

بهره‌برداری چند هدفه از ریزشکده‌ها در حضور سیستم‌های تولید همزمان مقیاس کوچک

علی بدری^۱، احمد مرادقلی^۲

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۲/۱۲/۱۹

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۵/۷

چکیده:

بهره‌برداری از ریزشکده‌های 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 بهینه‌سازی 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 شبانه‌روز 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 مشتریان ارایه گردیده و از این بین، اقتصادی‌ترین سناریو پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی:

بهره‌برداری اقتصادی، بهینه‌سازی چندهدفه، تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک، ریزشکده، مدل‌سازی

ali.badri@srttu.edu

a.moradgholi@gmail.com

۱) استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی (نویسنده 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 رویه گاز های آلاینده، کاهش تلفات خطوط، بهبود پروفیل ولتاژ و بررسی امکان صدور برق بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۴]. ریزشبکه 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^۱، 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 وابستگی 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 میکروتوربین 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 چندهدفه در حوزه انتقال و توزیع و با در نظر گرفتن مدل های مختلف منابع 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 عمدتاً از چگونگی تأثیر قیود ترمودینامیکی مولدها سخنی به میان نیامده است. پاره ای از مقالات نیز صرفاً روی روش ها و تکنیک های حل مساله متمرکز شده و الگوریتم های ابتکاری و نوینی نظیر الگوریتم تجمع ذرات تطبیقی^۲ (AMPSO) [۶]، الگوریتم ترکیبی مبتنی بر نظریه فازی و تکاملی هوش جمعی^۳ (FSAPSO) [۲] و روش برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح (MINLP) [۱] را برای حل مسائل چندهدفه مربوط به ریزشبکه 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 موتورگازسوز و میکروتوربین گازی و یک بویلر کمکی در کنار دیگر منابع جهت تأمین برق و حرارت یک مشترک نمونه در یک شبانه روز، بهینه سازی چندهدفه 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 (μ CHP)

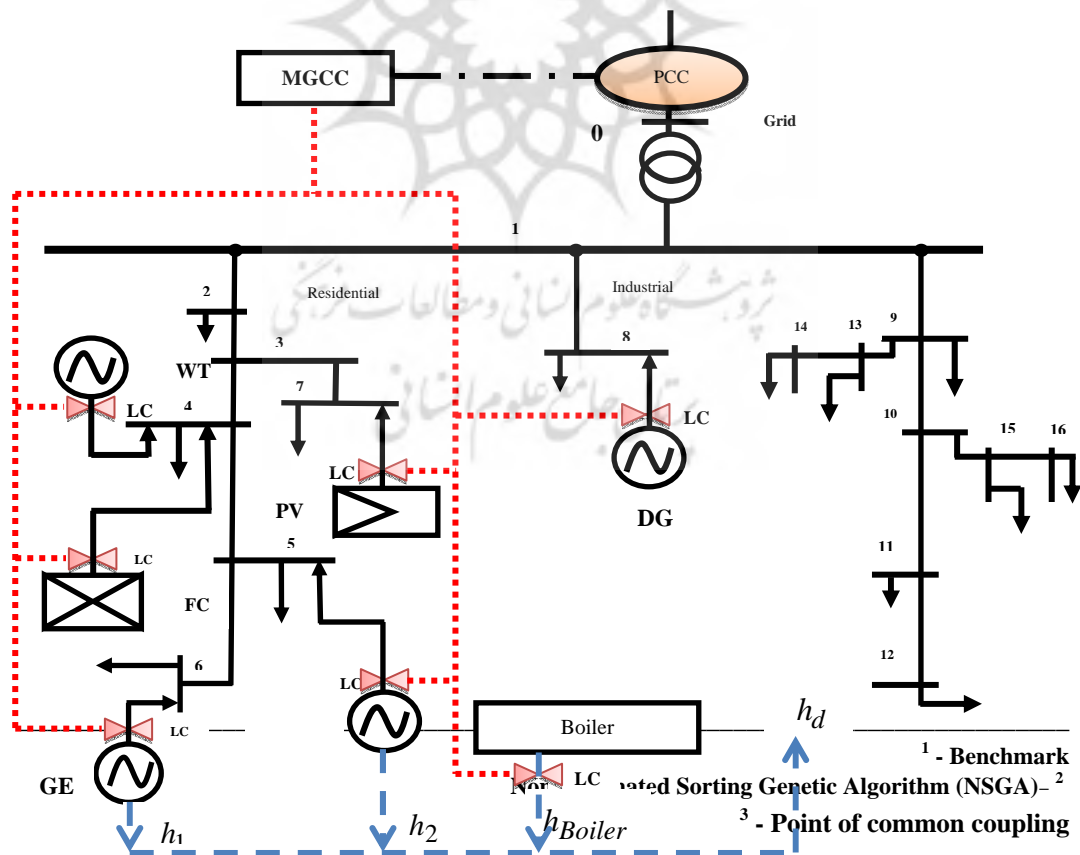
2) Adaptive Modified Particle Swarm Optimization algorithm

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 برازش مدلی برای هزینه میکروتوربین گازی ارایه می گردد. سپس با توجه به ضرایب آلودگی منابع ریزشبکه محک^۱، 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 چندهدفه مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA II^۲) معرفی گردیده و نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف استخراج می گردد.

مدل سازی هزینه مولدهای برق و حرارت و منابع تجدیدپذیر در ریزشبکه

شکل (۱) ساختار یک ریزشبکه واقعی را نشان می دهد. در این تحقیق، ریزشبکه شامل منابع تولیدی میکروتوربین گازی (MT) و موتورگازسوز (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 20/0.4kV و نقطه ترویج مشترک^۳ PCC می باشد.



شکل (۱) ریز شبکه مورد مطالعه

هر واحد تولید محلی یک کنترل کننده محلی^۱ (LC) دارد که با کنترل کننده‌های محلی دیگر و کنترل کننده مرکزی ریزشکه^۲ (MGCC) جهت مبادله اطلاعات در ارتباط است.

موتور گازسوز (EG)

با توجه به اطلاعات آب و هوایی و همچنین منحنی های تقاضای برق و حرارت، برنامه ریزی تحت الشعاع برخی قیود ترمودینامیکی قرار می گیرد. 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 می باشد به گونه‌ای که ۱۰۰۰ft افزایش ارتفاع راندمان را ۳٪ و توان حداکثر خروجی را ۳/۸٪ کاهش می دهد.

همچنین ۱۰ درجه فارنهایت افزایش در دمای محیط موجب کاهش ۱٪ راندمان می گردد [۱۱]. گاز طبیعی با ارزش حرارتی ۱۰۳۰ Btu / ft³ و قیمت آن معادل ۱۸/۱۰۴۵ Cent / m³ در نظر گرفته می شود. بر این اساس، راندمان یک موتور گازسوز را می توان مطابق رابطه (۱) در نظر گرفت [۱۱].

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

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

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

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

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

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

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 می گیرند به طوری که هر 1000ft افزایش ارتفاع و هر 10 درجه فارنهایت افزایش در دمای محیط به ترتیب راندمان را 3% و 1% کاهش می دهد. به علاوه، به ازای افزایش 10 درجه فارنهایت، دبی گازهای خروجی به اندازه 0.67% کاهش می یابد. با این حال، با توجه به کاهش 3% راندمان به ازای افزایش 1000ft در ارتفاع، برای دبی گاز خروجی نیز 3% کاهش در نظر گرفته می شود. همچنین با توجه به استاندارد ISA افزایش 1000ft در ارتفاع باعث کاهش $3/56$ درجه فارنهایت دمای محیط و به تبع آن کاهش تقریبی 4 درجه در دمای خروجی خواهد شد [۹].

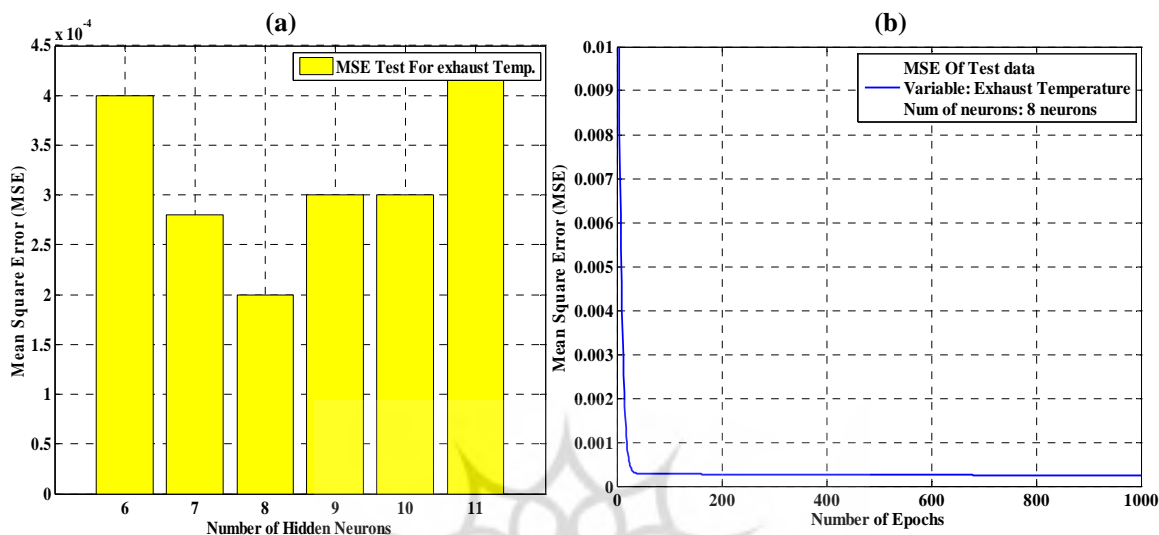
با توجه به نبود روابط مشخص برای میکروتوربین و با در نظر گرفتن اطلاعات محیطی از قبیل ارتفاع، دمای محیط و بار جزئی میکروتوربین، در این مقاله از شبکه عصبی مصنوعی^۱ به منظور تعیین روابط خروجی آن استفاده می گردد. شکل (۲) ارتباط ورودی ها و خروجی ها را در این مساله نشان می دهد. شبکه عصبی مصنوعی براساس یک فرایند تکراری و مبتنی بر انطباق وزن ها عمل می کنند. با به دست آمدن وزن های مورد قبول و آموزش شبکه عصبی می توان خروجی های مورد نظر را به دست آورد.



شکل (۲) استفاده از شبکه عصبی در ارتباط ورودی ها و خروجی ها

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 می توان نتایج مشابهی ارائه کرد. همانطور که پیداست، کمترین میانگین مربعات خطا برای دمای خروجی میکروتوربین به ازای 8 نرون مخفی اتفاق می افتد. با به دست آمدن وزن های مورد قبول، محاسبه داده ها در ارتفاع مشخص (در اینجا ارتفاع شهر مورد نظر) انجام می گیرد.

1) Artificial Neural Network



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

از این رو، هر یک از سه متغیر راندمان، دما و دبی گازهای خروجی به دمای محیط و توان خروجی وابسته می شوند. برآزش منحنی^۱ در نرم افزار متلب^۲ ابزاری مناسب جهت فرمول بندی متغیرهای مذکور می باشد. بر این اساس، روابط مربوط به میکروتوربین ۳۰ kW ساخت شرکت کپستون^۳ در ارتفاع ۵۳۰۰ft (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.

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

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

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

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

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

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

توربین بادی (WT)

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

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

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 10 kW [۶] به شرایط محیطی (مثلا دمای محیط) نکته مهمی است که کمتر در نظر گرفته شده است، بازده این نمونه در رابطه (۱۲) با ابزار برازش بیان 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 دوره هایی 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 می شود.

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

مدل سازی آلودگی ریزشبه

بهره برداری از ریزشبه تحت تأثیر عوامل دیگری غیر از هزینه (مانند آلودگی زیست محیطی، تلفات خطوط، مشخصه های فنی و ...) می باشد. بنابراین لازم است تدابیری اندیشیده شود تا عوامل دیگر نیز مدنظر قرار گیرند. آلودگی زیست محیطی از جمله عواملی است که بهره بردار یک سیستم قدرت به آن توجه ویژه ای دارد. از جمله گازهای آلوده کننده محیط می توان به CO_2 ، NO_x ، SO_2 و CO اشاره کرد. جدول (۱) نشان دهنده قیمت این آلودگی ها می باشد [۱۰].

جدول (۱) قیمت آلودگی های مرسوم

	CO_2	NO_x	SO_2
\$/ton	۳۳	۱۴۹۰	۱۳۰۲

مدل سازی تلفات ریزشبه

ریزشبه ها نزدیکترین پل ارتباطی با مصرف کنندگان در شبکه توزیع انرژی می باشند. در این سیستم ها به علت نوع ساختار آنها که اغلب شعاعی است، بین مصرف کننده 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 سیستم های انتقال می باشد. چون در عمل بار فیدر توزیع به دلیل حضور بارهای تکفاز ذاتا نامتعادل بوده، در این مقاله به منظور دستیابی به نتایج عملی و مدل سازی عدم تعادل این سیستم ها از هادی های با فواصل نابرابر به همراه سیم نول استفاده می گردد [۱۲].

در این مطالعه، یک ریزشبه واقعی با مشخصات عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. با داشتن این مشخصات می توان پارامترهای دیگری چون تلفات و مشخصه های فنی شبکه را به صورت دقیقتر محاسبه نمود. این ریزشبه در سطح ولتاژ پایین و در سه بخش خانگی، تجاری و صنعتی به کار می رود. در این تحلیل، سهم تقاضای الکتریکی این سه بخش به ترتیب ۵۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ می باشد.

مشخصات توزیع میزان بار در باس ها مشابه [۱۴] مدنظر قرار گرفته است. برای تحلیل تلفات ریزشبه با توجه به

ساختار شبکه مورد مطالعه از روش پخش بار پس رو - پیش رو [۱۵] که به وفور در شبکه های توزیع شعاعی 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، آلودگی و تلفات بیان شده در بخش های قبل، تابع هدف جهت برنامه ریزی تولید مولدها در ریز شبکه مزبور را می توان به صورت بیان کرد:

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

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

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

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

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

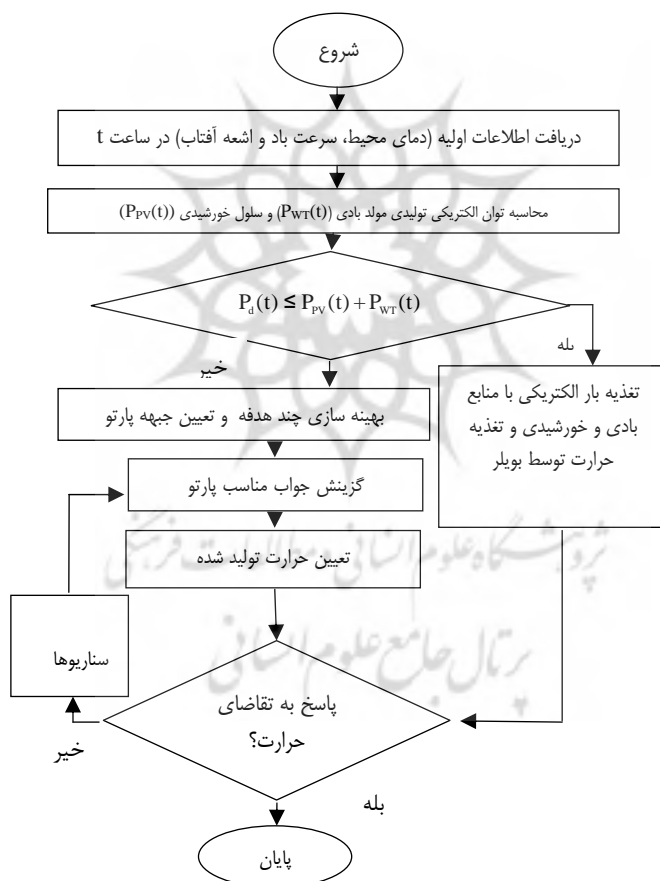
$$p_{im}(t) \geq 0, p_{ex}(t) \geq 0 \quad (22)$$

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

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

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

در این روابط، هزینه تولید^۱ برحسب سنت و آلودگی^۲ بر حسب کیلوگرم و تلفات^۳ بر حسب کیلووات ساعت می باشد. نظر به اینکه فقط آلودگی برای منابع با سوخت اولیه در نظر گرفته شده، مقدار آلودگی برای مولفه های 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 می باشد. رویکرد بهینه سازی با در نظر گرفتن قیود حرارتی انجام می شود. نمودار جریان عملکرد سیستم در شکل (۴) رسم شده است. برطبق این نمودار، مادامی که منابع بدون سوخت توانایی تغذیه بار الکتریکی سیستم را دارند، تنها منابع استفاده می گردند. در ضمن حرارت مورد نیاز سیستم در آن ساعات صرفاً از طریق بویلر تأمین می گردد. نظر به آنکه نمونه تقاضای بار الکتریکی در این تحقیق به گونه ای است که تقاضای الکتریکی بدون حضور منابع با سوخت اولیه امکان پذیر نیست، مساله بهینه سازی و محاسبه گرمای بازیافتی به ازای اتخاذ سناریوهایی موضوعیت می یابد که در بخش شبیه سازی به آنها اشاره می شود.



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^۱ انتخاب می‌گردد. تفاوت ژنتیک چندهدفه و تک‌هدفه در تولید جمعیت جدید می‌باشد. در این تولید پس از عملیات قطع و جهش، سه مرحله ادغام‌سازی^۲، مرتب‌سازی^۳ و کوتاه‌سازی^۴ اجرا می‌گردد. دو مرحله اول معروف به رتبه‌بندی نامغلوب و مرحله سوم موسوم به فاصله انبوهی^۵ 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 تابع هدف، ابتدا حداقل مقادیر تابع هدف بهنجار شده 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 پیش بینی سرعت باد، به پارامترهای دیگری چون مشخصات واحدهای نیروگاهی موجود در ریزشبهک، مقدار توان مورد تقاضا، قیمت خرید و فروش برق و مقدار توان خریداری یا فروخته شده نیاز است.

در ریزشبهک مفروض، بار الکتریکی مشترک بین ۱۸kW تا ۵۷kW تغییر می‌کند و بار گرمایی ساعتی نیز بین ۳۳kW تا ۴۷kW متغیر است. حداکثر توان تولیدی میکروتوربین، موتور گازسوز، پیل سوختی، دیزل ژنراتور و بویلر کمکی به ترتیب ۳۰، ۵۰، ۱۰، ۱۵ و ۵۰ کیلووات و حداقل این تولیدها به ترتیب ۷/۵، ۷/۵، ۱/۵، ۲/۵ و صفر کیلووات می‌باشد. این حداکثرها ممکن است به واسطه ارتفاع تغییر کند. بنابراین، هر مولفه سیستم ریزشبهک، 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 ریزشبه، دیزل ژنراتور با توان نامی ۱۸/۸ kVA و ضریب توان ۰/۸ شرکت کاترپیلار مطابق با مرجع [۳] لحاظ شده است. در این دیزل ژنراتور با استفاده از ابزار برآزش ضرایب هزینه به صورت $a=۰/۰۱۲$ $b=۰/۲۸$ $c=۱/۲۳$ به دست می‌آید. همچنین پیل سوختی ۱۰kW کمپانی ICF با ضریب هزینه تعمیرات و نگهداری ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در مورد منابع تجدید پذیر نیز اطلاعات توربین بادی ۱kW کمپانی VEN و سلول خورشیدی SANYO HIT بکار رفته در این تحقیق در جدول (۲) ارایه شده است [۶]. با بکارگیری موتور گازسوز ۵۰ کیلوواتی، ضریب هزینه تعمیرات به صورت رابطه (۲۶) در نظر گرفته می‌شود.

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

هزینه تعمیرات با فرض عملکرد سیستم در حالت بار کامل مدنظر است. با توجه به [۱۴، ۱۵] و در نظر گرفتن $\frac{\text{¢}}{\text{kWh}}$ به عنوان واحد، این هزینه برای میکروتوربین ۲/۴، پیل سوختی ۱، دیزل ژنراتور ۲ و بویلر ۰/۵ فرض شده است.

جدول (۲) مشخصه‌های توربین بادی و سلول خورشیدی

G_{STC}	$1000 \frac{W}{m^2}$	P_r	[W] ۱۰۰۰
k	0.004	V_{rat}	[m/s] ۱۲
θ_r	$77^\circ F$	V_{cin}	[m/s] ۳/۵
$\theta_{ambient}$ و G_{ING}	از منحنی	V_{cout}	[m/s] ۱۳

همچنین به واسطه آنکه هر دو محرک اولیه سیستم تولید همزمان گازسوز هستند، هزینه راه اندازی چندانی متحمل نمی‌گردد. این هزینه برای منابع دیگر بکار رفته در تحقیق، صفر در نظر گرفته شده است. حداکثر نرخ شیب موتور گازسوز ۵۰ درصد توان نامی آن مدنظر می‌باشد. این مقدار برای میکروتوربین، دیزل ژنراتور و پیل سوختی به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد توان نامی در نظر گرفته می‌شود [۹، ۶، ۱].

به منظور مدل سازی آلودگی زیست محیطی (در اینجا CO₂) 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.

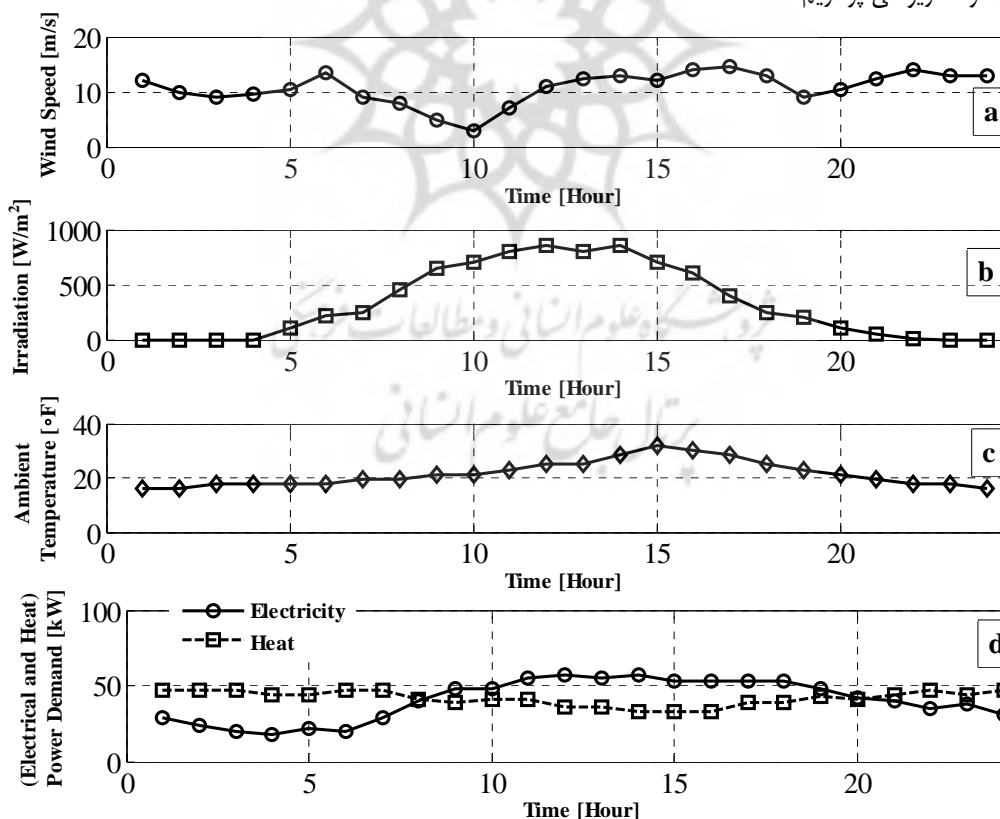
جدول (۳) ضرایب آلودگی منابع موجود در ریز شبکه

منبع	موتور گازسوز	میکرو توربین	پیل سوختی	دیزل ژنراتور	بویلر
ضریب آلودگی	۰/۶۲۵	۰/۷۲۵	۰/۴۷۷	۰/۶۹۵	۰/۲

در هنگام تبادل ریزشیکه 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 ارضای شرایط پاسخ تقاضا قیمت خریداری برق از فروش آن بیشتر در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، قیمت فروش برق $0/6$ 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 شبانه‌روز 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 یک تابع سه هدفه و قیود آن و در قالب تعریف سه سناریو به تعیین جبهه پارتو و جوابهای بهینه در هر سناریو می پردازیم.



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

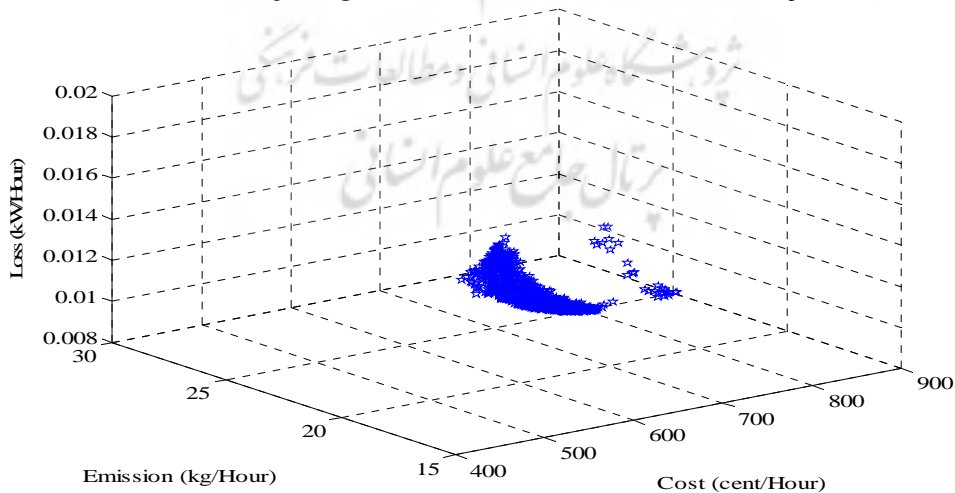
سناریوی ۱

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 ۸۰۰ عدد، ۴۵ تکرار می‌باشد. برای نشان دادن تفرع 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.

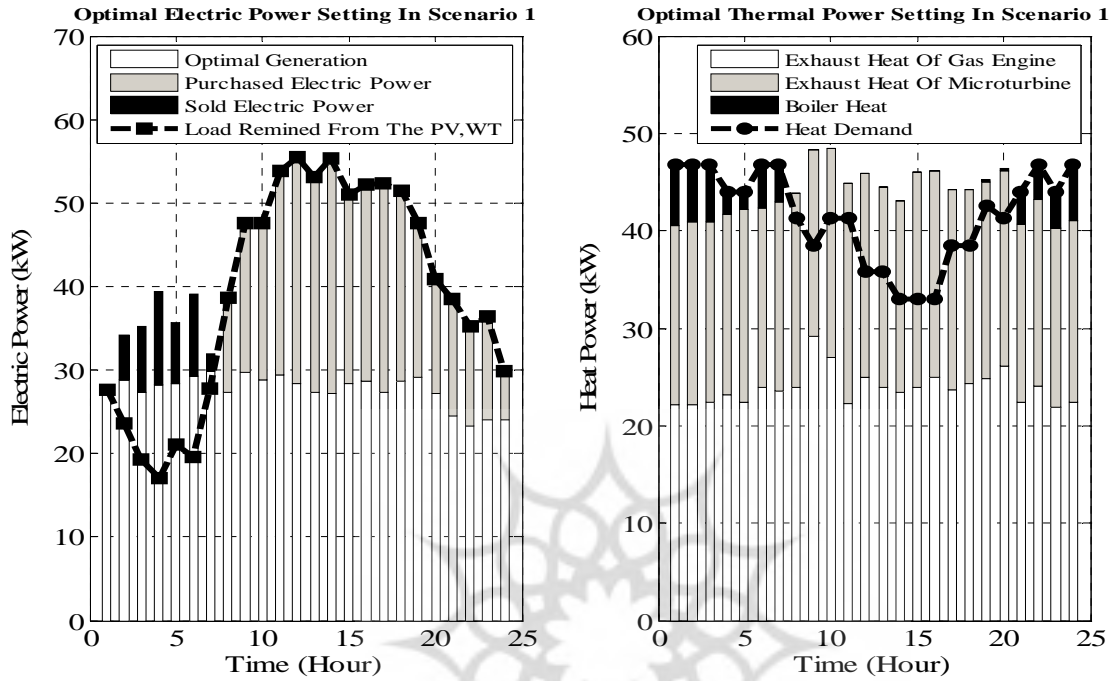
این مقدار بهینه منجر به توزیع بهینه بار الکتریکی و حرارتی در شبانه‌روز می‌گردد. مقادیر بهینه تولید برق و حرارت در ساعات مختلف در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. با توجه به این شکل، مقداری از حرارت در ساعت‌های پرباری و میان‌باری مازاد بر نیاز می‌باشد. این در حالی است که تولید حرارت بویلر تنها در ساعت‌های کم‌باری صورت می‌گیرد. اصلی‌ترین دلیل این اتفاق را می‌توان در تمایل نداشتن 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 خلاً برق و حرارت را به ترتیب از شبکه و بویلر تأمین نماید.

عملکرد هر یک از مولدهای الکتریکی و کمک آنها به مشارکت و مبادله توان الکتریکی نشان از کارایی مولد با توجه به مدل پیشنهادی آنها می‌باشد. شکل (۸) تولید مجزای هر یک از منابع را در این سناریو نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، مشارکت محرک‌های اولیه مولد‌های 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.

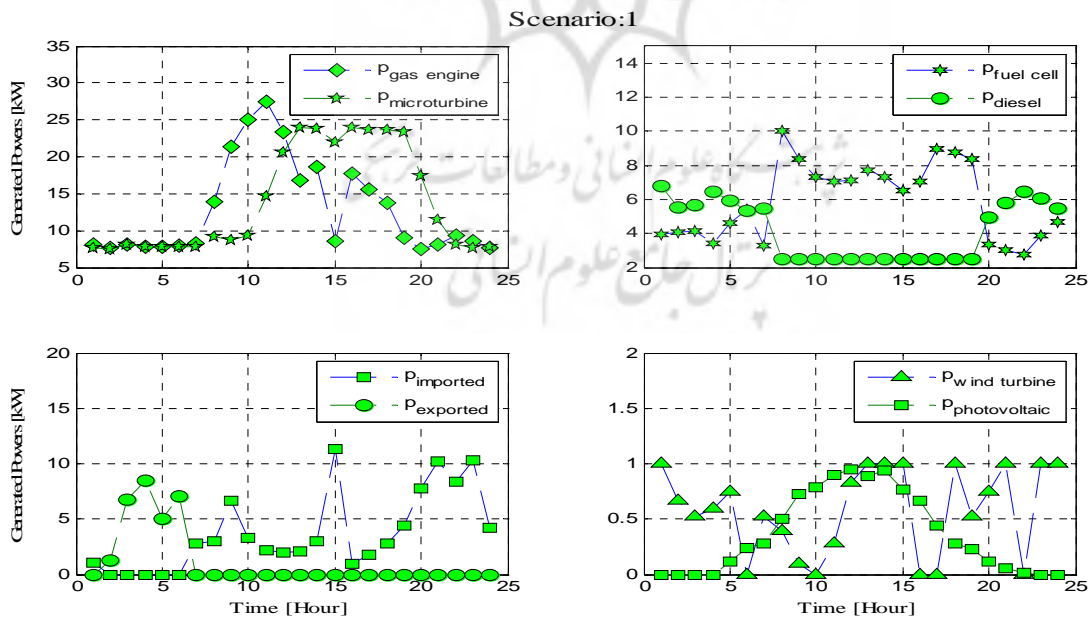
Trade-off in operating cost, emission and Loss, Scenario 1 (a sample Hour)



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



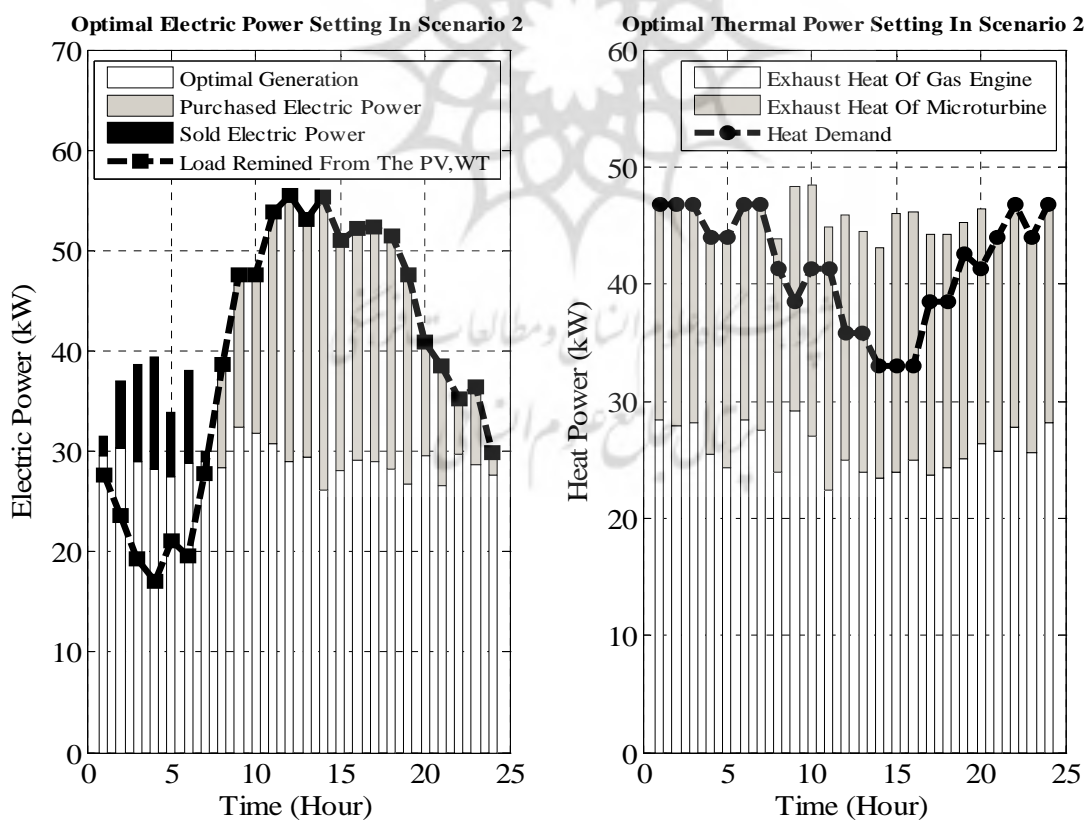
شکل ۷) توزیع برق و حرارت در سناریو ۱



شکل ۸) مشارکت منابع ریز شبکه در سناریو ۱

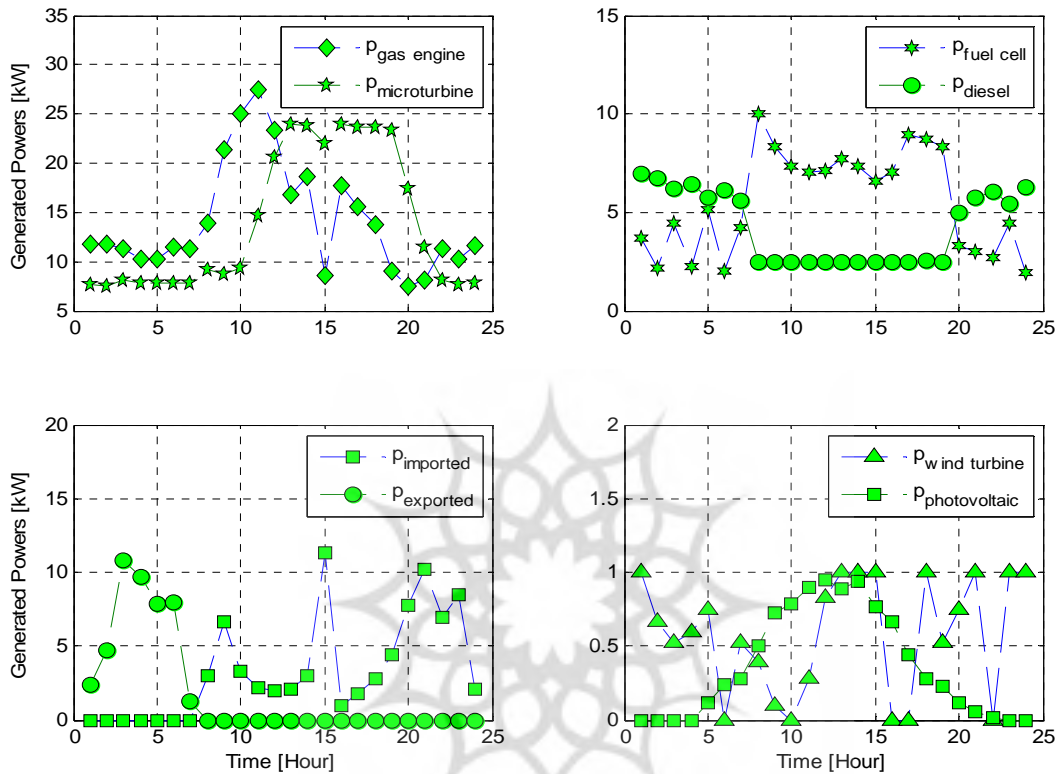
سناریوی ۲

در این سناریو هدف آن است تا در ساعت‌هایی که سیستم‌های تولید همزمان موجود به هردلیلی توانایی پاسخ به حرارت مورد نیاز را نداشته باشند، بهره‌بردار با افزایش دستی تولید الکتریکی موتور گازسوز این خلأ حرارت را پاسخ دهد. گرچه افزایش سطح تولید الکتریکی موتور گازسوز علاوه بر بالابردن هزینه بهره‌برداری، باعث افزایش سطح آلاینده‌ها و افزایش تلفات خط می‌گردد، اما حالت جبهه پارتو مشابه سناریوی 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 خلأ تقاضای حرارت، باعث 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 سناریو 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 سناریو ۲

Scenario:2

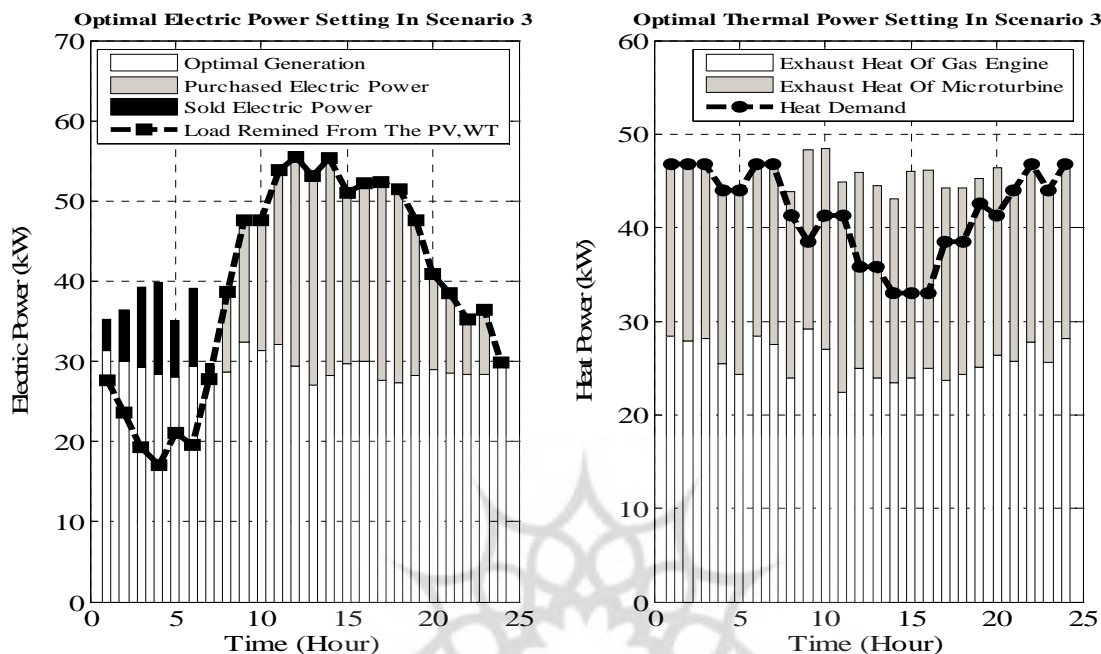


شکل ۱۰ مشارکت منابع ریزشبهه در سناریو ۲

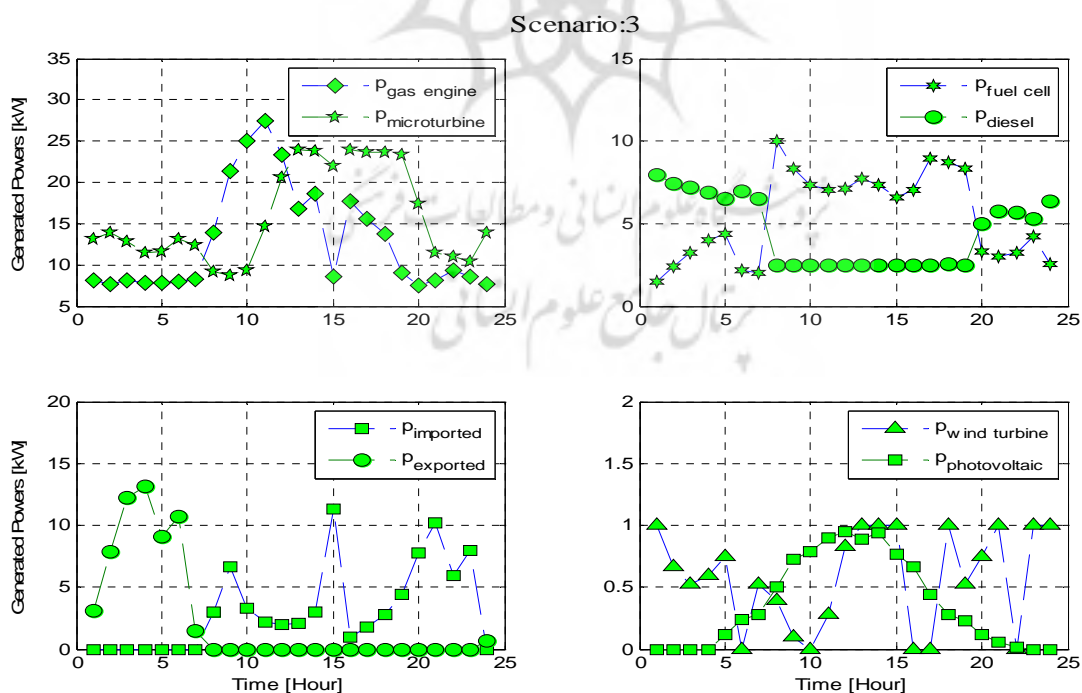
سناریوی ۳

ثابت نگه داشتن سطح تولید الکتریکی موتورگازسوز و بالابردن تولید برق میکروتوربین گازی به اندازه‌ای که بتواند به تقاضای حرارت پاسخ دهد، منجر به تولید سناریوی ۳ می‌گردد. تغییرات این جبهه در حوزه آلودگی مشابه سناریوی اول و بیشتر از سناریوی دوم می‌باشد. فروش برق در ساعات‌های 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 ساعات ۱ تا ۶ به دلیل پایین بودن تقاضا علاوه بر پاسخ به آن، مقداری برق به شبکه می‌فروشد. همچنین این تولید در ساعات پایانی شبانه‌روز 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 (۱) توزیع برق و حرارت در سناریو ۳



شکل (۱۲) مشارکت منابع ریزشبه 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 موتورگازسوز 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 موتورگازسوز 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 ریزشکبه 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	توربین بادی (kWh/Day)
۸/۸۹	۸/۸۹	۸/۸۹	فتوولتاییک (kWh/Day)
۲۲۱/۴۷	۲۴۳/۲۵	۲۲۱/۴۷	موتور گازسوز (kWh/Day)
۲۴۲/۸۳	۲۰۹/۸۵	۲۰۹/۸۵	میکروتوربین گازسوز (kWh/Day)
۱۰۴/۱۵	۱۰۶/۹۶	۸۸/۱۶۳	پیل سوختی (kWh/Day)
۱۳۲/۶	۱۳۳/۱۱	۱۳۹/۲	موتور دیزل (kWh/Day)
۲۹۱/۲۸	۲۹۶/۱	۲۴۶/۷۲	برق خریداری شده (kWh/Day)
۴۹/۳۲۵	۴۶/۲۸۱	۴۳/۶۱۲	برق فروخته شده (kWh/Day)
۱۷۲۱۷	۱۷۲۳۷	۱۶۶۰۲	هزینه تولید (Cent/Day)
۴۵۶/۳	۴۴۷/۷۱	۴۳۸/۸۲	انتشار آلاینده‌ها (kg/Day)
۰/۳۱۰۹۵	۰/۳۰۸۹۷	۰/۳۱۴۷۴	تلفات انرژی ریز شبکه (kWh/Day)
۱۸۷۲۵	۱۸۷۱۷	۱۸۰۵۳	هزینه کل (Cent/Day)

از این رو، با توجه به نتایج اهداف مختلف، پیروی از سناریوی (۱) باعث صرفه‌جویی در کاهش سطح آلودگی می‌گردد. در انتها 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 ۳/۶٪ و ۳/۷٪ 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 ریزشکه نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش ۱۰٪ قیمت برق در شبکه بالادست، هزینه کل ۳/۵٪ 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 ریزشکه 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 ریزشکه

+۱۰٪	+۵٪	-۱۰٪	-۵٪	
۱۷۰۹۹	۱۶۸۰۰	۱۵۴۷۲	۱۶۴۹۵	هزینه تولید (Cent/Day)
۴۷۸/۸۶	۴۴۸/۱۳	۳۹۵/۵۲	۴۲۷/۰۸	انتشار آلاینده‌ها (kg/Day)
۰/۳۱۲	۰/۳۱۴۴	۰/۳۳۳۴۱	۰/۳۳۷۱۲	انرژی ریزشکه (kWh/Day)
۱۸۶۸۳	۱۸۲۸۲	۱۶۷۸۱	۱۷۹۰۸	هزینه کل (Cent/Day)

نتیجه گیری

در این مقاله، پس از مدل‌سازی منابع تولید پراکنده و تعیین محرکه‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان مقیاس کوچک در یک ریزشکه نمونه، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب برای حل مساله مدیریت بهره‌برداری فنی و اقتصادی ریزشکه مورد استفاده قرار گرفت. روش مذکور به دلیل استفاده از سازوکار الگوریتم ژنتیک قادر خواهد بود پارامترهای ساختاری خود را در مواقع 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 شبانه‌روز مطرح گردید. با استفاده از مساله بهینه‌سازی سه هدفه هزینه تولید منابع انرژی، آلودگی زیست محیطی و تلفات ریزشکه، 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 ریزشکه را از هر سه جنبه اقتصادی، محیطی و ساختاری بهبود بخشد.

جدول نمادهای مورد استفاده

Boiler	بویلر گازی کمکی	V	سرعت
Btu	واحد دمایی بریتانیایی	$\eta(\%)$	راندمان
c	گرمای ویژه محصولات احتراق $(\frac{kJ}{kg^{\circ}c})$	α	نسبت برق به گرمای خروجی
Cost (ϕ)	تابع هزینه	ϕ	سنت
Coff _j	ضریب آلودگی (واحد/ژام)	$\theta (^{\circ}F)$	دما
Cost _j	هزینه واحد نمونه		زیرنویس
Ft	فوت	Ambient	شرایط محیطی
f	سوخت	Boiler	بویلر
G	ژنراتور	cin	قطع پایین
G_{ING}	میزان تشعشعات آفتاب	cout	قطع بالا
G_{STC}	تشعشعات آفتاب در حالت استاندارد	d	تقاضا
h (kW)	گرما	ex	فروخته شده
h.exchanger	مبدل حرارت	exhaust	خروجی
ISA	سیستم استاندارد بین المللی	Hydro	هیدروژن
k	ضریب حرارتی	im	خریداری شده
p (kW)	توان الکتریکی	ng	گاز طبیعی
Heat(ϕ)	هزینه حرارت	O&M	تعمیر و نگهداری
Pr (ϕ/kWh)	قیمت	loss	تلفات
mf	دبی گاز	r	مرجع
t	زمان (ساعت)	rat	نامی
n	تعداد مولدهای مصرف کننده‌ی سوخت	K_{po}	قیمت آلودگی

منابع

- [۱] ارمکان، محمد. ذکریزاده، علیرضا. جدید، شهرام. (۱۳۹۱)، برنامه ریزی ریزشبه های یکپارچه در بازار برق با حضور منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو در شبکه توزیع هوشمند. بیست وهفتمین 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 ریزشبه با در نظر گرفتن پاسخگویی بار، بیست وهفتمین کنفرانس بین المللی برق.
- [۳] رضاییان، میثم. جدید، شهرام. (۱۳۸۹). بررسی اثر تولید همزمان برق و حرارت در کاهش هزینه بهره برداری و آلودگی ریزشبه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق.
- [۴] زنگنه، علی. (۱۳۸۸). برنامه ریزی توسعه منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن عدم قطعیتها و با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره، رساله ی 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] Kalia, 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.

- [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.

