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

سید مظاهر میربهبهانی[1] مهرداد ستایش نظر[2]

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 روبرو هستند که در بازار رقابتی برق، چگونه مقدار تولید خود را جهت اکتساب حداکثر 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 ازدحام 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 ارتجاعی

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۱- مقدمه

تجدید ساختار در صنعت برق اصولا 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 کنندگان 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 استراتژی پیشنهاد قیمت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت تسویه 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 روشها نیاز به آمارهای بسیار زیادی دارند و البته قادر به مدیریت مسائلی که داده های آن به صورت کیفی توسط کارشناسان بیان می‌شود، نیستند. زیرا، این داده ها بیشتر حالت فازی دارند و در بازارهای تازه تاسیس که آمارهای کافی از رفتار رقبا وجود ندارد، این مشکلات بارزتر است که این مسأله در [۷] مورد بررسی کامل قرار گرفته است.

این مسائل باعث شده است که عده ای 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 گونه ای است که همچنان تحقیق بسیاری را می‌طلبد.

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 مجتمع که در بازار شرکت نمی‌کند و دارای خاصیت ارتجاعی 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 متناسبا هر مصرف کننده باید پیشنهاد خرید قیمت خود را به صورت یک منحنی خطی غیر افزایشی اعلام کند. پس، برای تولیدکننده ها، منحنی مذکور به صورت معادله (1) قابل ارائه است:

$$G_i(P_i) = a_i + b_i P_i \quad (۱)$$

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

$$W_j(L_j) = c_j - d_j L_j \quad (۲)$$

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 گونه ای که همه موارد امنیت سیستم و محدودیتهای فنی در این انتقال انرژی در نظر گرفته شود، است. البته، هدف اصلی حداکثرسازی سود برای همه شرکت کنندگان است.

با صرفه نظرکردن از محدودیتهای فنی شبکه و لحاظ نمودن تابع پیشنهاد خطی برای تولید کنندگان و مصرف کنندگان و هدف حداکثرسازی سود آنها، شرایط بازار منجر به قیمت یکسان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

و شفاف برای همه شرکت کنندگان می‌شود. 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 = (P1,P2…,Pm)T و نیز مجموعه توان درخواستی مصرف کنندگان L = (L1,L2,…,Ln)T است:

$$a_i + b_i P_i = R \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۳)$$

$$c_j - d_j L_j = R \qquad j = 1,2,\dots,n \qquad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{m} P_i = Q(R) + \sum_{j=1}^{n} L_j \qquad (۵)$$

$$P_{min,i} \le P_i \le P_{max,i} \qquad (۶)$$

$$L_{min,j} \le L_j \le L_{max,j} \qquad (۷)$$

R قیمت یکنواخت بازار است که تعیین می‌شود و Q(R) بار مجتمع است که به قیمت بازار بستگی دارد و توسط مدیربازار مشخص و اعلام می‌شود. مقادیر Pmin,i و Pmax,i مقادیر حد بالا و پایین تولید مربوط به ژنراتور i ام است و Lmin,j و Lmax,jمقادیر حد بالا و پایین تقاضای بار مصرف کننده بزرگ jام است. اکنون فرض کنیم که معادله مربوط به بار مجتمع چنین باشد:

$$Q(R) = Q_0 - KR \qquad (۸)$$

که در آن Q_0 یک عدد ثابت و K ضریب ارتجاعی بار نسبت به قیمت است. اگر این بار به صورت کامل غیر ارتجاعی باشد، آنگاه این ضریب را می توان صفر فرض کرد. با صرفه نظر از نامساویهای (۶) و (۷) و با حل معادلات (۳) تا (۵) داریم:

$$R = \frac{Q_0 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{b_i} + \sum_{j=1}^{n} \frac{c_j}{d_j}}{K + \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{b_i} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{d_j}} \qquad (۹)$$

$$P_i = \frac{R - a_i}{b_i} \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۱۰)$$

$$L_j = \frac{c_j - R}{d_j} \qquad j = 1,2,\dots,n \qquad (۱۱)$$

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 Pmin,i شود، باید خروجی آن ژنراتور صفر شده و از گردونه رقابت خارج شود. همچنین زمانی که P_i از مقدار حداکثر خود بیشتر شود، مقدار آن را باید برابر Pmax,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

$$C_i(P_i) = e_i P_i + f_i P_i^2 \qquad (۱۲)$$

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

$$\text{Maximize } F(a_i, b_i) = RP_i - C_i(P_i) \qquad (۱۳)$$

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 (14) نشان می‌دهیم:

$$B_j(L_j) = g_j L_j + L_j L_j^2 \qquad (۱۴)$$

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

$$\text{Maximize } B(c_j, d_j) = B_j(L_j) - RL_j \qquad (۱۵)$$

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

در بازار برق ، غالبا اطلاعات برای دوره بعدی محرمانه 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:

$$Pdf_i(a_j, b_j) = \exp\left\{\frac{-1}{2(1-\rho_j^2)}\left[\left(\frac{a_j-\mu_j^{(a)}}{\sigma_j^{(a)}}\right)^2 - \frac{2\rho_j(a_j-\mu_j^{(a)})(b_j-\mu_j^{(b)})}{\sigma_j^{(a)}\sigma_j^{(b)}} + \left(\frac{b_j-\mu_j^{(b)}}{\sigma_j^{(b)}}\right)^2\right]\right\} \qquad (۱۶)$$

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

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 مسأله 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 مسأله، ثابت نگه داشتن مقادیر a_j و c_j و یافتن مقادیر b_j و d_j با الگوریتم فازی است. نهایتا، نتایج را بر روی شبکه نمونه فرضی با روش ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک 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 [9] به شرح ذیل استفاده شده است.

اگر U یک مجموعه غیر تهی باشد و F یک مجموعه شامل کلیه زیر مجموعه های 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 ∨ نشانه تعیین مقدار حداکثر بین دو عبارت است):

$$\pi(\emptyset) = 0 \quad , \quad \pi(U) = 1 \quad , \quad \pi(A) \geq 0$$
$$\pi(A \cup B) = \pi(A) \vee \pi(B) \qquad (۱۷)$$

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 [10] :

$$E(\varphi) = \int_0^{+\infty} Cr(\varphi \geq r)dr - \int_{-\infty}^{0} Cr(\varphi \leq r)\, d \qquad (۱۸)$$

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

$$Cr(A) = \frac{\pi(A)+N(A)}{2} \ , \forall A \in F \qquad (۱۹)$$

$\pi(A)$، اندازه امکان وقوع پیشامد A بوده و $N(A)$ اندازه لزوم پیشامد A است که در معادله (۲۰) تعریف شده اند:

$$N(A) = 1 - \pi(-A) \ , \quad \pi(A) = 1 - N(-A) \qquad (۲۰)$$

نکته قابل توجه این است که یک رویداد فازی ممکن است اتفاق نیافتد، حتی اگر امکان آن یک باشد و ممکن است رخ دهد، حتی اگر امکان آن صفر باشد. اما رخداد فازی حتما رخ خواهد داد، اگر اندازه اعتبار آن یک باشد و رخ نخواهد داد، اگر اندازه اعتبار آن صفر باشد.

۴- فرمولاسیون فازی مسأله

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.

اکنون 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 $\tilde{a}_j$ و $\tilde{b}_j$ نمایش داد.

$$\varphi = \{\tilde{a}_1, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{a}_{i-1}, \tilde{b}_{i-1}, \tilde{a}_{i+1}, \tilde{b}_{i+1}, \dots, \tilde{a}_n, \tilde{b}_n\} \qquad (۲۱)$$

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:

$$\text{حداکثر امید تابع } F(a_i, b_i, \varphi) \qquad (۲۲)$$

$$R = \frac{Q_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{m} \frac{\tilde{a}_k}{\tilde{b}_k} + \frac{a_i}{b_i} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\tilde{c}_j}{\tilde{d}_j}}{K + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{m} \frac{1}{\tilde{b}_k} + \frac{1}{b_i} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\tilde{d}_j}} \qquad (۲۳)$$

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 حداکثر شود. از لحاظ ریاضی جهت تک بعدی کردن مسأله می‌توان گزینه ای 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:

$$Pdf_i(a_j, b_j) = \mu_i(a_j, b_j) \qquad (۲۴)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

بنـابراین از دیـدگاه شـرکت کننـده i ام امکـان آن کـه ضرایب حضور سایر رقبا مجموعه معادله (۲۵) باشـد، بـا معادلـه (۲۶) مشخص می‌شود.

$$\delta = \{(a_1, b_1), \dots, (a_{i-1}, b_{i-1}), (a_{i+1}, b_{i+1}), \dots, (a_n, b_n)\} \quad (۲۵)$$

$$\mu_i(\varphi) = \mu_i(a_1, b_1) \wedge \dots \wedge \mu_i(a_{i-1}, b_{i-1}) \wedge \mu_i(a_{i+1}, b_{i+1}) \wedge \dots \wedge \mu_i(a_n, b_n) \quad (۲۶)$$

که در معادله (۲۶)، عملگر $\wedge$ 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 معرفـی شـده در مرجـع [۹] استفاده می‌شود.

مجموعـه $\varphi_l = \{a_{l1}, b_{l1}, \dots, a_{ln}, b_{ln}\}$ بـه صـورت تصادفی تولید می‌شود که $l = 1,2, \dots, H$ اسـت و عناصـر ایـن مجموعه بـه انـدازه ε از $\tilde{a}_j$ و $\tilde{b}_j$ فاصـله دارد، و ε عـددی بسـیار کوچک است. همچنـین H عـددی بسـیار بـزرگ بـوده و نشـان دهنده زمان نمونه گیری اسـت. اکنـون انتگـرال معادلـه (۱۸) را می‌توان به صورت مجموع ناپیوسته برای تعداد H جمله نوشت.

برای هر $r \geq 0$، اندازه اعتبار $Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \geq r)$ بـه صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \geq r) = 0.5 \times (max_{l=1,2\dots,H}\{\mu(\varphi_l)|F(a_i, b_i, \varphi_l) \geq r\} + 1 - max_{l=1,2\dots,H}\{\mu(\varphi_l)|F(a_i, b_i, \varphi_l) < r\}) \quad (۲۷)$$

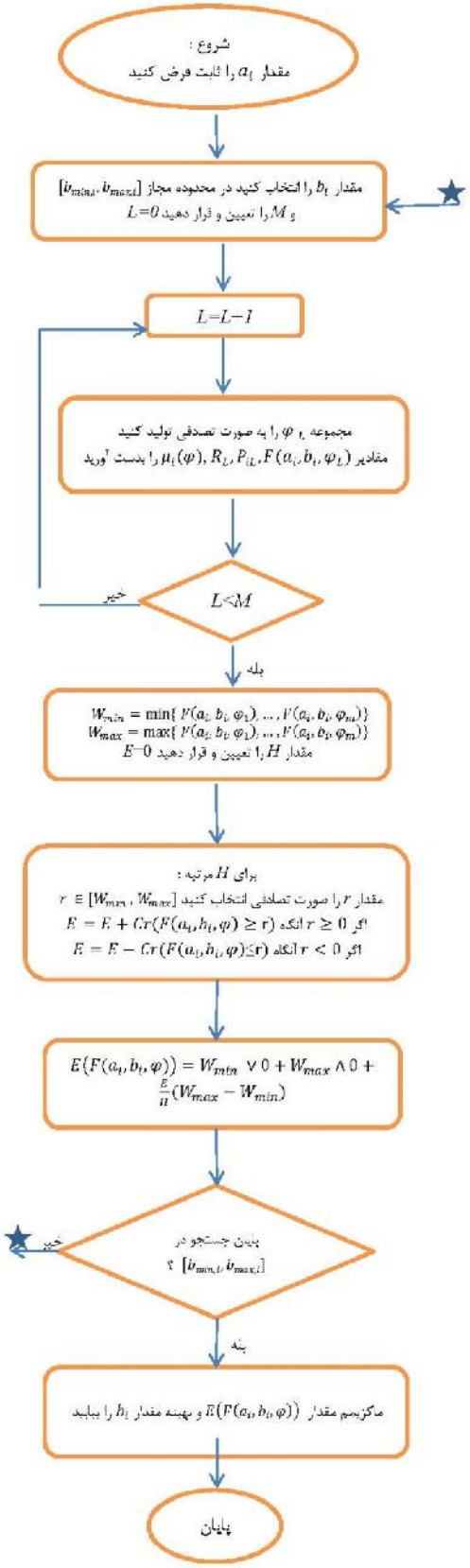
و برای هر $r < 0$ انـدازه اعتبـار $Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \leq r)$ به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Cr(F(a_i, b_i, \varphi) \leq r) = 0.5 \times (max_{l=1,2\dots,H}\{\mu(\varphi_l)|F(a_i, b_i, \varphi_l) \leq r\} + 1 - max_{l=1,2\dots,H}\{\mu(\varphi_l)|F(a_i, b_i, \varphi_l) > r\}) \quad (۲۸)$$

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 بـار مجتمـع و دو مصرف کننده بزرگ برق را در نظر می‌گیریم. اطلاعات مربوط به شرکت کنندگان در جدول یک آمده است. بـرای بـار مجتمـع نیز Qo برابر ۳۰۰ و ضریب الاستیسیته یا ضریب ارتجاعی آن K برابر ۵ است.



شکل (۱): الگوریتم حل فازی مسأله

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

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	مصرف کننده
200	0	0.04	30	7
150	0	0.03	25	8

۶-۱- حالت اطلاعات متقارن

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 می توان با استفاده از اطلاعات دوره های 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)*	مصرف 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 i ام و یا مصرف کننده j ام ($i,j\neq p$) مطابق معادله (۱۶) بوده و سایر پارامترهای توزیع آن به صورت معادلات (۲۹) و (۳۰) تخصیص داده می‌شود.

$$\mu_i^{(a)} = \frac{a_i^{min}+a_i^{max}}{2}, \qquad \mu_i^{(b)} = \frac{b_i^{min}+b_i^{max}}{2},$$
$$\sigma_i^{(a)} = 0.1 \times \mu_i^{(a)}, \sigma_i^{(b)} = 0.1 \times \mu_i^{(b)},$$
$$\rho_i = -0.1 \qquad (۲۹)$$

$$\mu_i^{(a)} = \frac{a_i^{min} + a_i^{max}}{2},$$
$$\mu_i^{(b)} = \frac{b_i^{min} + b_i^{max}}{2},$$
$$\sigma_i^{(a)} = 0.1 \times \mu_i^{(a)}, \quad \sigma_i^{(b)} = 0.1 \times \mu_i^{(b)},$$

$$\rho_i = -0.1 \qquad (۳۰)$$

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 $\mu_i^{(a)}$ قرار داده و بعد مسأله را طبق الگوریتم فازی بیان شده و با استفاده از نرم افزار متلب حل می‌شود.

این مسأله به چهار روش مختلف حل می‌شود. روش اول مبتنی بر مقدار امید فازی که الگوریتم آن در این مقاله بیان شد، بوده و آن را منبعد 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. نهایتا 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

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

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

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

در مرحله بعدی با استفاده از نتایج بدست آمده و معادلات (۹) و (۱۰) و (۱۱) می توان 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.

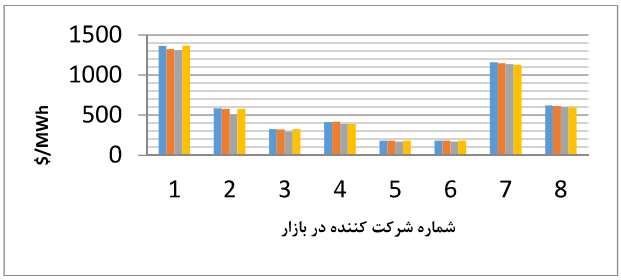
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

جدول (۵): برآورد سود هر شرکت کننده ($/MWh) و قیمت بازار($/MWh) به چهار روش

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

همانطور که در جدول (5) ملاحظه می‌شود، 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 ژنتیک و بنفش نمایشگر روش مونت کارلو است).

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



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

۶-۲- حالت اطلاعات نامتقارن

در این حالت موردی 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 می‌کند، در حالی که سایر رقبا با مفروضات معادلات (۲۸) و (۲۹) مانند حالت قبل در بازار شرکت می کنند.

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

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

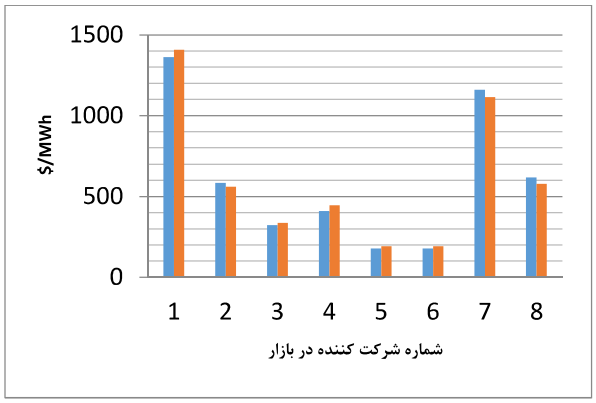
$$\sigma_i^{(a)} = 0.1 \times \mu_i^{(a)} \ , \sigma_i^{(b)} = 0.1 \times \mu_i^{(b)}, \rho_i = -0.1 \qquad (۳۱)$$

در این حالت به دنبال مقایسه روشهای بهینه سازی نیستیم و فقط قصد نمایش اهمیت تخمین حضور رقبا را بیان می‌کنیم. 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 می‌کنیم. 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 نا متقارن

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016



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 اشتباه، 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 مصرف 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 می یابد.

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 می شود.

۷- بررسی تاثیر خاصیت ارتجاعی بار

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

جدول (۷): نتایج حل مسأله برای بار غیر ارتجاعی *K=0*

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

جدول (۸): نتایج حل مسأله برای بار ارتجاعی *K=15*

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

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

با بررسی شکل و جداول مربوط به این تحلیل، مشخص است که هنگامیکه بار غیر ارتجاعی است، مقدار سود ژنراتورها زیادتر از حالتی است که بار غیر ارتجاعی است و وقتی بار ارتجاعی می‌شود، مقدار سود مصرف کننده بالا می‌رود. لذا می توان نتیجه گرفت که سود ژنراتورها با افزایش مقدار ارتجاعیت بار کاهش می‌یابد و عکس این موضوع در مورد مصرف کنندگان صادق است. به بیانی دیگر سود تولید کنندگان در بازار برق توسط خصوصیت ارتجاعی 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 تخمین 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 مسأله را با سه روش حل عددی همان مسأله مقایسه شد و برتری نسبی آن را در نتایج ملاحظه شد. همچنین برای همان شبکه، تاثیر تخمین نادرست و تخمین درست را به صورت عددی و با نامتقارن فرض کردن تخمین 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

نویسندگان این مقاله از توجه اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران و داوران محترم که با نظرات ارزشمندشان به 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'. 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. Shaikhalishahi: '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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-18]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.5.9]