



KNO-1004-4203

تعیین استراتژی بهینه واحدهای تولید بر پایه قدرت بازار

مریم رمضانیان لنگرودی، سید مازیار میرحسینی مقدم، بهنام علیزاده

گروه مهندسی برق، واحد لاهیجان

دانشگاه آزاد اسلامی

لاهیجان، ایران

ramezanianmariam9@gmail.com

m.mirhosseini@liau.ac.ir

behnam_alizadeh@liau.ac.ir

چکیده — در بازار انرژی الکتریکی، قیمت مهم‌ترین سیگنال برای همه واحدهای تولید (GenCos) می‌باشد. هر GenCo به دنبال پیشنهاد قیمتی است که سود خود را حداکثر سازد. از این رو در این مقاله، یک الگوریتم آموزشی نوین بر پایه هوشمندسازی نحوه قیمت‌دهی GenCos، به منظور یادگیری استراتژی بهینه GenCos و رسیدن به نقطه تعادل نش ارائه می‌گردد. در این میان بهره‌بردار مستقل بازار (ISO) نیز با اعمال قیود شبکه تعادل را برقرار می‌سازد. به منظور بررسی تأثیر استراتژی اتخاذ شده بر وضعیت رقابت بازار، از شاخص ضریب آنتروپی استفاده کردیم. مقدار این شاخص در پایان کار نشان می‌دهد که GenCosها توانسته‌اند در حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال نسبت به حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال، سود خود را بیشتر و بازار را انحصاری‌تر کنند. نتایج شبیه‌سازی کارآیی الگوریتم یادگیری پیشنهادی را نشان می‌دهد. شبکه مورد مطالعه، برگرفته شده از بازار Nord Pool می‌باشد.

واژه‌های کلیدی — بازار برق، استراتژی قیمت‌دهی، قدرت بازار، پرداخت براساس پیشنهاد قیمت، تعادل نش

1. مقدمه

از اوایل 1980 بیشترین کوشش برای تجدیدساختار صنعت برق انحصاری، با اهدافی نظیر رقابت عادلانه و بهبود بازده اقتصادی صورت پذیرفته است. در سال‌های اخیر با ورود پدیده تجدیدساختار به سیستم‌های قدرت، بهره‌برداری از این سیستم‌ها دچار دگرگونی شده است و آنچه که اکنون جای بهره‌برداری سنتی را گرفته، در قالب مکانیزم قدرتمندی به نام بازار برق است که با ایجاد بسترهای جدید، سیستم‌های قدرت را به تجربه بهره‌برداری نوین نائل کرده است. اما با تمام تدابیری که در بازارهای تجدیدساختار یافته در نظر گرفته می‌شود، باز هم بنگاه‌هایی وجود دارند که بسته به شرایط خاصی که دارا می‌باشند، از قدرت بازار³¹ برخوردارند زیرا شرکت‌کنندگان بازار با بکارگیری استراتژی‌های قدرت بازار قیمت را از سطح رقابتی افزایش و در نتیجه، رفاه اجتماعی و کارایی بازار را کاهش می‌دهند. بنابراین بهره‌بردار مستقل سیستم³² (ISO) باید بتواند در شرایطی که عملاً قدرت بازار وجود دارد، رقابتی ایمن و بهره‌برداری اقتصادی از بازار برق را تضمین کند. از نقطه نظر اقتصادی قدرت بازار به معنای توانایی جایجایی (بالا بردن) قیمت‌ها از سطح رقابتی به منظور رسیدن به سوددهی بالاتر است [1]. مرجع [2] به بررسی جامعی بر شاخص‌های مختلف قدرت بازار که در تحلیل قدرت بازار استفاده می‌شوند و همچنین به ارزیابی تحقیقاتی در زمینه قدرت بازار پرداخته است. استراتژی پیشنهاد قیمت واحدهای تولید³³ (GenCos)، ترکیبی از پیشنهاد قیمت و میزان تولید می‌باشد که سهم مشارکت واحد در بازار را مشخص می‌نماید. پیشنهاد قیمت، تأثیری مستقیم بر سود اقتصادی GenCos داشته و به رفتار سایر شرکت‌کنندگان و شرایط بهره‌برداری نیز بستگی دارد. مهمترین مسأله برای هر GenCo در بازار رقابتی مسأله پیشنهاد قیمت است که این مسأله به نحوه پیشنهاد قیمت، استراتژی مدیریت ریسک آنها و نوسانات قیمت، مکانیزم‌های بهره‌برداری از واحدها و قوانین حاکم در بازارها بستگی دارد. هدف مسئله پیشنهاد قیمت پیدا کردن قیمت بهینه و تعیین استراتژی مناسب جهت رقابت با دیگر تولیدکنندگان می‌باشد [3]. به طور کلی، سه روش برای استراتژی پیشنهاد قیمت بهینه از دیدگاه تولیدکنندگان وجود دارد:

- (1) روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی قیمت بازار
- (2) روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی قیمت رقبا
- (3) روش‌های مبتنی بر تئوری بازی³⁴ و الگوریتم‌های هوشمند

همچنین از روش‌های شبیه‌سازی بازار و تحلیل تجربی نیز برای رفتار پیشنهاد قیمت استراتژیک استفاده می‌شود. اما این روش‌ها، روش‌های سیستماتیک برای پیشنهاد قیمت نمی‌باشند. روش اول بر اساس تخمین قیمت تسویه بازار³⁵ (MCP) است به این طریق که قدری پایین‌تر از MCP پیشنهاد دهند. لازم به ذکر است که برای پیش‌بینی قیمت براساس مدل، به صورتی که همه تولیدکنندگان بازار حداکثر رضایت ممکن را داشته باشند، متداول‌ترین مفهوم شناخته شده نقطه تعادل نش محسوب می‌شود. نقطه تعادل نش نقطه پایداری است که هر تخطی از آن منجر به کاهش سود واحد تولیدی خاصی می‌گردد. روش دوم بازیهای چند انحصاری مانند مدل Cournot، Bertrand، مدل Stackelberg و مدل تابع تولید را دنبال می‌کند. روش سوم از تئوری بازی برای شبیه‌سازی رفتار پیشنهاد قیمت GenCos و توسعه راهکارهای ارائه پیشنهاد قیمت در نقطه تعادل نش³⁶ استفاده می‌کند [4-5]. مرجع [6] راه‌حلی برای محاسبه تعادل نش چندین شرکت‌کننده تحت قیود انتقال بازار برق ارائه داده است که به طور کلی برای انواع شرایط بازی در بازارهای برق کاربرد دارد. مرجع [7] توضیحات جامعی مبنی بر روش‌های مدل‌سازی استراتژی قیمت‌دهی واحدهای تولید ارائه داده است. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نحوه ارائه پیشنهاد قیمت در بازار برق، فرآیند پرداخت این بازارها یا روش‌های قیمت‌گذاری می‌باشد. هدف از ارائه یک پیشنهاد قیمت استراتژیک حداکثرسازی سود است که تابع سود مستقیماً از تابع درآمد متأثر بوده و بنابراین فرآیند پرداخت یک بازار بر تابع هدف مسأله بهینه‌سازی اثر محسوسی دارد. دو نوع مکانیزم تسویه یا فرآیند پرداخت متداول در بازار برق اشتراکی وجود دارد [8]:

³¹ Market Power

³² Independent System Operator

³³ Generation Companies

³⁴ Game Theory

³⁵ Market Clearing Price

³⁶ Nash Equilibrium

1) روش قیمت گذاری پرداخت مطابق پیشنهاد³⁷: براساس قیمت پیشنهادی، پرداختی به واحدها صورت می گیرد. 2) روش قیمت گذاری یکنواخت³⁸: پرداختی به واحدها براساس آخرین قیمت پذیرفته شده یا اولین قیمت برگشت داده شده می باشد. مرجع [9] یک روش تحلیلی به منظور استراتژی قیمت دهی GenCos، تحت قیود انتقال در بازار ساعت پیش ارائه می دهد و برای حل مسأله پیشنهادی از مدل تعادل تابع عرضه³⁹ و روش برنامه ریزی چندسطحی⁴⁰ استفاده کرده است. مرجع [10] به منظور استراتژی بهینه قیمت دهی واحدهای تولید از روش برنامه ریزی خطی پارامتری⁴¹ استفاده کرده است و همچنین گفته شده است که روش پیشنهادی در حالت اطلاعات ناقص نیز عمومیت دارد. در مرجع [11] هدف، ارائه پیشنهاد قیمت بهینه در راستای بیشینه کردن سود نیروگاه های بادی در شرایط بازار و عدم قطعیت های سرعت باد است و یک روش احتمالاتی برای تخمین سود واحدهای تولید بادی⁴² با در نظر گرفتن پراکندگی جغرافیایی و عدم قطعیت ناشی از سرعت باد و قیمت بازار ارائه شده است.

هدف اصلی این مقاله ارائه راهکاری به منظور استراتژی بهینه قیمت دهی GenCos، به منظور حداکثرسازی سود و رسیدن به نقطه تعادل نش با انتخاب بهترین راهبرد پیشنهاد قیمت است.

در مقاله پیش رو، ابتدا در بخش 2 روش پیشنهادی معرفی می گردد. در بخش 3، شبیه سازی ها نشان داده می شوند و در بخش 4 نتایج حاصل از ملاحظات آورده می شود و پیشنهادات آینده مطرح می شود.

2. مدل سازی بهینه سازی پیشنهاد قیمت با اطلاعات کامل

2.1. مسأله پخش بار بهینه

مسأله ارائه پیشنهاد قیمت تولید، یک مسأله با دو سطح بهینه سازی است که یک سطح آن مسأله پخش بار بهینه نام دارد. قیود شبکه که توسط ISO لحاظ می شود شامل:

$$\begin{aligned} e^T(G - D) &= 0 \\ 0 &\leq G \leq G_{\max} \\ -P_1^{\min} &\leq PTDF(G - D) \leq P_1^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه بالا G بردار مشخص کننده میزان تولید هر یک از واحدها است که بردار متغیرهای مسأله بهینه سازی است. D میزان تقاضا و ماتریس $PTDF$ ، ماتریس ضرایب توزیع انتقال توان است و براساس تحلیل حساسیت در مدل پخش بار DC مدل می شود [12]. در معادله (1) قید اول بکار گرفته شده، مبین برابری تولید با مصرف، قید دوم مبین محدودیت های بهره برداری و قید سوم مبین محدودیت های انتقال است [13]. با توجه به استراتژی های مختلفی که عرضه کننده های توان انتخاب می کنند، بردار G به عنوان جواب مسأله

³⁷ Pay as bid pricing method (PAB)

³⁸ Uniform pricing method

³⁹ supply function equilibrium

⁴⁰ Bilevel programming (BLP)

⁴¹ Parametric linear programming

⁴² Wind Genco (WGenco)

بهینه‌سازی بالا بدست می‌آید. بنابراین با توجه به استراتژی‌های مختلف پیشنهاد قیمت، میزان تولید و سهم عرضه‌کننده‌های توان بازار تغییر خواهد کرد.

2.2. محاسبه قدرت بازار و بررسی وضعیت رقابت

در تحلیل قدرت بازار، دسته‌ای از شاخص‌ها وجود دارند که با عنوان شاخص‌های ارزیابی رقابتی بودن بازار شناخته می‌شوند. در این نوع از شاخص‌ها فارغ از نوع جایگاه و رفتار هر یک از بازیگران بازار، به ساختار کلی بازار پرداخته می‌شود. شاخص ضریب آنتروپی مثالی از این دسته از شاخص‌هاست. معیار آنتروپی به عنوان گزینه‌ای برای واریانس به کار برده می‌شود. در واقع آنتروپی معیار معکوس تمرکز است. هنگامی که آنتروپی افزایش یابد، تمرکز کاسته می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^N S_i \log\left(\frac{1}{S_i}\right) \quad (2)$$

در رابطه بالا S_i سهم بازار و N تعداد واحدهای تولید است. مقدار این شاخص برای بازار تک انحصاری برابر صفر است و با رقابتی شدن بازار به طور غیرخطی افزایش می‌یابد [14].

2.3. تعیین نقطه تعادل در بازار با فرآیند پرداخت مطابق پیشنهاد قیمت در حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال

در مرجع [15] نحوه محاسبه تعادل نش در فرآیند پرداخت مطابق پیشنهاد در بازارهای برق در حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال بیان شده است. در روابط زیر b_i و a_i ضرایب پیشنهاد قیمت بازیگران، α_i قیمت پیشنهادی هر شرکت‌کننده، λ قیمت بازار، Q_{si} میزان تولید عرضه‌کننده‌های بازار و Q_d کل بار است. مطابق با این مرجع تابع هزینه و درآمد از روابط زیر بدست می‌آید:

$$(\cos t)_i = a_i Q_{si} + \frac{b_i}{2} Q_{si}^2 \quad (3)$$

$$(rev)_i = \alpha_i Q_{si} + (b_i / 2) Q_{si}^2 \quad (4)$$

تعادل در بازار با فرآیند پرداخت مطابق پیشنهاد برابر است با:

$$\lambda = \frac{Q_d + \sum_j \frac{\alpha_j}{b_j}}{\sum_j \frac{1}{b_j}} \quad (5)$$

راهبرد بهینه برای شرکت‌کننده i ام در بازی بدون قید توسط روابط زیر اتخاذ می‌شود:

$$\alpha_i = A_i + B_i \sum_{j \neq i} \frac{\alpha_j}{b_j} \quad (6)$$

$$A_i = \frac{Q_d + a_i \sum_{j \neq i} \frac{1}{b_j}}{2 \sum_{j \neq i} \frac{1}{b_j}} \quad (7)$$

$$B_i = \frac{1}{2 \sum_{j \neq i} \frac{1}{b_j}} \quad (8)$$

بنابراین معادله (6) n معادله می‌دهد که می‌توانند بصورت ماتریس $M \cdot \alpha^* = A$ نوشته شوند که بالانویس α^* روی α ها نشان می‌دهد که آنها یک نقطه نش را تشکیل می‌دهند.

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{B_1}{b_2} & -\frac{B_1}{b_3} & \dots & -\frac{B_1}{b_n} \\ -\frac{B_2}{b_1} & 1 & -\frac{B_2}{b_3} & \dots & -\frac{B_2}{b_n} \\ -\frac{B_3}{b_1} & -\frac{B_3}{b_2} & 1 & \dots & -\frac{B_3}{b_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{B_n}{b_1} & -\frac{B_n}{b_2} & -\frac{B_n}{b_3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_1^* \\ \alpha_2^* \\ \alpha_3^* \\ \vdots \\ \alpha_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_{Si} = (\lambda - \alpha_i) / b_i \quad (10)$$

2.4. نحوه قیمت‌دهی پیشنهادی واحدهای تولید در حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال

در سیستم‌های تجدیدساختار یافته، تقاضای مصرف‌کنندگان از طریق یک بازار تأمین می‌گردد و قیمت تسویه بازار، پس از دریافت پیشنهاد قیمت **Gencos** توسط **ISO** تعیین می‌شود. حال این سؤال اساسی برای شروع فرآیند یادگیری قیمت‌دهی **Gencos** مطرح می‌شود که تولیدکنندگان بر چه اساس قیمت دهند، پیشنهاد قیمت خود را در چه بازه‌ای تغییر دهند یا به عبارتی بازیگران بازنده تا چه میزان پیشنهاد قیمت خود را کاهش و افراد برنده تا چه میزان افزایش دهند که متضرر نگردند و در نهایت اینکه، آیا می‌توان با ارائه پیشنهاد قیمت مناسب به تعادل نش رسید. جهت پاسخگویی به این سؤالات مفاهیم زیر را بررسی می‌کنیم:

تابع هزینه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(\text{cost})_i = a_i P_{Si}^2 + b_i P_{Si} + c_i \quad (11)$$

در تکرار اول فرض می‌کنیم که با مشتق‌گیری از رابطه تابع هزینه، می‌توان به قیمت پیشنهادی هر بازیگر در نقطه شروع رسید [16]:

$$(\text{price}_i) = 2a_i P_{Si} + b_i \quad (12)$$

حال بسته به مکانیزم تسویه بازار درآمد را محاسبه می‌کنیم، درآمد در فرآیند پرداخت مطابق پیشنهاد برابر است با:

$$(\text{rev}_i) = (\text{price}_i) \cdot P_{Si} = 2a_i P_{Si}^2 + b_i P_{Si} \quad (13)$$

تابع سود تفاوت بین درآمد و هزینه خواهد بود، با فرض صفر بودن c_i داریم:

$$\pi_i(PAB) = a_i P_{Si}^2 \quad (14)$$

شروع فرآیند یادگیری در روش پیشنهادی براساس مکانیزم **PAB** به این صورت است که هر **GenCo** پیشنهاد قیمت خود را برای **ISO** ارسال می‌کند و سپس **ISO** تسویه بازار را بر اساس قیود کلی شبکه و رفتار قیمت‌دهی سایر بازیگران انجام و تعادل را برقرار می‌سازد. با توجه به عدم قطعیتی که برای ضرایب a_i و b_i از دیدگاه هیأت تنظیم بازار برق در نظر گرفته شده است، در حالت پایه متناظر با هر زوج (a_i, b_i) بردار تولید **P** از فرآیند تسویه بازار قابل محاسبه است و از روی میزان تولید، سود هر بازیگر مطابق با رابطه (14) محاسبه می‌شود. برای درک وضعیت میزان سود هر بازیگر مانند یک انسان تحلیل منطقی می‌کنیم یعنی در مرحله اول به کم یا زیاد بودن سود فکر نمی‌کنیم چون در ابتدا همه افراد خواستار افزایش قیمت و در نتیجه رسیدن به سود بیشتر می‌باشند و تنها یک عده

قیمت خود را افزایش نمی‌دهند و آن هم افرادی هستند که تولیدی نداشته و توان عبوری‌شان صفر است. این دسته از افراد متوجه می‌شوند که پیشنهاد قیمت‌شان زیاد بوده و باید قیمت کمتری پیشنهاد دهند. بنابراین افراد بازنده در بازار ناچار هستند استراتژی قیمت‌دهی خود را تغییر دهند و این تغییر را از طریق کم کردن b_i' اعمال کردیم. در نتیجه متغیر استراتژیک ما b_i' است و رابطه (14) در ادامه، با فرض صفر بودن c_i به شکل زیر تغییر خواهد کرد:

$$\pi_i(PAB) = a_i P_{Si}^2 + (b_i' - b_i) P_{Si} \quad (15)$$

افراد بازنده در بازار با کم کردن b_i' و ثابت نگه داشتن a_i سعی می‌کنند برنده بازار شوند. ولی کم شدن b_i' باید به حدی باشد که منجر به منفی شدن سود نگردد یعنی:

$$a_i P_{Si}^2 + (b_i' - b_i) P_{Si} \geq 0 \quad (16)$$

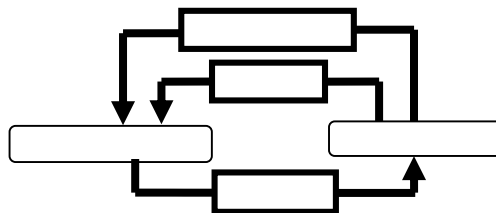
همچنین باید توجه داشت که یک رابطه توازن بین کم شدن b_i' و زیاد شدن میزان توان تولیدی وجود دارد یعنی کم شدن آن نباید به حدی باشد که از محدوده ماکزیمم توان تولیدی واحدها تجاوز کند. با ساده‌سازی رابطه بالا به مقدار زیر برای پیشنهاد دادن حداقل مقدار ممکن برای b_i' رسیدیم:

$$b_{\min}' \geq b_i - a_i P_i^{\max} \quad (17)$$

براساس رابطه بالا همه واحدهای بازنده در بازار مجاز هستند که b_i' خود را حداکثر تا این مقدار کاهش دهند چون کمتر از این مقدار سبب می‌شود، هزینه بیشتر از درآمد شده و در نتیجه سود منفی گردد. از طرفی افراد برنده در بازار نیز تلاش می‌کنند که سود خود را افزایش دهند. برای این دسته از افراد یک سقف برای قیمت پیشنهادی واحدهای تولید در نظر گرفته می‌شود که پیشنهاد قیمت‌شان از آن مقدار تجاوز نکنند. براساس روش پیشنهادی یک بازیگر تنها از اطلاعات خود فیدبک می‌گیرد هرچند که می‌داند سایرین در تکرارهای مختلف استراتژی خود را تغییر می‌دهند. بنابراین، برای یک بازیگر خاص توجه تنها معطوف به اطلاعات خود بازیگر است و نه سایر بازیگران که اطلاعات آنها در دسترس نیست.

2.5. یادگیری تقویتی

ایده اصلی برای رسیدن به تعادل نش **Genco** ها، از الگوریتم یادگیری تقویتی گرفته شده است. در روش یادگیری هر عامل از طریق سعی و خطا با محیط تعامل کرده و یاد می‌گیرد تا عملی بهینه را برای رسیدن به هدف انتخاب نماید. یادگیری تقویتی راهی برای آموزش عامل‌ها برای انجام یک عمل از طریق دادن پاداش و تنبیه است. جستجو براساس سعی و خطا انجام می‌شود. یادگیر سعی می‌کند اعمالی را یاد بگیرد که بیشترین پاداش را تولید می‌کنند. ساختار کلی مسأله یادگیری تقویتی در شکل 1 آورده شده است:

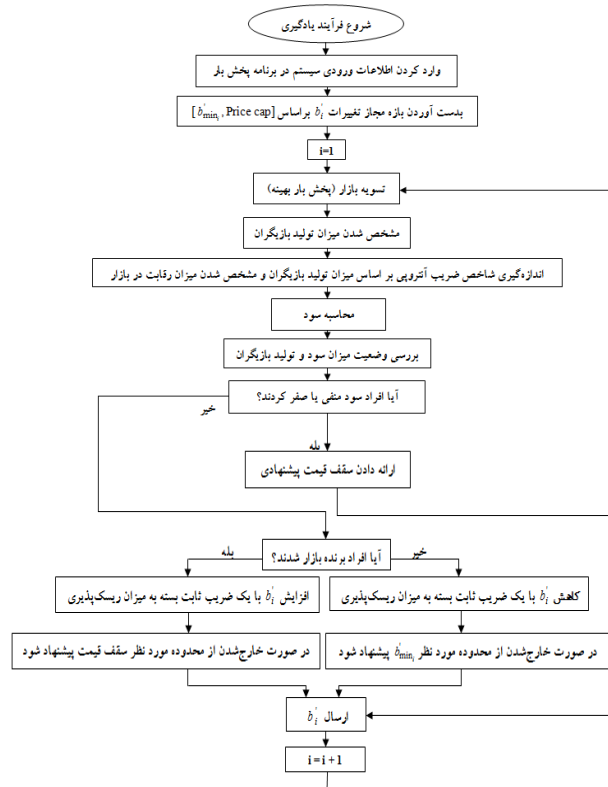


شکل 1: تعامل عامل و محیط در الگوریتم یادگیری تقویتی

2.6. هوشمندسازی نحوه ساخت قیمت

در این قسمت به بیان راهکارهایی برای هوشمند کردن قیمت پیشنهادی بازیگران می‌پردازیم که عبارتند از: (1) بازیگران را به 3 دسته محتاط، نرمال و ریسک‌پذیر تقسیم کردیم و بسته به نوع بازیگر دو ضریب ثابت برای افزایش یا کاهش قیمت پیشنهادی آنها در نظر گرفتیم و بر اساس اینکه آن بازیگر چقدر ریسک‌پذیر باشد، ضریب این افزایش یا کاهش را متفاوت گرفتیم. (2) برای آن دسته از بازیگران که در جریان بازی سود منفی می‌کنند، پیشنهاد کردیم که سقف مقدار b' را به عنوان قیمت پیشنهادی ارائه دهند که در این

صورت تولید نکنند و متضرر نگردند. استفاده از راهکار هوشمندسازی به رفتار معقول تر بازیگران و رسیدن به تعادل نش کمک می کند. بررسی وضعیت روند تغییرات میزان سود و تولید بازیگران نشان دهنده برتری این روش در همگرایی به نقطه تعادل نش می باشد. روند ناما الگوریتم پیشنهادی در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2: فلوچارت روش پیشنهادی

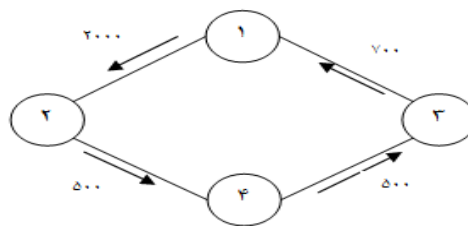
3. شبیه سازی

در این بخش، روش پیشنهادی را با استفاده از سیستم تست مورد بررسی قرار دادیم. شبکه مورد مطالعه، یک سیستم 4 ناحیه ای و متشکل از 12 واحد تولیدی است که برگرفته شده از مدل Nord Pool می باشد و در مطالعه فقط شبکه انتقال بین ناحیه ای مدل سازی می شود که در شکل 3 نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به GenCos در جدول 1 آورده شده است. میزان تقاضا برای نواحی نشان داده شده در شکل 3 به ترتیب برابر 2300، 4000، 3000 و 1800 مگاوات است [16]. جدول 2، وضعیت قیمت و تولید GenCos را در شرایطی که قیمت گذاری بر اساس PAB است، در حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال نشان می دهد؛ مطابق با این جدول مشاهده می شود که شرکت کنندگان در این حالت با ضریب آنتروپی 1.0446 به تعادل نش رسیده اند. محدوده بالا قیمت دهی GenCos به دلیل رسیدن به سوددهی بالاتر در PAB می باشد. با توجه به مقادیر قیمت و تولید هر یک از شرکت کنندگان می توان دریافت که هر شرکت کننده با قیمت پیشنهادی کمتر، تولید بیشتری داشته است.

جدول 1: اطلاعات واحدهای تولید

تحت تملک	واحد تولید	مینیمم ظرفیت (MW)	ماکزیمم ظرفیت (MW)	$F = aP^2 + bP + c$		
				a	b	c
1	1	0	500	0.004	10	0

1	2	0	500	0.006	15	0
1	3	0	1000	0.008	50	0
2	4	0	2500	0.005	12	0
2	5	0	2000	0.006	15.5	0
2	6	0	2000	0.007	15.5	0
2	7	0	1500	0.008	21.5	0
3	8	0	1500	0.006	16	0
3	9	0	1500	0.005	14	0
3	10	0	1500	0.004	13	0
4	11	0	700	0.006	16	0
4	12	0	2000	0.009	31	0



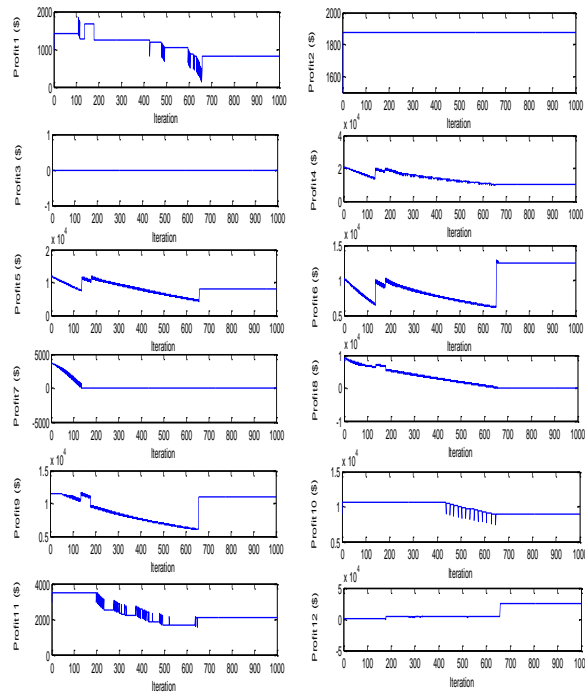
شکل 3: ساختار شبکه سیستم مورد مطالعه

جدول 2: نتایج حاصل از تعادل نش بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال

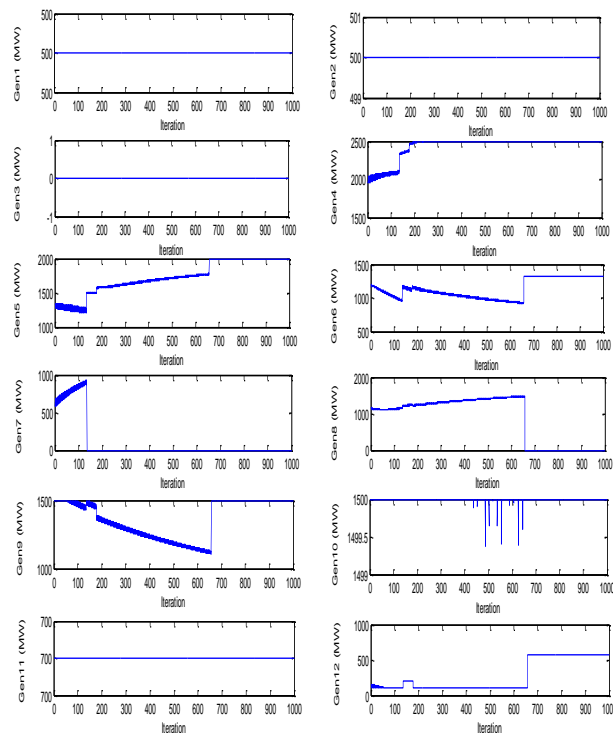
واحد تولید	نتایج حاصل از تعادل نش در حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال برای سیستم مورد مطالعه		ضریب آنتروپی
	قیمت α (\$/MWh)	تولید (MW)	
1	37.6715	1520.7	1.0446
2	39.4865	938.1487	
3	52.8708	285.3510	
4	38.2697	1186.6	
5	39.7260	928.1688	
6	39.5818	800.7254	
7	42.3813	613.1486	
8	39.9655	918.1890	
9	39.2190	1139.2	
10	39.0751	1432.9	
11	39.9655	918.1890	
12	46.9284	418.7131	

شکل‌های 4 و 5 وضعیت میزان سود و تولید GenCos را با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال نشان می‌دهد؛ نتایج نشان‌دهنده این است که همه عامل‌ها بعد از یک تکرار معقول از اجرای سیستم توانسته‌اند طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی به تعادل نش برسند. نتایج GenCos در حالت رسیدن به تعادل، طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی در جدول 3 آورده شده است؛ مطابق با این جدول، بازیگران 3، 7 و 8 چون واحدهای گرانی هستند، بازنده بازار شدند و پیشنهاد قیمت خود را در سقف قیمت پیشنهادی که 70 (\$/MWh) در نظر گرفته شده، قرار دادند تا به این طریق پاسخگوی هزینه حدی خود باشند. شرکت‌کنندگان 1، 2، 4، 5، 9، 10، 11 واحدهای به نسبت ارزانی هستند ولی در حداکثر ظرفیت مجاز تولید خود قرار گرفته‌اند. بنابراین با اتخاذ استراتژی بهینه قیمت‌دهی توانستند به حداکثر سود ممکن که می‌توانند در این حالت داشته باشند، برسند. واحدهای 6 و 12 با اینکه در سقف ظرفیت تولید خود قرار نگرفته‌اند ولی با توجه به اینکه واحدهای گرانی هستند امکان تولید بیشتر به آنها داده نشده است. شکل 6 وضعیت رقابت در بازار را نشان می‌دهد؛ مطابق با این شکل GenCos با استفاده از روش یادگیری تقویتی و تغییر متغیر استراتژیک b' توانسته‌اند آموزش ببینند و سود خود را بیشتر کنند. با مقایسه مقدار شاخص آنتروپی در جداول 2 و 3 و کمتر شدن این شاخص رقابتی در جدول

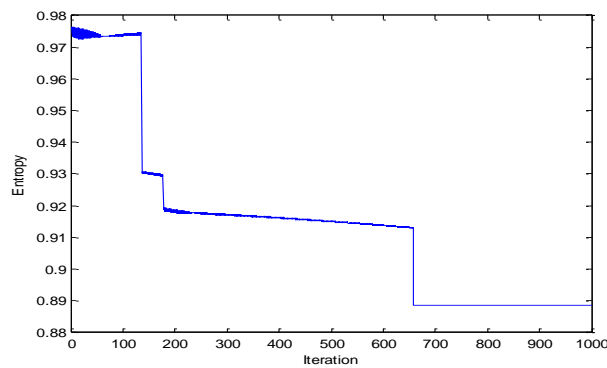
3 می‌توان دریافت که GenCos توانسته‌اند نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال سود خود را بیشتر و بازار را انحصاری‌تر کنند.



شکل 4: نمودارهای سود بازیگران در حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال طبق روش پیشنهادی



شکل 5: نمودارهای تولید بازیگران در حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال طبق روش پیشنهادی



شکل 6: نمودار وضعیت رقابت بازار در حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال طبق روش پیشنهادی

جدول 3: نتایج حاصل از تعادل نش با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال طبق روش پیشنهادی

واحدهای تولید	نتایج حاصل از تعادل نش با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال طبق روش پیشنهادی برای سیستم مورد مطالعه				ضریب آنروپی
	قیمت پیشنهادی b' ($\$/MWh$)	قیمت تسویه بازار براساس PAB ($\$/MWh$)	تولید (MW)	سود (\$) (\$)	
1	9.6204	13.6204	500	810.2207	0.8885
2	15.75	21.75	500	1875	
3	70	70	0	0	
4	3.5883	28.5883	2500	10221	
5	7.5187	31.5187	2000	8037.4	
6	15.6042	34.2042	1328.6	12494	
7	70	70	0	0	
8	70	70	0	0	
9	13.8565	28.8565	1500	11035	
10	12.9157	24.9157	1500	8873.5	
11	14.7496	23.1496	700	2064.7	
12	69.2792	79.5649	571.4286	24813	

4. نتیجه گیری

براساس تعریف قدرت بازار، یک رابطه مستقیم بین قدرت بازار و قیمت برق وجود دارد. از این رو هدف در این مقاله، ارائه پیشنهاد قیمت بهینه در راستای بیشینه کردن سود GenCos و رسیدن به تعادل نش است. مقدار و تغییرات شاخص آنروپی نشان می‌دهد که GenCos طبق روش پیشنهادی توانسته‌اند در حالت با در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن محدوده مجاز تولید و انتقال سود خود را بیشتر و بازار را انحصاری‌تر کنند. همچنین بازیگران بازار طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی، آموزش یافتند که پیشنهاد قیمت خود را تا چه حد تغییر دهند و از آن حد به بعد متوجه می‌شوند که تغییر رفتار خود با توجه به ساختار رفتار سایر بازیگران منجر به کاهش سود آنها خواهد شد. در واقع با رسیدن به نقطه تعادل نش تمایلی برای خروج از این نقطه تعادل را ندارند. برای ادامه کار این مقاله پیشنهاد می‌گردد که تأثیر عدم قطعیت پیش‌بینی بار در تغییر رفتار بازیگران و رسیدن به نقطه تعادل نش مد نظر قرار گیرد.

منابع

- [14] M. B. Nappu, R. C. Bansal and T. K. Saha, "Market power implication on congested power system: A case study of financial withheld strategy" *Elect. Power and Energy Systems*, pp. 408-415, 2013.
- [15] S. P. Karthikeyan, I. J. Raglend and D.P. Kothari, "A review on market power in deregulated electricity market" *Elect. Power and Energy Systems*, pp. 139-147, 2013.
- [16] سید علیرضا مزداور، حبیب قراگوزلو، " تأثیر مدلسازی پرداخت هزینه روشن و خاموش شدن واحدهای نیروگاهی در استراتژی قیمت‌دهی آنها در بازار برق"، بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، 1393
- [17] A. Mozdavar and B. Khaki, "Strategic Bidding in Pay as Bid Power Market By Combined Probabilistic and Game Theory Procedures," *IEEE Bucharest Power Tech. Conf.*, pp. 1-6, 2009.
- [18] A. K. David and F. Wen, "Strategic Bidding in Competitive Electricity Markets: A Literature Survey," *IEEE Power Engineering Society Power Eng. Conf.*, pp. 2168-2173, 2000.
- [19] M. E. Khodayar and M. Shahidehpour, "Optimal Strategies for Multiple Participants in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 986-987, March 2014.
- [20] G. Li, J. Shi and X. Qu, "Modeling methods for GenCo bidding strategy optimization in the liberalized electricity spot market: A state-of-the-art review," *Energy*, pp. 4686-4700, 2011.
- [21] M. Prabavathi and R. Gnanadass, "Energy bidding strategies for restructured electricity market," *Elect. Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 956-966, January 2015.
- [22] I. Taheri, M. Rashidinejad, A. Badri and A. Rahimi-Kian, "Analytical Approach in Computing Nash Equilibrium for Oligopolistic Competition of Transmission-Constrained GENCOs," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-11, 2014.
- [23] F. Gao, G. B. Sheble, K. W. Hedman, and C.-N. Yu, "Optimal bidding strategy for gencos based on parametric linear programming considering incomplete information," *Elect. Power & Energy Systems*, vol. 66, pp. 272-279, march 2015.
- [24] S. Qiao and P. Wang, "Maximizing Profit of a Wind Genco Considering Geographical Diversity of Wind Farms," *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. 1-9, 2014.
- [25] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control," John Wiley & Sons, 1996.
- [26] Information for development program, "Quantitative Tests for Market Power," Available at: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/PracticeNote.aspx?id=2880>
- [27] جعفر رزمی، سید فرید قادری، امین ذکایی آشتیانی، " تحلیل شاخص های ارزیابی رقابتی بودن بازار برق ایران : مطالعه موردی"، نشریه مدیریت بازرگانی، دوره 2، شماره 5، صفحه 41 تا 60، پاییز 1389.
- [28] P. Couchman, B. Kouvaritakis, M. Cannon, and F. Prashad, "Gaming Strategy for Electric Power with Random Demand," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, NO. 3, pp. 1283 - 1292, August 2005.
- [29] M. Rahimiyan and H. Rajabi Mashhadi, "Evaluating the Efficiency of Divestiture Policy in Promoting Competitiveness Using an Analytical Method and Agent-based Computational Economics," *Energy Policy*, pp. 1-8, Nov 2009.