

جایابی و تعیین بهینه ظرفیت واحدهای تولید هم‌زمان گازسوز جهت تأمین برق و حرارت در یک شهرک صنعتی

میثم، انصاری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهرداد، ستایش نظر، استادیار^{۲*}

^۱دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق- تهران- ایران

ansari.meisam@gmail.com

^۲دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق- تهران- ایران

msnazar@pwut.ac.ir

ارسال مقاله: ۹۰/۳/۱۳ اصلاحیه: ۹۱/۲/۱

پذیرش مقاله: ۹۱/۲/۹

چکیده: شرکت‌های خدماتی که مسئولیت بهره‌برداری شبکه برق شهرک‌های صنعتی را به عهده دارند، برق مورد نیاز خود را از بازار عمده‌فروشی برق و یا از واحدهای گازسوز موجود در شبکه تأمین می‌کنند. از دیدگاه فنی و اقتصادی، ارائه طرح بهینه نصب واحدها در شبکه، نقشی حیاتی در بهینگی شرایط بهره‌برداری این شرکت‌ها دارد. در این مقاله، روشی شبه دینامیکی برای ارائه طرح بهینه توسعه چندساله، شامل تعیین مکان نصب، زمان، ظرفیت الکتریکی و حرارتی واحدهای تولید هم‌زمان گازسوز یک شهرک صنعتی ارائه شده است. مسئله مدل شده، در قالب یک فرآیند بهینه‌سازی مقید به قیود تأمین انرژی مصرف‌کننده، قیود واحد گازسوز و سیستم بازیافت حرارت، ارائه شده و مسئله با هدف کاهش هزینه شرکت خدماتی در یک بازه زمانی ۵ ساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. در تعریف مسئله، دو دیدگاه اولویت تولید حرارت یا تولید برق نیز در نظر گرفته شده است. در مطالعات عددی، روش مورد نظر برای طرح توسعه واحدهای تولید هم‌زمان گازسوز در فیدر فشار متوسط منطقه صنعتی تهران مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نهایی، کارایی این روش را در کاهش هزینه‌ها در طول ۵ سال بهره‌برداری نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: توسعه سیستم تولید، تولید هم‌زمان گازسوز، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، بازار عمده‌فروشی برق.

بهینه توسعه واحدهای تولید هم‌زمان در شبکه توزیع، عنصر زمان، مکان و ظرفیت نصب واحدهای گازسوز است. تعیین این پارامترها می‌تواند از دیدگاه سرمایه‌گذار، شرکت خدماتی و یا مصرف‌کننده انجام گیرد.

در این مقاله، مسئله توسعه واحدهای تولید هم‌زمان، از دیدگاه شرکت خدماتی صورت می‌گیرد. برای تعریف ریاضی هر مسئله بهینه‌سازی، سه بخش کلی شامل متغیرهای کنترلی مسئله، تابع هدف مسئله و قيود مسئله باید به طور دقیق مشخص شوند. متغیرهای کنترلی مسئله شامل مکان، زمان و ظرفیت بهینه برای نصب می‌باشد. همچنین برای تعیین این متغیرها از یک روش شبه دینامیکی استفاده می‌شود. در این روش، مسئله نصب واحدهای گازسوز برای یک دوره یک‌ساله حل می‌شود. بدین ترتیب، طرح لازم برای نصب واحدهای گازسوز برای هر سال، با در نظر گرفتن واحدهای نصب‌شده در سال قبل تعیین می‌شود. تعاریف ریاضی ارائه‌شده، از دیدگاه شرکت خدماتی می‌باشد. برای انجام محاسبات لازم، منحنی تداوم بار سالیانه شبکه به چندین پله مساوی تخمین زده می‌شود.

۱.۱.۲. تابع هدف

تابع هدف در راستای کاهش هزینه بهره‌برداری از شبکه در مدت N سال تعریف می‌شود. این هزینه‌ها شامل موارد چندگانه‌اند که به شرح زیر ارائه می‌شوند.

۱.۱.۲.۱. هزینه خرید برق از شبکه بالادست (بازار برق)

برای محاسبه این هزینه، قیمت پیش‌بینی شده بازار برق با منحنی تداوم بار به پله‌های مساوی تقسیم می‌شود. مجموعه روابط (۱) چگونگی محاسبه این هزینه را نشان می‌دهد [۲ و ۵].

$$f_{NET_{pur}}(n, t) = (1 + r_N)^n \cdot c_N(t) \cdot [E_{load}(n, t) - E_{CHP}(n, t)]$$

$$E_{load}(n, t) = (1 + r_e)^n \cdot PL(t) \cdot h(t) \quad (1)$$

$$E_{CHP}(n, t) = \sum_{i=1}^{n_{CHP}} P_{CHP_i}(n, t) \cdot h(t) \cdot K_{CHP}$$

۲.۱.۲. هزینه خرید برق از واحدهای گازسوز

با توجه به قوانین موجود در ایران، خرید برق از واحدهای گازسوز به دو صورت ساعتی و یا قرارداد تضمینی صورت می‌گیرد. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی مسئله از خرید تضمینی استفاده می‌شود. بدین ترتیب، هزینه خرید برق از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲ و ۵].

$$f_{CHP_{pur}}(n, t) = (1 + r_c)^n \cdot c_c(t) \cdot E_{CHP}(n, t) \quad (2)$$

۱. مقدمه

واحدهای تولید پراکنده^۱ (DG) با اهداف متعدد بهینه‌سازی نظیر بهبود مصرف انرژی، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق به کار گرفته می‌شوند. امروزه پیشرفت تکنولوژی، گستره وسیعی از انواع این واحدها و به‌خصوص واحدهای تولید هم‌زمان^۲ (CHP) ایجاد کرده است که می‌تواند در کاهش هزینه‌های تولید و توزیع انرژی به رقابت بپردازد. در این باره، مسئله افزودن این واحدها به شبکه توزیع با اهداف گوناگونی مطرح و با روش‌های مختلفی حل شده است.

در [۱] روشی برای طراحی یک سیستم تولیدسه‌گانه برق، حرارت و سرما و تعیین قیمت حامل‌های انرژی خروجی این سیستم ارائه گردیده است. که تابع هدف، سود حاصل از تولید حامل‌های انرژی سه‌گانه در مدت زمان کارکرد آن در نظر گرفته شده است. در [۲]، روشی برای تعیین نوع و تعداد میکروتوربین‌های گازی برای تأمین بار حرارتی و الکتریکی مشخص در طول یک سال ارائه شده، و مسئله با افزایش سود طرح حل شده است. در [۳]، روشی برای تعیین بهینه پارامترهای CHP برای مصرف‌کنندگان صنعتی ارائه شده است. در [۴]، مسئله تعیین پارامترهای CHP از دید یک کارخانه‌دار با هدف کاهش دوره بازگشت سرمایه تحلیل شده است. در [۵]، توسعه شبکه‌های توزیع با استفاده از DG و حل آن به روش الگوریتم اجتماع مورچگان مورد بحث قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، مالکیت واحدهای DG می‌تواند در اختیار شرکت‌های توزیع و یا بخش خصوصی باشد. در [۶ و ۷]، چگونگی وضع قوانین اتصال به شبکه و چگونگی خرید برق از واحدهای DG تحت اختیار بخش خصوصی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در [۸]، مسئله توسعه تولید و شبکه به صورت توأم و از دید یک شرکت توزیع و مبتنی بر مفهوم هاب انرژی، با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سیستم حل شده است. در [۹]، مسئله تعیین پارامترهای یک سیستم تولید هم‌زمان از دید یک شرکت خدماتی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در افق برنامه‌ریزی ارائه گردیده است.

۲. طرح مسئله

برای تعیین یک طرح بهینه توسعه CHP در یک شبکه توزیع برق، باید مسئله را از ابعاد گوناگون مانند قيود فنی شبکه، مشخصات واحدهای گازسوز، تأثیر در محیط زیست، تحلیل اقتصادی و قيود حاکم بر مسئله مورد بررسی قرار داد. مهم‌ترین پارامترهای لازم برای تعیین یک طرح

1. Distributed Generation (DG)

2. Combined Heat and Power (CHP)

۳.۱.۲. هزینه ناشی از تلفات

رابطه (۳) چگونگی محاسبه هزینه تلفات را نشان می‌دهد [۲ و ۱۰].

$$f_{loss}(n, t) = c_N(t) \cdot (1 + r_N)^n \cdot E_{loss}(n, t)$$

$$E_{loss}(n, t) = h(t) \cdot \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{n_{bus}} R_{ij} \cdot I_{ij}^2(n, t) \quad (3)$$

۴.۱.۲. هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده

برای محاسبه هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده از مجموعه روابط (۴) استفاده می‌شود [۲ و ۵].

$$f_{ENS}(n, t) = \frac{h(t)}{8760} \sum \sum \lambda_{ij} \cdot r_j \cdot (1 + r_s)^n \cdot PL_i(t) \cdot c_s(t) \quad (4)$$

رابطه‌های فوق، زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که منابع تولید پراکنده در شبکه وجود نداشته باشد. در حضور منابع تولید پراکنده در شرایطی که امکان ساخت جزیره وجود ندارد، هر واحد تنها می‌تواند تمام یا بخشی از بار محلی خود را تأمین کند. در این شرایط، هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$f_{ENS}(n, t) = \frac{h(t)}{8760} \sum_i U_i \cdot c_s(t) \cdot (1 + r_s)^n \cdot P_{Lo} \quad (5)$$

در این رابطه، P_{Lo} میزان باری است که در صورت تغذیه محلی، قابل تأمین می‌باشد. بدین ترتیب، هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده در شبکه‌های شعاعی را که امکان ساخت جزیره در آنها وجود ندارد، می‌توان قبل و بعد از حضور واحدهای تولید پراکنده محاسبه کرد.

۵.۱.۲. درآمد ناشی از بازیافت حرارت

این درآمد در واقع به مالک واحد تعلق می‌گیرد. اما اضافه کردن این پارامتر به تابع هزینه (به صورت منفی)، موجب می‌شود تا شین‌های دارای بار حرارتی از اولویت بیشتری برای نصب واحدهای گازسوز برخوردار شوند. برای در نظر گرفتن این درآمد، دو رویکرد وجود دارد: در دیدگاه اول بار حرارتی در اولویت قرار می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، هدف اصلی استفاده از واحدهای گازسوز، تأمین بار حرارتی محلی است و در کنار آن با تولید برق می‌توان تمام یا بخشی از نیاز مصرف‌کننده محلی را تأمین کرد. همچنین در صورت تولید برق مازاد بر مصرف محلی، می‌توان با فروش آن درآمدزایی کرد. در این طرح،

همه حرارت مورد نیاز توسط واحدهای نصب شده در محل تأمین می‌شود. واحدهای نصب شده باید توانایی تأمین بار حرارتی محلی را داشته باشند. در این حالت، حرارت بازیافتی به اندازه بار حرارتی است و درآمد حاصل از بازیافت حرارت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{rec}(n, t) = \sum_i U_{bf} \cdot C_f \cdot (1 + r_h)^n \cdot QD_i(t) \cdot h(t) \cdot K_{CHP} \quad (6)$$

در دیدگاه دوم، استفاده از واحدهای گازسوز جهت تولید برق و فروش آن به شبکه است. در کنار آن از حرارت بازیافتی این واحدها نیز برای تأمین بار حرارتی محلی استفاده می‌شود. در این حالت، میزان حرارت بازیافتی ممکن است توانایی تأمین بار محلی را نداشته باشد؛ به عبارت دیگر، حرارت بازیافتی برابر یا کمتر از میزان مصرف محلی است و درآمد حاصل از آن از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$R_{rec}(n, t) = \sum_i \min\{(1 + r_h)^n \cdot QD_i(t), Q_{CHP_i}(n, t)\} \cdot U_{bf} \cdot C_f \cdot h(t) \cdot K_{CHP} \quad (7)$$

هزینه کل سالیانه از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$tot_cost = \sum_{t=0}^{N-1} \sum_t cost(n, t) \cdot (1 + I)^{N-n}$$

$$cost(n, t) = f_{NET_pur}(n, t) + f_{CHP_pur}(n, t) + f_{loss}(n, t) + f_{ENS}(n, t) - R_{rec}(n, t) \quad (8)$$

۲.۲. قیود مسئله

مهم‌ترین قیود حاکم بر مسئله، قیود مربوط به شبکه و قیود مربوط به واحد تولید هم‌زمان و سیستم بازیافت حرارت است. مجموعه روابط (۹) قیود مربوط به شبکه را نشان می‌دهد. این قیود شامل قیود مربوط به پخش بهینه شبکه می‌باشد.

$$q_{Gi} - q_{Li} = \sum_{i=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{i=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$\sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{Li} + \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{n_{bus}} R_{ij} \cdot I_{ij,b}^2 = 0$$

$$\begin{cases} |F_{ij}| \leq F_{ij}^{max} \\ V_{min} < V_i < V_{max} \end{cases} \quad (9)$$

قیود مربوط به واحدهای گازسوز شامل دو بخش کلی می‌شود: بخش اول مربوط به کارکرد الکتریکی این واحدهاست. مجموعه روابط (۱۰) قیود مربوط به این قسمت را نشان می‌دهد. این قیود، شامل محدوده تولید توان اکتیو و راکتیو محدوده ضریب توان مجاز

مقداری بزرگ‌تر دارد و با نزدیک شدن الگوریتم به پایان تکرارها مقدار آن کوچک‌تر می‌شود. $c(x)$ نشانگر قیود نامساوی و $d(x)$ نشانگر قیود تساوی است. برای آنکه الگوریتم از هدف اصلی خود فاصله نگیرد، از این ضرایب برای کاهش تأثیر قیود در تابع هدف استفاده می‌شود. این ضریب در بازه صفر و یک مقدار می‌گیرد.

۴. مطالعه عددی

برای مطالعات عددی، فیدر پیکو از پست فوق توزیع معنوی واقع در منطقه برق آزادی تهران که تقریباً تمام مصرف‌کنندگان آن صنعتی می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به بار شبکه، خطوط و مکان کلیدهای موجود در شبکه، همراه پارامترهای لازم برای حل مسئله به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند. در این مطالعه، واحدهای تولید هم‌زمان با اولویت تولید حرارت نصب می‌شوند. برای محاسبه پارامترهای C_n و C_s ، قیمت خرید برق از بازار برق ایران در یک دوره یک‌ساله متناظر با منحنی تداوم بار شبکه به صورت تجمعی ترسیم شده و به ۱۲ پله مساوی تقسیم شده است. بدین ترتیب، ۱۲ پله قیمتی متناظر با ۱۲ پله بار در شبکه می‌باشند.

شکل (۱) نمودار تک‌خطی این فیدر را نشان می‌دهد. جدول (۳) طرح بهینه برای نصب واحد گازسوز را در طول ۵ سال مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، اضافه کردن واحدهای گازسوز به شبکه در سال‌های اول، دوم و چهارم صورت می‌گیرد. در طرح بهینه توسعه تولید هم‌زمان گازسوز، در سال اول ۸۴۸ کیلووات در شین ۶ و ۱۰۶۰ کیلووات در شین ۱۳ نصب می‌شود. در سال دوم ۱۳۱۴ کیلووات در شین ۱۴ نصب می‌شود و در نهایت در سال چهارم ۷۲۹ کیلووات در شین ۱۲ نصب می‌شود. بدین ترتیب، طرح بهینه ۵ ساله توسعه واحدهای گازسوز به اتمام می‌رسد. در پایان ۵ سال بهره‌برداری به میزان ۳۷۶۸ کیلووات ظرفیت الکتریکی در شبکه نصب می‌شود. با توجه به شکل (۱)، شین‌های انتخاب شده برای نصب واحد گازسوز جزء شین‌های انتهایی فیدر مورد نظر و دارای مشترک دیماندی با بار حرارتی هستند؛ از این رو برای نصب واحد تولید هم‌زمان مناسب می‌باشند. این امر، انتخاب این شین‌ها را توسط الگوریتم توجیه‌پذیر می‌سازد.

جدول (۴) وضعیت هزینه‌ها را قبل و بعد از نصب واحدها برای ۵ سال بهره‌برداری از شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، میزان کاهش تلفات، ۸۲ درصد بوده است که با توجه به قیمت برق در بازار معادل بیش از ۱۸۵ میلیون ریال است. این عدد بیانگر تأثیر زیاد تولیدات پراکنده بر کاهش تلفات در شبکه است. انرژی تأمین‌نشده که

این واحدها می‌باشد.

$$\begin{aligned} P_{CHP_i}^{min} &\leq P_{CHP_i} \leq P_{CHP_i}^{max} \\ q_{CHP_i}^{min} &\leq q_{CHP_i} \leq q_{CHP_i}^{max} \\ \frac{P_{CHP_i}}{\sqrt{P_{CHP_i}^2 + q_{CHP_i}^2}} &\geq PF^{min} \end{aligned} \quad (10)$$

بخش دوم، قید مربوط به محدوده حرارت بازیافتی از این

واحدهاست. رابطه (۱۱) این قید را نشان می‌دهد:

$$Q_{CHP_i}(n, t) \leq k_{heat} \cdot P_{CHP_i}(n, t) \quad (11)$$

در صورت وجود بار حرارتی محلی و امکان بازیافت حرارت، نصب واحدهای گازسوز با دو دیدگاه مختلف می‌تواند انجام شود؛ این دو دیدگاه در بخش ۵.۱.۲ بیان شده‌اند. رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) قیود مربوط به این قسمت را به ترتیب برای اولویت تولید حرارت و تولید برق نشان می‌دهند.

$$Q_{CHP_i}(n, t) \geq Q_{D_i}(t) \cdot (1 + r_h)^n \quad (12)$$

$$Q_{CHP_i}(n, t) + Q_{boiler_i}(n, t) = Q_{D_i}(t) \cdot (1 + r_h)^n \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، Q_{boiler_i} پارامتری است که در صورت مثبت بودن، بیانگر نیاز به نصب بویلر کمکی برای تأمین حرارت است؛ اما در صورت منفی بودن، بیانگر مازاد بودن گرمای قابل بازیافت نسبت به مصرف محلی است که در این صورت باید مقداری از گرمای موجود به محیط داده شود. همچنان‌که بیان شد، در این مقاله، مسئله از نگاه شرکت خدماتی تعریف می‌شود، لذا مسائل مربوط به نصب بویلر کمکی در تعریف ریاضی مسئله لحاظ نمی‌شود.

۳. بهینه‌سازی مسئله

برای حل مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک و برای مدل‌سازی قیود از ضرایب جریمه استفاده می‌شود. این روش در [۱۰] توضیح داده شده است. رابطه (۱۴) تابع شایستگی هر کروموزوم را نشان می‌دهد:

$$fit = K - tot_cost \quad (14)$$

K عددی صحیح و بزرگ‌تر از tot_cost است که در این تحقیق، برابر هزینه اولیه بهره‌برداری از شبکه بدون اضافه کردن واحدهای گازسوز در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی قیود موجود در مسئله، از روش ضرایب جریمه در تابع هدف استفاده می‌شود. مجموعه روابط (۱۵) چگونگی مدل‌سازی ضرایب جریمه را برای قیود موجود نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} penalty_fact &= e^{-it.a} \\ \alpha &= \begin{cases} \frac{c(x)+|c(x)|}{2} & :if\ c(x) \leq 0\ (ineq.\ constraint) \\ |d(x)| & :if\ d(x) = 0\ (eq.\ constraint) \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

α ضریب کاهش تأثیر قیود است که در تکرارهای اولیه الگوریتم

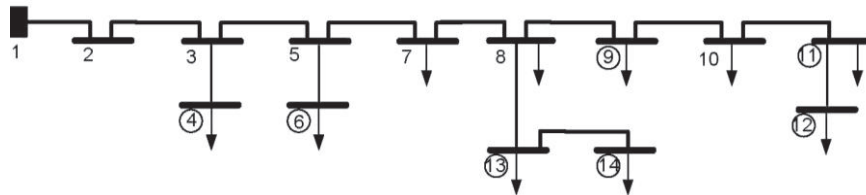
جدول (۱): اطلاعات مربوط به فیدر پیکو

مشخصات شین‌ها						
شماره	کیلووات	کیلو وار	دیماندر حرارتی به کیلووات	وضعیت واحد		
۱	۰	۰	۰	۰		
۲	۰	۰	۰	۰		
۳	۰	۰	۰	۰		
۴	۳۱۵	۲۴۱	۳۷۸	۱		
۵	۰	۰	۰	۰		
۶	۵۶۶	۴۳۳	۶۷۹	۱		
۷	۹	۷	۰	۰		
۸	۴	۳	۰	۰		
۹	۳۱۵	۲۴۱	۳۷۸	۱		
۱۰	۱۱	۹	۰	۰		
۱۱	۳۲۱	۲۴۵	۳۸۵	۱		
۱۲	۴۶۹	۳۵۹	۵۶۳	۱		
۱۳	۷۳۴	۵۶۱	۸۸۱	۱		
۱۴	۵۹۵	۴۵۵	۷۱۴	۱		
مشخصات خطوط						
از شین	به شین	مقاومت (پریونیت)	راکتانس (پریونیت)	حداکثر توان قابل انتقال (مگاوات)	r	λ
۱	۲	۰/۰۱۰	۰/۰۰۶	۱۲	۴	۰/۰۳۷
۲	۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۱۰	۱	۰/۰۶۹
۳	۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۶	۱۰	۱	۰/۱۶۶
۳	۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۱۰	۱	۰/۰۲۳
۵	۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۱۰	۴	۰/۰۱۲
۵	۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۱۰	۱	۰/۰۳۳
۷	۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۳	۱۲	۴	۰/۰۸۲
۸	۹	۰/۰۲۶	۰/۰۱۲	۱۰	۴	۰/۰۷۳
۹	۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۱۰	۴	۰/۰۰۷
۱۰	۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۱۰	۴	۰/۰۳۶
۱۱	۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۱۰	۴	۰/۰۱۵
۸	۱۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۳	۱۰	۴	۰/۰۴۹
۱۳	۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۱۲	۴	۰/۰۰۳

مکان کلیدها	
شماره خط	شماره شناسایی شین
۱	۱
۲	۵
۳	۶
۴	۹
۵	۱۲
۶	۱۳
۷	۱۳

جدول (۲): پارامترهای لازم برای حل مسئله

r_c	r_N	r_h	r_e
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳
r_s	C_f	U_{bf}	K_{CHP}
۰/۰۵	۴۹	۰/۲۵	۰/۹
k_{heat}	PF_k^{min}	N	I
۱/۱	۰/۸۵	۵	۰/۱۲



شکل (۱): نمودار تک خطی فیدر پیکو

جدول (۳): مشخصات طرح بهینه نصب واحد گازسوز در دوره زمانی ۵ ساله

شماره شناسایی شین	ظرفیت (کیلووات)				
	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۶	۸۴۸	۰	۰	۰	۰
۱۲	۰	۰	۰	۷۲۹	۰
۱۳	۱۰۶۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۰	۱۱۳۱	۰	۰	۰
جمع	۱۹۰۸	۳۰۳۹	۳۰۳۹	۳۷۶۸	۳۷۶۸

جدول (۴): وضعیت هزینه‌ها برای ۵ سال بهره‌برداری از شبکه قبل و بعد از نصب واحدها

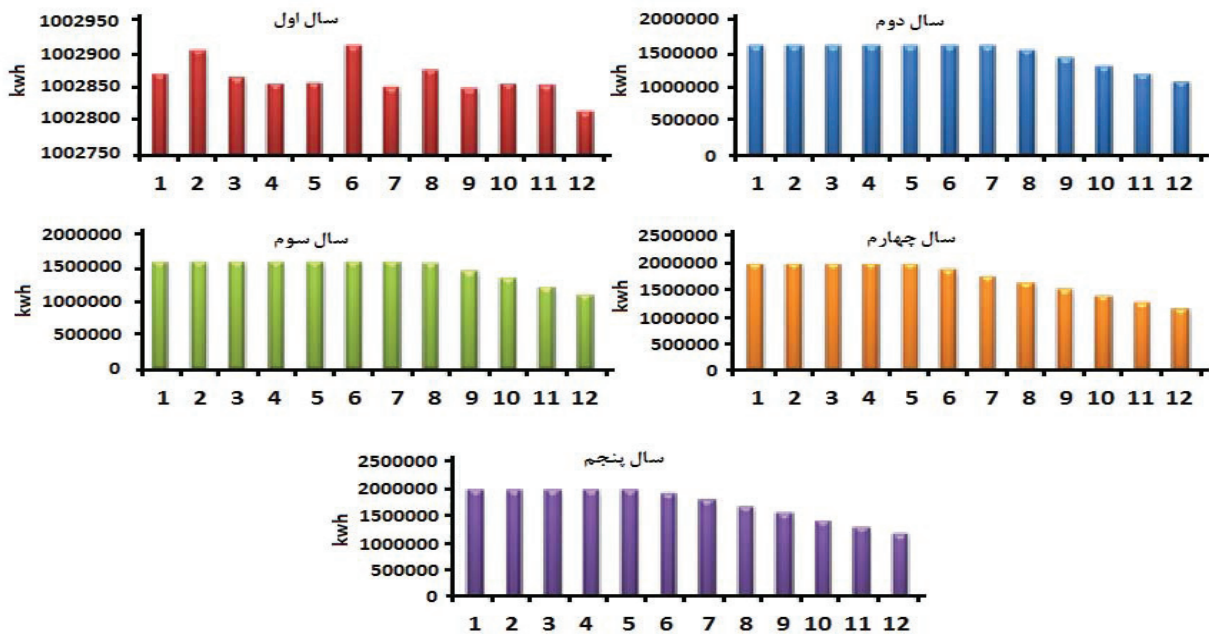
	انرژی (کیلووات ساعت)			هزینه (ریال)			درصد بهبود
	بدون تولید پراکنده	با تولید پراکنده	بهبود	بدون تولید پراکنده	با تولید پراکنده	بهبود	
تلفات	۲E+۰۵	۳۳۷۶۲	۲۰۶۳۰۶	۲۲۷۰۰۰۰۰۰	۴۱۵۵۳۷۴۶	۱۸۵۰۰۰۰۰۰	۸۲
خرید از شبکه بالادستی	۱E+۰۸	۲۰۶۶۳۲۵۸	۹۷۳۱۶۳۴۱	۱/۰۸E+۱۱	۲۴۸۰۰۰۰۰۰۰	۸۳۴۰۰۰۰۰۰۰	۷۷
خرید از تولیدات پراکنده	۰	۸۸۷۷۵۹۵۵	*	۰	۶۸۰۰۰۰۰۰۰۰	*	*
انرژی توزیع نشده	۱۸۱۸۲	۸۱۰۸	۱۰۰۷۴	۱۶۶۸۱۳۰۳	۷۷۴۷۴۷۲	۸۹۳۳۸۳۱	۵۴
بازیافت حرارت	۰	۴۹۸۰۸۱۳۰	*	۰	۱۴۰۰۰۰۰۰۰۰	*	*
جمع	*	*	*	۱/۰۸E+۱۱	۹۲۹۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۵۶۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۴

ابتدایی که مربوط به ساعات پرباری شبکه می‌باشند، تمامی انرژی قابل تولید توسط واحدهای نصب‌شده خریداری می‌شود. به همین ترتیب، در پله‌های پایانی که مربوط به ساعات کم‌باری شبکه است، میزان خرید برق از واحدهای نصب‌شده کاهش می‌یابد. این امر به دلیل ارزان‌تر شدن قیمت خرید برق از بازار، نسبت به قیمت قرارداد تضمینی در ساعات کم‌باری شبکه است. محور افقی در این شکل، ۱۲ پله تخمینی مربوط به منحنی تداوم بار شبکه، به ترتیب از ساعات پرباری به ساعات کم‌باری است.

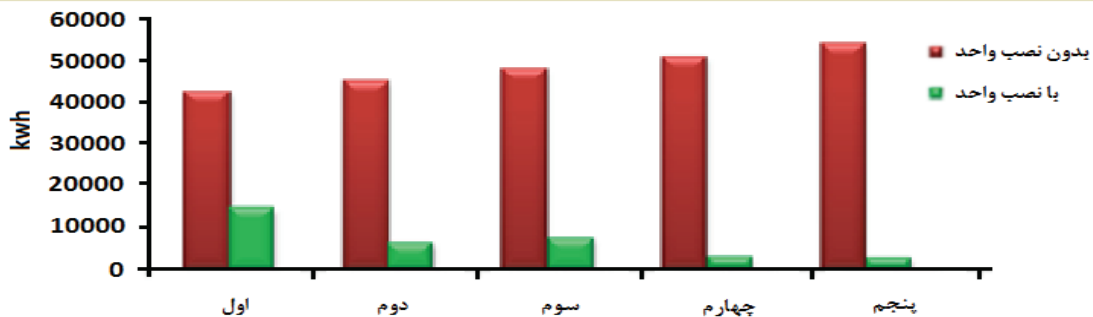
شکل (۳) میزان تلفات سالیانه را قبل و بعد از نصب واحدهای گازسوز مورد نظر نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در سال‌های مختلف با اضافه شدن واحدهای گازسوز به شبکه، مقدار تلفات به طور قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر واحدهایی که در سال‌های آخر اضافه شده‌اند، بسیار کمتر از واحدهای نصب‌شده ابتدایی است. علت این امر، اشباع شدن شبکه از ظرفیت تولید واحدهای گازسوز است؛ لذا باید به این امر توجه کرد که ظرفیت نصب‌شده در شبکه نباید از حد معینی تجاوز کند. شکل (۴) میزان انرژی تأمین‌نشده را قبل و بعد از نصب واحدهای گازسوز در شبکه، در هر سال نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تأثیر اضافه کردن واحدهای گازسوز بر کاهش انرژی تأمین‌نشده به اندازه تأثیر آن در کاهش تلفات نیست. علت این امر، عدم تجهیز شبکه به کلیدهای اتوماتیک است. اگر امکان

معادل بیش از ۸/۹ میلیون ریال می‌باشد، حدود ۵۴ درصد کاهش یافته است. برای محاسبه هزینه انرژی تأمین‌نشده از قیمت برق در بازار عمده‌فروشی برق استفاده شده است. در این صورت، هزینه انرژی تأمین‌نشده برابر میزان انرژی است که شرکت خدماتی از بازار خریداری کرده است، اما به دلیل بروز خاموشی در شبکه قادر به فروش آن نبوده است. در صورتیکه شرکت خدماتی ملزم به پرداخت جریمه به مشترکان بدون برق باشد، ارزش ریالی انرژی تأمین‌نشده افزایش می‌یابد. پس از اجرای طرح، بیش از ۴۹ گیگاوات ساعت انرژی از بازیافت حرارت به دست می‌آید که معادل بیش از ۱/۴ میلیارد ریال است. این مقدار صرفه‌جویی در مصرف سوخت بسیار قابل توجه است. مقایسه اعداد به دست آمده، نشان می‌دهد که استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان در شبکه، بیشترین درآمدزایی را در زمینه بازیافت حرارت دارد. در نهایت با اجرای طرح، هزینه بهره‌برداری از شبکه بیش از ۱۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. این مقدار معادل بیش از ۱۵ میلیارد ریال است. هزینه‌های به دست آمده با در نظر گرفتن افزایش قیمت برق و گاز و همچنین با در نظر گرفتن مفهوم اقتصادی نرخ بهره در طول ۵ سال محاسبه شده‌اند.

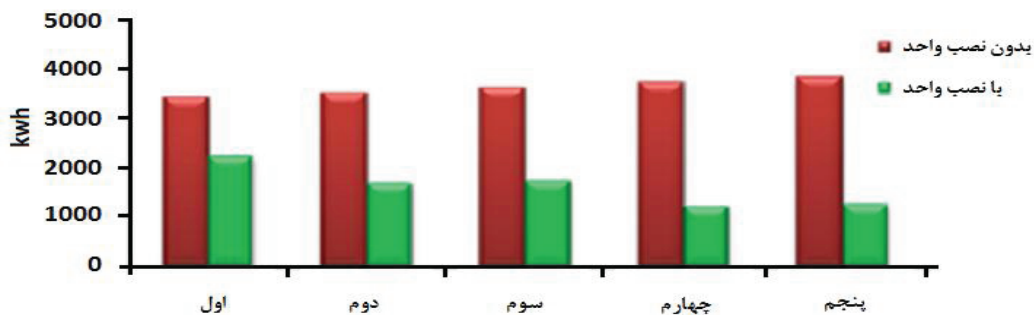
شکل (۲) حجم انرژی خریداری شده از واحدهای گازسوز مورد نظر را در هر پله نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در پله‌های



شکل (۲): حجم انرژی خریداری شده از واحدهای گازسوز در ۱۲ پله تخمینی مربوط به منحنی تداوم بار شبکه (به ترتیب از ساعات پرباری به ساعات کم‌باری)



شکل (۳): مقایسه تلفات سالیانه قبل و بعد از نصب واحدهای گازسوز



شکل (۴): مقایسه انرژی تأمین نشده در هر سال قبل و بعد از نصب واحدهای گازسوز

که کار بهره‌برداری از شبکه یک شهرک صنعتی را بر عهده دارد، ارائه شد و مدل ریاضی مسئله فرمول‌بندی گردید و نهایتاً فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. نتایج مطالعات عددی نشان داد که استفاده از واحدهای تولید هم‌زمان گازسوز به دلیل بازدهی خوب و پراکندگی در شبکه، وضعیت بازده انرژی شبکه‌های توزیع را

بهره‌برداری از شبکه به صورت جزیره‌ای وجود داشت، آنگاه تأثیر اضافه کردن واحدهای گازسوز بر کاهش انرژی تأمین‌نشده بیشتر می‌شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای برآورد هزینه‌های یک شرکت خدماتی

(kW)	کمترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i	$Q_{CHP_i}^{min}$
(kW)	حرارت بازیافتی از واحد گازسوز i	Q_{CHP_i}
(kW)	بار حرارتی موجود در شین i	QD_i
(pu)	مجموع توان راکتیو تولیدی در شین i	q_{Gi}
(pu)	مجموع توان راکتیو بار موجود در شین i	q_{Li}
(kW)	توان الکتریکی خروجی واحد گازسوز i	P_{CHP_i}
$(kVAR)$	توان راکتیو تولیدی واحد گازسوز i	q_{CHP_i}
(kW)	بیشترین توان الکتریکی قابل تولید توسط	$p_{CHP_i}^{max}$
(kW)	کمترین توان الکتریکی قابل تولید توسط واحد	$p_{CHP_i}^{min}$
(pu)	مجموع توان اکتیو تولیدی در شین i	PG_i
(pu)	مجموع توان اکتیو بار موجود در شین i	PL_i
Rls/m^3	قیمت گاز مصرفی	C_f
(m^3/kWh)	میزان گاز مصرفی واحد	U_{bf}
(pu)	قسمت موهومی ادمیتانس خط بین شین های i و j	B_{ij}
(pu)	توان ظاهری عبوری از خط بین شین های i و j	F_{ij}
(pu)	قسمت حقیقی ادمیتانس خط بین شین های i و j	G_{ij}
(pu)	جریان الکتریکی عبوری از خط بین شین های i و j	I_{ij}
rad	زاویه ادمیتانس خط بین شین های i و j	θ_{ij}
--	ضریب دسترس پذیری واحدهای گازسوز نصب شده در سال n	K_{CHP}
(pu)	مقدار مقاومت خط بین شین های i و j	R_{ij}
--	تعداد دفعات خرابی در سال برای تجهیز j که خرابی آن منجر به قطع بار i می شود	λ_{ij}
$(hour/year)$	میانگین زمان قطع بار i در یک سال	U_i
$(Hour)$	متوسط زمان لازم برای رفع عیب تجهیز j پس از هر بار خرابی	r_j
(pu)	ولتاژ شین i	V_i
(pu)	حد بالای ولتاژ مجاز در هر شین	V_{max}
(pu)	حد پائین ولتاژ مجاز در هر شین	V_{min}
--	ضریب بازیافت حرارت واحد گازسوز	k_{heat}
$(year)$	افق زمانی حل مسئله	N
(Rls)	هزینه بهره برداری از شبکه در سال n	$cost(n)$
(Rls)	کل هزینه بهره برداری از شبکه	tot_cost
--	حداقل ضریب توان مجاز برای واحد گازسوز k	PF_k^{min}

تا حد مناسبی ارتقا می دهد. نتایج نهایی نشان دهنده کاهش قابل توجه تلفات در شبکه و ایجاد درآمد قابل توجه از بازیافت حرارت پس از نصب واحدهای تولید هم زمان در شبکه است. همچنین تأثیر اضافه کردن واحدهای تولید هم زمان بر هزینه قطع بار نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که حتی در صورت عدم امکان بهره برداری جزیره ای از بخشی از شبکه دارای تولید هم زمان گازسوز، استفاده از واحدهای تولید هم زمان، موجب کاهش هزینه انرژی تأمین نشده می شود. نتایج نهایی نشان می دهد که استفاده از این واحدها در شبکه، امکان استفاده حداکثر از ظرفیت شبکه را فراهم می کند و در صورت حل مسئله به صورت دینامیکی، به رشد بار نیز پاسخ داده می شود. در پایان می توان گفت که روش مورد بحث در این مقاله، در تأمین انرژی شهرک های صنعتی، تناسب خوبی با فضای تجدید ساختار یافته دارد.

فهرست علائم

(Rls)	هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده	f_{ENS}																						
(Rls)	هزینه خرید برق از واحدهای گازسوز	f_{CHP_pur}																						
(Rls)	هزینه خرید برق از بازار	f_{NET_pur}																						
(Rls)	هزینه تلفات	f_{loss}																						
(Rls)	درآمد بازیافت حرارت	R_{rec}																						
(kWh)	مجموع انرژی الکتریکی تولید شده توسط واحدهای گازسوز	E_{CHP}																						
(kWh)	انرژی مصرفی بارهای شبکه	E_{load}																						
(kWh)	انرژی تلف شده در شبکه	E_{loss}																						
(Rls/kWh)	قیمت خرید برق از واحدهای گازسوز	c_c																						
(Rls/kWh)	قیمت خرید برق از شبکه	c_N																						
(Rls/kWh)	هزینه بار قطع شده	c_s																						
$(Hour)$ </tr <tr> <td>-</td> <td>مدت زمان مربوط به پله Δt</td> <td>$h(t)$</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>تعداد شین های شبکه</td> <td>n_{bus}</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>نرخ افزایش قیمت برق خریداری شده از واحدهای گازسوز</td> <td>r_c</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>نرخ افزایش قیمت برق شبکه</td> <td>r_N</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>نرخ افزایش بار حرارتی شبکه</td> <td>r_h</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>نرخ افزایش بار الکتریکی شبکه</td> <td>r_e</td> </tr> <tr> <td>--</td> <td>نرخ افزایش قیمت بار قطع شده</td> <td>r_s</td> </tr> <tr> <td>(kW)</td> <td>بیشترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i</td> <td>$Q_{CHP_i}^{max}$</td> </tr>	-	مدت زمان مربوط به پله Δt	$h(t)$	-	تعداد شین های شبکه	n_{bus}	-	نرخ افزایش قیمت برق خریداری شده از واحدهای گازسوز	r_c	--	نرخ افزایش قیمت برق شبکه	r_N	--	نرخ افزایش بار حرارتی شبکه	r_h	--	نرخ افزایش بار الکتریکی شبکه	r_e	--	نرخ افزایش قیمت بار قطع شده	r_s	(kW)	بیشترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i	$Q_{CHP_i}^{max}$
-	مدت زمان مربوط به پله Δt	$h(t)$																						
-	تعداد شین های شبکه	n_{bus}																						
-	نرخ افزایش قیمت برق خریداری شده از واحدهای گازسوز	r_c																						
--	نرخ افزایش قیمت برق شبکه	r_N																						
--	نرخ افزایش بار حرارتی شبکه	r_h																						
--	نرخ افزایش بار الکتریکی شبکه	r_e																						
--	نرخ افزایش قیمت بار قطع شده	r_s																						
(kW)	بیشترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i	$Q_{CHP_i}^{max}$																						

- [1] Hashemi R., "A Developed Offline Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No. 1, pp. 222-229, 2009.
- [2] Sanaye S., Raessi Ardali M., "Estimating the power and number of micro-turbines in small-scale combined heat and power systems", Applied Energy, Vol. 86, pp. 895-903, 2009.
- [3] Giaccone L., Canova A., "Economical comparison of CHP systems for industrial user with large steam demand", Applied Energy, Vol. 86, No. 6, pp. 904-914, 2009.
- [4] Zhi-Gao S., "Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine", Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 126-130, 2008.
- [5] Favuzza S., Graditi G., Giuseppe Ippolito M., Sanseverino R., E., "Optimal Electrical Distribution Systems Reinforcement Planning Using Gas Micro Turbines by Dynamic Ant Colony Search Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 580-587, 2007.
- [6] Keane A., Denny E., O'Malley M., "Quantifying the Impact of Connection Policy on Distributed Generation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 189-196, 2007.
- [7] Harrison G.P., Piccolo A., Siano P., Wallace A.R., "Exploring the Tradeoffs Between Incentives for Distributed Generation Developers and DNOs", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 821-828, 2007.
- [8] Setayesh Nazar M., Haghifam M. "Multi-objective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept", Electric Power System Research, No. 79, pp. 899-911, 2009.
- [۹] انصاری، میثم، انتخاب بهینه پارامترهای (مکان نصب، زمان نصب، ظرفیت و رژیم کاری) واحدهای تولید پراکنده گازسوز با و بدون سیستم بازیافت حرارت از دیدگاه شرکت خدماتی شهرک صنعتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۴۰ صفحه، مهر ۱۳۸۹.
- [۱۰] غلامی، عادل، قاضی زاده، محمد صادق، پاکدامن، جواد، انصاری، میثم، تعیین بهینه ظرفیت و برنامه کاری سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت با محرک اولیه موتور گازسوز، نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی، شماره ۱، ۱۰-۲، ۱۳۹۰.