

# بهره‌برداری چند هدفه از ریز شبکه‌ها در حضور سیستم‌های تولید همزمان مقیاس کوچک

علی بدراei<sup>۱</sup>, احمد مرادقلی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۲/۱۲/۱۹

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۵/۷

چکیده:

بهره‌برداری از ریز شبکه‌های شامل منابع تولید همزمان برق و گرما به دلیل وابستگی درونی دو نوع انرژی الکتریکی و حرارتی نیاز به روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی خاصی دارد. در این مقاله پس از معرفی یک ریز شبکه نمونه و مدل‌های مختلف منابع تولید پراکنده موجود در آن به بررسی مساله بهره‌برداری چند هدفه از این ریز شبکه خواهیم پرداخت. در این راستا، مدلی بر اساس بهینه سازی با سه هدف هزینه تولید منابع، آلودگی زیست محیطی و تلفات ریز شبکه معرفی و با توجه به ماهیت مساله از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب استفاده می‌شود. رویکرد مساله تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی مشترکین در طول شباهنگی روز با در نظر گرفتن امکان تبادل انرژی با شبکه بالادستی و رعایت قیود ترمودینامیکی محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان می‌باشد. بر این اساس، سه سناریوی عملی استفاده از بویلر کمکی، تولید موتور گازسوز و تولید میکرو توربین برای پاسخگویی به نیازهای حرارتی و الکتریکی مشترکان ارایه گردیده و از این بین، اقتصادی ترین سناریو پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی:

بهره‌برداری اقتصادی، بهینه‌سازی چند هدفه، تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک، ریز شبکه، مدل‌سازی

ali.badri@srttu.edu

a.moradgholi@gmail.com

(۱) استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی (تویینده مسئول)

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

## مقدمه

با توجه به اینکه امروزه حجم بالایی از انرژی در بخش های خانگی و نیمه صنعتی مصرف می گردد، استفاده از منابع تولید پراکنده به منظور افزایش امنیت بارهای حساس، ممانعت از انتشار بی روحیه گاز های آلاینده، کاهش تلفات خطوط، بهبود پروفیل ولتاژ و بررسی امکان صدور برق بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۴]. ریز شبکه مجموعه ای از بارها، منابع تولید پراکنده و در برخی اوقات تجهیزات ذخیره می باشد که به صورت یک بار قابل کنترل یا ژنراتور عمل می کند و می تواند توان و گرما را برای یک ناحیه محلی فراهم نماید [۱۴]. سیستم های تولید همزمان برق و حرارت نوع خاصی از تأمین انرژی می باشند که با کاربرد آن به عنوان منبع تولید پراکنده می توان علاوه بر کاهش تلفات شبکه، به یک منبع گرمایشی نیز مجهز شد. مفهوم سیستم های تولید همزمان مقیاس کوچک<sup>۱</sup>، به سیستم های تولید همزمانی اطلاق می گردد که توان الکتریکی آنها کمتر از ۲۰۰ کیلووات بوده و راندمان کل آنها به ۸۵ تا ۹۰ درصد می رسد [۳]. انتخاب منابع تولید پراکنده به عنوان محرک اولیه سیستم های تولید همزمان مقیاس کوچک و استگی زیادی به شرایط سرمایه گذاری، آب و هوا، منحنی های برق و حرارت و همچنین قیمت های خرید و فروش برق دارد. از این بین، نسل جدید موتورهای احتراق داخلی و میکرو توربین های گازی با توجه به مسائلی مانند یکسان بودن سوخت، قابلیت اطمینان بالا، سرمایه گذاری اولیه پایین و نیز امکان راه اندازی سریع بیشتر مورد توجه واقع شده اند [۱۱، ۹]. در سال های اخیر، تحقیقات مختلفی روی بهره برداری اقتصادی و چند هدفه در حوزه انتقال و توزیع و با در نظر گرفتن مدل های مختلف صورت پذیرفته است [۵] و [۳]. اما این بررسی ها تولید حرارت را تنها محدود به درصدی از تولید الکتریکی دانسته و مدل بهینه ای که بیانگر ساختار واقعی محرک باشد، بیان نمی کند، ضمن آنکه در این مدل ها عدالت از چگونگی تاثیر قیود ترمودینامیکی مولد ها سخنی به میان نیامده است. پاره ای از مقالات نیز صرفا روی روش ها و تکنیک های حل مساله متمرکز شده و الگوریتم های ابتکاری و نوینی نظیر الگوریتم تجمع ذرات تطبیقی<sup>۲</sup> (AMPSO) [۶]، الگوریتم ترکیبی مبتنی بر نظریه فازی و تکاملی هوش جمعی<sup>۳</sup> (FSAPSO) [۲] و روش برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح (MINLP) [۱] را برای حل مسائل چند هدفه مربوط به ریز شبکه های نمونه معرفی کرده اند.

در این مقاله پس از معرفی یک ریز شبکه نمونه با اضافه نمودن دو منبع تولید همزمان با محرک اولیه موتور گازسوز و میکرو توربین گازی و یک بویلر کمکی در کنار دیگر منابع جهت تأمین برق و حرارت یک مشترک نمونه در یک شبانه روز، بهینه سازی چند هدفه بر اساس توابع هدف هزینه تولید منابع، آلودگی زیست محیطی و تلفات ریز شبکه و با پیروی از منحنی تقاضای حرارتی مشترک در قالب سناریوهای مختلف انجام می گیرد. بر این اساس، مدل هزینه منابع مورد استفاده

1) Micro Combined Heat and Power ( $\mu$  CHP)

2) Adaptive Modified Particle Swarm Optimization algorithm

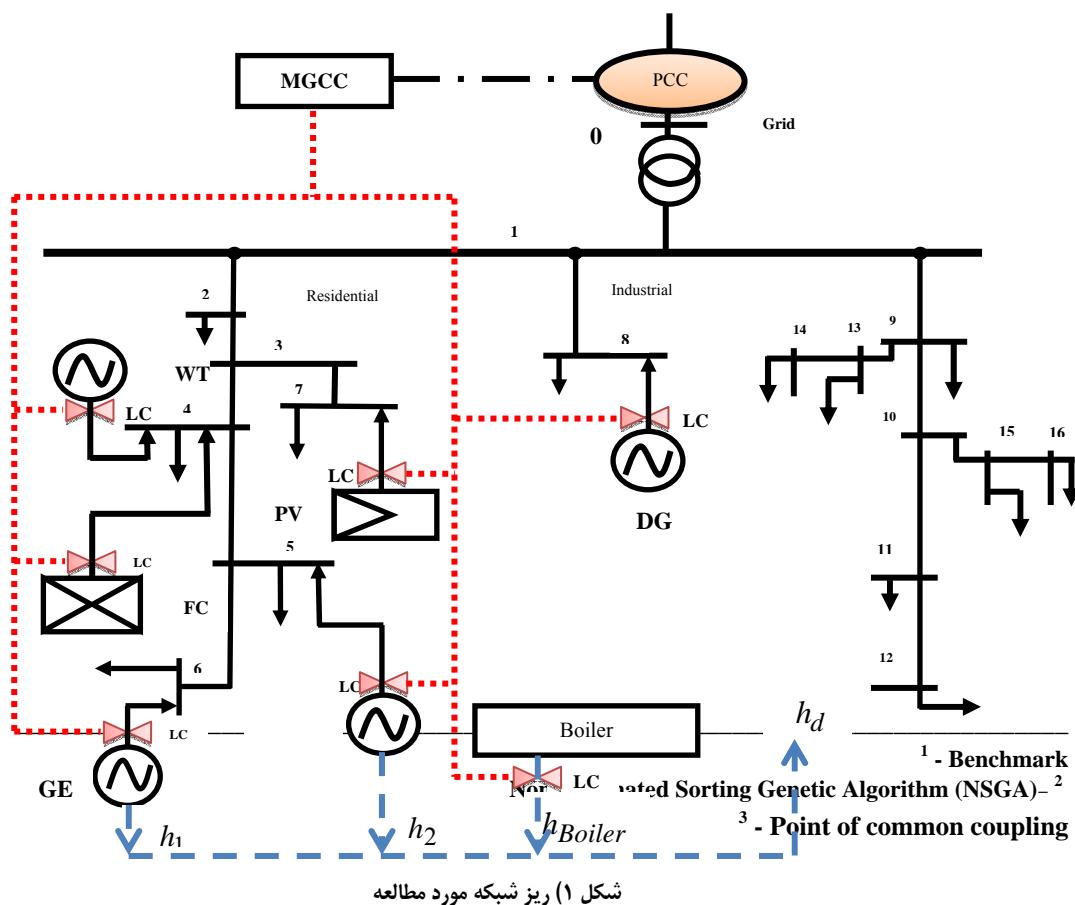
3) Fuzzy Self Adaptive Particle Swarm Optimization

اعم از مولد های تولید همزمان برق و حرارت و نیز منابع تجدید پذیر بیان گردیده و در این راستا، با استفاده از ابزارهای شبکه عصبی و برآش مدلی برای هزینه میکروتوربین گازی ارایه می گردد. سپس با توجه به خرایب آلودگی منابع ریزشبکه محک<sup>۱</sup>، مدل بر اساس آلودگی زیست محیطی به عنوان تابع هدف دوم بیان می گردد. در ادامه، با استفاده از پخش بار پس رو-پیش رو و تعیین تلفات ریزشبکه این شاخص به عنوان سومین تابع هدف در نظر گرفته می شود. در نهایت نیز با بیان روابط منابع موجود، روش حل مساله بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA II<sup>2</sup>) معرفی گردیده و ترتیج شبیه سازی در سناریوهای مختلف استخراج می گردد.

#### مدل سازی هزینه مولدهای برق و حرارت و منابع تجدید پذیر در ریز شبکه

شکل (۱) ساختار یک ریز شبکه واقعی را نشان می دهد. در این تحقیق، ریز شبکه شامل منابع تولیدی میکروتوربین گازی (MT) و موتور گاز سوز (GE) به عنوان محرک های اولیه سیستم های تولید همزمان مقیاس کوچک و نیز پیل سوختی (FC)، دیزل ژنراتور (DG)، توربین بادی (WT)، سلول خورشیدی (PV)، بویلر کمکی، ترانسفورماتور

۲۰/۰.۴kV و نقطه تزویج مشترک PCC می باشد.



هر واحد تولید محلی یک کنترل کننده محلی<sup>۱</sup> (LC) دارد که با کنترل کننده‌های محلی دیگر و کنترل کننده مرکزی ریز شبکه<sup>۲</sup> (MGCC) جهت مبادله اطلاعات در ارتباط است.

### موتور گازسوز (EG)

با توجه به اطلاعات آب و هوایی و همچنین منحنی‌های تقاضای برق و حرارت، برنامه ریزی تحت الشاعع برخی قیود ترمودینامیکی قرار می‌گیرد. در این نوع بررسی از محرک‌های اولیه درون سوز با سوخت گاز طبیعی استفاده می‌گردد. ارتفاع و دمای محیط مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد یک سیستم تولید انرژی می‌باشد به گونه‌ای که ۱۰۰۰ ft افزایش ارتفاع راندمان را ۳٪ و توان حداکثر خروجی را ۳/۸٪ کاهش می‌دهد.

همچنین ۱۰ درجه فارنهایت افزایش در دمای محیط موجب کاهش ۱٪ راندمان می‌گردد[۱۱]. گاز طبیعی با ارزش حرارتی  $10^3 \text{ Btu} / \text{ft}^3$  و قیمت آن معادل  $10^{45} \text{ Cent} / \text{m}^3$  در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، راندمان یک موتور گازسوز را می‌توان مطابق رابطه (۱) در نظر گرفت[۱۱].

$$\eta_{GE}(t) = \frac{0.15 + 0.174K - 0.103K^2 + 0.0202K^3}{0.19 + 0.117K - 6.16 \times 10^{-4} \theta_{ambient} - 0.0406K^2 + 3.5 \times 10^{-4} K \theta_{ambient}} \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_{ambient} \leq 70^\circ F \\ \theta_{ambient} \geq 70^\circ F \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه  $K = \frac{(P_{\mu CHP}(t))_{GE}}{(P_{nom})_{GE}}$  فرض می‌شود.

گرمای بازیافتی مبدل حرارتی که جهت تغذیه مشترک به دست می‌آید، نمی‌تواند از گرمای خروجی سیستم بیشتر باشد. بنابراین می‌توان مقدار گرمای خروجی موتور گازسوز را مطابق (۲) محاسبه کرد[۱۱].

$$(h_{Exhaust}(t))_{GE} = \frac{(P_{\mu CHP}(t))_{GE}}{0.32 + 0.377K - 0.195K^2 + 0.057K^3} \quad (2)$$

در نهایت می‌توان هزینه سوخت موتور گازسوز را در زمان  $t$  به صورت (۳) محاسبه کرد:

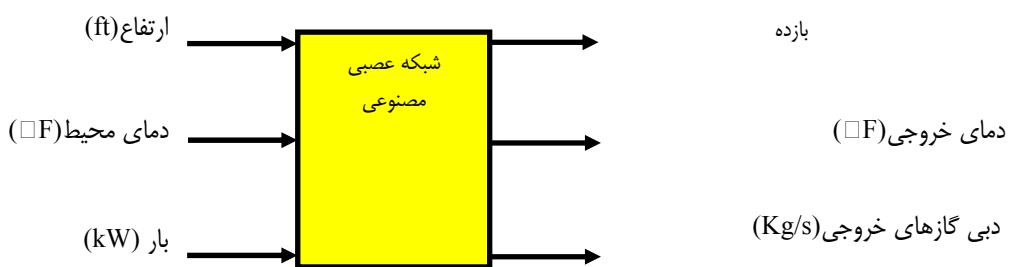
$$Cost_{GE}(t) = Pr_{ng} \frac{(P_{\mu CHP}(t))_{GE}}{\eta_{GE}(t)} \quad (3)$$

1) Local Controller  
2) Micro Grid Central Controller

### میکروتوربین(MT) و کاربرد شبکه عصبی

مشابه آنچه برای موتور گازسوز بیان شد، در اینجا نیز پارامترهای خروجی تحت تاثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرند به طوری که هر  $1000 \text{ ft}$  افزایش ارتفاع و هر  $10^\circ \text{C}$  درجه فارنهایت افزایش در دمای محیط به ترتیب راندمان را  $3\%$  و  $1\%$  کاهش می‌دهد. به علاوه، به ازای افزایش  $10^\circ \text{C}$  درجه فارنهایت، دبی گازهای خروجی به اندازه  $0.067\%$  کاهش می‌یابد. با این حال، با توجه به کاهش  $3\%$  راندمان به ازای افزایش  $1000 \text{ ft}$  در ارتفاع، برای دبی گاز خروجی نیز  $3\%$  کاهش در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به استاندارد ISA افزایش  $1000 \text{ ft}$  در ارتفاع باعث کاهش  $3/56$  درجه فارنهایت دمای محیط و به تبع آن کاهش تقریبی  $4^\circ \text{C}$  در دمای خروجی خواهد شد [۹].

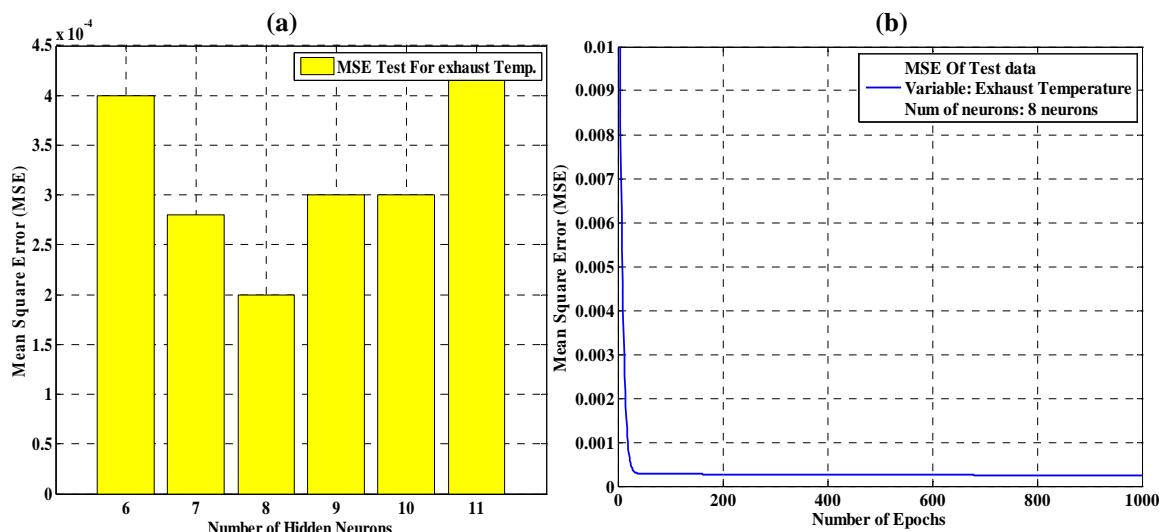
با توجه به نبود روابط مشخص برای میکروتوربین و با در نظر گرفتن اطلاعات محیطی از قبیل ارتفاع، دمای محیط و بارجذبی میکروتوربین، در این مقاله از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> به منظور تعیین روابط خروجی آن استفاده می‌گردد. شکل (۲) ارتباط ورودی‌ها و خروجی‌ها را در این مساله نشان می‌دهد. شبکه عصبی مصنوعی براساس یک فرایند تکراری و مبتنی بر انطباق وزن‌ها عمل می‌کند. با به دست آمدن وزن‌های مورد قبول و آموزش شبکه عصبی می‌توان خروجی‌های مورد نظر را به دست آورد.



شکل (۲) استفاده از شبکه عصبی در ارتباط ورودی‌ها و خروجی‌ها

به عنوان مثال، مراحل همگرایی شبکه عصبی برای متغیر دمای خروجی میکروتوربین در شکل (۳) نشان داده شده است. به طور مشابه برای دبی گازهای خروجی و راندمان میکروتوربین نیز می‌توان نتایج مشابهی ارایه کرد. همانطور که پیداست، کمترین میانگین مربعات خطای برای دمای خروجی میکروتوربین به ازای  $8$  نمون مخفی اتفاق می‌افتد. با به دست آمدن وزن‌های مورد قبول، محاسبه داده‌ها در ارتفاع مشخص (در اینجا ارتفاع شهر مورد نظر) انجام می‌گیرد.

1) Artificial Neural Network



شکل ۳) تحلیل شبکه عصبی دمای گاز خروجی میکروتوربین با نمایش (a) تعداد نرون های مخفی با هدف کمترین خطأ (b) مقدار خطأ به ازای لایه های بدست آمده

از این رو، هر یک از سه متغیر راندمان، دما و دبی گاز های خروجی به دمای محیط و توان خروجی وابسته می شوند.

برازش منحنی<sup>۱</sup> در نرم افزار متلب<sup>۲</sup> ابزاری مناسب جهت فرمول بندی متغیرهای مذکور می باشد. بر این اساس، روابط مربوط به میکروتوربین kW ۳۰ ساخت شرکت کپستون<sup>۳</sup> در ارتفاع ۵۳۰۰ ft (حالت مورد مطالعه) به صورت (۴) تا (۸) استخراج گردیده است. در اینجا نیز دبی گرمای بازیافتی مبدل حرارتی میکروتوربین نیز نمی تواند از دبی گازهای خروجی میکروتوربین بیشتر باشد.

$$\eta_{MT}(t) = 0.057 + 0.053 \ln((P_{\mu CHP}(t))_{MT}) - 0.0009 \theta_{ambient}(t) \quad (4)$$

$$\theta_{Exhaust}(t) = -65.74 + 64.59 \ln(89.92(P_{\mu CHP}(t))_{MT}) + 1.204 \theta_{ambient}(t) \quad (5)$$

- 1) Surface fitting
- 2) MATLAB
- 3) Capstone

$$mf_{\text{Exhaust}}(t) = 0.087 + 0.0065(P_{\mu\text{CHP}}(t))_{\text{MT}} + 0.00018\theta_{\text{ambient}}(t) \quad (6)$$

$$\eta_{\text{MT}}(t) = 0.057 + 0.053\ln((P_{\mu\text{CHP}}(t))_{\text{MT}}) - 0.0009\theta_{\text{ambient}}(t) \quad (7)$$

$$\text{Cost}_{\text{MT}}(t) = Pr_{\text{ng}} \frac{(P_{\mu\text{CHP}}(t))_{\text{MT}}}{\eta_{\text{MT}}(t)} \quad (8)$$

### توربین بادی (WT)

برای محاسبه میزان توان خروجی توربین بادی با توجه به سرعت‌های مختلف باد طی ۲۴ ساعت از شباهه روز و با توجه به سرعت قطع پایین و قطع بالای توربین بادی می‌توان از رابطه (۹) استفاده نمود [۸].

$$P_{\text{WT}}(t) = \begin{cases} P_r \frac{V(t)^2 - V_{\text{cin}}^2}{V_{\text{rat}}^2 - V_{\text{cin}}^2} & V_{\text{cin}} < V(t) < V_{\text{rat}} \\ P_r & V_{\text{rat}} < V(t) < V_{\text{cout}} \\ 0 & V(t) \leq V_{\text{cin}} \& V(t) \geq V_{\text{cout}} \end{cases} \quad (9)$$

### سیستم فتوولتاییک (PV)

توان خروجی یک پانل فتوولتاییک با استفاده از رابطه ای که میان میزان تابش خورشید روی پانل‌ها و دمای محیط وجود دارد، مطابق رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۳].

$$P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{STC}} \frac{G_{\text{ING}}(t)}{G_{\text{STC}}} (1 + k(\theta_{\text{ambient}}(t) - \theta_r)) \quad (10)$$

### دیزل ژنراتور (DG)

هزینه سوخت دیزل ژنراتور به صورت تابعی از توان خروجی و با چند جمله‌ای درجه دوم مطابق رابطه (۱۱) مدل می‌شود [۱].

$$\text{Cost}_{\text{DG}}(t) = c + bP_{\text{DG}}(t) + aP_{\text{DG}}(t)^2 \quad (11)$$

### پیل سوختی (FC)

پیل های سوختی در ارزش گرمایی پایین با بازده الکتریکی در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد و در کاربردهای تولید همزمان با راندمان ۸۵ درصد عمل می نمایند. هزینه سوخت برای هر پیل سوختی به نسبت توان خروجی به ظرفیت انرژی ورودی در گاز طبیعی اطلاق می شود که هر دو باید در یک واحد باشند. نظر به اینکه وابستگی بازده پیل سوختی  $W = 10 \cdot kW$  [۶] به شرایط محیطی (مثل دمای محیط) نکته مهمی است که کمتر در نظر گرفته شده است، بازده این نمونه در رابطه (۱۲) با ابزار برآورده شده است. بر این اساس، هزینه این منبع به صورت (۱۳) می باشد.

$$\eta_{\text{FC}}(t) = 0.3315 - 0.01P_{\text{FC}}(t) - 0.0004\theta_{\text{ambient}}(t) \quad (12)$$

$$\text{Cost}_{\text{FC}}(t) = \text{Pr}_{\text{Hydro}} \frac{(P(t))_{\text{FC}}}{\eta_{\text{FC}}(t)} \quad (13)$$

### بویلر کمکی (Domestic boiler)

از بویلر کمکی به منظور جبران بعضی کمبودهای حرارتی استفاده می شود. در دوره‌هایی که حرارت بازیافتی بیشتر از حد نیاز باشد، بویلر های کمکی از مدار خارج شده و مازاد حرارت نیز مستقیماً از مسیر فرعی به کمک رادیاتور به محیط فرستاده می شود. همچنین راندمان بویلر کمکی مستقل از بار نامی در نظر گرفته می شود. مطالعات بازگشت هزینه بویلر کمکی ۵۰ کیلوواتی این تحقیق بر اساس تعامل با موتور گازسوز در نظر گرفته شده است. حال اگر دمای بیشینه محیط ۱۷۶ درجه فارنهایت باشد، روابط (۱۴) و (۱۵) بیانگر راندمان مجاز و وابستگی راندمان بویلر به حرارت تولیدی خواهد بود [۱۱].

$$\eta_{\text{rated}}(t) = 0.94 - 2.2 \times 10^{-4} \theta_{\text{ambient}}(t) \quad (14)$$

$$\eta_{\text{boiler}}(t) = \eta_{\text{rated}}(t)(0.9556 + 3.8 \times 10^{-3} h_{\text{boiler}}(t) - 1.22 \times 10^{-4} h_{\text{boiler}}(t)^2 + 6.27 \times 10^{-6} h_{\text{boiler}}(t)^3 - 1.62 \times 10^{-7} h_{\text{boiler}}(t)^4) \quad (15)$$

بنابراین، هزینه مصرفی بویلر به صورت (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\text{Cost}_{\text{boiler}}(t) = \text{Pr}_{\text{ng}} \frac{h_{\text{boiler}}(t)}{\eta_{\text{boiler}}(t)} \quad (16)$$

### مدل‌سازی آلودگی ریز شبکه

بهره‌برداری از ریز شبکه تحت تأثیر عوامل دیگری غیر از هزینه (مانند آلودگی زیست محیطی، تلفات خطوط، مشخصه‌های فنی و ...) می‌باشد. بنابراین لازم است تدبیری اندیشه شود تا عوامل دیگر نیز مدنظر قرار گیرند. آلودگی زیست محیطی از جمله عواملی است که بهره‌بردار یک سیستم قدرت به آن توجه ویژه‌ای دارد. از جمله گازهای آلوده کننده محیط می‌توان به  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_2$  اشاره کرد. جدول (۱) نشان دهنده قیمت این آلودگی‌ها می‌باشد [۱۰].

جدول (۱) قیمت آلودگی‌های مرسوم

	$\text{CO}_2$	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$
\$/ton	۳۳	۱۴۹۰	۱۳۰۲

### مدل‌سازی تلفات ریز شبکه

ریز شبکه‌ها نزدیکترین پل ارتباطی با مصرف‌کنندگان در شبکه توزیع انرژی می‌باشند. در این سیستم‌ها به علت نوع ساختار آنها که اغلب شعاعی است، بین مصرف‌کنندگان و منبع تغذیه فاصله زیادی وجود دارد و از طرفی، به علت پایین بودن ولتاژ و بالا بودن جریان، تلفات اهمی در آنها بسیار بیشتر و مهمتر از سیستم‌های انتقال می‌باشد. چون در عمل بار فیدر توزیع به دلیل حضور بارهای تکفاز ذاتاً نامتعادل بوده، در این مقاله به منظور دستیابی به نتایج عملی و مدل‌سازی عدم تعادل این سیستم‌ها از هادی‌های با فواصل نابرابر به همراه سیم‌نول استفاده می‌گردد [۱۲].

در این مطالعه، یک ریز شبکه واقعی با مشخصات عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. با داشتن این مشخصات می‌توان پارامترهای دیگری چون تلفات و مشخصه‌های فنی شبکه را به صورت دقیق‌تر محاسبه نمود. این ریز شبکه در سطح ولتاژ پایین و در سه بخش خانگی، تجاری و صنعتی به کار می‌رود. در این تحلیل، سهم تقاضای الکتریکی این سه بخش به ترتیب ۵۰٪، ۳۰٪ و ۲۰٪ می‌باشد.

مشخصات توزیع میزان بار در بسیار مشابه [۱۴] مدنظر قرار گرفته است. برای تحلیل تلفات ریز شبکه با توجه به

ساختار شبکه مورد مطالعه از روش پخش بار پس رو - پیش رو [۱۵] که به وفور در شبکه های توزیع ساعتی مطرح می باشد، استفاده شده است.

#### مدل ریاضی مساله بهینه سازی پیشنهادی ریز شبکه به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه

با استفاده از سه تابع هدف هزینه تولید، آلدگی و تلفات بیان شده در بخش های قبل، تابع هدف جهت برنامه ریزی تولید مولد ها در ریز شبکه مزبور را می توان به صورت بیان کرد:

$$F(P) = \sum_{t=1}^{24} \left( \text{Fun} \left( \left[ \sum_{j=1}^n \text{Cost}_j(t) + p_{im}(t).Pr_{im}(t) - p_{ex}(t).Pr_{ex}(t) \right], \left[ \sum_{j=1}^n K_{po}(\text{coff}_j \times p_j(t)) \right], [P_{Loss}(t)] \right) \right) \quad (17)$$

$$P = [p_{im}(t), p_{EG}(t), p_{MT}(t), p_{FC}(t), p_{DG}(t), p_{ex}(t), h_{boiler}(t)] \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n p_j(t) + p_{im}(t) - p_{ex}(t) = p_d(t) + p_{Loss}(t) - p_{WT}(t) - p_{PV}(t) \quad (19)$$

$$(h_{\mu CHP}(t))_{GE} + (h_{\mu CHP}(t))_{MT} + h_{boiler}(t) = h_d(t) \quad (20)$$

$$p_j^{\min} \leq p_j(t) \leq p_j^{\max} \quad (21)$$

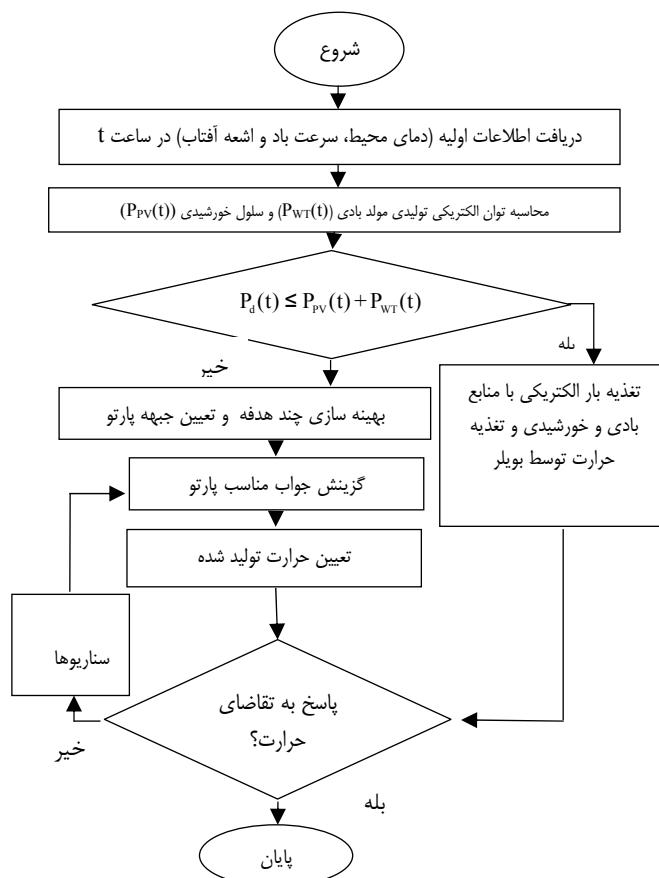
$$p_{im}(t) \geq 0, p_{ex}(t) \geq 0 \quad (22)$$

$$h_{boiler}^{\min}(t) \leq h_{boiler}(t) \leq h_{boiler}^{\max}(t) \quad (23)$$

$$0 \leq (h_{\mu CHP})_{GE} \leq (h_{Exhaust})_{GE} \quad (24)$$

$$0 \leq (mf_{h,exchanger})_{MT} \leq (mf_{exhaust})_{MT} \quad (25)$$

در این روابط، هزینه تولید<sup>۱</sup> بر حسب سنت و آводگی<sup>۲</sup> بر حسب کیلوگرم و تلفات<sup>۳</sup> بر حسب کیلووات ساعت می‌باشد. نظر به اینکه فقط آводگی برای منابع با سوخت اولیه در نظر گرفته شده، مقدار آводگی برای مولفه‌های اول و ششم بردار P صفر در نظر گرفته شده است. روابط (۱۷) تا (۲۵) بیانگر چارچوب کلی تابع هزینه و قیود حاکم بر آن می‌باشد. رویکرد بهینه سازی با در نظر گرفتن قیود حرارتی انجام می‌شود. نمودار جریان عملکرد سیستم در شکل (۴) رسم شده است. برطبق این نمودار، مدامی که منابع بدون سوخت توانایی تغذیه بار الکتریکی سیستم را دارند، تنها منابع استفاده می‌گردد. در ضمن حرارت مورد نیاز سیستم در آن ساعات صرفاً از طریق بویلر تأمین می‌گردد. نظر به آنکه نمونه تقاضای بار الکتریکی در این تحقیق به گونه‌ای است که تقاضای الکتریکی بدون حضور منابع با سوخت اولیه امکان پذیر نیست، مساله بهینه سازی و محاسبه گرمای بازیافتی به ازای اتخاذ سناریوهای موضوعیت می‌یابد که در بخش شبیه سازی به آنها اشاره می‌شود.



شکل (۴) نمودار جریان عملکرد کلی بهینه سازی سیستم در رویکرد چند هدفه

- 1) Cost
- 2) Emission
- 3) Loss

عمده‌ترین روش‌های کاربردی در بهینه‌سازی، الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند. تفاوت این الگوریتم‌ها غالباً در نحوه به دست آوردن جبهه پارتو می‌باشد. نظر به آنکه الگوریتم ژنتیک دارای بهترین پاسخ می‌باشد و نیز به دلیل آنکه الگوریتم ژنتیک همگرایی بیشتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های مشابه تکاملی دارد، در اینجا ویرایش دوم الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب<sup>۱</sup> انتخاب می‌گردد. تفاوت ژنتیک چندهدفه و تک‌هدفه در تولید جمعیت جدید می‌باشد. در این تولید پس از عملیات قطع و جهش، سه مرحله ادغام سازی<sup>۲</sup>، مرتب سازی<sup>۳</sup> و کوتاه سازی<sup>۴</sup> اجرا می‌گردد. دو مرحله اول معروف به رتبه‌بندی نامغلوب و مرحله سوم موسوم به فاصله انبوهی<sup>۵</sup> می‌باشد[۷].

با توجه به اینکه خروجی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب می‌باشد، نیاز به استفاده از روش‌هایی جهت انتخاب جواب نهایی مساله می‌باشد. در این راستا، تاکنون روش‌های زیادی ارائه شده است. روش حداقل-حداکثر و رتبه‌بندی تابع عضویت دو راه معروف جهت انتخاب و گزینش جواب مناسب از میان مجموعه جواب‌های بهینه پارتو می‌باشند. در این میان، روش حداقل-حداکثر به جهت کارایی بالاتر انتخاب می‌گردد[۴]. در این روش، پس از بهنجارسازی مقادیر توابع هدف، ابتدا حداقل مقادیر توابع هدف بهنجارشده تعیین و هر یک از جواب‌های نامغلوب محاسبه و پس از آن، گزینه مطلوب (جواب نهایی) با انتخاب حداکثر مقدار به دست می‌آید.

### شبیه‌سازی

با توجه به توابع هدف و قیود مطرح شده برای بهینه‌سازی، علاوه بر پیش‌بینی سرعت باد، به پارامترهای دیگری چون مشخصات واحدهای نیروگاهی موجود در ریز شبکه، مقدار توان مورد تقاضا، قیمت خرید و فروش برق و مقدار توان خریداری یا فروخته شده نیاز است.

در ریز شبکه مفروض، بار الکتریکی مشترک بین  $W_{57}$  تا  $W_{18}$  تغییر می‌کند و بار گرمایی ساعتی نیز بین  $W_{33}$  تا  $W_{47}$  متغیر است. حداکثر توان تولیدی میکروتوربین، موتور گازسوز، پیل سوختی، دیزل ژنراتور و بویلر کمکی به ترتیب  $30$ ،  $50$ ،  $10$ ،  $15$  و  $50$  کیلووات و حداقل این تولیدها به ترتیب  $7/5$ ،  $7/5$ ،  $1/5$ ،  $2/5$  و صفر کیلووات می‌باشد. این حداکثرها ممکن است به واسطه ارتفاع تغییر کند. بنابراین، هر مولفه سیستم ریز شبکه، به طور جداگانه براساس مشخصات و محدودیت‌ها مدل می‌شود. در این مقاله سعی شده است از مدل شرکت‌هایی استفاده شود که جزو معروف‌ترین شرکت‌های تولیدکننده محصول باشند تا اطلاعات ورودی قابل بسط و پیاده‌سازی باشد.

- 
- 1) Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II)
  - 2) Merge
  - 3) Sort
  - 4) Truncate
  - 5) Crowding distance

در این ریز شبکه، دیزل ژنراتور با توان نامی  $18/8 \text{ kVA}$  و ضریب توان  $18/8$  شرکت کاترپیلار مطابق با مرجع [۳] لحاظ شده است. در این دیزل ژنراتور با استفاده از ابزار برازش ضرایب هزینه به صورت  $a=0/0012$ ,  $b=0/28$ ,  $c=1/23$  به دست می‌آید. همچنین پیل سوختی  $10 \text{ kW}$  کمپانی ICF با ضریب هزینه تعییرات و نگهداری  $5/0$  در نظر گرفته شده است. در مورد منابع تجدید پذیر نیز اطلاعات توربین بادی  $1 \text{ kW}$  کمپانی VEN و سلول خورشیدی SANYO HIT بکار رفته در این تحقیق در جدول (۲) ارایه شده است [۶]. با بکارگیری موتور گازسوز  $50 \text{ کیلوواتی}$ , ضریب هزینه تعییرات به صورت رابطه (۲۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$(Pr_{O\&M}(t))_{EG} = 7.8 - 0.11(p_{\mu CHP}(t))_{EG} \quad (26)$$

هزینه تعییرات با فرض عملکرد سیستم در حالت بار کامل مدنظر است. با توجه به [۱۵, ۱۴] و در نظر گرفتن  $\$/\text{kWh}$  به عنوان واحد، این هزینه برای میکروتوربین  $4/2$ , پیل سوختی  $1$ , دیزل ژنراتور  $2$  و بویلر  $0/05$  فرض شده است.

جدول (۲) مشخصه‌های توربین بادی و سلول خورشیدی

$G_{STC}$	$1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$P_r$	$[W] 1000$
$k$	0.004	$V_{rat}$	$[\text{m/s}] 12$
$\theta_r$	$77^\circ F$	$V_{cin}$	$[\text{m/s}] 3/5$
$\theta_{ambient}$ و $G_{ING}$	از منحنی	$V_{cout}$	$[\text{m/s}] 13$

همچنین به واسطه آنکه هر دو محرک اولیه سیستم تولید همزمان گازسوز هستند، هزینه راه اندازی چندانی متتحمل نمی‌گردد. این هزینه برای منابع دیگر بکار رفته در تحقیق، صفر در نظر گرفته شده است. حداکثر نرخ شیب موتور گازسوز  $50$  درصد توان نامی آن مدنظر می‌باشد. این مقدار برای میکروتوربین، دیزل ژنراتور و پیل سوختی به ترتیب  $40$ ,  $40$  و  $50$  درصد توان نامی در نظر گرفته می‌شود [۱۶, ۹].

به منظور مدل سازی آلودگی زیست محیطی (در اینجا  $\text{CO}_2$ ) در سطوح ولتاژ پایین از الگوی ارایه ضرایب تبدیل استفاده می‌شود. این ضرایب برای پنج منبع مصرف کننده سوخت که در این ریز شبکه به کار رفته‌اند، در جدول (۳) آمده است.

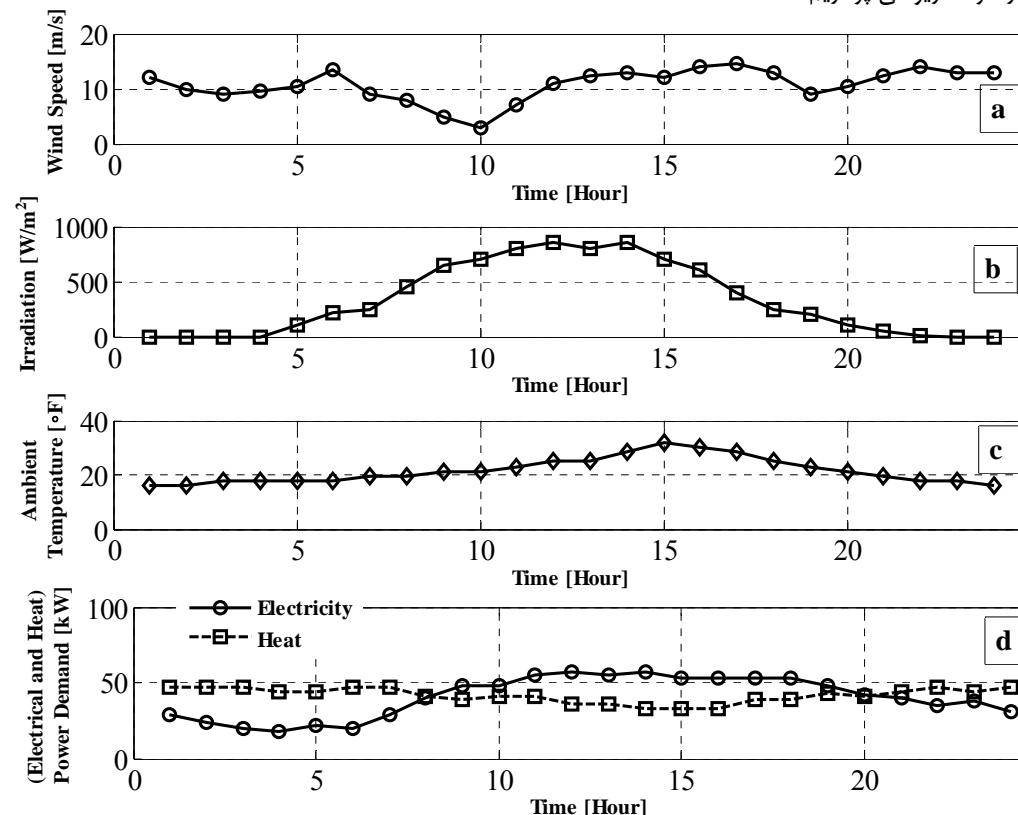
جدول (۳) ضرایب آلودگی منابع موجود در ریز شبکه

منبع	موتور گازسوز	میکرو توربین	پیل سوختی	دیزل ژنراتور	بویلر
ضریب آلودگی	$0/625$	$0/725$	$0/477$	$0/695$	$0/2$

در هنگام تبادل ریز شبکه با شبکه بالادستی، قیمت برق فروخته شده به بازار غالباً کمتر از قیمت برق خریداری شده آن در نظر گرفته می‌شود. این موضوع به آن دلیل است که بهره‌بردار باید بتواند قیمت برق فروخته شده خود را کمتر از قیمت تسویه بازار در آورد تا همواره بتواند در بازار رقابتی حضور یابد. از طرفی، در بعضی مراجع به منظور ارتقای کاربری منابع تولید پراکنده و اراضی شرایط پاسخ تقاضا قیمت خریداری برق از فروش آن بیشتر در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، قیمت فروش برق ۰/۶ قیمت خرید آن در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

شکل(۵) اطلاعات اولیه محیطی و تقاضای برق و حرارت یک مصرف کننده نمونه را در ساعت‌های مختلف شب‌نیروز نشان می‌دهد. این اطلاعات به ترتیب عبارت از سرعت باد (شکل(۵)(a)، داده‌های تابش خورشید(شکل(۵)(b))، منحنی دمای محیط(شکل(۵)(c)) و تقاضای برق و حرارت مشترک نمونه (شکل(۵)(d)) می‌باشد.

حال می‌توان به کمک ویرایش دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب بهینه ترین جوابها را به دست آورد. از این رو، با بیان یکتابع سه هدفه و قیود آن و در قالب تعریف سه سناریو به تعیین جبهه پارتو و جوابهای بهینه در هر سناریو می‌پردازیم.



شکل ۵) منحنی ساعتی(a) سرعت باد(b) تابش خورشید(c) دمای محیط(d) تقاضای برق و حرارت، در یک روز نمونه

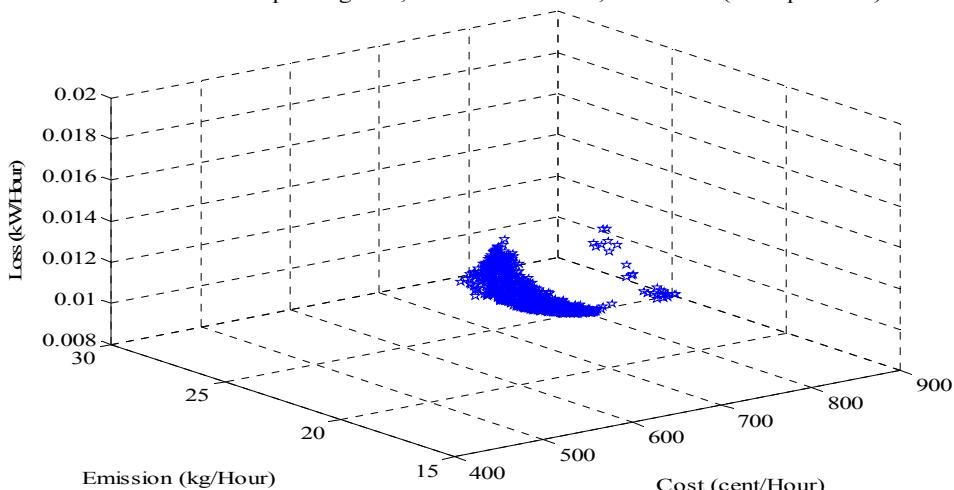
## سناریوی ۱

در سناریوی ۱ هدف آن است تا در ساعت‌هایی از شبانه‌روز که قید حرارتی نقض می‌گردد و گرمای بازیافت‌شده توانایی پاسخ به تقاضای حرارتی را ندارد، بویلر کمکی وارد شود. محاسبه جبهه پارتو برای هر ساعت به صورت جداگانه انجام می‌گردد. برای مثال، همگرایی اهداف در ساعت نمونه( $t=2$ ) و برای جمعیت اولیه‌ای معادل  $800$  عدد،  $45$  تکرار می‌باشد. برای نشان دادن تغیر منحنی و گستره توزیع هر هدف، جبهه پارتو در شرایط مذکور در شکل(۶) ترسیم شده است. پاسخ بهینه براساس روش حداقل-حداکثر محاسبه می‌گردد.

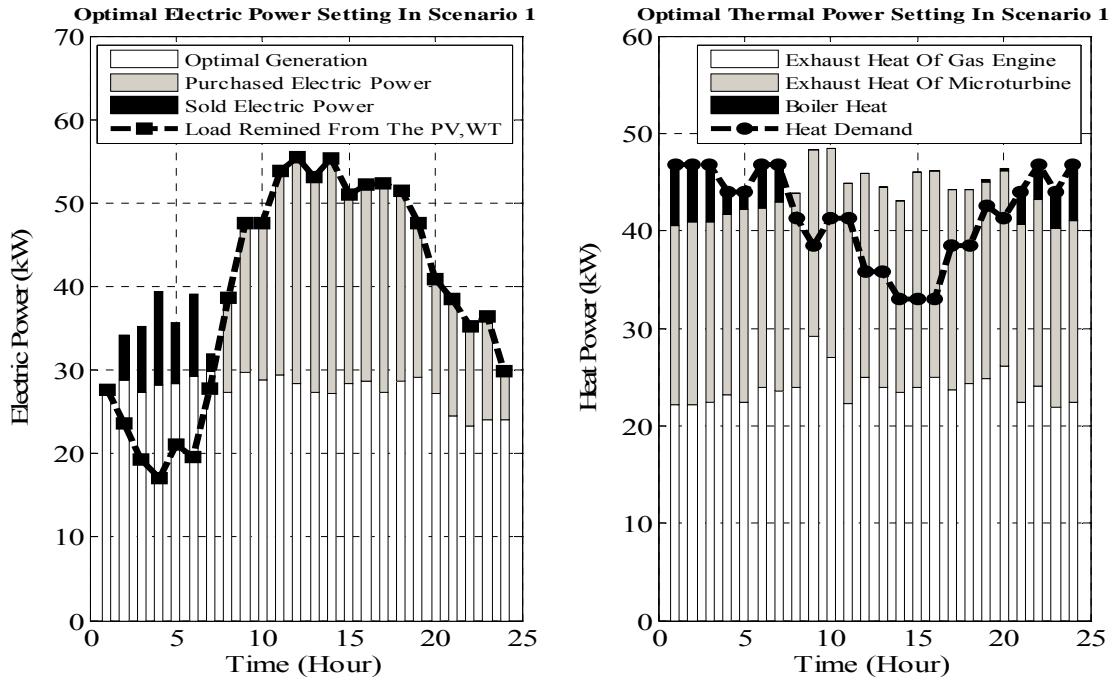
این مقدار بهینه منجر به توزیع بهینه بار الکتریکی و حرارتی در شبانه‌روز می‌گردد. مقادیر بهینه تولید برق و حرارت در ساعت‌های مختلف در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. با توجه به این شکل، مقداری از حرارت در ساعت‌های پرباری و میان‌باری مازاد بر نیاز می‌باشد. این در حالی است که تولید حرارت بویلر تنها در ساعت‌های کمباری صورت می‌گیرد. اصلی‌ترین دلیل این اتفاق را می‌توان در تمایل نداشتمن سیستم‌های تولید همزمان به تولید الکتریکی زیاد (و به تبعیت از آن تولید حرارت مورد نیاز) به جهت ارزان بودن قیمت برق و سودآور نبودن این تولید جستجو نمود. از این رو، بهره‌بردار مرکزی ترجیح می‌دهد در این دوره خالٰ برق و حرارت را به ترتیب از شبکه و بویلر تأمین نماید.

عملکرد هر یک از مولدات‌های الکتریکی و کمک آنها به مشارکت و مبادله توان الکتریکی نشان از کارایی مولد با توجه به مدل پیشنهادی آنها می‌باشد. شکل (۸) تولید مجازی هر یک از منابع را در این سناریو نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، مشارکت محرک‌های اولیه مولدات های تولید همزمان در ساعت‌های کمباری حداقل می‌باشد. این مشارکت برای پیل سوختی نیز در دوره کمباری به دلیل ارزان بودن قیمت برق و بالابودن قیمت هیدروژن حداقل می‌باشد.

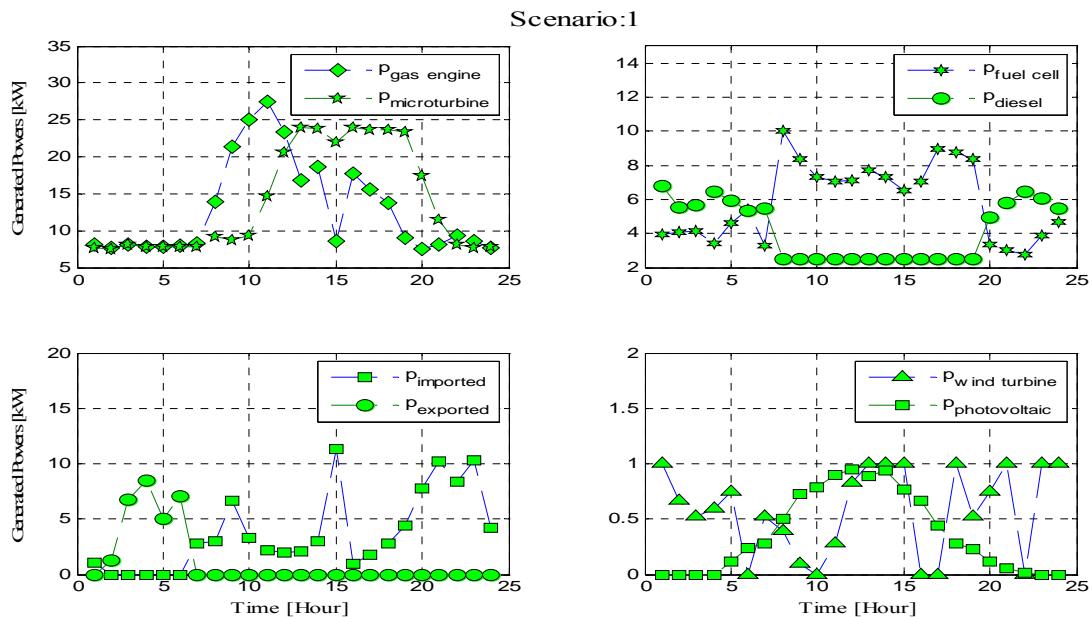
Trade-off in operating cost, emission and Loss, Scenario 1 (a sample Hour)



شکل (۶) معاوضه هزینه، آلودگی و تلفات در سناریو ۱



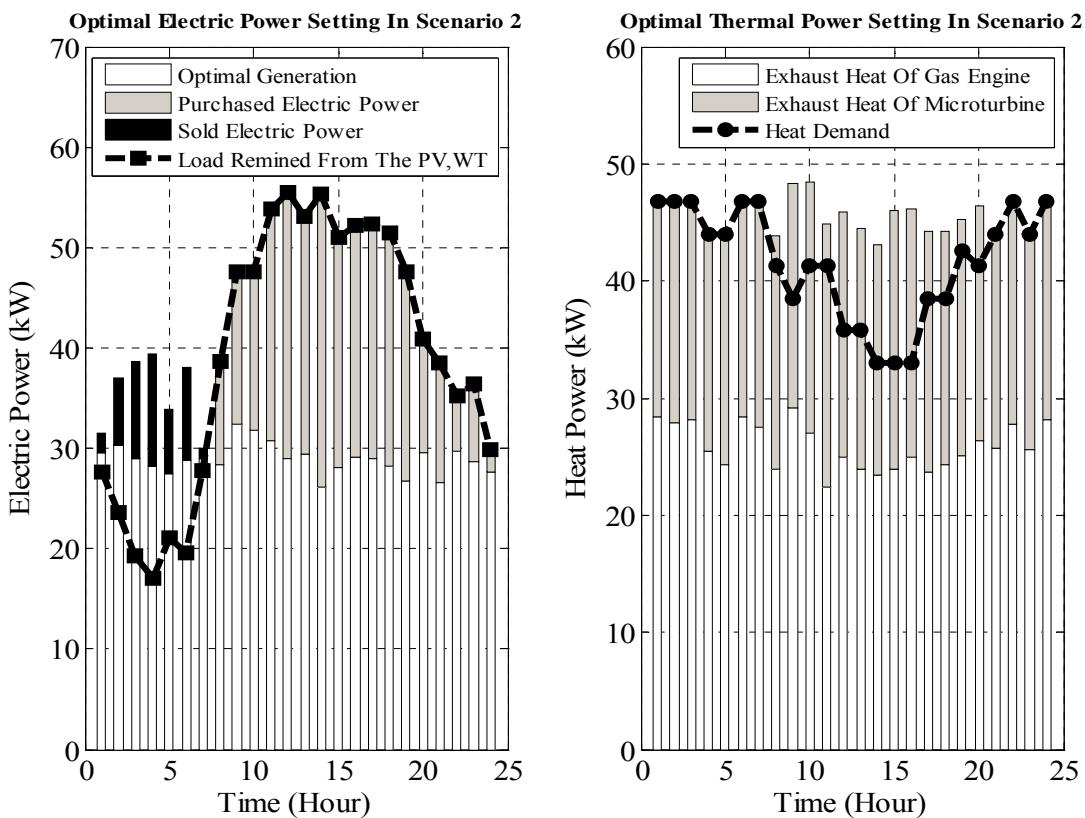
شکل ۷ توزیع برق و حرارت در سناریو ۱



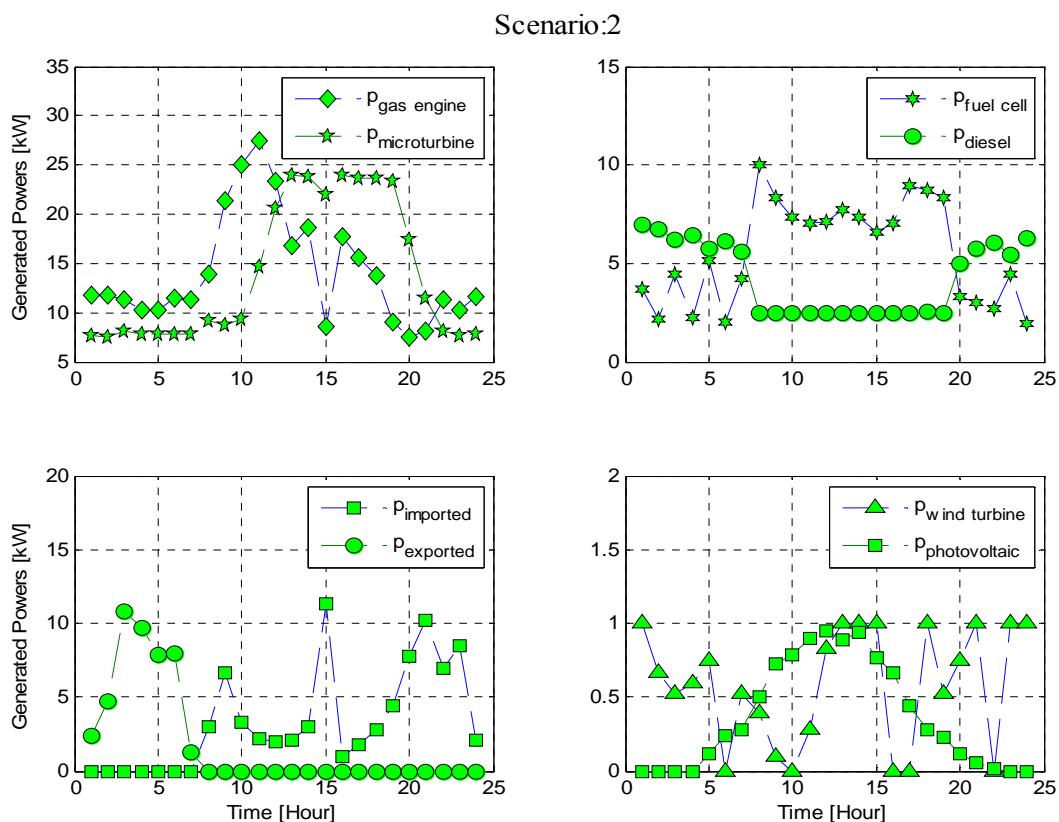
شکل ۸) مشارکت منابع ریز شبکه در سناریو ۱

## سناپریو ۲

در این سناپریو هدف آن است تا در ساعت‌هایی که سیستم‌های تولید همزمان موجود به هر دلیلی توانایی پاسخ به حرارت مورد نیاز را نداشته باشند، بهره‌بردار با افزایش دستی تولید الکتریکی موتور گازسوز این خلاً حرارت را پاسخ دهد. گرچه افزایش سطح تولید الکتریکی موتور گازسوز علاوه بر بالابردن هزینه بهره‌برداری، ساعت افزایش سطح آلاینده‌ها و افزایش تلفات خط می‌گردد، اما حالت جبهه پارتو مشابه سناپریو اول می‌باشد. شکل (۹) کل تولید برق و حرارت منابع و وضعیت خرید و فروش برق را به تصویر می‌کشد. افزایش تولید الکتریکی موتور گازسوز علاوه بر پاسخ به خلاً تقاضای حرارت، ساعت صدور بیشتر برق می‌گردد. مقایسه تولید سایر منابع و نمایش افزایش تولید منبع گازسوز در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. نتایج حاکی از افزایش فروش برق در ساعت‌های ۱ تا ۶ دارد. این افزایش در ساعت‌های ۲۱ تا ۲۴ که بازه کمباری می‌باشد نیز صورت می‌گیرد. گرچه در این سناپریو موتور گازسوز به تولید برق اضافه می‌پردازد، اما به واسطه بهینه‌سازی مجدد و به دلیل ارزان بودن برق در این ساعت‌ها، سیستم ترجیح می‌دهد مقدار دیگری از نیاز الکتریکی را از شبکه برق تأمین نماید.



شکل (۹) توزیع برق و حرارت در سناپریو ۲

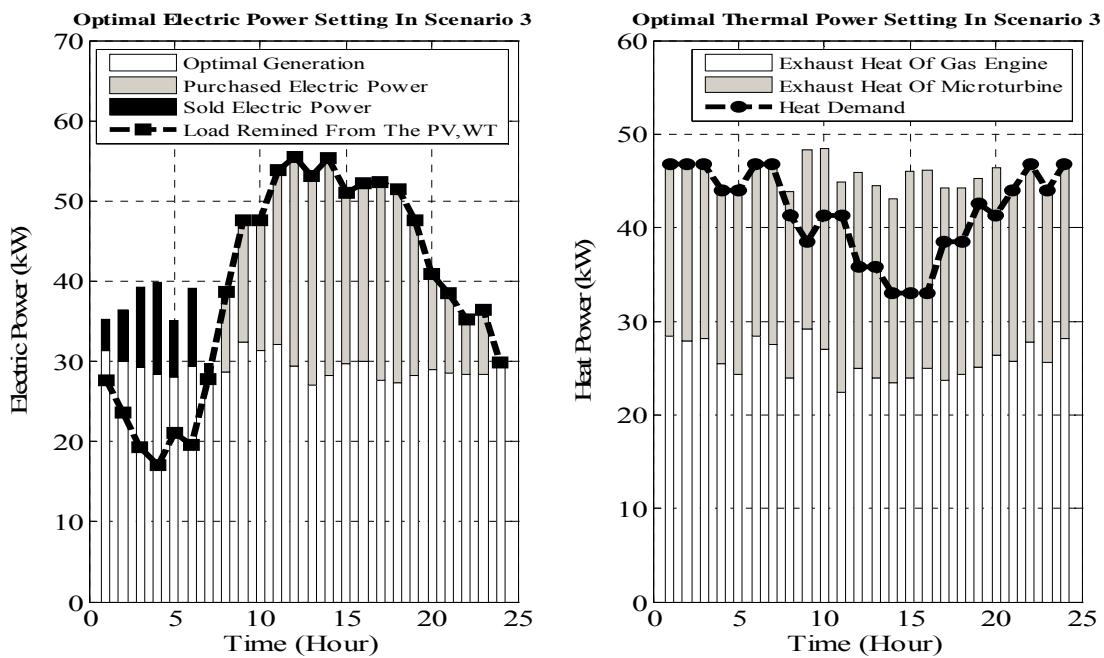


شکل (۱۰) مشارکت منابع ریزشبکه در سناریو ۲

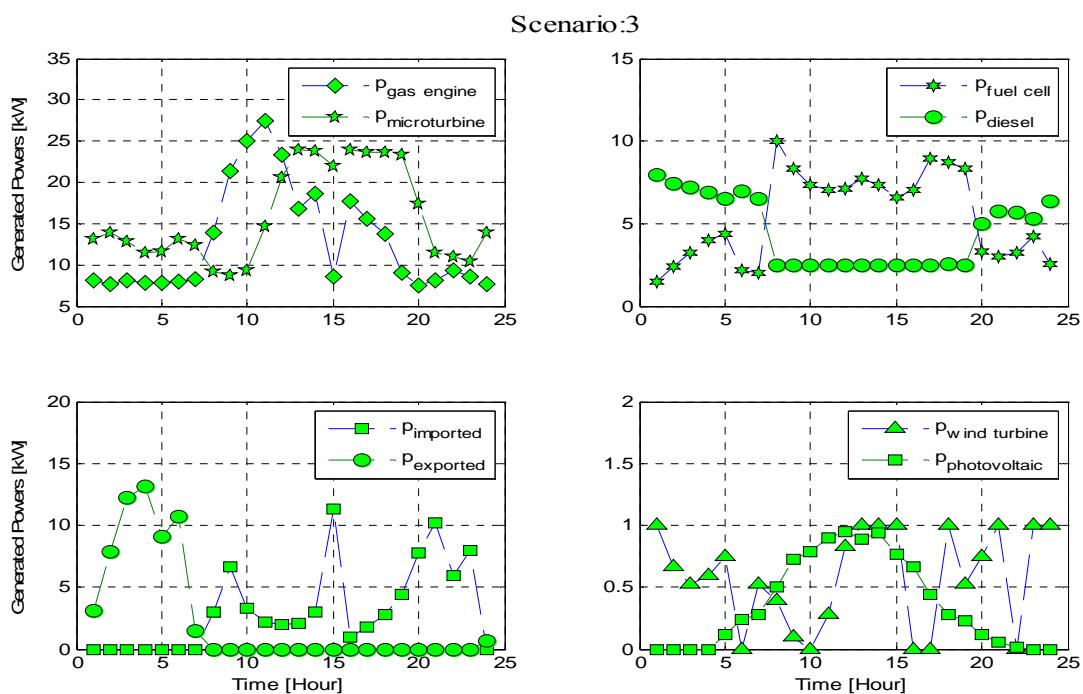
### سناریوی ۳

ثبت نگهداشتن سطح تولید الکتریکی موتور گازسوز و بالایردن تولید برق میکروتوربین گازی به انداهای که بتواند به تقاضای حرارت پاسخ دهد، منجر به تولید سناریوی ۳ می‌گردد. تغییرات این جبهه در حوزه آводگی مشابه سناریوی اول و بیشتر از سناریوی دوم می‌باشد. فروش برق در ساعتهای کمباری به واسطه اعمال سناریوی ۳ در مقایسه با دو سناریوی دیگر افزایش ناچیزی دارد. این موضوع در شکل (۱۱) مشهود است. به طور مشابه، شکل (۱۲) با تفکیک تولید هر یک از منابع، مقدار افزایش تولید میکروتوربین را نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص است، سیستم در ساعت ۱ تا ۶ به دلیل پایین بودن تقاضا علاوه بر پاسخ به آن، مقداری برق به شبکه می‌فروشد. همچنین این تولید در ساعت پایانی شباه روز روند معقولی را پیروی می‌کند و به دلیل آنکه تمایل سیستم در جهت کمینه نمودن هزینه مولدها می‌باشد، مابقی نیاز برق از شبکه سراسری تأمین می‌گردد.



شکل ۱۱) توزیع برق و حرارت در سناریو ۳



شکل ۱۲) مشارکت منابع ریز شبکه در سناریو ۳

با توجه به مباحث گفته شده، جدول (۴) به جمع‌بندی مباحث بهینه‌سازی سه‌هدفه مذکور می‌پردازد. از آنجایی که منابع فتوولتاییک و بادی به کاهش تقاضای برق قبل از بهینه‌سازی می‌پردازند، تولید آنها در هر سه سناریوی پیشنهادی یکسان خواهد بود. با توجه به اینکه سناریوهای (۲) و (۳) به ترتیب در اثر تغییر دو منبع موتور گازسوز و میکروتوربین گازی ایجاد می‌گردند، نتایج حاکی از آن است که به منظور رعایت قیود حرارتی (۲۴) و (۲۵) تولید الکتریکی میکروتوربین گازی بیشتر از موتور گازسوز می‌باشد. اجرای سناریوهای (۲) و (۳) در مقایسه با سناریوی (۱) تولید الکتریکی پیل سوختی و میزان خرید و فروش برق را در حد بالاتری قرار داده و متعاقب آن هزینه و آلودگی نیز افزایش می‌یابد. این میزان تولید در دیزل ژنراتور نزولی می‌باشد. دلیل این امر را (علیرغم موقعیت مناسبتر آن در ریز شبکه نسبت به پیل سوختی) می‌توان گران بودن هزینه تولید آن دانست.

**جدول ۴)** جمع‌بندی بهینه‌سازی چند‌هدفه هزینه، آلودگی و تلفات در تحلیل کلاسیک

سناریوی ۳	سناریوی ۲	سناریوی ۱	
۱۳/۹۰۵	۱۳/۹۰۵	۱۳/۹۰۵	(kWh/Day) توربین بادی
۸/۸۹	۸/۸۹	۸/۸۹	(kWh/Day) فتوولتاییک
۲۲۱/۴۷	۲۴۳/۲۵	۲۲۱/۴۷	(kWh/Day) موتور گازسوز
۲۴۲/۸۳	۲۰۹/۸۵	۲۰۹/۸۵	(kWh/Day) میکروتوربین گازسوز
۱۰۴/۱۵	۱۰۶/۹۶	۸۸/۱۶۳	(kWh/Day) پیل سوختی
۱۳۲/۶	۱۳۳/۱۱	۱۳۹/۲	(kWh/Day) موتور دیزل
۲۹۱/۲۸	۲۹۶/۱	۲۴۶/۷۲	(kWh/Day) برق خریداری شده
۴۹/۳۲۵	۴۶/۲۸۱	۴۳/۶۱۲	(kWh/Day) برق فروخته شده
۱۷۲۱۷	۱۷۲۳۷	۱۶۶۰۲	(Cent/Day) هزینه تولید
۴۵۶/۳	۴۴۷/۷۱	۴۳۸/۸۲	(kg/Day) انتشار آلاینده‌ها
۰/۳۱۰۹۵	۰/۳۰۸۹۷	۰/۳۱۴۷۴	(kWh/Day) تلفات انرژی ریز شبکه
۱۸۷۲۵	۱۸۷۱۷	۱۸۰۵۳	(Cent/Day) هزینه کل

از این‌رو، با توجه به نتایج اهداف مختلف، پیروی از سناریوی (۱) باعث صرفه‌جویی در کاهش سطح آلودگی می‌گردد. در انتهای نیز هزینه کل بر اساس ضرایب تبدیل آلودگی و تلفات به هزینه محاسبه شده است. لازم به ذکر است که هزینه تلفات بر مبنای بیشترین قیمت خرید برق محاسبه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نتایج حاکی از برتری بکارگیری

سناریوی اول می‌باشد به طوری که استفاده از این سناریو به ترتیب سبب کاهش  $3/6\%$  و  $3/7\%$  در هزینه کل نسبت به سناریوهای دوم و سوم می‌گردد. نظر به تأثیر قیمت خرید برق از شبکه بالادستی، جدول (۵) تأثیر تغییرات قیمت خرید برق را در بهره برداری ریزشبکه نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش  $10\%$  قیمت برق در شبکه بالادست، هزینه کل  $3/5\%$  افزایش می‌یابد. با توجه به جدول، گرچه با کم کردن قیمت خرید برق از شبکه، هزینه کل روندی نزولی می‌یابد، اما حمایت از قیمت حامل‌های انرژی می‌تواند هزینه بهره برداری از ریزشبکه را بدون کاهش قیمت برق شبکه بالادستی (که در اختیار بهره بردار نیست) پایین آورد.

جدول (۵) تأثیر تغییرات قیمت برق در بهره برداری از ریز شبکه

+10%	+5%	-10%	-5%	
۱۷۰۹۹	۱۶۸۰۰	۱۵۴۷۲	۱۶۴۹۵	هزینه تولید (Cent/Day)
۴۷۸/۸۶	۴۴۸/۱۳	۳۹۵/۵۲	۴۲۷/۰۸	انتشار آلاینده‌ها (kg/Day)
۰/۳۱۲	۰/۳۱۴۴	۰/۳۴۴۳۴۱	۰/۳۳۷۱۲	انرژی ریزشبکه (kWh/Day)
۱۸۶۸۳	۱۸۲۸۲	۱۶۷۸۱	۱۷۹۰۸	هزینه کل (Cent/Day)

### نتیجه گیری

در این مقاله، پس از مدل‌سازی منابع تولید پراکنده و تعیین محركه‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان مقایسه کوچک در یک ریزشبکه نمونه، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب برای حل مساله مدیریت بهره‌برداری فنی و اقتصادی ریزشبکه مورد استفاده قرار گرفت. روش مذکور به دلیل استفاده از سازوکار الگوریتم ژنتیک قادر خواهد بود پارامترهای ساختاری خود را در موقع نیاز به خوبی تنظیم نماید و به جواب‌های مناسب‌تری در زمان کمتر دست یابد. به منظور ارزشیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سه سناریوی مختلف با رویکرد پیروی از منحنی تقاضای حرارت یک مشترک نمونه در ۲۴ ساعت یک شب‌نامه‌روز مطرح گردید. با استفاده از مساله بهینه‌سازی سه هدفه هزینه تولید منابع انرژی، آلودگی زیست محیطی و تلفات ریزشبکه، نتایج نشان از برتری سناریوی استفاده از بویلر کمکی نسبت به دو سناریوی افزایش تولید موتور گازسوز و میکروتوربین دارد. همچنین نتایج حاکی از این است که با برقرار نمودن امکان ارتباط مناسب جهت تبادل توان میان دو شبکه، بهره بردار شبکه قادر خواهد بود بهره‌برداری از ریزشبکه را از هر سه جنبه اقتصادی، محیطی و ساختاری بهبود بخشد.

جدول نمادهای مورد استفاده

Boiler	بوييلر گازى كمکى	V	سرعت
Btu	واحد دمايی بريتانيابي	$\eta(\%)$	راندمان
c	گرمای ویژه محصولات احتراق $(\frac{kj}{kg^{\circ}c})$	$\alpha$	نسبت برق به گرمای خروجی
Cost ( $\phi$ )	تابع هزینه	$\phi$	سنت
Coff <sub>j</sub>	ضریب آلدگی (واحد زام)	$\theta (^{\circ}F)$	دما
Cost <sub>j</sub>	هزینه واحد نمونه		زیرنويس
Ft	فوت	Ambient	شرياط محيطى
f	سوخت	Boiler	بوييلر
G	ڙنراتور	cin	قطع پاين
G <sub>ING</sub>	ميزان تشعشعات آفتاب	cout	قطع بالا
G <sub>STC</sub>	تشعشعات آفتاب در حالت استاندارد	d	تقاضا
h (kW)	گرما	ex	فروخته شده
h.exchanger	مبدل حرارت	exhaust	خروجي
ISA	سيستم استاندارد بين الملل	Hydro	هيدروژن
k	ضریب حرارتی	im	خریداري شده
p (kW)	توان الکتریکی	ng	گاز طبیعی
Heat( $\phi$ )	هزینه حرارت	O&M	تممير و نگهداري
Pr ( $\phi/kWh$ )	قيمت	loss	تلفات
mf	دبی گاز	r	مرجع
t	زمان (ساعت)	rat	نامي
n	تعداد مولداهای مصرف کنندهی سوخت	$K_{po}$	قيمت آلدگی

## منابع

- [۱] ارمکان، محمد. ذکریازاده، علیرضا. جدید، شهرام. (۱۳۹۱)، برنامه ریزی ریز شبکه های یکپارچه در بازار برق با حضور منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو در شبکه توزیع هوشمند، بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی برق.
- [۲] پرویزی مساعد، مهدی. انوری مقدم ، امجد. قاسم خانی، امیر . ستاره، محمد.. رحیمی کیان، اشکان. (۱۳۹۱)، مدیریت انرژی هوشمند در یک ریز شبکه با در نظر گرفتن پاسخگویی بار، بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی برق.
- [۳] رضاییان، میثم. جدید، شهرام. (۱۳۸۹). بررسی اثر تولید همزمان برق و حرارت در کاهش هزینه بهره برداری و آلدگی ریز شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق.
- [۴] زنگنه، علی. (۱۳۸۸). برنامه ریزی توسعه‌ی منابع تولید پراکنده با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره، رساله‌ی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [5] Abido, M. A. ,(2003), “Environmental/Economic Power Dispatch Using Multiobjective Evolutionary Algorithms”, IEEE TRANS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 4.
- [6] Anvari Moghaddam, A. Seifi, A. Niknam, T., and Pahlavani ,M .R., (2011). “Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source”. Applied Energy 85 .968–987.
- [7] Coello, C. A., Gary, B. And David A., ( 2007). Van Veldhuizen. “Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems, Second Edition”, Springer Science Business Media, LLC.
- [8] Diaf S.,Notton G.,Belhamel M.,and Haddadi M., (2008). Louche,”Design and techno economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions”, Applied Energy 85 .968–987.
- [9] Energy Nexus Group, “Technology characterization–microturbine” ,(2002). USA Environmental Protection Agency;.
- [10] Integrated Resource Plan ,”Air Emissions Rates and Costs”, Seattle City Light 2010.
- [11] Kalian, J. and Janusz Skorek.(2008) .”CHP plant for distributed generation-equipment sizing and system performance evaluation”. Institute of thermal Technology Konarskiego 22. 44-101 Gliwice, Poland.
- [12] Kersting, W.H., (2001 ), “Distribution Systems”. The Electric Power Engineering Handbook Ed. L.L. Grigsby Boca Raton: CRC Press LLC, pp. 18-21.
- [13] Ontario Energy Board ,”Regulated Price Plan (RPP) Time-of-use (TOU) Prices”, [www.ontarioenergyboard.ca/OEB](http://www.ontarioenergyboard.ca/OEB).

- 
- [14] Strunz, K. Fletcher, R. H. Campbell, R. Gao, F.( 2009), “*Developing Benchmark Models for Low-voltage Distribution Feeders*”. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, CALGARY, CANADA.
  - [15] Ting-Chia,O., and Whei-Min L., “*A novel Z-matrix algorithm for distribution power flow solution, PowerTech*”, 2009 IEEE Bucharest , 2009, pp. 1-8.