_{\gamma_{Fur}} P_{\gamma,t}^{out} + \sum_{\gamma_{CHP}} H_{\gamma,t} + \sum_{\gamma_{TES}} (S_{\gamma,t}^{dis} - S_{\gamma,t}^{ch}) \quad (8)$$

۳.۳. قیود کاری ترانسفورمرها و کوره‌های گرمایی

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

$$P_{\gamma,t}^{out} = \eta_{\gamma} P_{\gamma,t}^{in} \quad \forall \gamma \in \gamma_{Tra}, \gamma_{Fur} \quad (9)$$

دو تایی روزهای هفته) به هزینه‌های سالیانه تبدیل می‌شوند.

- طراحی برای یک بازه زمانی طولانی مدت و با در نظر گرفتن نرخ بهره سالیانه انجام می‌پذیرد؛ به طوری که هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه با استفاده از ضریب بازگشت سرمایه برای یک بازه طولانی مدت ۱۰ ساله تعمیم داده شده و در کنار هزینه‌های احداث تجهیزات به عنوان تابع هدف هزینه‌ها تعیین شده‌اند.
- مسئله طراحی بهینه بر پایه استخراج مقادیر بهینه ورودی‌ها و خروجی‌های تجهیزات در تمامی بلوک‌های زمانی، تدوین شده است. به عبارتی، در این روش طراحی بهینه، توأم با محاسبه مقادیر بهینه بهره‌برداری از تجهیزات تحت ترکیب‌های نامزد انجام می‌پذیرد.
- طراحی سپهر انرژی در یک مرحله با ثابت فرض کردن قیمت انرژی و در یک مرحله با در نظر گرفتن نامعینی قیمت برای حامل‌های انرژی در بازه‌های چندساله انجام گرفته است. مقادیر ساعتی پیش‌بینی شده بارهای الکتریکی و حرارتی هم معین فرض شده‌اند.

۳. فرمول‌بندی مسئله طراحی بهینه سپهر

در این بخش، مسئله طراحی بهینه سپهر انرژی با در نظر گرفتن مشخصه‌های کاری تجهیزات و طی روابط (۲) تا (۴۲) فرمول‌بندی می‌شود. هدف از این مسئله، طراحی تجهیزات سپهر با تابع هدف کاهش هزینه‌ها (مجموع هزینه سرمایه‌گذاری در تجهیزات و هزینه بهره‌برداری) و افزایش قابلیت اطمینان است؛ با این شرط که توان‌های الکتریکی و حرارتی در طول دوره برنامه‌ریزی تأمین شوند. مسئله طراحی بهینه سپهر مشخص خواهد کرد که کدام یک از تجهیزات نامزد سپهر و کدام نوع از آن‌ها و هر کدام به چه تعداد برای تأمین انرژی مورد استفاده قرار گیرند. تجهیزات نامزد برای سپهر انرژی شامل ترانسفورماتور، کوره گرمایی، دو نوع واحد CHP متفاوت (با مشخصه‌های کاری مختلف)، منبع ذخیره انرژی الکتریکی و منبع ذخیره انرژی حرارتی هستند. بعضی از این تجهیزات نیز شامل چند نوع مختلف از حیث توان کاری و هزینه احداث هستند که به ترتیب با اندیس‌های γ_{Tra} , γ_{Fur} , γ_{CHP_1} , γ_{CHP_2} , γ_{EES} و γ_{TES} مشخص شده‌اند.

۱.۳. تابع هدف

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

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

که در آن، TIC مجموع هزینه احداث تجهیزات و TOC هزینه توان الکتریکی و گاز مصرفی (هزینه بهره‌برداری) در طول دوره برنامه‌ریزی

طراحی بهینه سپهر انرژی برای بهره‌برداری توأم از سیستم‌های برق و گاز با... ۷

بهینه‌سازی، استفاده از تقریب تکه‌ای خطی^۱ است. در این روش، یک منحنی غیرخطی به چند بلوک مجزا تقسیم می‌شود، به طوری که برای هر بلوک، تقریب جداگانه‌ای اختصاص می‌یابد و متغیرهایی نیز برای اعمال این بلوک‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت، با وجود اینکه تعداد متغیرهای بهینه‌سازی افزایش می‌یابد، در نهایت مسئله خطی‌سازی شده و با استفاده از روش رایج شاخه و حد^۲ به راحتی قابل حل خواهد بود. مزیت اصلی یک فرمول‌بندی خطی‌سازی شده در این است که حتی اگر ابعاد مسئله بزرگ هم باشد، جواب بهینه مطلق مسئله قابل دسترسی خواهد بود. این امتیاز تقریباً به مسائلی محدود می‌شود که در قالب کلی برنامه‌ریزی خطی مرکب عدد صحیح (MILP^۳) جای می‌گیرند. چراکه دسترسی به جواب بهینه مطلق برای مسائل غیرخطی در حالت کلی ناممکن بوده و برای مسائل موسوم به برنامه‌ریزی سهموی (Quadratic) مرکب عدد صحیح نیز منوط به برقراری شرایط خاصی است؛ بدتر اینکه حل‌کننده‌های تجاری موجود برای این قالب بهینه‌سازی، با افزایش ابعاد و متغیرهای مسئله از حل آن بازمی‌مانند. برای جلوگیری از بروز این مشکلات می‌توان مشابه مسائل بسیاری، از تقریب‌های تکه‌ای خطی استفاده کرد و بدیهی است با افزایش تعداد بلوک‌های تکه‌ای به کارگرفته شده در این روش می‌توان دقت محاسبات را هم به اندازه مطلوبی افزایش داد.

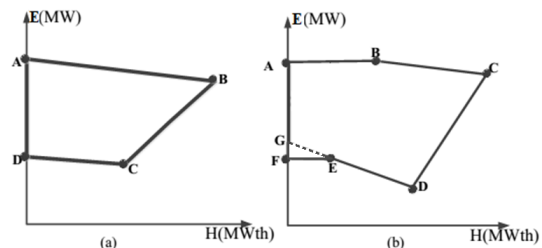
چنان‌که در رابطه (۱۱) آمده است، گاز مصرفی یک واحد CHP رابطه‌ای غیرخطی با توان الکتریکی و حرارت خروجی آن دارد. اگر گاز مصرفی CHP را به شکل تابعی دوبعدی از E و H و به صورت رویه خم‌داری در فضای سه‌بعدی تصور کنیم، تقریب‌های تکه‌ای خطی برای این رویه، شامل مجموعه صفحات پله‌مانندی خواهند بود. برای استخراج این پله‌ها در این مقاله از منحنی‌های موسوم به «منحنی‌های هم‌پتانسیل» استفاده می‌شود. منحنی‌های هم‌پتانسیل در واقع تصویر محل تلاقی صفحه سه‌بعدی مذکور با صفحات افقی با ارتفاع مشخص هستند. به عبارت دیگر، نقاط روی یک منحنی هم‌پتانسیل، مجموعه نقطه‌کارهای خروجی CHP هستند که مقدار گاز مصرفی CHP به‌ازای تمامی آن‌ها یکسان است. این منحنی‌ها برای واحد CHP نوع اول به صورت نقطه‌چین در شکل (۳) و به همراه مقدار گاز مصرفی متناظر با هر کدام نشان داده شده‌اند. برای استخراج این نقاط، معادله غیرخطی (۱۱) برای مقادیر مختلف از H و مقادیر مشخص از گاز ورودی (با فواصل ۲/۴ مگاوات) با حل‌کننده غیرخطی نرم‌افزار MATLAB حل شده است.

$$P_{\gamma, \min}^{out} \cdot u_{\gamma} \leq P_{\gamma, t}^{out} \leq P_{\gamma, \max}^{out} \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{Tra}, \gamma_{Fur} \quad (10)$$

۴.۳. قیود کاری واحدهای CHP

۱.۴.۳. مشخصه کاری واحدهای CHP

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، مقادیر توان خروجی الکتریکی و حرارتی واحدهای CHP تا حدی از یکدیگر مستقل بوده و تنها مرزهایی برای مشخص کردن حدود کاری آن‌ها وجود دارد. این مرزها به شکل چندضلعی‌هایی برای دو نوع CHP متفاوت در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. ناحیه محصور در این چندضلعی‌ها به اصطلاح «ناحیه عملی کاری (FOR)» نامیده می‌شود. ضلع AB در مشخصه CHP نوع اول (BC در CHP نوع دوم) حد کاری مربوط به بیشترین مصرف سوخت را نمایش می‌دهد. مشخص است که تحت شرایط خاصی مانند عدم دسترسی به برق شبکه، می‌توان با کاهش حرارت تولیدی این واحدها و تغییر نقطه‌کار از B به A، توان الکتریکی تولیدی را تا اندازه‌ای (حدود ۱۵٪ [۲۳]) افزایش داد. در CHP نوع اول، ضلع BC حدود کاری مربوط به بیشترین حرارت تولیدی و ضلع CD حدود مربوط به کمترین میزان از مصرف سوخت را مشخص می‌کند.



شکل (۲): مشخصه کاری توان‌های تولیدی CHP نوع اول (a) و CHP نوع دوم (b) [۲۴]

مقدار گاز مصرفی واحدهای CHP به صورت تابعی سهموی از توان الکتریکی و حرارتی تولیدی آن‌ها و مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در این مقاله، مشابه با صورت‌های دیگر انرژی، مقدار حامل انرژی گاز نیز با واحد معادل آن برای مگاوات و مگاوات‌ساعت بیان شده است.

$$P_{\gamma, t}^{in} = a_{\gamma} E_{\gamma, t}^2 + b_{\gamma} E_{\gamma, t} + c_{\gamma} u_{\gamma} + d_{\gamma} H_{\gamma, t}^2 + e_{\gamma} H_{\gamma, t} + f_{\gamma} E_{\gamma, t} H_{\gamma, t} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1}, \gamma_{CHP_2} \quad (11)$$

۲.۴.۳. استفاده از تقریب تکه‌ای خطی برای خطی‌سازی مشخصه کاری واحدهای CHP

یکی از روش‌های رایج برای ساده‌سازی روابط در مسائل مختلف

1. Piece-wise Linear Approximation
2. Branch and Bound
3. Mixed Integer Linear Programming

در این روابط، M عدد مثبت بزرگ دلخواهی است تا در مواقعی که $u_\gamma = 0$ است، مشکلی در برقراری روابط پیش نیاید. دو معادله (۱۵) و (۱۶) مشخص‌کننده وضعیت به‌کارگیری یا عدم به‌کارگیری واحد CHP در ترکیب سپهر هستند. پنج ناحیه مربوط به تقریب تکه‌ای خطی توسط معادلات (۱۷) تا (۱۹) بیان شده‌اند. در این روابط، مقادیر $r_{1,\gamma,t}$ تا $r_{5,\gamma,t}$ متغیرهای باینری مشخص‌کننده موقعیت نقاط کاری CHP هستند، به طوری که هر کدام از پنج ناحیه که نقطه کار CHP در آن واقع باشد، $r_{\gamma,t}$ مربوط به آن ناحیه یک بوده و $r_{\gamma,t}$ مربوط به بقیه نواحی صفر خواهد بود (رابطه ۱۷). در صورتی هم که CHP در سپهر حضور نداشته باشد، تمامی این متغیرهای این رابطه صفر خواهند بود.

$$\sum_{i=1}^5 r_{i,\gamma,t} = u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP} \quad (17)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^{M_i} - \frac{E_\gamma^{M_i} - E_\gamma^{N_i}}{H_\gamma^{M_i} - H_\gamma^{N_i}} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^{M_i}) \leq (1 - r_{i,\gamma,t})M \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP} \quad (18)$$

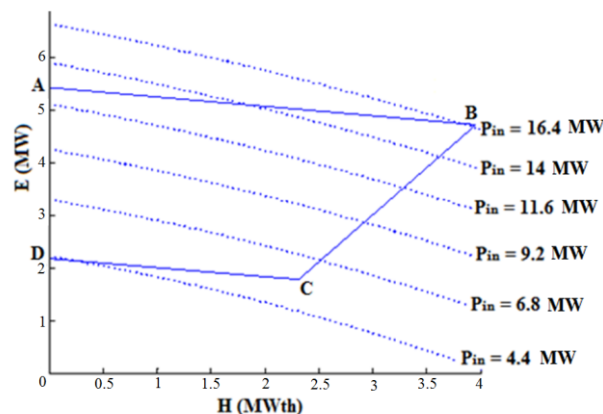
$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^{M_{i-1}} - \frac{E_\gamma^{M_{i-1}} - E_\gamma^{N_{i-1}}}{H_\gamma^{M_{i-1}} - H_\gamma^{N_{i-1}}} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^{M_{i-1}}) \geq -(1 - r_{i,\gamma,t})M \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP} \quad (19)$$

در این روابط، M_i و N_i نقاط تلاقی برآوردهای خطی منحنی هم‌پتانسیل نام با مرزهای چندضلعی مشخص‌کننده ناحیه کاری عملی هستند. دو رابطه (۱۸) و (۱۹) به ترتیب بیان می‌کنند که ناحیه i پایین پاره خط $M_i N_i$ و بالای پاره خط $M_{i-1} N_{i-1}$ قرار دارد. گاز مصرفی CHP نوع اول با استفاده از تقریب به دست آمده مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$P_{\gamma,t}^{in} = 5.6r_{1,\gamma,t} + 8r_{2,\gamma,t} + 10.4r_{3,\gamma,t} + 12.8r_{4,\gamma,t} + 15.2r_{5,\gamma,t} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (20)$$

۴.۴.۳ روابط کاری CHP نوع دوم

مطابق با روال ارائه شده، خطوط هم‌پتانسیل برای CHP نوع دوم نیز استخراج می‌شوند. این منحنی‌ها که در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند، نسبت به منحنی‌های شکل (۳) شیب کمتری دارند. این مسئله بیانگر این واقعیت است که نسبت گاز مورد نیاز برای تولید حرارت، به گاز مصرفی برای تولید توان الکتریکی، در این نوع CHP نسبت به CHP نوع اول کمتر است. در این شکل نیز اختلاف ارتفاع هر پله با پله مجاور به اندازه ۲/۱ مگاوات از گاز مصرفی انتخاب شده است. رابطه گاز مصرفی برای CHP نوع دوم در ادامه آمده است:



شکل (۳): منحنی‌های هم‌پتانسیل متناظر با مقادیر مختلف از گاز مصرفی برای CHP نوع اول

چنان‌که مشاهده می‌شود، منحنی‌های هم‌پتانسیل خوشبختانه در داخل بازه کاری CHP، طرح نسبتاً ساده‌ای دارند و با انجام یک برآورد خطی متوجه می‌شویم که بیشینه خطای تقریب این منحنی‌ها با خطوط راست کمتر از ۱/۱٪ است. در نتیجه به سادگی می‌توان این خطوط راست را به عنوان مرز پله‌های تقریب تکه‌ای خطی انتخاب کرد، به طوری که میانگین گاز مصرفی مربوط به هر دو منحنی هم‌پتانسیل مجاور به عنوان گاز مصرفی نقاط کار بین آن دو استفاده شود.

۳.۴.۳ روابط کاری CHP نوع اول

مرحله بعدی، تنظیم روابط به گونه‌ای است که تقریب پیشنهادی برای مشخصه ورودی-خروجی را در فرمول‌بندی مسئله وارد کند. چنان‌که مشاهده می‌شود، نقاط کاری CHP نوع اول مستقل از اینکه در کدام ناحیه تقریب واقع باشند، در داخل چهارضلعی مشخص شده با نقاط A, B, C, D قرار دارند. معادلات (۱۲) تا (۱۴) بیانگر این نکته هستند.

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^A - \frac{E_\gamma^A - E_\gamma^B}{H_\gamma^A - H_\gamma^B} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^A) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (12)$$

$$E_{\gamma,t} - E_\gamma^B - \frac{E_\gamma^B - E_\gamma^C}{H_\gamma^B - H_\gamma^C} (H_{\gamma,t} - H_\gamma^B) \geq -(1 - u_\gamma)M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (13)$$

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

$$0 \leq E_{\gamma,t} \leq E_\gamma^A \cdot u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (15)$$

$$0 \leq H_{\gamma,t} \leq H_\gamma^B \cdot u_\gamma \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (16)$$

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^B - \frac{E_{\gamma}^B - E_{\gamma}^C}{H_{\gamma}^B - H_{\gamma}^C} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^B) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_1} \quad (23)$$

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^C - \frac{E_{\gamma}^C - E_{\gamma}^D}{H_{\gamma}^C - H_{\gamma}^D} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^C) \geq -(1-u_{\gamma})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (24)$$

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^D - \frac{E_{\gamma}^D - E_{\gamma}^E}{H_{\gamma}^D - H_{\gamma}^E} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^D) \geq -(1-u_{\gamma})M \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (25)$$

$$0 \leq E_{\gamma,t} \leq E_{\gamma}^B \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (26)$$

$$0 \leq H_{\gamma,t} \leq H_{\gamma}^C \cdot u_{\gamma} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (27)$$

بزرگ‌ترین خطا برای برآورد خطی خطوط هم‌پتانسیل برای CHP

نوع دوم کمتر از ۱/۵ درصد است. بدیهی است با استفاده از مدل پیشنهادی برای خطی‌سازی بازه کاری، می‌توان تعداد پله‌های تقریب را به تعدادی افزایش داد که خطای تقریب‌زنی تکه‌ای خطی برابر با خطای برآورد خطی منحنی‌های هم‌پتانسیل برای هر نوع از واحدهای CHP باشد. در این صورت، تقریب خطی بسیار مناسبی از عملکرد غیرخطی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت به دست خواهد آمد که تأثیری راهبردی در حل مسائل طراحی و بهره‌برداری بهینه سپهر انرژی خواهد داشت.

۵.۳. قیود کاری منابع ذخیره انرژی

محدوده توان شارژ، توان دشارژ، حجم ذخیره‌سازی و مقدار انرژی ذخیره‌شده در منابع ذخیره انرژی به ترتیب توسط روابط (۲۸) تا (۳۱) مشخص می‌شوند. قید دیگری نیز که در این مدل‌سازی به کار رفته است، بیان می‌دارد که مقدار انرژی ذخیره‌شده در هر منبع ذخیره انرژی، در ساعت اول و ساعت ۲۴م از هر شبانه‌روز یکسان بوده و برابر با ۱۰ درصد از بیشینه حجم انرژی قابل ذخیره آن‌هاست.

$$S_{\gamma,\min}^{ch} \leq S_{\gamma,t}^{ch} \leq S_{\gamma,\max}^{ch} \quad \forall \gamma \in \gamma_{EES}, \gamma_{TES} \quad (28)$$

$$S_{\gamma,\min}^{dis} \leq S_{\gamma,t}^{dis} \leq S_{\gamma,\max}^{dis} \quad \forall \gamma \in \gamma_{EES}, \gamma_{TES} \quad (29)$$

$$V_{\gamma,\min} \leq V_{\gamma,t} \leq V_{\gamma,\max} \quad \forall \gamma \in \gamma_{EES}, \gamma_{TES} \quad (30)$$

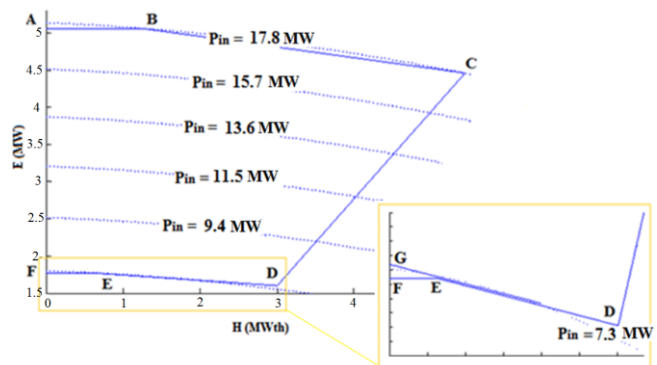
$$V_{\gamma,t} = V_{\gamma,t-1} + \eta_{\gamma}^{ch} S_{\gamma,t}^{ch} - S_{\gamma,t}^{dis} / \eta_{\gamma}^{dis} \quad \forall \gamma \in \gamma_{EES}, \gamma_{TES} \quad (31)$$

۴. قابلیت اطمینان

۱.۴. قابلیت اطمینان در سیستم‌های چندحامل

در بخش مقدمه مطرح شد که بهره‌برداری به‌روش سپهر انرژی، موجب افزایش چشم‌گیر قابلیت اطمینان تأمین توان می‌شود. یک دلیل اولیه این مسئله، استفاده از تجهیزات متعدد برای تأمین انرژی در این روش است

$$P_{\gamma,t}^{in} = 8.35r_{1,\gamma,t} + 10.45r_{2,\gamma,t} + 12.55r_{3,\gamma,t} + 14.65r_{4,\gamma,t} + 16.75r_{5,\gamma,t} \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (21)$$



شکل (۴): منحنی‌های هم‌پتانسیل متناظر با مقادیر مختلف از گاز مصرفی برای نوع دوم CHP

نکته دیگری که درباره CHP نوع دوم در مقالات اشاره شده، فرورفتگی مشخصه کاری در امتداد DEF است. این مسئله باعث غیرخطی شدن معادلات این بخش می‌شود که روش‌هایی نیز برای خطی‌سازی آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اهمیت این بحث از این ناشی می‌شود که در صورت نادیده گرفتن ناحیه محصور در مثلث EFG (شکل ۲) برای CHP‌های با اندازه بزرگ، مدل به دست آمده دارای خطای قابل توجهی خواهد بود. این در حالی است که در خصوص CHP‌های با اندازه مورد بحث در موضوع سپهر انرژی و با روالی که برای خطی‌سازی پیش گرفته شده است (تقریب تکه‌ای خطی)، این خطا قابل چشم‌پوشی خواهد بود. البته مشابه با بقیه تقسیم‌بندی‌ها، می‌توان این قسمت را نیز با چند معادله خطی مدل‌سازی کرد. اما چنان‌که در شکل (۴) قابل مشاهده است، امتداد منحنی هم‌پتانسیل زیرین و پاره‌خط DE، اختلاف بسیار اندکی با پاره‌خط EF دارند. در بخش بزرگ‌نمایی شده شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود که پاره‌خط بالایی را (که برآورد خطی از منحنی هم‌پتانسیل در داخل ناحیه کاری را نشان می‌دهد) می‌توان با خطایی کمتر از ۱٪ با امتداد پاره‌خط DE تخمین زد. در این حالت، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با صرف نظر از مثلث کوچک EFG، می‌توان مرز بازه کاری CHP را معادل با چندضلعی ABCDG دانست. روابط (۲۲) تا (۲۵) به ترتیب تضمین می‌کنند که نقاط کاری در داخل اضلاع AB, BC, CD و DG قرار دارند و روابط (۲۶) و (۲۷) وضعیت به‌کارگیری CHP را مشخص می‌کنند. برای تقسیم‌بندی مشخصه کاری به نواحی یک تا پنج نیز مطابق روابط (۱۷) تا (۱۹) عمل می‌شود.

$$E_{\gamma,t} - E_{\gamma}^A - \frac{E_{\gamma}^A - E_{\gamma}^B}{H_{\gamma}^A - H_{\gamma}^B} (H_{\gamma,t} - H_{\gamma}^A) \leq 0 \quad \forall \gamma \in \gamma_{CHP_2} \quad (22)$$

اطمینان استفاده شده است. $EENS$ به مجموع انرژی‌های تأمین نشده به دلیل خروج تجهیزات در طول دوره برنامه‌ریزی اطلاق می‌شود، به طوری که مقدار کمبود انرژی ناشی از هر سناریوی خروج تجهیزات در احتمال وقوع آن سناریو ضرب می‌شود. در این مقاله، بنابه معیار رایج موسوم به امنیت $N-1$ ، سناریوهای مربوط به خروج یکی از تجهیزات سپهر (سناریو تک-خروجی) در محاسبه معیار قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده‌اند. طبق این توضیحات، شاخص $EENS$ برای تأمین بار نوع β مطابق رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$EENS^\beta = \sum_{\gamma} \sum_t \left(FOR_{\gamma} \times \prod_{\gamma' \neq \gamma} (1 - FOR_{\gamma'} u_{\gamma'}) \times u_{\gamma} LL_{\gamma,t}^\beta \right) \quad (32)$$

$$\square \sum_{\gamma} \sum_t FOR_{\gamma} u_{\gamma} LL_{\gamma,t}^\beta$$

که در آن، FOR نرخ خروج اجباری هر کدام از تجهیزات تأمین توان است که احتمال خروج آن در هر بازه زمانی را به صورت عدد ثابتی بیان می‌کند. برای محاسبه احتمال وقوع سناریو مربوط به خروج هر یک از تجهیزات سپهر، FOR المان مربوطه در احتمال عدم خروج بقیه تجهیزات ضرب می‌شود. می‌توان نشان داد مقدار عبارت اخیر که معادل با جمله $\prod (1 - FOR_{\gamma'} u_{\gamma'}) \forall \gamma' \neq \gamma$ در رابطه (۳۲) است، نزدیک به یک می‌باشد. به همین سبب، در سطر دوم این رابطه از آن صرف نظر شده است. در این رابطه، $LL_{\gamma,t}^\beta$ نشان‌دهنده مقدار بار تأمین نشده از نوع β در بازه زمانی t است که در اثر خروج γ رخ داده است. برای محاسبه این مقدار، باید ابتدا امکان تأمین کمبود توان ناشی از خروج γ توسط بقیه تجهیزات حاضر در سپهر را بررسی کرد. با فرض اینکه متغیر باینری $z_{\gamma,t}^\beta$ مشخص‌کننده این مسئله باشد، $LL_{\gamma,t}^\beta$ مطابق رابطه (۳۳) قابل محاسبه خواهد بود. صفر بودن $z_{\gamma,t}^\beta$ در این رابطه، بدین معنی است که تجهیزات حاضر در سپهر قابلیت رفع کامل کمبود توان ناشی از خروج γ را دارند. در غیر این صورت، $z_{\gamma,t}^\beta$ برابر با یک خواهد بود [۱۶].

$$LL_{\gamma,t}^\beta = z_{\gamma,t}^\beta \left(P_{\gamma,t}^{max,\beta} - (Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta) \right) \quad (33)$$

در این رابطه، $Reserve_t^\beta$ ذخیره توان موجود در سپهر را مشخص می‌کند که از رابطه (۳۴) به دست می‌آید.

$$Reserve_t^\beta = \sum_{\gamma} R_{\gamma,t}^\beta \quad (34)$$

که در آن، $R_{\gamma,t}^\beta$ توان مازاد قابل بهره‌برداری هر کدام از تجهیزات سپهر در شرایط وقوع خرابی و خروج تجهیزات است. به عبارتی دیگر، $R_{\gamma,t}^\beta$ به میزان افزایش توان ممکن هر کدام از تجهیزات در این شرایط اطلاق

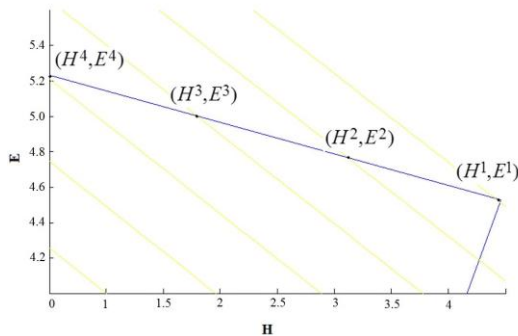
که به خودی خود باعث خواهد شد تا در صورت خروج یکی از تجهیزات، بتوان بخشی از کمبود توان را توسط بقیه تأمین کرد. برای نمونه، تصور کنید که طراحی بهره‌رشد چندان صورت نگیرد و توان الکتریکی مورد نیاز تنها از طریق ترانسفورماتور تأمین شود. طبیعی است که حتی در این حالت، در صورتی که از دو ترانسفورماتور کوچک به جای یک ترانسفورماتور بزرگ (با اندازه دو برابر) استفاده شود، سیستم قدرت قابلیت اطمینان بیشتری خواهد داشت. به کارگیری روش سپهر انرژی به خودی خود این امتیاز را برای سیستم تأمین انرژی به همراه دارد.

اما دلیل اصلی و مهم افزایش قابلیت اطمینان در طراحی بهره‌رشد سپهر انرژی، استفاده از چندین حامل انرژی مختلف در این روش است. در یک سپهر انرژی، تحت شرایط عدم دسترسی به شبکه برق، واحدهای CHP قادر خواهند بود با افزایش توان تولیدی، بخشی از (و یا تمامی) کمبود توان ایجاد شده را تأمین کنند. همچنین به طور مثال، در صورت خروج یکی از واحدهای CHP ، کمبود توان الکتریکی به وجود آمده می‌تواند توسط ظرفیت موجود بقیه واحدهای CHP و ترانسفورماتورها تأمین شود و برای جبران کمبود توان حرارتی نیز، علاوه بر دیگر واحدهای CHP از کوره‌های گرمایی موجود هم استفاده شود. علاوه بر این نکات، اولویت‌بندی بین بارهای الکتریکی و حرارتی در شرایط خروج تجهیزات نیز، یکی دیگر از عوامل دخیل در مدل‌سازی قابلیت اطمینان است. این اولویت‌بندی، به خصوص اگر مدل کامل کاری واحدهای CHP در طراحی سپهر به کار گرفته شده باشد، نقش پررنگ‌تری در شیوه بهره‌برداری تحت شرایط خروج تجهیزات خواهد داشت؛ چراکه در این مدل، آزادانه (البته با در نظر گرفتن نرخ شیب) می‌توان نقطه کار را متناسب با نوع نیاز (الکتریکی یا حرارتی) طوری تغییر داد که CHP مقادیر دلخواهی از توان‌های خروجی را تولید کند. در نظر گرفتن تمامی موارد اشاره شده در طراحی سپهر، مستلزم ادغام مدل قابلیت اطمینان با مسئله بهره‌برداری بهینه در فرمول‌بندی نهایی مسئله طراحی سپهر است. مسئله نهایی مصالحه‌ای خواهد بود بین دو عامل هزینه و قابلیت اطمینان تا در نهایت بهترین تجهیزات را برای حضور در ترکیب سپهر معرفی کند، شیوه بهره‌برداری بهینه از تجهیزات در طول دوره برنامه‌ریزی را استخراج کند و با توجه به اولویت میان بارهای الکتریکی و حرارتی، کمبود توان ناشی از خروج تجهیزات در بازه‌های زمانی مختلف را به حداقل برساند.

۲.۴. مدل قابلیت اطمینان

در این مقاله، از شاخص رایج $EENS$ به عنوان معیار ارزیابی قابلیت

برای خطی‌سازی مشخصه کاری CHP، فرض کنید که مرز پله‌های تقریب تک‌ای خطی، محدوده «بیشترین گاز مصرفی» را مطابق شکل (۵) در k نقطه قطع کند (در اینجا $k = 4$).



شکل (۵): تعیین نقطه پیشینه توان CHP در شرایط خروج تجهیزات با توجه به تقریب تک‌ای خطی

حال برای انتخاب یکی از این نقاط برای تعیین نقطه کار پیشینه توان در رابطه (۳۳) از چندین متغیر باینری $s_{i,\gamma,t}$ مطابق روابط (۳۸) تا (۴۰) استفاده می‌شود، به طوری که با انتخاب هریک از این نقاط به عنوان نقطه پیشینه توان، $s_{i,\gamma,t}$ متناظر با آن ناحیه یک بوده و برای بقیه صفر خواهد بود. مقادیر H_γ^i و E_γ^i روی شکل (۵) مشخص شده‌اند.

$$\sum_{i=1}^k s_{i,\gamma,t} = u_\gamma \quad (38)$$

$$P_{\gamma,\max}^{out,e} u_\gamma = s_{1,\gamma,t} E_\gamma^{S_1} + s_{2,\gamma,t} E_\gamma^{S_2} + \dots + s_{k,\gamma,t} E_\gamma^{S_k} \quad (39)$$

$$P_{\gamma,\max}^{out,h} u_\gamma = s_{1,\gamma,t} H_\gamma^{S_1} + s_{2,\gamma,t} H_\gamma^{S_2} + \dots + s_{k,\gamma,t} H_\gamma^{S_k} \quad (40)$$

با جمع‌بندی مطالب فوق و ادغام روابط (۳۲) و (۳۳)، رابطه کلی شاخص قابلیت اطمینان به شکل رابطه (۴۱) درمی‌آید.

$$EENS^\beta = \sum_\gamma \sum_t FOR_\gamma u_\gamma z_{\gamma,t}^\beta \left(P_{\gamma,t}^{out,\beta} - (Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta) \right) \quad (41)$$

چنان‌که مشاهده می‌شود، این رابطه شامل حاصل ضرب دو متغیر باینری u_γ و $z_{\gamma,t}^\beta$ و یک متغیر پیوسته (عبارت درون پارانتر) است. تکنیک‌های رایجی برای خطی‌سازی چنین مواردی وجود دارد که در فصل ۷ از مرجع [۲۵] هم قابل دسترس‌اند. اولی شامل تبدیل حاصل ضرب دو متغیر باینری به یک متغیر باینری است. دومی هم شامل خطی‌سازی حاصل ضرب یک متغیر باینری و یک متغیر پیوسته است که مستلزم اطلاع از کران بالا و پایین متغیر پیوسته (در اینجا $(P_{\gamma,t}^{out,\beta} - (Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta))$) می‌باشد. کران بالای این متغیر وقتی رخ می‌دهد که تمامی ظرفیت γ در حالت عادی به کار گرفته شده و هیچ ذخیره‌توانی نیز وجود نداشته باشد. کران پایین نیز مربوط به وضعیتی می‌شود که ظرفیت کامل تمامی تجهیزات نامزد به‌عنوان ذخیره عمل

می‌شود (توضیحات بیشتر در ادامه ارائه خواهد شد). در رابطه (۳۳)، $P_{\gamma,t}^{out,\beta}$ توان خروجی γ است و در صورتی که بخشی از این توان توسط بقیه تجهیزات قابل تأمین باشد $(Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta)$ ، بقیه آن به‌عنوان توان تأمین نشده $LL_{\gamma,t}^\beta$ تعیین می‌شود. با تعریف ارائه‌شده برای متغیر باینری $z_{\gamma,t}^\beta$ ، امکان یا عدم امکان رفع کامل کمبود توان از نوع β در صورت خروج γ در زمان t از طریق رابطه (۳۵) قابل استخراج خواهد بود [۲۳].

$$\frac{(P_{\gamma,t}^{out,\beta} - (Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta))}{G} \leq z_{\gamma,t}^\beta \quad (35)$$

$$\leq 1 + \frac{(P_{\gamma,t}^{out,\beta} - (Reserve_t^\beta - R_{\gamma,t}^\beta))}{G}$$

که در آن، G یک عدد مثبت بزرگ دلخواه است. در صورتی که عبارت سمت چپ این رابطه کوچک‌تر از صفر باشد، الزاماً صفر بوده و در غیر این صورت برابر با یک خواهد بود. برای محاسبه $R_{\gamma,t}^\beta$ برای هر کدام از تجهیزات نیز باید دقت داشت که میزان افزایش توان تجهیزات، محدود به ظرفیت دسترس آن‌ها و نرخ شیب این تجهیزات خواهد بود. این دو نکته به ترتیب در روابط (۳۶) و (۳۷) بیان شده‌اند که در آن، MRR_γ^β پیشینه توان قابل افزایش γ از نوع β در زمان نسبتاً کوتاهی است.

$$R_{\gamma,t}^\beta \leq P_{\gamma,\max}^{out,\beta} u_\gamma - P_{\gamma,t}^{out,\beta} \quad (36)$$

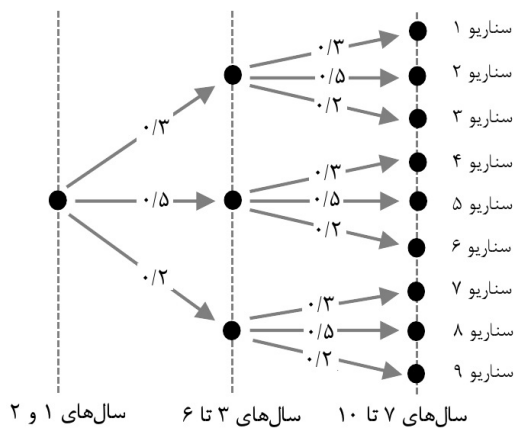
$$0 \leq R_{\gamma,t}^\beta \leq MRR_\gamma^\beta u_\gamma \quad (37)$$

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، یکی از قابلیت‌های راهبردی واحدهای CHP، تغییر نسبت توان الکتریکی/حرارتی تولیدی در شرایط خروج تجهیزات است. برای تعمیم رابطه (۳۳) برای در نظر گرفتن ناحیه کاری CHP باید توجه داشت که پیشینه توان کاری واحدهای CHP شامل یک نقطه کار خاص در ناحیه کاری CHP نیست، بلکه شامل بازه‌ای از مقادیر مختلف توان خروجی الکتریکی و حرارتی است. این بازه کاری برای CHP نوع اول شامل پاره خط AB و برای CHP نوع دوم شامل پاره خط BC است که به اصطلاح با مرز «بیشترین گاز مصرفی» شناخته می‌شود و می‌توان متناسب با نوع نیاز، نقطه کار پیشینه توان را در هر نقطه‌ای از این بازه انتخاب کرد. برای مثال در CHP نوع دوم، با تغییر نقطه کار از C به B و کاهش توان حرارتی خروجی، می‌توان پیشینه توان الکتریکی تولیدی را به‌انداز ۱۵ درصد [۲۲] افزایش داد. انتخاب مناسب‌ترین نقطه به‌عنوان نقطه پیشینه توان باید متناسب با اولویت‌بندی پیش فرض بین تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی و برای هر بازه زمانی به‌طور جداگانه صورت گیرد. برای این کار، متغیرهای جدیدی به کار گرفته می‌شوند تا این انتخاب را برای هر بازه زمانی ممکن سازند. با توجه به ایده مطرح‌شده

دوره چهارساله دچار تغییرات احتمالی می‌شود. در این روش، قیمت انرژی بعد از دو سال اول شامل یکی از سه حالت زیر خواهد بود:

۱. افزایش ۲۰ درصدی قیمت انرژی با احتمال وقوع ۳۰ درصد
۲. ثابت بودن قیمت انرژی با احتمال وقوع ۵۰ درصد
۳. کاهش ۱۵ درصدی قیمت انرژی با احتمال وقوع ۲۰ درصد

بعد از یک دوره چهارساله، در ابتدای سال هفتم نیز این سه حالت برای بقیه سال‌ها دوباره تکرار خواهد شد. به این ترتیب، تغییرات قیمت هر حامل انرژی در بازه ۱۰ ساله برنامه‌ریزی، شامل ۹ سناریو خواهد بود که در شکل (۶) نمایش داده شده است. در این شکل، احتمال وقوع هر یک از سناریوها از حاصل ضرب دو احتمال متوالی منجر به سناریو به دست می‌آید، به طوری که برای مثال، احتمال وقوع سناریوی ۲ برابر با ۱۵ درصد ($0.3 \times 0.5 = 0.15$) است.



شکل (۶): سناریوهای مربوط به نامعینی قیمت

با این توضیحات، تابع هدف بهینه‌سازی با در نظر گرفتن نامعینی قیمت انرژی، به صورت رابطه (۴۳) خواهد بود.

$$\min_{\gamma} (TIC + EOC) \quad (43)$$

$$EOC = \sum_{s=1}^9 (\pi(s) TOC(s)) \quad (44)$$

در این روابط، TIC هزینه سرمایه‌گذاری کل و EOC هزینه بهره‌برداری مورد انتظار با توجه به مجموعه سناریوهاست. $TOC(s)$ نیز هزینه بهره‌برداری کل تحت سناریوی s است که در احتمال وقوع آن $\pi(s)$ ضرب شده است. هزینه سرمایه‌گذاری کل مشابه با حالت معین و مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود، در حالی که $TOC(s)$ از روی رابطه (۴۵) به دست می‌آید. در این رابطه، $\lambda_{1,r}^{\alpha}(s)$ قیمت ساعتی انرژی (مربوط به حامل انرژی α) در دو سال اول، $\lambda_{2,r}^{\alpha}(s)$ به عنوان قیمت ساعتی انرژی در دوره چهارساله اول و $\lambda_{3,r}^{\alpha}(s)$ به عنوان قیمت ساعتی انرژی در دوره چهارساله دوم هستند. CRF نیز با توجه به تقسیم‌بندی

کنند. با این توضیحات، کران بالای قیمت مذکور برابر با $P_{\gamma, \max}^{out, \beta}$ و کران پایین آن برابر با $P_{\gamma, \max}^{out, \beta} + \min_{\gamma} (P_{\gamma, \max}^{out, \beta}) - \sum_{\gamma} (P_{\gamma, \max}^{out, \beta})$ خواهد بود.

باتوجه به مطالب ارائه شده، $EENS$ معیاری از عدم تأمین قابلیت اطمینان است که برای استفاده از آن در تابع هدف مسئله، باید در قالب تابع جریمه ارائه شود. تابع جریمه PC با استفاده از ضرایب $VOLL^{\beta}$ در رابطه (۴۲) تعریف شده است.

$$PC = \frac{VOLL^e \cdot EENS^e + VOLL^h \cdot EENS^h}{IR(1+IR)^Y / ((1+IR)^Y - 1)} \quad (42)$$

در این رابطه، مقادیر $VOLL^{\beta}$ به منزله توابع وزنی هستند که اهمیت افزایش قابلیت اطمینان در مقابل کاهش هزینه‌ها و همچنین اولویت بندی بین بارهای الکتریکی و حرارتی را مشخص می‌کنند.

۵. طراحی بهینه سپهر انرژی با در نظر گرفتن نامعینی

قیمت حامل‌های انرژی

برای اعمال نامعینی قیمت به مسئله طراحی بهینه سپهر در طول دوره برنامه‌ریزی از روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای^۱ استفاده شده است. برنامه‌ریزی تصادفی، چارچوبی برای مدل‌سازی آن دسته از مسائل بهینه‌سازی است که برخی اطلاعات مربوط به تابع هدف یا قيود آن‌ها حاوی نامعینی باشد. در برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، متغیرهای مسئله در دو مرحله و با در نظر داشتن مجموعه‌ای از سناریوها تعیین می‌شوند. متغیرهای مسئله هم شامل دو دسته‌اند: دسته اول که به متغیرهای مرحله اول یا متغیرهای *here and now* موسوم‌اند، تحت تمامی سناریوها مقدار یکسانی دارند. متغیرهای مرحله دوم یا متغیرهای *wait and see* هم باتوجه به نتایج حاصل از مرحله اول به دست آمده و تحت هر سناریو مقادیر مختلفی به خود می‌گیرند [۲۶ و ۲۷]. در مسئله طراحی بهینه سپهر، متغیرهای باینری مشخص‌کننده وضعیت به کارگیری تجهیزات (u_r) ، متغیرهای مرحله اول را تشکیل داده و متغیرهای مرحله دوم شامل مقادیر توان‌های ورودی و خروجی تجهیزات یا به عبارتی دیگر، خروجی‌های مسئله «بهره‌برداری بهینه» هستند.

تعداد سناریوهای مربوط به نامعینی قیمت حامل‌های انرژی متناسب با حجم محاسبات طراحی انتخاب می‌شود. این نامعینی همچنین به دلیل اینکه طراحی برای یک بازه بلندمدت انجام می‌پذیرد، به صورت بلندمدت اعمال شده است. بدین ترتیب، قیمت انرژی در دو سال اول ثابت فرض شده و در هشت سال بعدی نیز به صورت دو

تقسیم‌بندی دوتایی مربوط به روزهای طول هفته و آخر هفته نیز جزو تقسیم‌بندی‌های مدنظر برای بلوک‌های زمانی در این مقاله است. این دو نکته توسط ضرایب تعیین شده در جدول (۲) اعمال شده‌اند. با این توضیحات، تعداد بلوک‌های زمانی برنامه‌ریزی برای طول مدت یک سال برابر با $192 = 4 \times 2 \times 24$ بلوک است.

مشخصات کامل تجهیزات نامزد برای حضور در ترکیب سپهر در جداول (۳) و (۴) ارائه شده‌اند. مقادیر مربوط به ضرایب سوخت مصرفی واحدهای CHP (برگرفته از مقادیر موجود در مرجع [۲۳]) در جدول (۵) آمده‌اند. واحدهای CHP از دسته‌ای از توربین‌های گازی (موسوم به GGT در مرجع [۲۸]) انتخاب شده و اندازه آن‌ها نیز با استفاده از اطلاعات موجود در مراجع [۲۸ و ۲۹] تعیین شده‌اند. مقادیر توان‌های مربوط به ناحیه کاری عملی این واحدها نیز از مرجع [۲۴] برگرفته شده و در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

۲.۶. نتایج عددی

۱.۲.۶. طراحی بهینه سپهر انرژی با در نظر گرفتن قیمت‌های

معین برای حامل‌های انرژی

طراحی تجهیزات تأمین و ذخیره انرژی تحت ۹ حالت مختلف از به‌کارگیری تجهیزات و شاخص‌های طراحی مختلف انجام گرفته است و نتایج به‌همراه مقادیر توابع هدف هزینه و قابلیت اطمینان در جدول (۷) ارائه شده‌اند. حالت اول مربوط به بهره‌برداری‌های جداگانه از سیستم‌های برق و گاز و بدون در نظر گرفتن ایده سپهر انرژی است که بیشترین تابع هزینه را به خود اختصاص داده است. با اضافه کردن واحدهای ذخیره‌کننده انرژی در حالت دوم مشاهده می‌شود که علاوه بر کاهش تعداد ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی، مجموع هزینه‌های بهره‌برداری و احداث تجهیزات به اندازه ۱/۹ درصد کاهش یافته است. در حالت‌های سوم و چهارم تأثیر به‌کارگیری هر نوع از واحدهای CHP در تابع هزینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حالت پنجم نشان می‌دهد که با استفاده از واحدهای CHP، تعداد ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی مورد نیاز به ۲ و ۱ کاهش یافته است. بعد از اضافه کردن ذخیره‌سازها در حالت شش، این تعداد به ۱ و ۰ رسیده است و هزینه کل بهره‌برداری و احداث تجهیزات تا ۶۱/۳۸۵ میلیون دلار کاهش پیدا کرده است که کاهش ۲۵ درصدی نسبت به حالت اول را نشان می‌دهد. دلیل اصلی این مسئله، قیمت پایین حامل انرژی گاز در مقایسه با برق و البته بازده بالای تولید توان در واحدهای CHP است.

مطرح شده درباره بازه‌های سه‌گانه اعمال نامعینی، اصلاح شده است.

$$TOC(s) = \left(\sum_{\alpha} \sum_t P_{Tot,t}^{in,\alpha}(s) \cdot \lambda_{1,t}^{\alpha}(s) \right) \times \left(\frac{(1+IR)^2 - 1}{IR(1+IR)^2} \right) + \left(\sum_{\alpha} \sum_t P_{Tot,t}^{in,\alpha}(s) \cdot \lambda_{2,t}^{\alpha}(s) \right) \times \left(\frac{(1+IR)^6 - 1}{IR(1+IR)^6} - \frac{(1+IR)^2 - 1}{IR(1+IR)^2} \right) + \left(\sum_{\alpha} \sum_t P_{Tot,t}^{in,\alpha}(s) \cdot \lambda_{3,t}^{\alpha}(s) \right) \times \left(\frac{(1+IR)^{10} - 1}{IR(1+IR)^{10}} - \frac{(1+IR)^6 - 1}{IR(1+IR)^6} \right) \quad (45)$$

بقیه روابط مربوط به فرمولاسیون برنامه‌ریزی تصادفی، مشابه با روابط (۵) تا (۳۱) است، با این تفاوت که تمامی متغیرهای مسئله به‌جز TIC و متغیرهای باینری مشخص‌کننده وضعیت به‌کارگیری تجهیزات (u_p)، تابعی از سناریو (s) هستند.

۶. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش، مدل ارائه‌شده روی یک سیستم موردی پیاده‌سازی شده و نتایج مسئله طراحی بهینه برای آن ارائه می‌شود. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار GAMS و در قالب MILP پیاده‌سازی شده و برای حل آن از حل‌کننده CPLEX استفاده شده است. رایانه شخصی با پردازنده core i5 ۲/۶ GHz و با حافظه داخلی ۴ Gb برای اجرای شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مسائل طراحی بهینه با بیشینه زمان اجرای ۲۰ ساعت (مربوط به حالت‌های شامل قابلیت اطمینان) و با فاصله نسبی 10^{-1} شبیه‌سازی شده‌اند، اما نتایج نهایی بعد از حل بهره‌برداری بهینه با دقت 10^{-4} گزارش شده‌اند.

۱.۶. ورودی‌های مسئله

مقادیر بار الکتریکی و حرارتی و قیمت حامل‌های انرژی به‌صورت ساعتی برای مدت یک شبانه‌روز در جدول (۱) ارائه شده‌اند. قابل توجه است که در این مقاله، برای کاهش تعداد واحدهای زمانی برنامه‌ریزی، روش معمول موسوم به منحنی گسسته‌سازی شده مدت‌زمان بار (DLDC^۲) [۱۳] استفاده نشده است. در طراحی سپهر انرژی، طبقه‌بندی بازه‌های زمانی باید به‌صورتی انجام پذیرد که ارتباط بین دو منحنی بار الکتریکی و حرارتی نیز در نظر گرفته شود؛ چراکه تجهیزات طراحی شده باید قابلیت تأمین همزمان هر دو بار را داشته باشند و اطلاع همزمان از مقادیر آن‌ها در هر ساعت از شبانه‌روز ضروری است. علاوه بر ۲۴ بلوک زمانی شبانه‌روز، چهار فصل مختلف سال و

1. Relative Gap
2. Discretized Load Duration Curve

جدول (۱): مقادیر ۲۴ ساعته بارهای الکتریکی و حرارتی (MW) و قیمت برق و گاز (\$/MW)

ساعت	بار الکتریکی	بار حرارتی	قیمت برق	قیمت گاز	ساعت	بار الکتریکی	بار حرارتی	قیمت برق	قیمت گاز
۱	۴	۲	۸۰	۵۰	۱۳	۱۷	۱۰	۸۰	۵۰
۲	۴	۲	۸۰	۵۰	۱۴	۱۶	۴	۸۰	۵۰
۳	۴	۶	۸۰	۵۰	۱۵	۱۵	۴	۸۰	۵۰
۴	۶	۴	۹۰	۵۰	۱۶	۱۴	۴	۹۰	۵۰
۵	۸	۶	۹۰	۵۰	۱۷	۱۶	۱۰	۹۰	۵۰
۶	۱۰	۲	۹۰	۵۰	۱۸	۱۹	۱۲	۹۰	۵۰
۷	۱۰	۴	۱۰۰	۷۰	۱۹	۲۰	۱۴	۱۰۰	۷۰
۸	۱۱	۴	۱۰۰	۷۰	۲۰	۲۲	۱۶	۱۰۰	۷۰
۹	۱۲	۶	۱۱۰	۷۰	۲۱	۲۴	۱۷	۱۱۰	۷۰
۱۰	۱۴	۸	۱۱۰	۷۰	۲۲	۲۲	۱۴	۱۱۰	۷۰
۱۱	۱۶	۱۰	۱۲۰	۷۰	۲۳	۱۸	۸	۱۲۰	۷۰
۱۲	۱۸	۱۲	۱۲۰	۷۰	۲۴	۱۰	۴	۱۲۰	۷۰

جدول (۲): ضرایب مربوط به فصول مختلف و روزهای هفته

بهار	تابستان	پاییز	زمستان	طول هفته	آخر هفته
۰/۷	۱	۰/۹	۰/۸	۱	۰/۸
۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۸۵	۱	۱	۰/۸
۰/۸	۱	۰/۹	۰/۷	۱	۰/۸
۰/۸	۰/۷	۰/۹	۱	۱	۰/۸

جدول (۳): مشخصات ذخیره‌سازهای انرژی

تجهیزات	هزینه احداث (\$)	پیشینه انرژی MWh	کمپنه انرژی MWh	دشارژ MW	دشارژ توان شارژ و پیشینه توان شارژ و (%)	بازده شارژ و دشارژ
ذخیره‌ساز الکتریکی	۲۰۰۰۰۰	۱۰	۰/۵	۰	۴	۰/۸۵
ذخیره‌ساز حرارتی	۱۵۰۰۰۰	۱۰	۰/۵	۰	۲	۰/۷۵

جدول (۴): مشخصات مبدل‌های انرژی

تجهیزات	هزینه احداث (\$)	بازده (%)	ورودی (MW)	پیشینه توان (MW)	کمپنه توان	اجازت (%)	نرخ خروج MRR ^h
ترانسفورماتور سایز ۱	۳۰۰۰۰۰	۹۷	۷	۷	۰/۱	۳	۵/-
ترانسفورماتور سایز ۲	۴۵۰۰۰۰	۹۸/۵	۱۲	۱۲	۰/۲	۱/۵	۱۰/-
کوره گرمایی سایز ۱	۳۵۰۰۰۰	۷۵	۷	۷	۰/۰۷	۳	-/۵
کوره گرمایی سایز ۲	۴۰۰۰۰۰	۸۰	۱۰	۱۰	۰/۱۲	۲	-/۷
واحد CHP نوع اول	۱۰۰۰۰۰۰	-	-	-	-	۴	۲/۲
واحد CHP نوع دوم	۱۰۰۰۰۰۰	-	-	-	-	۴	۲/۲

جدول (۵): ضرایب مربوط به سوخت مصرفی واحدهای CHP

CHP	a	b	c	d	e	f
CHP نوع اول	۰/۳۱۰۵	۲/۹	۱/۱۸	۰/۲۷	۰/۸۴	۰/۲۷۹
CHP نوع دوم	۰/۲۳۹۲۵	۷/۳۳	۰/۹۴	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۶۰۵

جدول (۶): مقادیر توان نقطه کارهای ناحیه کاری عملی (MW)

CHP	E ^A	E ^B	E ^C	E ^D	E ^E	E ^F
CHP نوع اول	۵/۴۳	۴/۸۳	۰/۵۷	۰/۶۴	-	-
CHP نوع دوم	۵/۰۵	۵/۰۵	۴/۴۶	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۷۵

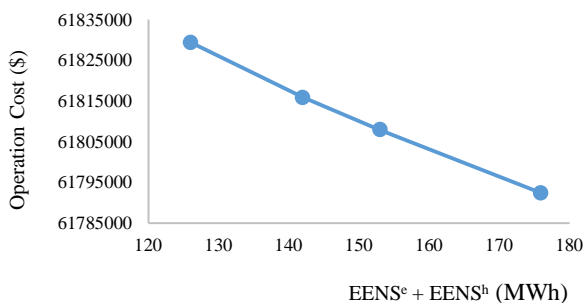
CHP	H ^A	H ^B	H ^C	H ^D	H ^E	H ^F
CHP نوع اول	۰	۳/۹۶	۱/۲۱	۰	-	-
CHP نوع دوم	۰	۱/۳۰	۵/۴۴	۰/۹۶	۰/۳۳	۰

جدول (۷): نتایج نهایی طراحی برای تجهیزات سپهر تحت حالت‌های مختلف

شماره حالت	CHP	ذخیره‌ساز انرژی	VOLL ^h / VOLL ^h (\$/MWh)		EENS ^h (MWh)	EENS ^h (MWh)	تابع هدف کل (M\$)	تابع جریمه (\$)	هزینه احداث (M\$)	ذخیره‌ساز		توان گرمایی				ترانسفورماتور	
			قابلیت اطمینان	ذخیره‌ساز انرژی						حرارتی	الکتریکی	CHP نوع دوم	CHP نوع اول	سایز ۱	سایز ۲	سایز ۱	سایز ۲
۱	-	-	-	-	۲۹/۵	۸۳/۷	۸۲/۳۲۲	-	۲/۳۵	-	-	-	-	۲	۱	۲	۱
۲	-	*	-	-	۲۷۲/۹	۶۲۶/۹	۸۰/۷۷۵	-	۲/۸۵	-	۱	۵	-	۲	۰	۲	۲
۳	نوع ۱	-	-	-	۲/۹۷	۰	۷۵/۸۶۰	-	۳/۵۵	-	-	-	-	۲	۰	۲	۲
۴	نوع ۲	-	-	-	۴۳/۳	۱۳۲/۶	۶۴/۴۸۳	-	۳/۱۵	-	-	-	-	۲	۰	۱	۱
۵	دو نوع	-	-	-	۴۳/۳	۱۳۲/۶	۶۴/۴۸۳	-	۳/۱۵	-	-	-	-	۲	۰	۱	۱
۶	دو نوع	*	-	-	۰	۵۶/۲	۶۱/۳۸۵	-	۴/۴	-	۲	۲	۴	۲	۰	۰	۰
۷	دو نوع	*	-	-	۱۲/۹	۰/۴	۶۳/۵۲۸	۱۶۷۷۹	۴/۸۵	-	۳	۳	۴	۲	۰	۰	۰
۸	دو نوع	*	-	-	۰	۱۵/۷	۶۳/۳۰۷	۱۹۳۵۳	۴/۷	-	۲	۲	۴	۱	۰	۰	۱
۹	دو نوع	*	-	-	۰	۰	۶۳/۷۹۰	۰	۴/۷۵	-	۲	۲	۴	۱	۱	۱	۲

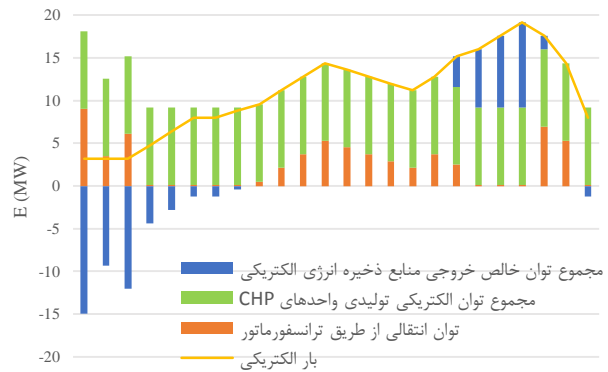
به سیستم تحمیل می‌شود. برای محاسبه مقادیر $EENS^{\beta}$ در حالت‌های ۱ تا ۶ که تنها شامل تابع هدف هزینه هستند، باید مقادیر بهینه $R_{7,t}^{\beta}$ و $\delta_{i,7,t}$ استخراج شوند. برای این کار بعد از محاسبه هزینه بهره‌برداری بهینه، شبیه‌سازی یک بار دیگر با همان تجهیزات به‌دست‌آمده و با رعایت قید دیگری که حاکی از برابر بودن هزینه بهره‌برداری با مقدار به‌دست‌آمده است، اجرا می‌شود.

استفاده از شاخص قابلیت اطمینان در تابع هدف مسئله طراحی بهینه، روند حل مسئله را به دو شیوه کلی تحت تأثیر قرار می‌دهد: اولی به تعداد و انواع تجهیزات مورد استفاده مربوط می‌شود، به طوری که ظرفیت مورد نیاز برای بهره‌برداری در شرایط خروج فراهم شود. نکته دوم مربوط به نوع بهره‌برداری است، بدین معنی که توان‌های خروجی تک‌تک این تجهیزات باید طوری تعیین شوند که با خروج هرکدام از آن‌ها کمترین کمبود توان به سیستم تحمیل شود. برای مطالعه این نکته، تجهیزات به‌دست‌آمده از حالت ۵، یک بار دیگر با تابع هدف هزینه به‌اضافه تابع جریمه قابلیت اطمینان مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از به‌کاربردن مقادیر مختلف $VOLL^{\beta}$ در این شبیه‌سازی در شکل (۸) به نمایش درآمده است. نتایج، مصالحه بین دو عامل هزینه و قابلیت اطمینان را در شیوه بهره‌برداری از یک ترکیب واحد از تجهیزات سپهر را نمایش می‌دهد. بدیهی است عوامل مختلفی از جمله ظرفیت تجهیزات، احتمال خروج اجباری، MRR و مشخصه ورودی-خروجی واحدهای CHP در این مصالحه نقش دارند.



شکل (۸): مصالحه بین قابلیت اطمینان و هزینه بهره‌برداری برای تجهیزات به‌دست‌آمده از حالت ۵

سهم تجهیزات مختلف در تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی در حالت‌های ۱، ۶ و ۹، به‌همراه حجم انرژی تبدیلی توسط ذخیره‌سازها و نیز مقادیر گاز و برق خریداری‌شده در طول یک سال در شکل (۹) برحسب مگاوات-ساعت نمایش داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود طراحی بدون قابلیت اطمینان (حالت ۶) بیشترین سهم گاز مصرفی را



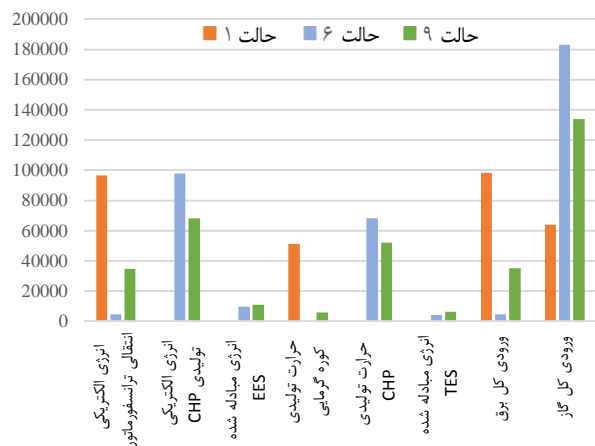
شکل (۷): توان‌های خروجی تجهیزات مختلف برای تأمین بار الکتریکی یک شبانه‌روز مربوط به حالت ۶

شکل (۷) سهم تجهیزات مختلف را در تأمین بار الکتریکی مربوط به یک شبانه‌روز از آخر هفته تابستان در حالت ۶ را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، سهم عمده تولید برق متعلق به واحدهای CHP است؛ درحالی‌که توان انتقالی از طریق ترانسفورماتور یا مربوط به ساعات اوج بار است یا مربوط به ساعاتی که قیمت حامل برق پایین بوده و برق انتقالی از شبکه برای شارژ منابع ذخیره انرژی الکتریکی به‌کار می‌رود. این انرژی ذخیره‌شده، طبق انتظار، برای تولید توان در ساعات پرباری و قیمت بالای برق استفاده می‌شود.

مقایسه نتایج مربوط به حالت‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که با اضافه کردن منابع ذخیره انرژی به ترکیب سپهر، هزینه‌ها به‌اندازه $4/8$ درصد کاهش می‌یابد و این نکته بیانگر این است که اضافه کردن منابع ذخیره انرژی به ترکیب سپهر نقش مؤثرتری نسبت به استفاده از آن‌ها در روش بهره‌برداری جداگانه ($4/8$ درصد) در مقایسه با $1/9$ درصد) دارد. دلیل کلی این مسئله، وجود دو حامل انرژی با قیمت‌های مختلف برای شارژ این منابع در ساعات کم‌باری است.

در حالت‌های ۷ تا ۹ قابلیت اطمینان به‌عنوان یک شاخص دیگر طراحی به‌کار گرفته شده است و تابع هزینه بهینه‌سازی، علاوه بر هزینه احداث و بهره‌برداری شامل تابع جریمه مربوط به قابلیت اطمینان نیز می‌باشد. در این حالت‌ها تجهیزات بیشتری نسبت به حالت‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و طبق انتظار، هزینه‌ها در مقایسه با حالت ۶ افزایش یافته است. دو ستون آخر از جدول (۷) مقادیر انرژی تأمین‌نشده در طول یک سال را با احتساب احتمال خروج تجهیزات مختلف نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که با افزایش مقادیر $VOLL^{\beta}$ ، مقادیر متناظر $EENS^{\beta}$ کاهش می‌یابد و بدین ترتیب با افزایش وزن شاخص قابلیت اطمینان در تابع هدف، هزینه بیشتری نیز

نسبت به بقیه دارد. مقادیر بازده کل (نسبت مجموع انرژی‌های خروجی به مجموع انرژی‌های ورودی) برای حالت‌های ۱، ۶ و ۹ به ترتیب ۹۱/۲، ۷۸/۸ و ۸۷/۵ درصد است.



شکل (۹): مقادیر ورودی حامل‌های انرژی و سهم تجهیزات مختلف در تولید انرژی موردنیاز الکتریکی و حرارتی برحسب مگاوات ساعت

را نشان می‌دهد. از طرفی دیگر، به‌کارگیری واحدهای CHP بیشتر، به‌معنی بهره‌گیری از مجموعه CHPها در توان‌های خروجی پایین‌تری است. این مسئله خودبه‌خود، بازده‌های کاری بالاتری را برای این واحدها تحت سناریوهای مختلف به‌همراه داشته و بدین طریق بخشی از افزایش هزینه‌ها را تا حدی جبران خواهد کرد. در نتیجه افزایش تعداد واحدهای CHP در این طراحی از سپهر انرژی، تعداد ترانسفورماتورهای موردنیاز نیز کاهش یافته و کوره گرمایی کوچک‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه نتایج طراحی سپهر با وجود ذخیره‌سازها (سطر انتهایی جدول ۸ و حالت ۶ از جدول ۷) نشان می‌دهد که با وجود اعمال نامعینی قیمت، ترکیب یکسانی برای تجهیزات به‌دست آمده است. این مسئله به این نتیجه اشاره دارد که استفاده از منابع ذخیره انرژی در ترکیب سپهر، می‌تواند انعطاف‌پذیری سپهر انرژی را در مقابل تغییرات قیمت در بلندمدت به‌میزان قابل‌توجهی افزایش دهد.

جدول (۸): نتایج طراحی بهینه با در نظر گرفتن نامعینی قیمت

ترانسفورماتور	کوره گرمایی		CHP وضع اول	CHP وضع دوم	ذخیره‌ساز		
	۱	۲			۱	۲	
۱	۱	۱	۱	۲	-	-	بدون ذخیره‌سازها
۲	۰	۰	۱	۲	۴	۲	با ذخیره‌سازها

جدول (۹) سهم تجهیزات مختلف در تأمین انرژی‌های الکتریکی و حرارتی موردنیاز سالیانه را برای تجهیزات نشان داده‌شده در جدول (۸) و تحت سه سناریوی نوعی ۲، ۵ و ۸ نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قیمت برق در سناریوهای ۲ تا ۸، انرژی الکتریکی بیشتری از طریق واحدهای CHP تولید شده و حجم انرژی انتقال‌یافته از طریق ترانسفورماتور کاهش پیدا کرده است. این نکته به‌وضوح مصالحه بین قیمت برق و تغییرات نقطه‌کار واحدهای CHP را نمایش می‌دهد که برخاسته از بازده کاری غیرثابت این واحدهاست. با افزایش قیمت برق، انرژی مبادله‌شده توسط منابع ذخیره انرژی نیز افزایش یافته و چنان‌که انتظار می‌رود، سهم دو حامل انرژی گاز و برق در تأمین انرژی‌های موردنیاز به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

۲.۲.۶. طراحی بهینه سپهر انرژی با در نظر گرفتن نامعینی قیمت

طراحی سپهر انرژی با در نظر گرفتن نامعینی قیمت حامل‌های انرژی طبق فرمول‌بندی ارائه‌شده در بخش ۵ و با در نظر گرفتن هر دو نوع CHP، یک بار بدون ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی و بار دیگر با به‌کارگیری آن‌ها در ترکیب سپهر انجام پذیرفته است. در این بخش با توجه به اینکه قیمت حامل گاز طبیعی در مقایسه با برق تغییرات کمتری دارد، از تغییرات قیمت گاز صرف‌نظر شده است. این در حالی است که قیمت جهانی برق در طولانی‌مدت تغییرات احتمالی زیادی دارد که این نکته با بیشینه افزایش تا ۴۰ درصد در پایان بازه ۱۰ ساله، در مسئله مدنظر قرار گرفته است.

قابل ذکر است که تعداد بلوک‌های زمانی مربوط به مسئله طراحی سپهر (۱۹۲ بلوک) در حالتی که نامعینی قیمت در مسئله اعمال شود، به دلیل استفاده از سه بازه مربوط به اعمال نامعینی، سه برابر می‌شود. این حجم از محاسبات متناسب با تعداد سناریوهای تغییرات قیمت هم به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تابع هدف بیان‌شده در رابطه (۴۳) در جدول (۸) ارائه شده است. با مقایسه نتایج این جدول برای طراحی سپهر بدون ذخیره‌سازها با حالت مشابهی که نامعینی قیمت در آن لحاظ نشده است (حالت ۵ از جدول ۷)، مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن نامعینی، تعداد CHPهای به‌کار گرفته‌شده یک واحد افزایش یافته است. این مسئله لزوم کاهش وابستگی به شبکه برق در سناریوهای با قیمت بالای برق

جدول (۹): سهم تجهیزات مختلف در تأمین انرژی‌های موردنیاز سالیانه و مقادیر ورودی حامل‌های انرژی در سناریوهای مختلف (بر حسب MWh)

سناریو	برق انتقالی	انرژی الکتریکی	انرژی مبادله شده		انرژی تولیدی		ورودی کل برق	ورودی کل گاز
			EES	کوره گرمایی	CHP	TES		
بدون ذخیره‌سازها	۱۱۴۳۹	۹۰۳۰۶	۰	۱۵۸۷	۷۱۳۷۷	۰	۱۱۶۱۳	۱۸۶۰۵۸
سناریو ۵	۱۲۷۸۳	۸۹۶۲	۰	۱۶۶۵	۷۱۰۴۱	۰	۱۲۹۷۸	۱۸۲۹۰۶
سناریو ۲	۱۴۷۴۲	۸۷۰۰۳	۰	۹۹۵	۷۱۳۴۲	۰	۱۴۹۶۶	۱۷۸۳۱۱
سناریو ۸	۳۰۱۸	۹۹۱۸۰	۹۸۰۵	۰	۶۸۶۳۰	۴۶۲۴	۳۱۱۱	۱۸۶۵۰۹
با ذخیره‌سازها	۴۴۲۹	۹۷۷۱۷	۹۷۲۳	۰	۶۸۱۱۳	۴۶۹۲	۴۵۶۵	۱۸۳۰۵۹
سناریو ۲	۵۸۳۴	۹۶۱۱۰	۹۳۶۵	۰	۶۷۰۹۲	۴۵۶۹	۶۰۱۴	۱۸۰۹۰۰

جدول (۱۰) هزینه‌های موردانتظار برای طراحی به‌دست‌آمده در جداول (۸) و (۱۱) هزینه‌های بهره‌برداری از آن‌ها را تحت سه سناریوی مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هزینه کل موردانتظار در مقایسه با حالت‌های مشابه (حالت‌های ۵ و ۶ از جدول ۷) به ترتیب ۱/۶ و ۰/۲ درصد افزایش داشته است. برای حالت بدون منابع ذخیره انرژی، بخشی از این مقدار به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط می‌شود. برای حالتی هم که از ذخیره‌سازها در ترکیب سپهر استفاده شده، افزایش کمی در هزینه‌های بهره‌برداری موردانتظار رخ داده است. این نکته حاکی از مزیت‌های ویژه استفاده از منابع ذخیره انرژی است که در مقادیر نشان‌داده شده در جدول (۱۱) نیز، در مقایسه با حالت بدون ذخیره‌سازها مشهود است.

جدول (۱۰): هزینه‌های بهره‌برداری موردانتظار و هزینه‌های احداث باتوجه به تابع هدف تعریف شده در رابطه (۴۳)

هزینه کل	هزینه احداث	هزینه بهره‌برداری	موردانتظار EOC (M\$)
۶۵/۵۲۸	۳/۸	۶۱/۷۲۸	بدون ذخیره‌سازها
۶۱/۵۱۷	۴/۴	۵۷/۱۱۷	با ذخیره‌سازها

جدول (۱۱): هزینه بهره‌برداری از تجهیزات به‌دست‌آمده تحت سناریوهای مختلف (بر حسب M\$)

سناریو	بدون ذخیره‌سازها	با ذخیره‌سازها
سناریو ۸	۶۲/۷۸۵	۵۷/۴۶۸
سناریو ۵	۶۱/۰۸۹	۵۶/۹۸۵
سناریو ۲	۵۹/۳۷۶	۵۶/۳۳۶

قابلیت اطمینان (حدود ۲۵ درصد، مربوط به حالت ۶) است. دلیل اصلی این مسئله، استفاده از تعداد بیشتر واحدهای CHP و جایگزین کردن تولید سهم بزرگی از برق موردنیاز با گاز طبیعی به‌جای تأمین برق از شبکه است. از طرفی دیگر، حرارت تولیدی همزمان واحدهای CHP (در ادغام با ذخیره‌سازهای حرارتی) برای تأمین بارهای حرارتی استفاده شد، به‌طوری‌که هیچ کوره گرمایی در این حالت به‌کار گرفته نشد. حدود ۳/۷ درصد از این میزان کاهش، به استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی مربوط می‌شود که نشان داده شد نقش مؤثرتری در کاهش هزینه‌های سپهر انرژی نسبت به حالت بهره‌برداری سنتی دارند.

طراحی سپهر با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان نتایج متفاوت تری داشت. تعداد تجهیزات بیشتری در این حالت‌ها به‌کار گرفته شدند و شیوه بهره‌برداری از تجهیزات باتوجه به این شاخص تحت تأثیر قرار گرفت، به‌طوری‌که با افزایش ۲/۵ درصدی هزینه‌ها نسبت به حالت ۶، توان تأمین نشده تحت تمامی سناریوهای تک-خروجی به صفر رسید. مزیت دیگر این طراحی، داشتن بازده کلی انرژی بیشتری نسبت به حالت ۶ (۸۷/۵ درصد در مقابل ۷۸/۸ درصد) است. البته شایان ذکر است که با در نظر داشتن بازده پایین تولید توان شبکه در نیروگاه‌های حرارتی و تلفات مسیر انتقال و دیدگاهی سراسری از تولید انرژی، بهره‌برداری به‌روش سپهر نه تنها از نقطه نظرهای هزینه و قابلیت اطمینان، بلکه از دید بازده کل انرژی نیز مزیت‌های فراوانی برای تأمین انرژی خواهد داشت.

با اعمال نامعینی قیمت انرژی در طولانی‌مدت، با وجود اینکه میزان و احتمال افزایش قیمت بیشتر از کاهش آن در نظر گرفته شده است، مشاهده شد که افزایش نسبتاً کمی در هزینه کل موردانتظار رخ داده است. این نتیجه حاکی از انعطاف‌پذیری روش سپهر انرژی برای مقابله با تغییرات قیمت است؛ چراکه تنوع تجهیزات در این روش کمک می‌کند تا بتوان متناسب با سناریوهای مختلف، سهم‌های متفاوتی از حامل‌های انرژی را به‌کار گرفت. در این خصوص،

در این مقاله، طراحی سپهر انرژی با به‌کارگیری مشخصه کاری عملی واحدهای CHP فرمول‌بندی شد و شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف بر روی یک سیستم آزمایش اجرا شدند. نتایج حاکی از کاهش قابل‌ملاحظه هزینه کل در طراحی بدون شاخص

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی سپهر انرژی با به‌کارگیری مشخصه کاری عملی واحدهای CHP فرمول‌بندی شد و شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف بر روی یک سیستم آزمایش اجرا شدند. نتایج حاکی از کاهش قابل‌ملاحظه هزینه کل در طراحی بدون شاخص

$VOLL^\beta$	جریمه ناشی از عدم تأمین قابلیت اطمینان به‌ازای
$EENS^\beta$	واحد
$\pi(s)$	احتمال وقوع سناریوی s ام
متغیرها	
u_γ	متغیر باینری مشخص‌کننده وضعیت به‌کارگیری مبدل γ
EOC	هزینه بهره‌برداری موردانتظار (expected operation cost)
$E_{\gamma,t} / H_{\gamma,t}$	توان الکتریکی / حرارتی خروجی CHP در زمان t
$R_{\gamma,t}^\beta$	مقدار افزایش توان γ از نوع β در زمان t
$Reserve_t^\beta$	ذخیره توان از نوع β در زمان t
$LL_{\gamma,t}^\beta$	توان تأمین‌نشده از نوع β در بازه زمانی t در اثر خروج γ
$P_{Tot,t}^{in,\alpha}$	توان کل ورودی حامل انرژی α به سپهر در زمان t
$S_{\gamma,t}^{ch} / S_{\gamma,t}^{dis}$	توان شارژ / دشارژ منبع ذخیره γ در زمان t
$V_{\gamma,t}$	انرژی ذخیره‌شده در منبع ذخیره γ در زمان t
$r_{i,\gamma,t}$	متغیر باینری مشخص‌کننده اینکه نقطه‌کار خروجی CHP در ناحیه i از ناحیه عملی کاری قرار دارد.
$z_{\gamma,t}^\beta$	متغیر باینری مشخص‌کننده اینکه تجهیزات سپهر قابلیت تأمین توان نوع β ناشی از خروج γ در زمان t را ندارند.
$s_{i,\gamma,t}$	متغیر باینری مشخص‌کننده اینکه نقطه‌کار خروجی CHP در شرایط خروج تجهیزات در زمان t ، در ناحیه i ام از محدوده «بیشترین گاز مصرفی» خواهد بود.

ذخیره‌سازهای انرژی نقش مهمی در افزایش این انعطاف‌پذیری ایفا می‌کنند. با وجود ذخیره‌سازها، سپهر انرژی درجه‌های آزادی بیشتری برای مقابله با تغییرات قیمت می‌یابد؛ به‌طوری‌که بنابه نتایج، میزان تغییرات در هزینه بهره‌برداری تحت سناریوهای مختلف، با وجود ذخیره‌سازها کاهش یافته است.

فهرست علائم

اندیس‌ها	
α	نوع حامل انرژی ورودی (برق یا گاز) $\alpha = \{e, g\}$
β	نوع انرژی خروجی (الکتریکی یا حرارتی) $\beta = \{e, h\}$
γ	اندیس مشخص‌کننده هرکدام از تجهیزات نامزد برای سپهر
t	اندیس مربوط به بلوک‌های زمانی t
s	اندیس مربوط به سناریو
پارامترها	
L_i^c / L_i^h	بار الکتریکی / حرارتی در زمان t
η_γ	بازده مبدل γ (برای ترانسفورماتورها و کوره‌های گرمایی)
$\eta_\gamma^{ch} / \eta_\gamma^{dis}$	بازده شارژ / دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی
λ_t^α	قیمت حامل انرژی α در زمان t
$\lambda_{1,t}^\alpha(s), \lambda_{2,t}^\alpha(s), \lambda_{3,t}^\alpha(s)$	قیمت حامل انرژی α در زمان t ، تحت سناریوی s ام در دوره‌های سه‌گانه ۲، ۴ و ۴ ساله بازه برنامه‌ریزی
IC_γ	هزینه احداث المان γ از سپهر
FOR_γ	نرخ خروج اجباری γ

مراجع

- [1] Luo X., Wang J., Dooner M., and Clarke J., "Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation", Applied Energy, Vol. 137, pp. 511-536, 2015.
- [2] Shahidehpour M., Fu Y., and Wiedman T., "Impact of Natural Gas Infrastructure on Electric Power Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, pp. 1042-1056, 2005.
- [3] Li T., Eremia M., and Shahidehpour M., "Interdependency of Natural Gas Network and Power System Security", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 23, pp. 1817-1824, 2008.
- [4] Geidl M. and Andersson G., "Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 22, pp. 145-155, 2007.
- [5] Proietto R., Arnone D., Bertoncini M., Rossi A., La Cascia D., Miceli R., et al., "Mixed Heuristic-nonlinear Optimization of Energy Management for Hydrogen Storage-based Multi Carrier Hubs", Energy Conference (ENERGYCON), IEEE International, pp. 1019-1026, 2014.
- [6] Liu C., Shahidehpour M., Fu Y., and Li Z., "Security-Constrained Unit Commitment with Natural Gas Transmission Constraints", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 24, pp. 1523-1536, 2009.
- [7] Zhang X., Shahidehpour M., Alabdulwahab A. S., and Abusorrah A., "Security-Constrained Co-Optimization Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Infrastructures", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 30, pp. 2984-2993, 2015.
- [8] Unsuhay-Vila C., Marangon-Lima J., Perez-Arriaga I. J., and Balestrassi P. P., "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, 2010.
- [9] Geidl M. and Andersson G., "Operational and Structural Optimization of Multi-carrier Energy Systems", European Transactions on Electrical Power, Vol. 16, pp. 463-477, 2006.
- [10] Ramirez-Elizondo L., Optimal Usage of Multiple Energy Carriers in Residential Systems: Unit Scheduling and Power Control, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, TU Delft, 2013.
- [11] Bozchalui M. C., Hashmi S. A., Hassen H., Cañizares C.,

- and Bhattacharya K., "Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids", Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 3, pp. 1755-1766, 2012.
- [12] Rayati M., Sheikhi A., and Ranjbar A. M., "Optimising Operational Cost of a Smart Energy Hub, the Reinforcement Learning Approach", International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, pp. 1-17, 2014.
- [13] Zhang X., Shahidepour M., and Alabdulwahab A., "Optimal Expansion Planning of Energy Hub With Multiple Energy Infrastructures" Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 6, pp. 2302-2311, 2015.
- [14] Qiu J., Dong Z. Y., Zhao J. H., Meng K., Zheng Y., and Hill D. J., "Low Carbon Oriented Expansion Planning of Integrated Gas and Power Systems", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 30, pp. 1035-1046, 2015.
- [15] Sheikhi A., Ranjbar A. M., H. Oraee, and Moshari A., "Optimal Operation and Size for an Energy Hub with CCHP", Energy and Power Engineering, Vol. 3, p. 641, 2011.
- [16] Koepfel G. and Andersson G., "Reliability Modeling of Multi-carrier Energy Systems", Energy, Vol. 34, pp. 235-244, 2009.
- [17] Alabdulwahab A., Abusorrah A., Zhang X., and Shahidepour M., "Coordination of Interdependent Natural Gas and Electricity Infrastructures for Firming the Variability of Wind Energy in Stochastic Day-Ahead Scheduling", Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol. 6, pp. 606-615, 2015.
- [18] Wasilewski J., "Integrated Modeling of Microgrid for Steady-state Analysis Using Modified Concept of Multi-Carrier Energy Hub", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 73, pp. 891-898, 2015.
- [19] Geidl M., *Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems*, Ph.D. Thesis, TU Graz, Styria, Austria, 2007.
- [20] Geidl M., Koepfel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., and Frohlich K., "Energy Hubs for the Future", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5, pp. 24, 2007.
- [21] Bouffard F. and Galiana F. D., "An Electricity Market with a Probabilistic Spinning Reserve Criterion", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 19, pp. 300-307, 2004.
- [22] Farret F. A. and Simões M. G., *Integration of Alternative Sources of Energy*, John Wiley & Sons, 2006.
- [23] Alipour M., Mohammadi-ivatloo B., and Zare K., "Stochastic Scheduling of Renewable and CHP based Microgrids", Industrial Informatics, IEEE Transactions on, Vol. 11, pp. 1049-1058, 2015.
- [24] Shahmohammadi A., Moradi-Dalvand M., Ghasemi H., and Ghazizadeh M., "Optimal Design of Multicarrier Energy Systems Considering Reliability Constraints", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 30, pp. 878-886, 2015.
- [25] Bisschop J., *AIMMS Optimization Modeling*, Lulu, 2006.
- [26] Conejo A. J., Carrion M., and Morales J. M., *Decision Making under Uncertainty in Electricity Markets*, Springer, Vol. 1, 2010.
- [27] A. Soroudi, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Rabiee, "Energy Hub Management with Intermittent Wind Power", Large Scale Renewable Power Generation, pp. 413-438, 2014.
- [28] Koltsaklis N. E., Kopanos G. M., and Georgiadis M. C., "Design and Operational Planning of Energy Networks Based on Combined Heat and Power Units", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 53, pp. 16905-16923, 2014.
- [29] Koltsaklis N. E., Kopanos G. M., Konstantinidis D., and Georgiadis M. C., "Design and Operational Planning of an Urban Energy Network based on Combined Heat and Power Generators", Computer Aided Chemical Engineering, Vol. 33, pp. 1825-1830, 2014.