

یافتن راهبرد بهینه حضور شرکتهای تولید در بازار برق با استفاده از مفهوم مقدار امید فازی

سید مظاہر میربیهانی^۱ مهرداد ستایش نظر^۲

۱- دانشآموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - پردیس عباسپور دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
mazaher.mir@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق - پردیس عباسپور دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
msnazar@pwut.ac.ir

چکیده: شرکتهای تولید برق همواره با این مسأله رویرو هستند که در بازار رقابتی برق، چگونه مقدار تولید خود را جهت اکتساب حداقل سود مالی، تنظیم کنند. حل این مسأله از طریق تخمین و شبیه سازی اطلاعات غیر مطمئن در بازار، یکی از روش‌های مورد توجه است. در این مقاله، از روش مقدار امید فازی جهت یافتن حضور بهینه استفاده شده است که داده های اولیه آن بر اساس اطلاعات قبل از ایجاد رقابت در سیستم و داده های اکتشافی متخصصین بازار بدست آمده است. به این ترتیب که یک مجموعه فازی، جهت نمایش تخمین حضور رقبا به کار گرفته شده و سپس الگوریتم بهینه سازی بکار برده شده است. جهت تشریح ویژگی های روش پیشنهادی، یک مثال عددی با ۶ واحد تولید و نیز ۲ مصرف کننده، آورده شده است و سپس این مثال با سه روش بهینه سازی از دحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و روش مونت کارلو حل شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند.

کلمات کلیدی: بازار برق، راهبرد پیشنهاد حضور، مقدار امید فازی، اطلاعات غیر مستدل، اطلاعات متقارن، بار ارجاعی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: مهرداد ستایش نظر

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - پردیس عباسپور دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



۱- مقدمه

در این مقاله از روش تئوری امکان برای حل مسأله راهبرد بهینه حضور واحدهای تولید نیروگاهی در بازار برق استفاده می‌شود. به این ترتیب که یک مجموعه فازی جهت نمایش حضور رقبا به کار گرفته شده و سپس مدلسازی فازی حل مسأله را انجام می‌دهد. برای مثال، یک شبکه در حالت‌های مختلف و با چهار روش بهینه سازی مختلف حل شده و نتایج با هم مقایسه می‌شود.

۲- مدلسازی ریاضی مسأله

یک سیستم با تعداد m تولیدکننده مستقل که در یک شبکه تبادل قدرت قرار دارد، مورد بررسی است. همچنین، یک بار مجمع که در بازار شرکت نمی‌کند و دارای خاصیت ارجاعی نسبت به قیمت انرژی است را به همراه n مصرف کننده مستقل که در سمت تقاضای بار بازار شرکت می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود. هر تولیدکننده برق باید پیشنهاد قیمت خود را به صورت یک منحنی خطی غیر کاهشی اعلام نموده و متناسب با هر مصرف کننده باید پیشنهاد خرید قیمت خود را به صورت یک منحنی خطی غیر افزایشی اعلام کند. پس، برای تولیدکننده‌ها، منحنی مذکور به صورت معادله (۱) قابل ارائه است:

$$G_i(P_i) = a_i + b_i P_i \quad (1)$$

که $i = 1, 2, \dots, m$ است و برای مصرف کننده‌اند بزرگ منحنی با معادله (۲) قابل بیان است:

$$W_j(L_j) = c_j - d_j L_j \quad (2)$$

که $j = 1, 2, \dots, n$ است. در این معادلات P_i توان اکتیو خروجی تولیدکننده و a_i و b_i ضرایب مربوط به پیشنهاد تولیدکننده شماره i است و L_j مقدار مصرف توان اکتیو و پارامترهای c_j و d_j ضرایب پیشنهادی مصرف کننده شماره j است. همچنین کلیه ضرایب مذکور، اعدادی غیر منفی هستند. [۶]

مسأله مهم که پیش روی سیستم تبادل انرژی بازار است، تعیین مقدار تولید و درخواست مشتریان به گونه‌ای که همه موارد امنیت سیستم و محدودیتهای فنی در این انتقال انرژی در نظر گرفته شود، است. البته، هدف اصلی حداقل‌سازی سود برای همه شرکت کننده‌اند است.

با صرفه نظر کردن از محدودیتهای فنی شبکه و لحاظ نمودن تابع پیشنهاد خطی برای تولید کننده‌اند و مصرف کننده‌اند و هدف حداقل‌سازی سود آنها، شرایط بازار منجر به قیمت یکسان

تجددی ساختار در صنعت برق اصولاً با رویکرد تغییر سیستم انحصاری این صنعت، انجام شده است تا رقابت در سطوح مختلف سیستم تجدید ساختار شده شکل گیرد.

در یک بازار رقابتی ایده آل، هر تولیدکننده باید قیمت خود را با توجه به هزینه نهایی تولید اعلام کند؛ اما در عمل ممکن است به دلیل ماهیت شبه انحصاری بازار، تولید کننده‌اند قیمتی بالاتر از هزینه نهایی تولید خود را پیشنهاد دهند. لذا، مسأله راهبرد بهینه پیشنهاد حضور واحدهای نیروگاهی در بازار شکل می‌گیرد. در این قسمت به صورت خلاصه، تاریخچه بررسی محققین در خصوص حل مسأله پیشنهاد حضور بهینه آورده شده است.

نخستین تحقیق در این زمینه در [۱] منتشر شده است.

سپس حل این مسأله با استفاده از برنامه ریزی دینامیکی در [۲] پیشنهاد شد که با روش لاگرانژ و برای بازار برق انگلستان، مطالعات انجام شده است. همچنین، تحقیقات متعددی با استفاده از تئوری بازی انجام شده است که [۳]، روش زنجیره مارکف را جهت حل این نوع از مسائل پیشنهاد می‌دهد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسأله در [۴] پیشنهاد شده است و مسأله راهبرد بهینه حضور واحدهای نیروگاهی در بازارهای انرژی و خدمات جانبی را به صورت یک تابع چند هدفه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه کرده است. [۵]، روشی را برای استرسیویه بازار و به صورت مدل احتمالی ارائه داده است. مرجع [۶] نیز روشی ابتکاری را برای یافتن نقطه تعادل نش از دیدگاه بازیگران بازار پیشنهاد می‌دهد.

اغلب روشهای ذکر شده فوق بر اساس تئوری احتمالات بنا شده اند؛ اما این روشهای نیاز به آمارهای بسیار زیادی دارند و البته قادر به مدیریت مسائلی که داده‌های آن به صورت کیفی توسط کارشناسان بیان می‌شود، نیستند. زیرا، این داده‌ها بیشتر حالت فازی دارند و در بازارهای تازه تاسیس که آمارهای کافی از رفتار رقبا وجود ندارد، این مشکلات بازتر است که این مسأله در [۷] مورد بررسی کامل قرار گرفته است.

این مسائل باعث شده است که عده‌ای از محققین، برای مدلسازی عدم قطعیتهای مسأله پیشنهاد بهینه قیمت واحدهای تولید نیروگاهی در بازار، به روشهای فازی روی آورند [۸]. توانایی مدلسازی عدم قطعیتها با استفاده از روشهای فازی به گونه‌ای است که همچنان تحقیق بسیاری را می‌طلبد.



بیشتر شود، مقدار آن را باید برابر $P_{max,i}$ در نظر گرفت و دیگر معادله (۳) برای این ژنراتور صادق نیست. استدلال مشابهی برای L_j نیز معتبر است.

از آنجا که معادله هزینه برای ژنراتور i ام به صورت

$$C_i(P_i) = e_i P_i + f_i P_i^2 \quad (12)$$

مفروض است، لذا تابع هدف سود حداکثری، جهت راهبرد بهینه حضور در بازار به صورت زیر است:

$$\text{Maximize } F(a_i, b_i) = RP_i - C_i(P_i) \quad (13)$$

اکنون مسأله مورد نظر، یافتن a_i و b_i است به گونه ای که تابع $F(a_i, b_i)$ حداکثر شده و معادلات (۳) تا (۷) معتبر باشند. به طور مشابه برای مصرف کننده بزرگ j ام مقدار درآمد حاصل از فروش توان L_j را با معادله (۱۴) نشان می دهیم:

$$B_j(L_j) = g_j L_j + L_j L_j^2 \quad (14)$$

لذا تابع هدف برای این مصرف کننده را به صورت زیر می نویسیم:

$$\text{Maximize } B(c_j, d_j) = B_j(L_j) - RL_j \quad (15)$$

در اینجا نیز مسأله، یافتن c_j و d_j است، به گونه ای که تابع $B(c_j, d_j)$ حداکثر شده و معادلات (۳) تا (۷) معتبر باشد.

در بازار برق، غالبا اطلاعات برای دوره بعدی محرومانه است و لذا شرکت کنندگان اطلاعات لازم برای حل مسأله (۱۳) و (۱۵) را ندارند. اما اطلاعات رقبا از دوره های قبلی وجود دارد و لذا امکان تخمین ضرایب ممکن است. لذا، اولین مسأله برای هر شرکت کننده آن است که چگونه ضرایب حضور رقبا را تخمین بزند.

جهت حل این چالش جدید، فرض کنیم که از دیدگاه شرکت کننده i ام احتمال آن که شرکت کننده j ام با ضرایب a_j و b_j حضور یابد از یک توزیع احتمال نرمال پیوسته با تابع چگالی احتمال به صورت زیر باشد:

$$P_{dfi}(a_j, b_j) = \exp \left\{ \frac{-1}{2(1-\rho_j^2)} \left[\left(\frac{a_j - \mu_j^{(a)}}{\sigma_j^{(a)}} \right)^2 - \frac{2\rho_j(a_j - \mu_j^{(a)})(b_j - \mu_j^{(b)})}{\sigma_j^{(a)}\sigma_j^{(b)}} + \left(\frac{b_j - \mu_j^{(b)}}{\sigma_j^{(b)}} \right)^2 \right] \right\} \quad (16)$$

در فرمول فوق ρ ضریب همبستگی بین a_j و b_j است. همچنین $\mu_j^{(a)}$ ، $\sigma_j^{(a)}$ ، $\mu_j^{(b)}$ و $\sigma_j^{(b)}$ پارامترهای توزیع پیوسته می باشند. توزیع پارامترهای a_j و b_j از نوع توزیع نرمال بوده که $\mu_j^{(a)}$ و $\mu_j^{(b)}$ مقادیر متوسط بوده و $\sigma_j^{(a)}$ و $\sigma_j^{(b)}$ انحراف معیار

و شفاف برای همه شرکت کنندگان می شود. بنابراین حل مسأله پخش بار سیستم فقط با در نظر گرفتن حد بالا و پایین تولید و مصرف برای هر شرکت کننده، منجر به حل معادلات (۳) تا (۷) به شرح ذیل خواهد بود که به صورت مجموعه توان خروجی ژنراتورها $P = (P_1, P_2, \dots, P_m)^T$ و نیز مجموعه توان درخواستی مصرف کنندگان $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T$ است:

$$a_i + b_i P_i = R \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$c_j - d_j L_j = R \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i = Q(R) + \sum_{j=1}^n L_j \quad (5)$$

$$P_{min,i} \leq P_i \leq P_{max,i} \quad (6)$$

$$L_{min,j} \leq L_j \leq L_{max,j} \quad (7)$$

R قیمت یکنواخت بازار است که تعیین می شود و $Q(R)$ بار مجتمع است که به قیمت بازار بستگی دارد و توسط مدیر بازار مشخص و اعلام می شود. مقادیر $P_{min,i}$ و $P_{max,i}$ مقادیر حد بالا و پایین تولید مربوط به ژنراتور i ام است و $L_{min,j}$ و $L_{max,j}$ مقادیر حد بالا و پایین تقاضای بار مصرف کننده بزرگ j ام است. اکنون فرض کنیم که معادله مربوط به بار مجتمع چنین باشد:

$$Q(R) = Q_0 - KR \quad (8)$$

که در آن Q_0 یک عدد ثابت و K ضریب ارجاعی بار نسبت به قیمت است. اگر این بار به صورت کامل غیر ارجاعی باشد، آنگاه این ضریب را می توان صفر فرض کرد. با صرفه نظر از نامساویهای (۶) و (۷) و با حل معادلات (۳) تا (۸) داریم:

$$R = \frac{Q_0 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{b_i} + \sum_{j=1}^n \frac{c_j}{d_j}}{K + \sum_{i=1}^m \frac{1}{b_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}} \quad (9)$$

$$P_i = \frac{R - a_i}{b_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$L_j = \frac{c_j - R}{d_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

وقتی پاسخ معادلات (۱۰) و (۱۱) محدودیتهای معادلات (۶) و (۷) را نقض کند، باید پاسخ را جهت تطبیق این محدودیتها ویرایش نمود. یعنی زمانی که P_i کوچکتر از حد $P_{min,i}$ شود، باید خروجی آن ژنراتور صفر شده و از گردونه رقابت خارج شود. همچنین زمانی که P_i از مقدار حداکثر خود



دهد، حتی اگر امکان آن صفر باشد. اما رخداد فازی حتماً رخ خواهد داد، اگر اندازه اعتبار آن یک باشد و رخ نخواهد داد، اگر اندازه اعتبار آن صفر باشد.

۴- فرمولاسیون فازی مسئله

اگر چه دانستن ضرایب پیشنهادی رقبا در مزایده یا مناقصه مشخص نیست، اما امکان تخمین آن وجود دارد. این تخمین می‌تواند با یک مجموعه فازی نمایش داده شود که بر اساس معلومات کیفی و آمار قبلی و روش‌های ابتکاری باشد.

اگر چه فرض کنیم که از دیدگاه شرکت کننده i ام، ضرایب حضور شرکت کننده j ام برابر a_j و b_j باشد که آن را به صورت یک مجموعه فازی \tilde{z}_j و \tilde{b}_j نمایش داد.

$$\varphi = \{\tilde{a}_1, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{a}_{i-1}, \tilde{b}_{i-1}, \tilde{a}_{i+1}, \tilde{b}_{i+1}, \dots, \tilde{a}_n, \tilde{b}_n\} \quad (21)$$

لذا سود شرکت کننده i ام با تابع $F(a_i, b_i, \varphi)$ بیان می‌شود و معادله (۱۳) به صورت زیر باز نویسی می‌شود:

$$F(a_i, b_i, \varphi) \quad (22)$$

$$R = \frac{Q_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \frac{\tilde{a}_k}{\tilde{b}_k} + \frac{a_i}{b_i} + \sum_{j=1}^n \frac{\tilde{c}_j}{\tilde{d}_j}}{K + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \frac{1}{\tilde{b}_k} + \frac{1}{b_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\tilde{d}_j}} \quad (23)$$

روشهای متعددی جهت مقایسه دو مجموعه فازی معرفی شده است. در این مقاله از روش مقدار امید فازی استفاده شده است که مزیت آن سازگاری بیشتر با اصول تحلیل احتمالات است.

سود شرکت کننده i ام که برابر $F(a_i, b_i, \varphi)$ است، بستگی به تخمین ضرایب حضور رقبا و ضرایب حضور وی دارد. از آنجا که φ یک متغیر فازی است، لذا تابع سود هدف $F(a_i, b_i, \varphi)$ نیز یک متغیر فازی است. لذا باید بهترین گزینه ضرایب a_i و b_i تعیین شود و مجموعه ضرایب رقبا به صورت مجموعه فازی φ مشخص شده و تابع سود هدف مذکور حداقل شود. از لحاظ ریاضی جهت تک بعدی کردن مسئله می‌توان گزینه‌ای مناسب برای a_i فرض کرده و سپس به دنبال تعیین بهترین مقدار b_i بود.

تابع عضویت \tilde{a}_j و \tilde{b}_j بوسیله معادله (۱۶) بیان می‌شود که می‌توان آن را به این صورت باز نویسی کرد:

$$P\delta f_i(a_j, b_j) = \mu_i(a_j, b_j) \quad (24)$$

استاندارد است. به همین ترتیب می‌توان تابع چگالی احتمال مشابهی برای تخمین ضرایب مصرف کنندگان بزرگ ارائه نمود.

با تعریف این تابع چگالی احتمالی برای ضرایب شرکت کنندگان و در نظر گرفتن معادلات (۳) تا (۷) و نیز تابع هدف با معادلات (۱۳) و (۱۵) یافتن راهبرد بهینه به یک مسئله بهینه سازی تصادفی تبدیل شد.

در این مقاله از روش امید فازی استفاده شده است تا راهبرد بهینه حضور در بازار برق واحدهای نیروگاهی مشخص شود. نکته قابل توجه در حل این مسئله، ثابت نگه داشتن مقادیر a_j و c_j و یافتن مقادیر \tilde{b}_j و \tilde{d}_j با الگوریتم فازی است. نهایتاً، نتایج را بر روی شبکه نمونه فرضی با روش ازدحام ذرات، الگوریتم زنتیک و مونت کارلو مقایسه می‌شود.

۳- مقدار امید فازی

تعاریف متعددی برای مقدار امید فازی بیان شده است که در این مقاله از تعریف مرجع [۹] به شرح ذیل استفاده شده است.

اگر U یک مجموعه غیر تهی باشد و F یک مجموعه شامل کلیه زیر مجموعه‌های تعریف شده در U باشد و π یک تابع حقیقی غیر منفی باشد، به صورتی که $\pi: F \Rightarrow [0, 1]$ آنگاه، اندازه امکان بر U تعریف می‌شود، اگر به ازای هر A و B متعلق به مجموعه F شرایط زیر صادق باشد. (عملگر \forall نشانه تعیین مقدار حداقل بین دو عبارت است):

$$\pi(\emptyset) = 0, \quad \pi(U) = 1, \quad \pi(A) \geq 0$$

$$\pi(A \cup B) = \pi(A) \vee \pi(B) \quad (17)$$

آنگاه سه گانه (U, F, π) ، یک فضای امکان نامیده می‌شود.

همچنین φ ، یک متغیر فازی بر فضای امکان (U, F, π) نامیده می‌شود و امید فازی φ به این صورت تعریف می‌شود [۱۰] :

$$E(\varphi) = \int_0^{+\infty} Cr(\varphi \geq r) dr - \int_{-\infty}^0 Cr(\varphi \leq r) d \quad (18)$$

که در آن اندازه اعتبار Cr به صورت معادله (۱۹) بیان می‌شود:

$$Cr(A) = \frac{\pi(A) + N(A)}{2}, \quad \forall A \in F \quad (19)$$

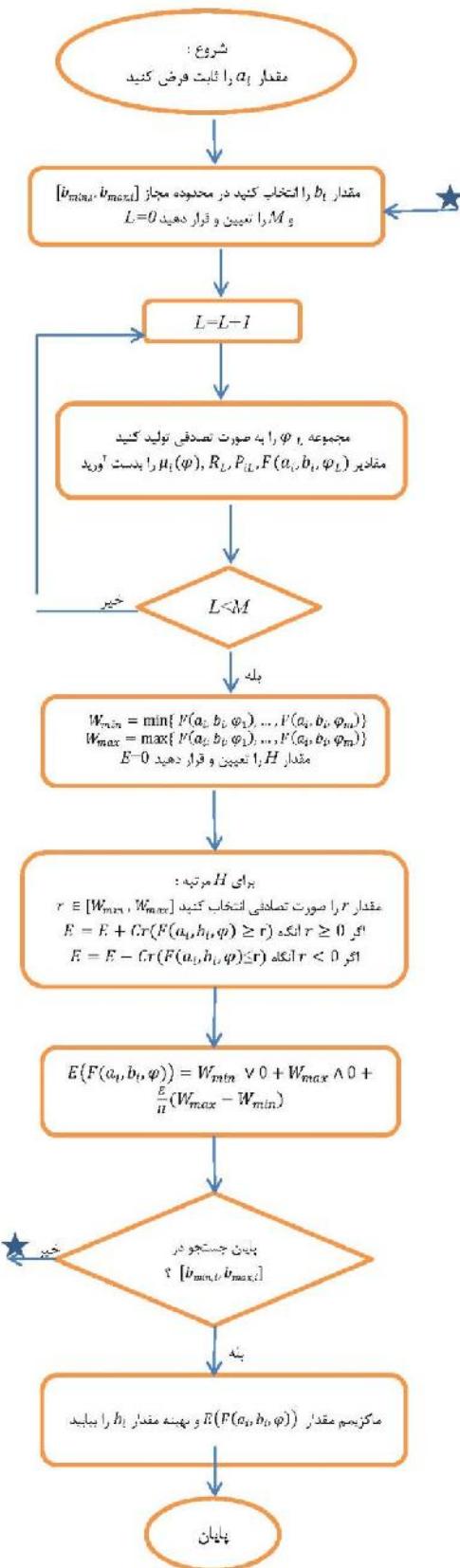
$\pi(A)$ ، اندازه امکان وقوع پیشامد A بوده و $N(A)$ اندازه

لزوم پیشامد A است که در معادله (۲۰) تعریف شده اند:

$$N(A) = 1 - \pi(-A), \quad \pi(A) = 1 - N(-A) \quad (20)$$

نکته قابل توجه این است که یک رویداد فازی ممکن است

اتفاق نیافتد، حتی اگر امکان آن یک باشد و ممکن است رخ



شکل (۱): الگوریتم حل فازی مسئله

بنابراین از دیدگاه شرکت کننده ام امکان آن که ضرایب حضور سایر رقبا مجموعه معادله (۲۵) باشد، با معادله (۲۶) مشخص می‌شود.

$$\delta = \{(a_1, b_1), \dots, (a_{i-1}, b_{i-1}), (a_{i+1}, b_{i+1}), \dots, (a_n, b_n)\} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mu_i(\varphi) &= \mu_i(a_1, b_1) \wedge \dots \wedge \mu_i(a_{i-1}, b_{i-1}) \wedge \\ \mu_i(a_{i+1}, b_{i+1}) \wedge \dots \wedge \mu_i(a_n, b_n) \end{aligned} \quad (26)$$

که در معادله (۲۶)، عملگر

∧ نشانه حداقل بین دو عبارت است.

۵- الگوریتم شبیه سازی فازی

جهت شبیه سازی الگوریتم فازی و تخمین امید تابع هدف یعنی عبارت $E(F(a_i, b_i, \varphi))$ ، از روش معرفی شده در مرجع [۹] استفاده می‌شود.

مجموعه $\varphi_l = \{a_{l1}, b_{l1}, \dots, a_{ln}, b_{ln}\}$ به صورت تصادفی تولید می‌شود که $l = 1, 2, \dots, H$ است و عناصر این مجموعه به اندازه ϵ از \tilde{a}_j و \tilde{b}_j فاصله دارد، و ϵ عددی بسیار کوچک است. همچنین H عددی بسیار بزرگ بوده و نشان دهنده زمان نمونه گیری است. اکنون انتگرال معادله (۱۸) را می‌توان به صورت مجموع ناپیوسته برای تعداد H جمله نوشت.

برای هر $r \geq 0$ ، اندازه اعتبار $Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \geq r)$ به

صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \geq r) = 0.5 \times (max_{l=1,2,\dots,H} \{\mu(\varphi_l) | F(a_i, b_i, \varphi_l) \geq r\} + 1 - max_{l=1,2,\dots,H} \{\mu(\varphi_l) | F(a_i, b_i, \varphi_l) < r\}) \quad (27)$$

و برای هر $r < 0$ اندازه اعتبار $Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \leq r)$

به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \leq r) = 0.5 \times (max_{l=1,2,\dots,H} \{\mu(\varphi_l) | F(a_i, b_i, \varphi_l) \leq r\} + 1 - max_{l=1,2,\dots,H} \{\mu(\varphi_l) | F(a_i, b_i, \varphi_l) > r\}) \quad (28)$$

در شکل (۱) فلوچارت و فرمولهای لازم برای الگوریتم یافتن ضریب بهینه به طور کامل آورده شده است.

۶- مثالهای عددی

یک سیستم قدرت با شش تولیدکننده برق و یک بار مجتمع و دو مصرف کننده بزرگ برق را در نظر می‌گیریم. اطلاعات مربوط به شرکت کنندگان در جدول یک آمده است. برای بار مجتمع نیز Q0 برابر ۳۰۰ و ضریب الاستیسیته یا ضریب ارتقای آن K برابر ۵ است.

$$\rho_i = -0.1 \quad (30)$$

مقدار ρ_i برای ژنراتورها باید منفی باشد، زیرا که زمانی که ژنراتور تصمیم به افزایش یکی از ضرایب حضورش می‌گیرد، تمایل به کاهش ضریب دیگر پیدا می‌کند، و با استدلال مشابه می‌توان گفت که برای مصرف کنندگان ضریب ρ_i عددی مثبت است. هر شرکت کننده در بازار مقدار a_i را برابر $a_i^{(a)} \mu_i$ قرار داده و بعد مسأله را طبق الگوریتم فازی بیان شده و با استفاده از نرم افزار مطلب حل می‌شود.

این مسأله به چهار روش مختلف حل می‌شود. روش اول مبتنی بر مقدار امید فازی که الگوریتم آن در این مقاله بیان شده، بوده و آن را متبع روش فازی می‌نامیم، روش دوم روش مونت کارلو است، روش سوم الگوریتم ژنتیک است [۱۰] و روش چهارم روش بهینه سازی ازدحام ذرات است که آن را به اختصار ذرهای خواهیم خواند. نهایتاً می‌توان نتیجه چهار روش را باهم مقایسه نمود. در جدول (۳) مسأله به هر چهار روش حل شده است.

جدول (۳): نتیجه یافتن ضرایب حضور بهینه به چهار روش

مونت کارلو	ژنتیک	ذرهای	فازی	ژنراتور
b_i	b_i	b_i	b_i	b_i
0.0297	0.058	0.062	0.0598	1
0.124	0.101	0.079	0.0807	2
0.292	0.221	0.243	0.2395	3
0.074	0.035	0.046	0.0519	4
0.170	0.116	0.124	0.1270	5
0.170	0.116	0.124	0.1270	6
d_i	d_i	d_i	d_i	صرف کننده
0.097	0.064	0.072	0.0782	7
0.077	0.049	0.051	0.0572	8

جدول (۴): نتیجه پخش بار با ضرایب بدست آمده را به چهار روش مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۴): نتیجه پخش بار متناظر با چهار روش مختلف

مونت کارلو	ژنتیک	ذرهای	فازی	ژنراتور
P(MW)	P(MW)	P(MW)	P(MW)	P(MW)
160.00	152.00	156.00	159.471	1
89.4	102.83	104.38	100.500	2
45.7	41.921	47.271	47.395	3
88.8	116.28	119.380	103.196	4
43.1	46.025	48.762	46.542	5
43.1	46.025	48.762	46.542	6
L(MW)	L(MW)	L(MW)	L(MW)	صرف کننده
139.7	162.61	168.97	157.306	7
112.1	139.95	140.92	128.015	8

در مرحله بعدی با استفاده از نتایج بدست آمده و معادلات (۹) و (۱۰) و (۱۱) می‌توان در هر روش قیمت نهایی بازار و نیز سود هر شرکت کننده را با معادلات (۱۵) و (۱۶) مشخص کرد که در جدول (۵) مقادیر مذکور محاسبه و آورده شده است.

جدول (۱): داده های مربوط به شرکت کنندگان

Pmax(MW)	Pmin(MW)	f	e	ژنراتور
160	40	0.01125	6.0	1
130	30	0.0525	5.25	2
90	20	0.1375	3.0	3
120	20	0.02532	9.75	4
100	20	0.075	9.0	5
100	20	0.075	9.0	6
Lmax(MW)	Lmin(MW)	h	g	صرف کننده
200	0	0.04	30	7
150	0	0.03	25	8

۱-۶ - حالت اطلاعات متقاضان

در این حالت فرض شده است که هر یک از رقبای شرکت کننده یک تخمین با توزیع نرمال یکسان برای دو ضریب حضور خود دارند. حدود بالا و پایین مرتبط هر پارامتر در جدول (۲) آمده است. این حدود را می‌توان با استفاده از اطلاعات دوره‌های قبلی بدست آورد.

جدول (۲): تخمین محدوده پارامترهای کلیه شرکت کنندگان

b(max)	b(min)	a(max)	a(min)	ژنراتور
0.0775	0.0465	7.47	6.11	1
0.0988	0.0592	9.04	7.40	2
0.3037	0.1823	5.48	4.48	3
0.0575	0.0345	12.07	9.88	4
0.1550	0.0930	11.46	9.38	5
0.1550	0.0930	11.46	9.38	6
d(max)	d(min)	c(max)	c(min)	صرف کننده
0.0900	0.0540	31.49	25.77	7
0.0638	0.0382	26.02	21.29	8

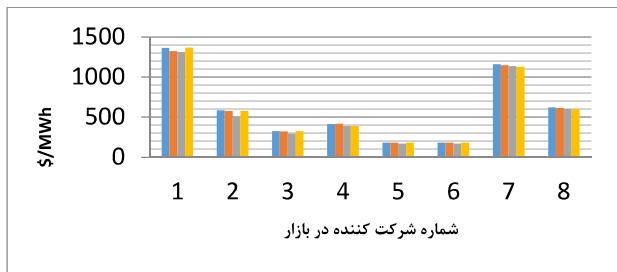
از دیدگاه شرکت کننده p ام که p می‌تواند عدد ۱ تا ۸ باشد، توزیع نرمال ژنراتور n ام و یا مصرف کننده z ام ($i, j \neq p$) مطابق معادله (۱۶) بوده و سایر پارامترهای توزیع آن به صورت معادلات (۲۹) و (۳۰) تخصیص داده می‌شود.

$$\begin{aligned} \mu_i^{(a)} &= \frac{a_i^{\min} + a_i^{\max}}{2}, & \mu_i^{(b)} &= \frac{b_i^{\min} + b_i^{\max}}{2}, \\ \sigma_i^{(a)} &= 0.1 \times \mu_i^{(a)}, & \sigma_i^{(b)} &= 0.1 \times \mu_i^{(b)}, \\ \rho_i &= -0.1 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\mu_i^{(a)} = \frac{a_i^{\min} + a_i^{\max}}{2},$$

$$\mu_i^{(b)} = \frac{b_i^{\min} + b_i^{\max}}{2},$$

$$\sigma_i^{(a)} = 0.1 \times \mu_i^{(a)}, \quad \sigma_i^{(b)} = 0.1 \times \mu_i^{(b)},$$



شکل (۳): مقایسه برآورد سود هر ۸ شرکت کننده به چهار روش

۶- حالت اطلاعات نامتقارن

در این حالت موردي را بررسی می کنیم که تخمین برخی رقبا دقت کمتری از تخمین دیگران دارد. به طور مثال شرکت کننده شماره دو با تخمین پارامترها به صورت معادله (۳۱) در رقابت شرکت می کند، در حالی که سایر رقبا با مفروضات معادلات (۲۸) و (۲۹) مانند حالت قبل در بازار شرکت می کنند.

$$\mu_i^{(a)} = 1.2 \times \frac{a_i^{\min} + a_i^{\max}}{2},$$

$$\mu_i^{(b)} = 1.2 \times \frac{b_i^{\min} + b_i^{\max}}{2}$$

$$\sigma_i^{(a)} = 0.1 \times \mu_i^{(a)}, \sigma_i^{(b)} = 0.1 \times \mu_i^{(b)}, \rho_i = -0.1 \quad (31)$$

در این حالت به دنبال مقایسه روشهای بهینه سازی نیستیم و فقط قصد نمایش اهمیت تخمین حضور رقبا را بیان می کنیم. لذا با مفروضات جدید، در این حالت محاسبات ضرایب بهینه را با روش فازی پیشنهادی، بدست آورده و سپس مقادیر پخش بار و قیمت بازار و سود هر شرکت کننده را با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) و (۱۳) محاسبه می کنیم. در جدول (۶) نتایج محاسبات آورده شده است و در شکل (۴) نمودار مقایسه ای بین حالت متقارن و نامتقارن ترسیم شده است.

جدول (۶): نتایج محاسبات برای اطلاعات نامتقارن

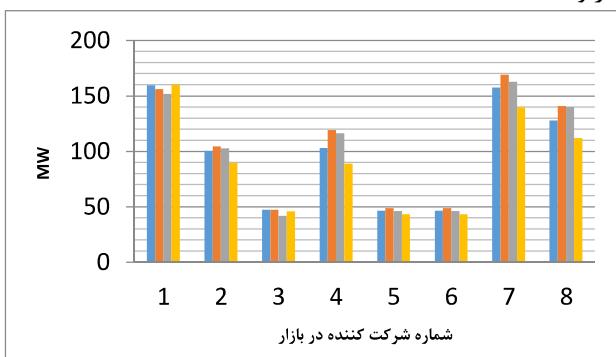
فازی			
(\$/MWh) سود	P(MW)	b_i	ژنراتور
1408.2	160.0000	0.0598	1
560.0	76.1579	0.11	2
336.2	48.5105	0.2395	3
445.1	108.3405	0.0519	4
192.3	48.6447	0.1270	5
192.3	48.6447	0.1270	6
(\$/MWh) سود	P(MW)	d_i	صرف کنندگان
1114.6	153.8929	0.0782	7
579.5	123.3484	0.0572	8
16.6014		قیمت (\$/MWh)	
4828.		جمع کل سود بازیگران (\$/MWh)	

جدول (۵): برآورد سود هر شرکت کننده (\$/MWh) و قیمت

بازار (\$/MWh) به چهار روش

مونت کارلو	زنگنه	ذریای	فازی	ژنراتور
سود (\$/MWh)				
1368.0	1310.1	1320.3	1361.9	1
572.7	504	574.1	583.7	2
322.9	291.8	316.2	323.1	3
386.4	384.7	416.1	409.8	4
177.5	165.8	178.4	178.9	5
177.5	165.8	178.4	178.9	6
سود (\$/MWh)	سود (\$/MWh)	سود (\$/MWh)	سود (\$/MWh)	صرف کنندگان
1126.3	1135.6	1146	1159.9	7
592.6	596.4	611.8	617.7	8
16.35	15.81	16.47	16.334	قیمت (\$/MWh)
4723.9	4554.2	4741.3	4814	جمع کل سود بازیگران (\$/MWh)

همانطور که در جدول (۵) ملاحظه می شود، مقدار سود هر شرکت کننده در هر روش مختلف است و برای مقایسه روشها می توان پارامتر مجموع سود شرکت کننده ها را در نظر گرفت که با این معیار، برتری نسبی با روش فازی شرح داده شده است. در شکل (۲) برای مقایسه راحت تر نتیجه پخش بار به چهار روش برای هر شرکت کننده نمایش داده شده است. در شکل (۳) نیز مقدار سود هر شرکت کننده به چهار روش مقایسه می شود. (در هر نمودار آبی نشانه روش فازی، قرمز نشانه روش ذره ای، سبز نشانه روش زنگنه و بنفش نمایشگر روش مونت کارلو است).



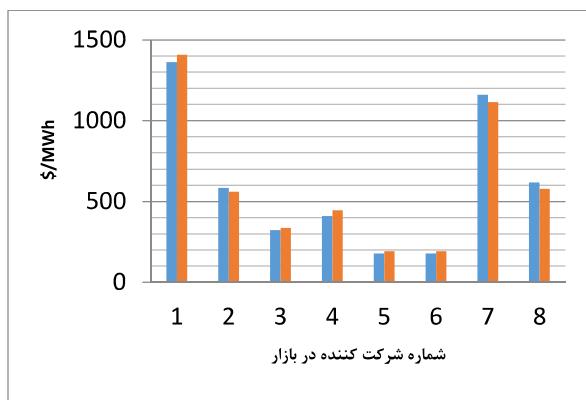
شکل (۲): نمودار مقایسه مقدار توان تولیدی یا صرفی هر ۸ شرکت کننده در نتیجه پخش بار، به چهار روش

جدول (۷): نتایج حل مسأله برای بار غیر ارجاعی $K=0$

فازی			
سود(\$/MWh)	P(MW)	b_i	ژنراتور
1525.8	160.00	0.0608	1
673.4	94.54	0.0964	2
371.3	47.95	0.2576	3
545.7	120.00	0.0520	4
230.4	51.52	0.1310	5
230.4	51.52	0.1310	6
سود(\$/MWh)	P(MW)	d_i	صرف کننده
985.3	137.66	0.0821	7
471.5	103.28	0.0612	8
		قیمت (\$/MWh)	
17.336		جمع کل سود بازیگران (\$/MWh)	
5032			

جدول (۸): نتایج حل مسأله برای بار ارجاعی $K=15$

فازی			
سود(\$/MWh)	P(MW)	b_i	ژنراتور
1024.5	157.39	0.0470	1
381.7	74.78	0.0810	2
231.3	40.62	0.2288	3
194.7	71.76	0.461	4
91.9	31.35	0.1230	5
91.9	31.35	0.1230	6
سود(\$/MWh)	P(MW)	d_i	صرف کننده
1518.3	170.9	0.0840	7
933	150.00	0.0621	8
		قیمت (\$/MWh)	
14.27		جمع کل سود بازیگران (\$/MWh)	
4467.2			



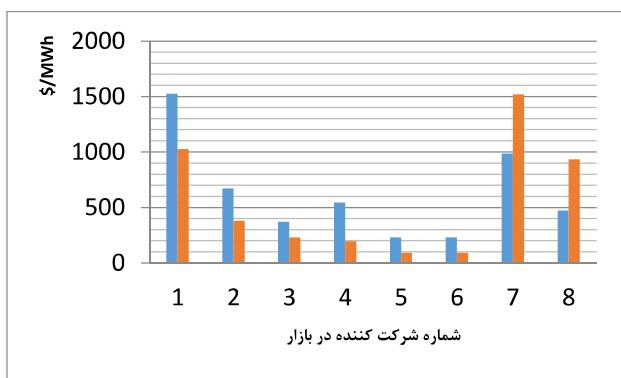
شکل (۴): مقایسه برآورد سود هر ۸ شرکت کننده در دو حالت

اطلاعات متقارن (رنگ آبی) و نامتقارن (رنگ قرمز)

از مقایسه نتایج بدست آمده در دو حالت بررسی شده مشخص است که فقط ضریب حضور بهینه ژنراتور شماره ۲ افزایش پیدا کرده است و به این نتیجه می‌رسیم که عدم تخمین صحیح از طرف ژنراتور شماره ۲ باعث افزایش قیمت در بازار شده است. زیرا که ژنراتور شماره ۲ تخمین بالاتری از حضور رقبا داشته و خود نیز پیشنهاد بالاتری داده است. در نتیجه این اشتباہ، فقط سود ژنراتور ۲ کاهش یافته است، اما سود سایر ژنراتورها که تخمین درست تری از حضور رقبا داشته اند، افزایش پیدا کرده است. در خصوص دو صرف کننده شماره ۷ و ۸ نیز با توجه به آن که با همان ضرایب قبلی در بازار شرکت کرده اند، بدیهی است که با افزایش قیمت بازار و کاهش سهم آنها در خرید توان، سود آنها نیز مانند ژنراتور شماره ۲ کاهش می‌یابد. نتیجه گیری مهم در این بخش، نشان دهنده اهمیت تخمین درست از حضور رقبا است. زیرا که عدم تخمین درست باعث کاهش سود آن شرکت کننده می‌شود.

۷- بررسی تاثیر خاصیت ارجاعی بار

در این بخش هدف یافتن تحلیل حساسیت مسأله به مقدار ارجاع بار است. لذا در این حالت نیز مسأله حضور بهینه را در دو حالت مختلف بررسی می‌کنیم. در حالت اول، بار مجتمع مسأله کاملاً غیر ارجاعی است، یعنی $K=0$ و در حالت دوم مقدار ارجاع بار را کمی بالا در نظر گرفته می‌شود، یعنی $K=15$. نتایج در جدول (۷) و (۸) آورده شده است و نمودار مقایسه‌ای در شکل (۵) ترسیم شده است. دقیق شود که در هر دو حالت، موارد مربوط به اطلاعات متقارن لحظه شده است.



شکل (۴): مقایسه سود شرکت کننده‌گان در بازار در حالت حضور بار غیر ارجاعی (رنگ آبی) و بار ارجاعی (رنگ قرمز)

- IEEE PES Summer Meeting, Vol. 4, pp. 2168–2173, 2000.
- [2] David, A.K., and Wen, F.: ‘Optimally co-ordinate bidding strategies in energy and ancillary service markets’, IEE Proc., Gener. Trans. Distrib., Vol. 3, pp. 331–338, 2002.
- [3] H. L. Song, C. C. Liu, J. Lawarree and R. W. Dahlgren. “Optimal Electricity Supply Bidding by Markov Decision Process”. IEEE Trans on Power Systems, Vol. 15, pp. 618-624, May 2000.
- [4] Jain A.K., S.C.Srivastava, Strategic Bidding and risk Assessment Using Genetic Algorithm in Electricity Markets, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 10, pp. 1-10,2009.
- [5] R. Khorram Nia, M. Raoofat,’ Optimal Bidding Strategy for Generation Units Considering Price Uncertainty’, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.8, No.2, Fall & Winter 2011.
- [6] Ebrahim Hasan, D. Francisco, and Galiana: ‘Fast computation of pure strategy Nash equilibrium in electricity markets cleared by Merit order’ IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, pp. 722–728, 2010.
- [7] M. Kazemi, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Ehsan,’ Risk-based bidding of large electric utilities using Information Gap Decision Theory considering demand response’, Electric Power Systems Research, Vol. 114, pp. 86-92, 2014.
- [8] J. Vijaya Kumar, D.M. Vinod Kumar, K. Edukondalu, ‘Strategic bidding using fuzzy adaptive gravitational search algorithm in a pool based electricity market’, Applied Soft Computing, Vol. 13, pp. 2445-2455,2013.
- [9] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility,” IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 1, pp 328, 1978.
- [10] Azadeh. A, S.F. Ghaderi, B. Pourvalikhan Nokhanandan and M. Shaikhali Shahi: ‘A new GA approach for optimal bidding Strategy viewpoint of profit maximization of a generation company’ Expert system with applications, Vol. 39, pp. 1565-1574, 2012.

با بررسی شکل و جداول مربوط به این تحلیل، مشخص است که هنگامیکه بار غیر ارجاعی است، مقدار سود ژنراتورها زیادتر از حالتی است که بار غیر ارجاعی است و وقتی بار ارجاعی می‌شود، مقدار سود مصرف کننده بالا می‌رود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سود ژنراتورها با افزایش مقدار ارجاعیت بار کاهش می‌یابد و عکس این موضوع در مورد مصرف کنندگان صادق است. به بیانی دیگر سود تولید کنندگان در بازار برق توسط خصوصیت ارجاعی بار نسبت به قیمت، محدود شده است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله روش حضور بهینه شرکت کنندگان در بازار برق با روش بدست آوردن مقدار امید فازی پیشنهاد شده است و علت موفقیت مفهومی این روش، عدم وجود اطلاعات مستدل در خصوص نحوه شرکت کردن رقبا در بازار است، زیرا اغلب اطلاعات حضور هر شرکت در بازار محرمانه بوده و باید از راههای ابتکاری و اکتشافی تخمين زده شود.

در این مقاله بر روی یک شبکه نمونه، به چهار روش معمول تحلیل حضور بهینه انجام شد که به ترتیب روش پیشنهادی امید فازی، روش بهینه سازی ازدحام ذرات، روش الگوریتم ژنتیک و روش مونت کارلو است. در واقع یک روش حل فازی مسئله را با سه روش حل عددی همان مسئله مقایسه شد و برتری نسبی آن را در نتایج ملاحظه شد. همچنین برای همان شبکه، تاثیر تخمين نادرست و تخمين درست را به صورت عددی و با نامتقاضن فرض کردن تخمين رقبا از هم بررسی شده و نیز تحلیل حساسیت سود تولید کنندگان و مصرف کنندگان بازار نسبت به مقدار الاستیسیته بار انجام شد.

در مقاله آینده تلاش خواهد شد تا همین روش با در نظر گرفتن محدودیتهای شبکه انتقال و برای یک شبکه واقعی بررسی شود.

سپاسگزاری

نویسندهای این مقاله از توجه اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران و داوران محترم که با نظرات ارزشمندانه بهبود این مقاله یاری رساندند، کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] David, A.K., and Wen, F.: ‘Strategic bidding in competitive electricity markets: a literature survey’.



