نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال یازدهم، شمارهٔ اول/ بهار ۱۴۰۰/ صفحه ۲ـ۱۱

تعیین استراتژی بهینهٔ خرده‌فروش انرژی در بازار یکپارچه با استفاده از مفهوم سپهر هوشمند انرژی

سپیده خازنی[۱*]، ارس شیخی[۲]، سودابه سلیمانی[۳]، علی‌محمد رنجبر[۴]

[۱] دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ایران
s.khazeni@srbiau.ac.ir
[۲] استادیار پژوهشکده علوم و فناوری انرژی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
asheikhi@sharif.edu
[۳] دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
s.soleymani@srbiau.ac.ir
[۴] استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
amranjbar.sharif.edu

چکیده: در این مقاله، تعیین استراتژی بهینهٔ خرده‌فروش انرژی در بازار یکپارچهٔ انرژی در قالب یک مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای با استفاده از مفهوم سپهر هوشمند انرژی تشریح می‌شود. در این مسئله، خرده‌فروش انرژی در سطح بالایی مسئله با هدف بیشینه‌سازی سود خود، قیمت حامل‌های انرژی و میزان خرید از بازار عمده‌فروشی را تعیین می‌کند. در سطح پایین مسئله، مصرف‌کنندگان با هدف کمینه‌سازی قبض پرداختی برای تمامی حامل‌های انرژی، میزان خرید از بازار خرده‌فروشی را تعیین می‌کنند. برای ایجاد رقابت بیشتر و دستیابی به پاسخ بهینه برای تمامی شرکت‌کنندگان بازار، خرده‌فروش انرژی، خرده‌فروشان رقیب و مصرف‌کنندگان سپهر هوشمند انرژی در نظر گرفته شده‌اند؛ به‌عبارت دیگر، تمامی شرکت‌کنندگان در بازار قابلیت تولید انرژی را دارند. به‌منظور ارزیابی مدل معرفی‌شده، یک بازار نمونه شامل خرده‌فروش انرژی، ۲ خرده‌فروش رقیب و ۱۰ مصرف‌کننده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد بهینهٔ خرده‌فروش انرژی در بازار را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خرده‌فروش انرژی، سپهر هوشمند انرژی، بازار یکپارچهٔ انرژی، مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای.

---

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

در بازارهای تجدید ساختارشدهٔ برق، خرده‌فروش به‌عنوان واسطه بین تولیدکننده و مصرف‌کننده عمل می‌کند. خرده‌فروش، انرژی الکتریکی را از بازار عمده‌فروشی خریداری می‌کند و آن را از طریق قراردادهای مختلف به فروش می‌رساند. خرده‌فروشان برای به دست آوردن سود با چالش تصمیم‌گیری هم در سمت تولید و هم در سمت مصرف مواجه‌اند. از این دیدگاه، می‌توان مطالعات صورت‌گرفته در زمینهٔ بازار خرده‌فروشی برق را به سه دستهٔ کلی تقسیم‌بندی کرد.

۱. مقالاتی که عملکرد و رفتار استراتژیک یک خرده‌فروش برق را در بازار برق بررسی کرده‌اند؛ برای مثال نویسندگان مرجع [۱] بار غیرقابل پیش‌بینی مصرف‌کنندگان را با استفاده از ضرایب مشارکت مدل‌سازی نموده‌اند. در این پژوهش، تابع هدف خرده‌فروش برق کمینه‌سازی هزینه تأمین برق از دو منبع بازار pool و پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته شده است. نویسندگان در مرجع [۲] بازار خرده‌فروشی برق را به‌عنوان یک بازی دو مرحله‌ای رهبر-پیرو مدل‌سازی کرده‌اند که در آن محدودیت‌های فیزیکی شبکهٔ توزیع در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳] یک چهارچوب بهینه‌سازی تصادفی با چند تابع هدف برای کمینه‌سازی قیمت برق و بیشینه‌سازی سود خرده‌فروش به‌طور همزمان ارائه شده است. در مرجع [۴] مدلی برای مهار نوسانات قیمت خرده‌فروش با استفاده از تعرفهٔ زمان استفاده ارائه شده است که در آن مصرف‌کنندگان برای جابه‌جایی بار خود مورد تشویق قرار می‌گیرند.

۲. مقالاتی که در آن‌ها عملکرد چندین خرده‌فروش برق در رقابت با یکدیگر مورد تحلیل قرار می‌گیرد؛ نظیر مرجع [۵] که مسئلهٔ تصمیم‌گیری کوتاه‌مدت خرده‌فروش برق را در یک بازار تجدید ساختار شده به‌عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی با چند تابع هدف و با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مورد بررسی قرار می‌دهد. مرجع [۶] نیز قراردادهای دوجانبهٔ یک خرده‌فروش برق را در محیط با محدودیت ریسک بررسی کرده و نتایج را با حالتی که رقابت بین چند خرده‌فروش وجود داشته باشد، مقایسه می‌کند.

۳. این دسته مربوط به مقالاتی است که در آن‌ها تعامل بین خرده‌فروشان و مصرف‌کنندگان به‌صورت بازی مدل‌سازی می‌شود. برای مثال مرجع [۷] بازی چهارمرحله‌ای برای تحلیل عملکرد خرده‌فروشان در شبکهٔ هوشمند معرفی می‌کند که در آن از مدیریت سمت بار بهره برده شده است. در مرجع [۸] نیز مدلی دومرحله‌ای برای تحلیل عملکرد خرده‌فروشان دارای قابلیت تولید پراکنده در برابر مصرف‌کنندگان حساس به قیمت معرفی شده است. نویسندگان مرجع [۹]، مدلی دوسطحی برای شبیه‌سازی قیمت‌گذاری و دیسپاچ خرده‌فروشان ارائه می‌دهد. سطح اول یک بازی دومرحله‌ای بین خرده‌فروش و مصرف‌کننده است و سطح دوم مسئله دیسپاچ خرده‌فروش را در حضور عدم قطعیت قیمت بازار بیان می‌کند. و در نهایت مرجع [۱۰] به‌منظور مدل‌سازی برهم‌کنش‌های بین خرده‌فروشان و مصرف‌کنندگان مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای را پیشنهاد می‌دهد که در آن از قیمت‌گذاری لحظه‌ای استفاده شده است.

در تمامی مقالاتی که تا اینجا در زمینهٔ بازار خرده‌فروشی مرور شد، خرده‌فروش برق به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفته است؛ زیرا در گذشته بخش‌های مختلف انرژی هم از لحاظ بهره‌برداری و هم از لحاظ برنامه‌ریزی از یکدیگر جدا بودند. این در حالی است که با توجه به روند کاهشی منابع تأمین انرژی الکتریکی به‌ویژه سوخت‌های فسیلی و لزوم توجه به منابع دیگر برای تأمین برق مورد نیاز مصرف‌کنندگان و نیز وجود تعامل بین بازارهای مختلف انرژی، تحلیل بازارهای یکپارچه شامل چندین حامل انرژی لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای مثال برق، حرارت و گاز در بسیاری موارد از طریق فناوری‌های توزیع‌شدهٔ مختلف مانند CHP، بسیار به هم وابسته خواهند بود. CHP مثال خوبی از فناوری‌های پربازده با قابلیت اطمینان بالاست که امکان یکپارچه‌سازی شبکه‌های مختلف انرژی را فراهم می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که یک راه‌حل اساسی برای دستیابی به انرژی پاک‌تر و مطمئن‌تر، استفاده از سیستم‌های یکپارچهٔ انرژی است [۱۱]. این سیستم‌ها از لحاظ فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به سیستم‌های جداگانهٔ انرژی عملکرد بهتری دارند. مفهوم سیستم یکپارچهٔ انرژی به معنی گسترش مرزهای یک سیستم فراتر از یک حامل انرژی (مثلاً برق یا حرارت) است. این مفهوم دیدگاه نوینی در تحلیل سیستم‌های انرژی پدید می‌آورد که دارای مزایای متعددی است. این مفهوم برای نخستین بار در مرجع [۱۲] معرفی شد. بر این اساس، در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در زمینهٔ سیستم‌های شامل چند حامل انرژی و تحلیل عملکرد خرده‌فروش انرژی در این سیستم‌ها صورت گرفته است. برای مثال در مرجع [۱۳]، طراحی بهینهٔ قراردادهای فروش خرده‌فروش انرژی برای بستهٔ انرژی در قالب بازی بین خرده‌فروش و مصرف‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. دو مرجع [۱۴] و [۱۵] پاسخ‌گویی جامع بار را در سیستم شامل چند حامل انرژی با حضور خرده‌فروش انرژی بررسی کرده‌اند. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته در زمینهٔ سیستم‌های شامل چند حامل انرژی و مفهوم سپهر هوشمند انرژی، در مرجع [۱۶] مفهومی به نام خرده‌فروش انرژی معرفی شد. در این مقاله، عملکرد

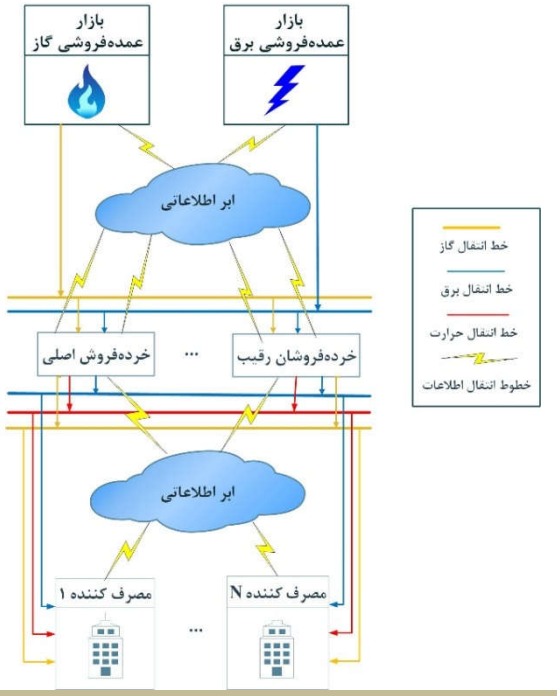
خرده‌فروش انرژی در بازار یکپارچهٔ انرژی در قالب یک بازی دومرحله‌ای با مصرف‌کنندگان هوشمند مدل‌سازی شده است که با استفاده از روش گسسته‌سازی پاسخ بهینهٔ آن به دست می‌آید. استفاده از این روش منجر به ایجاد محدودیت‌هایی در مفروضات مسئله شده و تعداد و بازهٔ استراتژی‌های ممکن خرده‌فروش انرژی و مصرف‌کنندگان را محدود می‌سازد.

برای رفع محدودیت‌های ذکرشده و حل پیوستهٔ مسئله در این مقاله، با در نظر گرفتن مفهوم خرده‌فروش انرژی، بهینه‌سازی از دیدگاه خرده‌فروش و مصرف‌کننده به‌صورت یک مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای معرفی شده است که در مرحلهٔ نخست آن، خرده‌فروش انرژی قیمت حامل‌های انرژی را تعیین کرده و در مرحلهٔ بعد، مصرف‌کننده میزان مصرف خود را با در نظر گرفتن واحدهای تولیدی خود معین می‌کند. این مسئله با استفاده از روش MPEC[1] حل می‌شود.

در این مسئله، خرده‌فروش انرژی فعالیت خود را در بازار یکپارچهٔ انرژی با تعامل بین بازار عمده‌فروشی و مصرف‌کنندگان حساس به قیمت دنبال می‌کند. مسئلهٔ اساسی در تحلیل عملکرد خرده‌فروش انرژی تصمیم‌گیری او برای تعیین قیمت حامل‌های انرژی است. از آنجایی که مصرف‌کنندگان نیز در این بازار سپهر هوشمند انرژی در نظر گرفته شده‌اند، دارای قابلیت تولید هستند. ازاین‌رو، قیمت پیشنهادی خرده‌فروش انرژی به‌طور مستقیم بر میزان خرید مصرف‌کنندگان مؤثر است. در ادامه، یک تحلیل حساسیت بر ظرفیت CHP و بویلر خرده‌فروش انرژی انجام گرفته است که ظرفیت بهینهٔ خرده‌فروش انرژی را برای ورود به بازار تعیین می‌کند.

۲. ساختار بازار یکپارچهٔ انرژی

برای مدل‌سازی بازار یکپارچهٔ انرژی و تحلیل عملکرد خرده‌فروش انرژی در آن، ابتدا باید ساختار بازار یکپارچهٔ انرژی و نحوهٔ تعامل بین شرکت‌کنندگان در آن مشخص شود. در این بازار، خرده‌فروش انرژی واسطهٔ بین بازار عمده‌فروشی برق و گاز و مصرف‌کنندگان است. ساختار این بازار در شکل (۱) نشان داده شده است. در این بازار، تمامی حامل‌های انرژی شامل برق، گاز و حرارت فقط از طریق خرده‌فروشان انرژی بین بازار عمده‌فروشی و مصرف‌کننده مبادله می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، امکان خرید حامل‌های انرژی به‌طور مستقیم از بازار عمده‌فروشی توسط هیچ‌یک از مصرف‌کنندگان وجود ندارد. از طرفی، خطوط زردرنگ نشان‌دهندهٔ ارتباط بین تمامی شرکت‌کنندگان در بازار یکپارچهٔ انرژی است که انتقال اطلاعات بین آن‌ها از طریق آن صورت می‌پذیرد. این بدین معنی است که خرده‌فروش انرژی در هنگام تصمیم‌گیری، از قیمت بازار عمده‌فروشی آگاهی دارند. در مقابل، مصرف‌کنندگان نیز در هنگام تعیین میزان مصرف خود از قیمت پیشنهادی خرده‌فروشان آگاه‌اند.



شکل (۱): ساختار بازار یکپارچهٔ انرژی

به‌منظور ساده‌سازی، در این مدل از فرض‌هایی استفاده شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد:

- بازار برای یک ساعت مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل بازار روزانه و یا حتی هفتگی و ماهانه، فقط بار مصرف‌کننده تغییر می‌کند. بنابراین با تغییر بار می‌توان به‌راحتی افق‌های زمانی بلندتر را نیز بررسی کرد. اما در این مقاله به‌علت جلوگیری از طولانی شدن مباحث، یک ساعت به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- استراتژی خرده‌فروشان رقیب ثابت در نظر گرفته شده است؛ به‌عبارتی، این خرده‌فروشان قیمت‌پذیر هستند. درحالی‌که خرده‌فروش اصلی قیمت‌گذار در نظر گرفته شده است. در صورتی که تمامی خرده‌فروشان را قیمت‌گذار در نظر بگیریم، تعداد معادلات مسئلهٔ بهینه‌سازی بسیار زیاد شده و مسئله از حالت MPEC به EPEC[2] تبدیل می‌شود که تضمینی برای یافتن پاسخ بهینه برای آن وجود ندارد و

1. Mathematical Problems with Equilibrium Constraints

۲. Equilibrium Problems with Equilibrium Constraints برای توضیح بیشتر نک: مرجع [۱۷].

بحث آن در این مقاله نمی‌گنجد.

- چون بازار در یک ساعت بررسی شده، فرض شده که قیمت بازار عمده‌فروشی ثابت است؛ که فرضی کاملاً منطقی است.

با توجه به فرض‌های مورد استفاده در این مدل‌سازی در بخش بعد، نحوهٔ تعریف مسئلهٔ بهینه‌سازی و معادلات مربوط آورده شده است.

۳. تعریف مسئله

۳. ۱. معرفی مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای

در این بخش ابتدا مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای خرده‌فروش انرژی شرح داده شده و سپس راهکاری برای حل این مسئله ارائه خواهد شد.

$$\min c^e l^e + c^g (l^{g,CHP} + l^{g,boiler}) + \sum_n \left(P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler}\right) - \pi^e \left(\sum_n P_n^e\right) - \pi^g \left(\sum_n \left(P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler}\right)\right) - \pi^h \left(\sum_n P_n^h\right) \quad (۱)$$

$$E_{UL} = \begin{Bmatrix} l^e, l^{g,CHP}, l^{g,boiler}, \pi^e, \pi^g, \pi^h, \\ \lambda^e(n), \lambda^h(n), \mu(n) \end{Bmatrix}$$

$$\mu(n) = \begin{Bmatrix} \mu_n^e, \mu_n^h, \mu_n^{g,CHP}, \mu_n^{g,boiler}, \mu_{n,k}^{et}, \\ \mu_{n,k}^{ht}, \mu_{n,k}^{gt,CHP}, \mu_{n,k}^{gt,boiler}, \\ \mu_n^{CHPmax}, \mu_n^{boilermax} \end{Bmatrix}$$

$$\sum_n P_n^e = l^e w^e + l^{g,CHP} w^{CHP,ge} \quad (۲)$$

$$\sum_n P_n^h \le l^{g,CHP} w^{CHP,gh} + l^{g,boiler} w^{boiler} \quad (۳)$$

$$0 \le l^e \le \overline{L^e} \quad (۴)$$

$$0 \le l^{g,CHP} \le \overline{L^{g,CHP}} \quad (۵)$$

$$0 \le l^{g,boiler} \le \overline{L^{g,boiler}} \quad (۶)$$

$$\sum_n P_{n,k}^{et} \le \overline{P_k^{et}}, \forall k \quad (۷)$$

$$\sum_n P_{n,k}^{ht} \le \overline{P_k^{ht}}, \forall k \quad (۸)$$

$$\sum_n P_{n,k}^{gt,CHP} + \sum_n P_{n,k}^{gt,boiler} \le \overline{P_k^{gt}}, \forall k \quad (۹)$$

$$\min_{\Xi_{LL}} \left[P_n^e \pi^e + P_n^h \pi^h + (P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler})\pi^g\right] + \sum_k \left[P_{n,k}^{et} \pi_k^{et} + P_{n,k}^{ht} \pi_k^{ht} + (P_{n,k}^{gt,CHP} + P_{n,k}^{gt,boiler})\pi_k^{gt}\right], \forall n \quad (۱۰)$$

$$E_{LL} = \begin{Bmatrix} P_n^e, P_n^h, P_n^{g,CHP}, P_n^{g,boiler}, P_{n,k}^{et}, \\ P_{n,k}^{ht}, P_{n,k}^{gt,CHP}, P_{n,k}^{gt,boiler} \end{Bmatrix}$$

$$\left(P_n^e + \sum_k P_{n,k}^{et}\right)\eta_n^{ee} + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,ge} \ge d_n^e, \forall n - \lambda_n^e \quad (۱۱)$$

$$\left(P_n^h + \sum_k P_{n,k}^{ht}\right) + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,gh} + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,gh} + \left(P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler}\right)\eta_n^{boiler} \ge d_n^h \forall n - \lambda_n^h \quad (۱۲)$$

$$0 \le P_n^e, \forall n - \mu_n^e \quad (۱۳)$$

$$0 \le P_n^h, \forall n - \mu_n^h \quad (۱۴)$$

$$0 \le P_n^{g,CHP}, \forall n - \mu_n^{g,CHP} \quad (۱۵)$$

$$0 \le P_n^{g,boiler}, \forall n - \mu_n^{g,boiler} \quad (۱۶)$$

$$0 \le P_{n,k}^{et}, \forall k, n - \mu_{n,k}^{et} \quad (۱۷)$$

$$0 \le P_{n,k}^{ht}, \forall k, n - \mu_{n,k}^{ht} \quad (۱۸)$$

$$0 \le P_{n,k}^{gt,CHP}, \forall k, n - \mu_{n,k}^{gt,CHP} \quad (۱۹)$$

$$0 \le P_{n,k}^{gt,boiler}, \forall k, n - \mu_{n,k}^{gt,boiler} \quad (۲۰)$$

$$P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP} \le \overline{P_n^{CHP}}, \forall n - \mu_n^{CHPmax} \quad (۲۱)$$

$$P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler} \le \overline{P_n^{boiler}}, \forall n - \mu_n^{boilermax} \quad (۲۲)$$

در این مسئله، خرده‌فروش انرژی در سطح بالای مسئله با هدف بیشینه‌سازی سود خود قیمت حامل‌های انرژی و میزان خرید خود از بازار عمده‌فروشی را تعیین می‌کند؛ به‌عبارت دیگر، متغیرهای تصمیم‌گیری خرده‌فروش انرژی که در E_{UL} نشان داده شده است عبارت‌اند از: قیمت برق، گاز و حرارت، میزان گاز ورودی به CHP و بویلر خرده‌فروش، میزان خرید برق از بازار عمده‌فروشی و مجموعه $\mu(n)$ که شامل متغیرهای دوگان مسئلهٔ پایین‌دست که برای هر قید مسئلهٔ پایین‌دست جلوی آن نوشته شده است. در این معادلات، تابع هدف خرده‌فروش انرژی در معادلهٔ (۱) نشان داده شده است. معادلات (۲) و (۳) بیان‌کنندهٔ محدودیت‌های موجود در میزان فروش برق و حرارت توسط خرده‌فروش انرژی هستند. بدین معنی که خرده‌فروش انرژی نمی‌تواند بیش از آنچه خریده یا تولید کرده، انرژی به فروش برساند. معادلات (۴) تا (۶) حداکثر خرید مجاز خرده‌فروش انرژی از بازار عمده‌فروشی را معین می‌کنند. حداکثر میزان مجاز فروش انرژی

توسط خرده‌فروش انرژی به مصرف‌کنندگان در معادلات (۷) تا (۹) نشان داده شده است. معادلهٔ (۱۰) بیانگر تابع هدف مصرف‌کننده است که برای هریک از مصرف‌کنندگان به‌طور جداگانه نوشته می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان که در E_{LL} نشان داده شده‌اند، میزان خرید برق و حرارت خریداری‌شده از خرده‌فروش اصلی و هریک از رقبا و نیز میزان گاز ورودی به CHP و بویلر مصرف‌کننده است که از خرده‌فروش اصلی و هریک از رقبا خریداری کرده است. قیود مربوط به تأمین بار الکتریکی و حرارتی مصرف‌کنندگان در معادلات (۱۱) و (۱۲) آورده شده است. در مسئلهٔ پایین‌دست، در جلوی هر معادله، متغیر دوگان مربوط به آن نوشته شده است که در ادامه برای نوشتن مسئلهٔ دوگان از آن‌ها استفاده می‌شود. معادلات (۱۳) تا (۲۲) مربوط به قیود مصرف‌کنندگان و خرده‌فروشان رقیب است. برای حل این مسئله، با توجه به خطی بودن مسئلهٔ پایین‌دست، می‌توان آن را با شروط بهینهٔ متناظر جایگزین کرد [۱۷].

۲.۳. حل مسئله

همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای را می‌توان با تبدیل مسئلهٔ سطح پایین به قیود معادل آن به مسئلهٔ معادل MPEC تبدیل کرد و سپس با استفاده از قیود مسئلهٔ دوگان، مسئلهٔ پایین‌دست را به‌صورت خطی درآورده و آن را با استفاده از روش‌های مرسوم برای مسائل بهینه‌سازی خطی حل نمود. الگوریتم حل مسئله به این روش در شکل (۲) بیان شده است.

در این روش، یک بار معادلات قیود مسئلهٔ پایین‌دست و یک بار قیود دوگان معادل آن‌ها نوشته می‌شود. قیود دوگان را می‌توان با مشتق‌گیری از تابع هدف و قیود اصلی نسبت به هریک از متغیرهای تصمیم‌گیری به دست آورد.

$$\left(P_n^e + \sum_k P_{n,k}^{et}\right)\eta_n^{ee} + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,ge} \geq d_n^e, \forall n \quad (۲۳)$$

$$\left(P_n^h + \sum_k P_{n,k}^{ht}\right) + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,gh} + \left(P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler}\right)\eta_n^{boiler} \geq d_n^h, \forall n \quad (۲۴)$$

$$P_n^e \geq 0, \forall n \quad (۲۵)$$

$$P_n^h \geq 0, \forall n \quad (۲۶)$$

$$P_n^{g,CHP} \geq 0, \forall n \quad (۲۷)$$

$$P_n^{g,boiler} \geq 0, \forall n \quad (۲۸)$$

$$P_{n,k}^{et} \geq 0, \forall n, k \quad (۲۹)$$

$$P_{n,k}^{ht} \geq 0, \forall n, k \quad (۳۰)$$

$$P_{n,k}^{gt,CHP} \geq 0, \forall n, k \quad (۳۱)$$

$$P_{n,k}^{gt,boiler} \geq 0, \forall n, k \quad (۳۵)$$

$$\overline{P_n^{CHP}} - P_n^{g,CHP} - \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP} \geq 0, \forall n \quad (۳۲)$$

$$\overline{P_n^{boiler}} - P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler} \geq 0, \forall n \quad (۳۳)$$

$$\begin{aligned}&\left[P_n^e\pi^e + P_n^h\pi^h + (P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler})\pi^g\right] + \sum_k P_{n,k}^{et}\pi_k^{et} + P_{n,k}^{ht}\pi_k^{ht} \\ &+(P_{n,k}^{gt,CHP} + P_{n,k}^{gt,boiler})\pi_k^{gt} - \lambda_n^e d_n^e \\ &-\lambda_n^h d_n^h + \mu_n^{CHPmax} P_n^{CHPmax} \\ &+\mu_n^{boilermax} P_n^{boilermax} = 0\end{aligned} \quad (۳۴)$$

$$\pi^e - \eta_n^{ee}\lambda_n^e - \mu_n^e = 0, \forall n \quad (۳۵)$$

$$\pi^h - \lambda_n^h - \mu_n^h = 0, \forall n \quad (۳۶)$$

$$\pi^g - \eta_n^{CHP,ge}\lambda_n^e - \eta_n^{CHP,gh}\lambda_n^h - \mu_n^{g,CHP} + \mu_n^{CHPmax} = 0, \forall n \quad (۳۷)$$

$$\pi^g - \lambda_n^h\eta_n^{boiler} - \mu_n^{g,boiler} + \mu_n^{boilermax} = 0, \forall n \quad (۳۸)$$

$$\pi_k^{et} - \eta_n^{ee}\lambda_n^e - \mu_{n,k}^{et} = 0, \forall n, k \quad (۳۹)$$

$$\pi_k^{ht} - \lambda_n^h - \mu_{n,k}^{ht} = 0, \forall n, k \quad (۴۰)$$

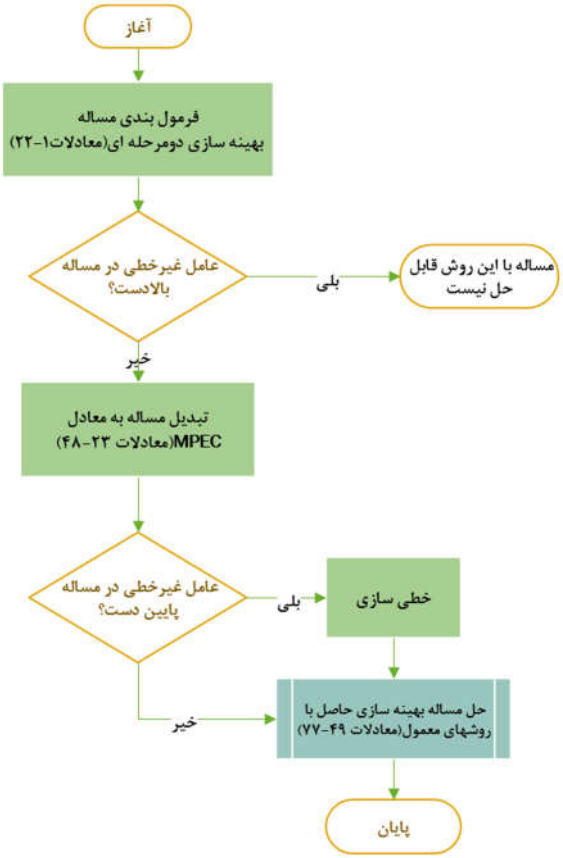
$$\pi_k^{gt} - \eta_n^{CHP,ge}\lambda_n^e - \eta_n^{CHP,gh}\lambda_n^h - \mu_{n,k}^{gt,CHP} + \mu_n^{CHPmax} = 0, \forall n, k \quad (۴۱)$$

$$\pi_k^{gt} + \eta_n^{boiler}\lambda_n^h - \mu_{n,k}^{gt,boiler} + \mu_n^{boilermax} = 0, \forall n, k \quad (۴۲)$$

$$\lambda_n^e \geq 0, \forall n \quad (۴۳)$$

$$\lambda_n^h \geq 0, \forall n \quad (۴۸)$$

در این معادلات، قیود اصلی مسئلهٔ پایین‌دست در معادلات (۲۳) تا (۳۳) آورده شده‌اند. معادلات (۳۵) تا (۴۸) قیود دوگان مسئلهٔ پایین‌دست هستند. معادلهٔ (۳۴) بیان‌کنندهٔ تئوری اصلی دوگانی است که بر پایهٔ برابری قیود اصلی و دوگان مسئله استوار است.



شکل (۲): الگوریتم حل مسئله

بنابراین می‌توان مسئلهٔ پایین‌دست را با معادلات (۲۳) تا (۴۸) به‌صورت زیر جایگزین کرد و در مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای قرار داد:

$$\min_{\Xi_{UL}} c^e l^e + c^g (l^{g,CHP} + l^{g,boiler}) + c^g \sum_n \left(P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler}\right) - \pi^e \left(\sum_n P_n^e\right) - \pi^g \left(\sum_n P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler}\right) - \pi^h \left(\sum_n P_n^h\right) \quad (۴۹)$$

$$\Xi_{UL} = \{l^e, l^{g,CHP}, l^{g,boiler}, \pi^e, \pi^g, \pi^h, \lambda^E(n), \lambda^H(n), \mu(n)\}$$

$$\mu(n) = \{\mu_n^e, \mu_n^h, \mu_n^{g,CHP}, \mu_n^{g,boiler}, \mu_{n,k}^{et}, \mu_{n,k}^{ht}, \mu_n^{CHPmax}, \mu_n^{boilermax}, \mu_{n,k}^{gt,CHP}, \mu_{n,k}^{gt,boiler}\}$$

$$\sum_n P_n^e = l^e w^e + l^{g,CHP} w^{CHP,ge} \quad (۵۰)$$

$$\sum_n P_n^h \le l^{g,CHP} w^{CHP,gh} + l^{g,boiler} w^{boiler} \quad (۵۱)$$

$$0 \le l^e \le \overline{L^e} \quad (۵۲)$$

$$0 \le l^{g,CHP} \le \overline{L^{g,CHP}} \quad (۵۳)$$

$$0 \le l^{g,boiler} \le \overline{L^{g,boiler}} \quad (۵۴)$$

$$\left(P_n^e + \sum_k P_{n,k}^{et}\right)\eta_n^{ee} + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,ge} \ge d_n^e, \forall n \quad (۵۵)$$

$$\left(P_n^h + \sum_k P_{n,k}^{ht}\right) + \left(P_n^{g,CHP} + \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP}\right)\eta_n^{CHP,gh} + \left(P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler}\right)\eta_n^{boiler} \ge d_n^h, \forall n \quad (۵۶)$$

$$P_n^e \ge 0, \forall n \quad (۵۷)$$

$$P_n^h \ge 0, \forall n \quad (۵۸)$$

$$P_n^{g,CHP} \ge 0, \forall n \quad (۵۹)$$

$$P_n^{g,boiler} \ge 0, \forall n \quad (۶۰)$$

$$P_{n,k}^{et} \ge 0, \forall n, k \quad (۶۱)$$

$$P_{n,k}^{ht} \ge 0, \forall n, k \quad (۶۲)$$

$$P_{n,k}^{gt,CHP} \ge 0, \forall n, k \quad (۶۳)$$

$$P_{n,k}^{gt,boiler} \ge 0, \forall n, k \quad (۶۴)$$

$$\overline{P_n^{CHP}} - P_n^{g,CHP} - \sum_k P_{n,k}^{gt,CHP} \ge 0, \forall n \quad (۶۵)$$

$$\overline{P_n^{boiler}} - P_n^{g,boiler} + \sum_k P_{n,k}^{gt,boiler} \ge 0, \forall n \quad (۶۶)$$

$$\left[P_n^e \pi^e + P_n^h \pi^h + (P_n^{g,CHP} + P_n^{g,boiler})\pi^g\right] + \sum_k P_{n,k}^{et} \pi_k^{et} + P_{n,k}^{ht} \pi_k^{ht} + (P_{n,k}^{gt,CHP} + P_{n,k}^{gt,boiler})\pi_k^{gt} - \lambda_n^e d_n^e - \lambda_n^h d_n^h + \mu_n^{CHPmax} P_n^{CHPmax} + \mu_n^{boilermax} P_n^{boilermax} = 0 \quad (۶۷)$$

$$\pi^e - \eta_n^{ee} \lambda_n^e - \mu_n^e = 0, \forall n \quad (۶۸)$$

$$\pi^h - \lambda_n^h - \mu_n^h = 0, \forall n \quad (۶۹)$$

$$\pi^g - \eta_n^{CHP,ge} \lambda_n^e - \eta_n^{CHP,gh} \lambda_n^h - \mu_n^{g,CHP} + \mu_n^{CHPmax} = 0, \forall n \quad (۷۰)$$

$$\pi^g - \lambda_n^h \eta_n^{boiler} - \mu_n^{g,boiler} + \mu_n^{boilermax} = 0, \forall n \quad (۷۱)$$

$$\pi_k^{et} - \eta_n^{ee} \lambda_n^e - \mu_{n,k}^{et} = 0, \forall n, k \quad (۷۲)$$

$$\pi_k^{ht} - \lambda_n^h - \mu_{n,k}^{ht} = 0, \forall n, k \quad (۷۳)$$

$$\pi_k^{gt} - \eta_n^{CHP,ge} \lambda_n^e - \eta_n^{CHP,gh} \lambda_n^h - \mu_{n,k}^{gt,CHP} + \mu_n^{CHPmax} = 0, \forall n, k \quad (۷۴)$$

$$\pi_k^{gt} + \eta_n^{boiler} \lambda_n^h - \mu_{n,k}^{gt,boiler} + \mu_n^{boilermax} = 0, \forall n, k \quad (۷۵)$$

$$\lambda_n^e \ge 0, \forall n \quad (۷۶)$$

$$\lambda_n^h \ge 0, \forall n \quad (۷۷)$$

همان طور که دیده می‌شود، عامل غیرخطی در تابع هدف با استفاده از معادلهٔ (۳۴)، به‌صورت خطی در معادلهٔ (۴۹) بازنویسی شده است.

در نوشتن معادلات KKT به سبک مرسوم، معادلاتی به شکل $0 \le P \perp \mu \ge 0$ وجود دارند. این معادلات به معنی مثبت بودن هریک از متغیرها و نیز صفر بودن حاصل‌ضرب آن‌هاست. برای خطی‌سازی آن‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از این روش‌ها تبدیل این معادلات به چهار معادله به‌صورت زیر است:

$$P \ge 0 \qquad (۷۸)$$

$$\mu \ge 0 \qquad (۷۹)$$

$$\mu \le \psi M^{\mu} \qquad (۸۰)$$

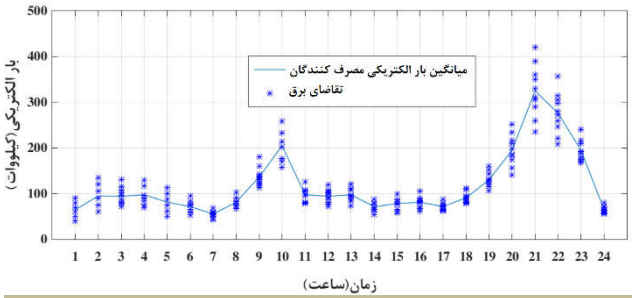
$$P \le (1-\psi) M^{P} \qquad (۸۱)$$

که در آن، $\psi \in \{0,1\}$ و M^{P} و M^{μ} ثابت‌های به قدر کافی بزرگ در نظر گرفته می‌شوند. در روش نوشتن قیود اصلی و دوگان این قیود خودبه‌خود به‌صورت خطی نوشته می‌شوند.

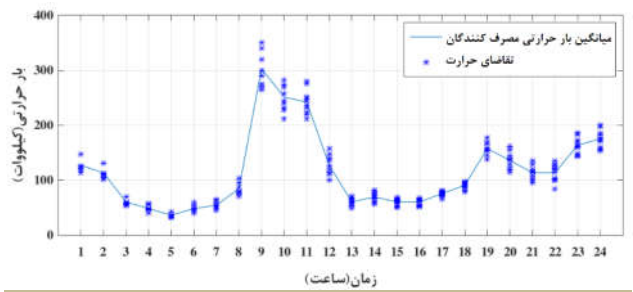
پس از خطی‌سازی معادلات با استفاده از نرم‌افزار گمز به‌راحتی می‌توان مسئلهٔ بهینه‌سازی دومرحله‌ای را حل کرد و پاسخ بهینه را یافت.

۴. بررسی نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مسئلهٔ بهینه‌سازی، یک بازار انرژی با یک خرده‌فروش اصلی و ۲ خرده‌فروش رقیب و ۱۰ مصرف‌کننده به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. در این سیستم بار الکتریکی و حرارتی مصرف‌کنندگان بر اساس شکل‌های (۳) و (۴) به‌صورت ساعتی در نظر گرفته شده است.

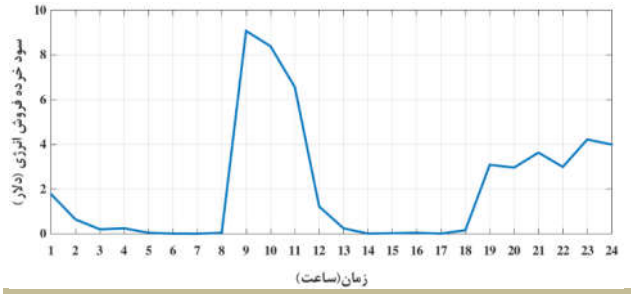


شکل (۳): بار الکتریکی مصرف‌کنندگان



شکل (۴): بار حرارتی مصرف‌کنندگان

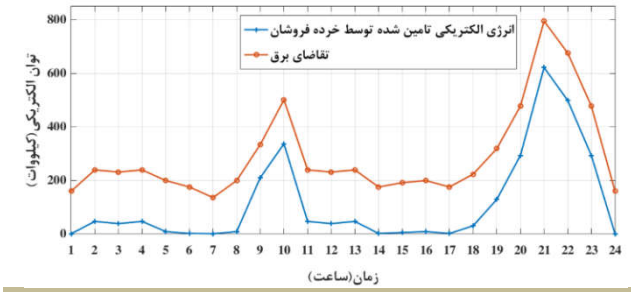
هدف اصلی در مسئلهٔ بیشینه‌سازی، سود خرده‌فروش انرژی است. پس در ابتدا سود خرده‌فروش انرژی در ساعت‌های مختلف را بررسی می‌کنیم.



شکل (۵): سود خرده‌فروش انرژی در ۲۴ ساعت

همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، در ساعت‌های اوج مصرف، میزان سود خرده‌فروش به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این در حالی است که در ساعت‌های غیر اوج ممکن است میزان سود خرده‌فروش حتی به صفر نیز برسد. دلیل این امر این است که در این ساعت‌ها رقابت بین خرده‌فروشان به حداکثر می‌رسد؛ زیرا در ساعات اوج مصرف، به‌دلیل زیاد بودن بار مصرف‌کنندگان ناگزیرند با هر قیمت پیشنهادی انرژی مورد نیاز خود را خریداری کنند. ولی در مقابل در ساعات غیر اوج، مصرف‌کنندگان منبع تأمین انرژی خود را انتخاب می‌کنند. در این رقابت، خرده‌فروش انرژی قیمت خود را تا رسیدن به هزینهٔ حاشیه‌ای خود پایین می‌آورد. در این حالت، اگر قیمت پیشنهادی خرده‌فروشان رقیب پایین‌تر از این مقدار باشد، این خرده‌فروش در بازار شکست خورده و مصرف‌کننده، بار مورد نیاز را که بسیار کمتر از حداکثر ظرفیت فروش خرده‌فروشان رقیب است، از آن‌ها می‌خرد. اگر هم خرده‌فروش انرژی در این حالت برنده شود، باز هم از فروش انرژی با قیمت پیشنهادی پایین سودی نمی‌برد. بنابراین سود او در برخی ساعات به صفر نیز می‌رسد.

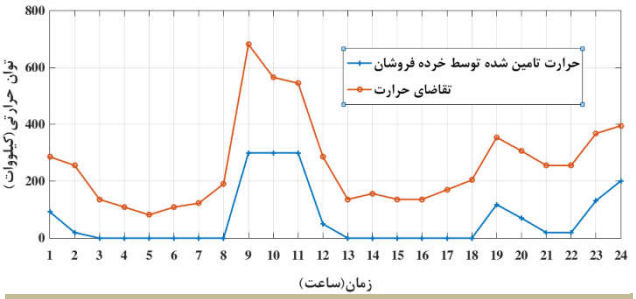
یکی از اهداف این پژوهش نمایش ویژگی‌های مصرف‌کنندگان دارای قابلیت تولید در برنامه پاسخ‌گویی جامع بار است. برای درک بهتر این مطلب، به شکل (۶) توجه کنید. در این شکل، به‌طور واضح نشان داده شده که بخشی از تقاضای انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان توسط واحدهای تولیدی خود آن‌ها تولید شده است. درحالی‌که آن‌ها هیچ گونه تغییری در الگوی مصرف خود ایجاد نکرده و تنها منبع تأمین انرژی خود را تغییر داده‌اند.



شکل (۶): مقایسهٔ تقاضای انرژی الکتریکی با میزان انرژی الکتریکی تأمین‌شده توسط خرده‌فروشان در هر ساعت

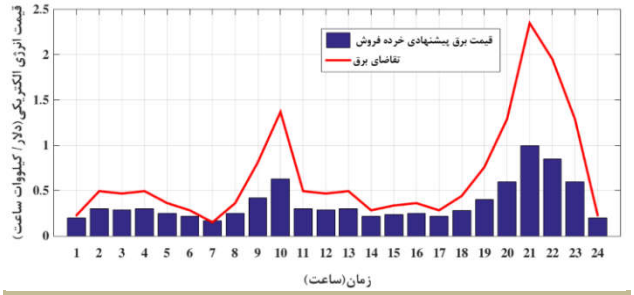
همان طور که مشاهده می‌شود، در برخی ساعت‌ها مصرف‌کنندگان به‌حدی از خودکفایی رسیده‌اند که بدون خرید برق از خرده‌فروشان انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را تأمین کرده‌اند.

به همین‌ترتیب می‌توان استدلالی مشابه برای تأمین حرارت مورد نیاز مصرف‌کنندگان انجام داد. در این مورد با توجه به شکل (۷) می‌توان به نتیجهٔ مشابهی دست یافت. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ساعت‌های اوج مصرف حرارت بیش از نیمی از توان حرارتی مورد نیاز توسط بویلر و CHP مصرف‌کنندگان تأمین‌شده است.

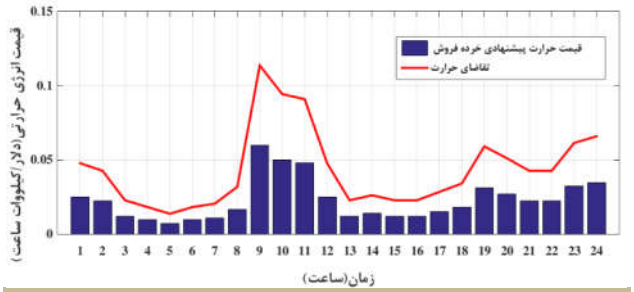


شکل (۷): مقایسهٔ تقاضای انرژی حرارتی با میزان انرژی حرارتی تأمین‌شده توسط خرده‌فروشان در هر ساعت

به‌منظور درک بهتر قیمت پیشنهادی برق و حرارت در مقایسه با تقاضای ساعتی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب دو شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است.



شکل (۸): قیمت برق در هر ساعت در برابر تقاضا



شکل (۹): قیمت حرارت در هر ساعت در برابر تقاضا

همان طور که در این دو شکل نشان داده شده، تغییرات قیمت برق و حرارت دقیقاً مطابق با تغییرات منحنی تقاضاست؛ به‌عبارت دیگر با افزایش تقاضا قیمت پیشنهادی نیز افزایش یافته و مصرف‌کنندگان ناگزیرند با قیمت بیشتر، میزان انرژی مورد نیاز خود را تأمین کنند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تعیین استراتژی بهینه خرده‌فروش انرژی با در نظر گرفتن استراتژی رقبا و مصرف‌کنندگان در بازار یکپارچهٔ انرژی ارائه شده است. همانطور که نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد پاسخ بهینه به‌دست‌آمده سود خرده‌فروش را بیشینه می‌سازد و درعین‌حال نوعی پاسخ‌گویی بار در عملکرد مصرف‌کنندگان به چشم می‌خورد. این روش پاسخ‌گویی بار بدون جابه‌جایی بار مصرف‌کنندگان و تنها با تغییر در منبع تأمین انرژی آن‌ها صورت گرفته است. توانایی خرده‌فروش انرژی در تأمین بار مصرف‌کنندگان به بهترین شکل در بازار یکپارچهٔ انرژی انکارناپذیر است. این مدل برای تحلیل عملکرد یک خرده‌فروش در بازار واقعی انرژی قابل پیاده‌سازی است. به‌عنوان پیشنهادی برای ادامهٔ این کار می‌توان راستی‌آزمایی این روش را در مقایسه با دیگر روش‌های مدل‌سازی خرده‌فروش در بازار یا دیگر روش‌های حل همین مسئله مورد ارزیابی قرار داد.

فهرست علائم

قیمت برق در بازار عمده‌فروشی	c^e
قیمت گاز در بازار عمده‌فروشی	c^g
میزان خرید برق از بازار عمده‌فروشی توسط خرده‌فروش اصلی	l^e
میزان گاز ورودی به CHP خرده‌فروش اصلی	$l^{g,CHP}$
میزان گاز ورودی به بویلر خرده‌فروش اصلی	$l^{g,boiler}$
میزان گاز خریداری شده از خرده‌فروش اصلی توسط مصرف‌کنندهٔ n که وارد CHP می‌شود.	$P_n^{g,CHP}$
میزان گاز خریداری‌شده از خرده‌فروش اصلی توسط	$P_n^{g,boiler}$

مصرف‌کنندهٔ n که وارد بویلر می‌شود.	
میزان برق خریداری‌شده از خرده‌فروش اصلی توسط مصرف‌کنندهٔ n	P_n^e
میزان حرارت خریداری‌شده از خرده‌فروش اصلی توسط مصرف‌کنندهٔ n	P_n^h
قیمت پیشنهادی برق توسط خرده‌فروش اصلی	π^e
قیمت پیشنهادی گاز توسط خرده‌فروش اصلی	π^g
قیمت پیشنهادی حرارت توسط خرده‌فروش اصلی	π^h
بازده ترانسفورماتور خرده‌فروش اصلی	w^e
بازده الکتریکی CHP خرده‌فروش اصلی	$w^{CHP,ge}$
بازده حرارتی CHP خرده‌فروش اصلی	$w^{CHP,gh}$
بازده بویلر خرده‌فروش اصلی	w^{boiler}
حداکثر میزان مجاز خرید برق از بازار عمده‌فروشی توسط خرده‌فروش اصلی	$\overline{L^e}$
حداکثر ورودی مجاز گاز CHP خرده‌فروش اصلی	$\overline{L^{g,CHP}}$
حداکثر ورودی مجاز گاز بویلر خرده‌فروش اصلی	$\overline{L^{g,boiler}}$
میزان خرید برق توسط مصرف‌کنندهٔ n از خرده‌فروش k	$P_{n,k}^{et}$
میزان خرید حرارت توسط مصرف‌کنندهٔ n از خرده‌فروش k	$P_{n,k}^{ht}$
میزان گاز ورودی CHP مصرف‌کنندهٔ n تأمین‌شده توسط خرده‌فروش k	$P_{n,k}^{gt,CHP}$
میزان گاز ورودی بویلر مصرف‌کنندهٔ n تأمین‌شده توسط خرده‌فروش k	$P_{n,k}^{gt,boiler}$
قیمت برق پیشنهادی توسط خرده‌فروش k	π_k^{et}
قیمت حرارت پیشنهادی توسط خرده‌فروش k	π_k^{ht}
قیمت گاز پیشنهادی توسط خرده‌فروش k	π_k^{gt}
حداکثر میزان مجاز خرید برق از خرده‌فروش k	$\overline{P_k^{et}}$
حداکثر میزان مجاز خرید حرارت از خرده‌فروش k	$\overline{P_k^{ht}}$
حداکثر میزان مجاز خرید گاز از خرده‌فروش k	$\overline{P_k^{gt}}$
بازده ترانسفورماتور مصرف‌کنندهٔ n	η_n^{ee}
بازده الکتریکی CHP مصرف‌کنندهٔ n	$\eta_n^{CHP,ge}$
بازده حرارتی CHP مصرف‌کنندهٔ n	$\eta_n^{CHP,gh}$
بازده بویلر مصرف‌کنندهٔ n	η_n^{boiler}
بار الکتریکی مصرف‌کنندهٔ n	d_n^e
بار حرارتی مصرف‌کنندهٔ n	d_n^h

مراجع

[1] Mahmoudi, N., Kumar Saha, T. and Eghbal, M., "*Developing a Scenario-Based Demand Response for Short-Term Decisions of Electricity Retailers*", Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE.

[2] Sekizaki, Sh., Nishizaki, I. and Hayashida, T., "*Electricity Retail Market Model with Flexible Price Settings and Elastic Price-Based Demand Responses by Consumers in Distribution Network*", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 81, pp. 317-386, 2016.

[3] Charwand, M., Ahmadi, M., Siano, P., Dargahi, V. and Sarno, D., "*Exploring the Trade-Off between Competing Objectives for Electricity Energy Retailers through a Novel Multi-Objective Framework*", Energy Conversion and Management, Vol. 91, pp. 12-18, 2015.

[4] Bertrand, R. G., "*Sale Prices Setting Tool for Retailers*", IEEE Transactions on Smart Grid, in press.

[5] Fotouhi Ghazvini, M. A., Soares, J., Horta, N., Neves, R., Castro, R. and Vale, Z., "*A Multi-Objective Model for Scheduling of Short-Term Incentive-Based Demand Response Programs Offered by Electricity Retailers*", Applied Energy, Vol. 151, pp. 102–118, 2015.

[6] Karandikar, R.G., Khaparde, S.A. and Kulkarni, S.V., "*Strategic Evaluation of Bilateral Contract for Electricity Retailer in Restructured Power Market*", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, pp. 457-463, 2010.

[7] Bu, Sh., Yu, F. R. and Liu, P. X., "*A Game-Theoretical Decision-Making Scheme for Electricity Retailers in the Smart Grid with Demand-Side Management*", in IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 17-20 Oct. 2011.

[8] Khojasteh, M. and Jadid, Sh., "*Decision-Making Framework for Supplying Electricity from Distributed Generation-Owning Retailers to Price-Sensitive Customers*", Utilities Policy, Vol. 37, pp. 1-12, 2015.

[9] Wei, W., Liu, F. and Mei, Sh., "*Energy Pricing and Dispatch for Smart Grid Retailers under Demand Response and Market Price Uncertainty*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 3, May 2015.

[10] Qian L. P., Zhang, Y. J., Huang, J. and Wu, Y., "*Demand Response Management via Real-Time Electricity Price Control in Smart Grids*", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, No. 7, July 2013.

[11] Mancarella, P., "*MES (multi-energy systems): An Overview of Concepts and Evaluation Models*", Energy, Vol. 65, pp. 1-17, 2014.

[12] Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G. and Frohlich, K., "*Energy Hubs for the Future*", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5, pp. 24-30, 2007.

[13] Chen, Y., Wei, W., Liu, F., Shafie-khah, M., Mei, Sh., João P. S. Catalão, "*Optimal Contracts of Energy Mix in a Retail Market under Asymmetric Information*", Energy, Vol. 165, Part B, pp. 634-650, 15 December 2018.

[14] Sheikhi, A., Rayati, M., Bahrami, Sh. and Ranjbar, A. M., "*Integrated Demand Side Management Game in Smart Energy Hubs*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 675-683, 2015.

[15]Wang D., Hu Q., Jia H., Du W., Chen N., Wang X. and Fan M., "*Integrated Demand Response in District Electricity-Heating Network Considering Double Auction Retail Energy Market based on Demand-Side Energy Stations*", Applied Energy, Vol. 248, pp. 656-678, 15 Aug. 2019.

[16] Khazeni, S., Sheikhi, A., Rayati, R., Soleymani, S., Ranjbar, A. M., "*Retail Market Equilibrium in Multi-Carrier Energy Systems; a Game Theoretical Approach*", IEEE Systems Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 738-747, 2019.

[17] Ruiz, C., Conejo, A. J. and Smeers, Y., "*Equilibria in an Oligopolistic Electricity Pool With Stepwise Offer Curves*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 752-761, 2012.