

استفاده از روش یادگیری رقابتی برای قیمت‌دهی استراتژیک شرکت‌های تولید بر اساس LMP در بازار برق

مریم رمضانیان لنگرودی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سیدمازیا میرحسینی مقدم^۲، استادیار؛ بهنام علیزاده^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - واحد لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - ایران - ramezaniannmaryam9@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - واحد لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - ایران - m.mirhosseini@liau.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - واحد لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی - لاهیجان - ایران - behnam_alizadeh@liau.ac.ir

چکیده: ساختار رقابت مابین تأمین‌کنندگان انرژی در بخش تولید بازارهای برق منجر به آن شده است که شرکت‌های تولید با اتخاذ تصمیمات استراتژیک به دنبال حداکثرسازی سودشان باشند. در این راستا، شرکت‌های تولید سعی می‌کنند که از طریق ارائه قیمتی مناسب در سطحی بالاتر از هزینه‌های حدی خود، در رقابت با سایر تولیدکنندگان سهم بیشتری از تأمین انرژی الکتریکی بازار برق را کسب نمایند. هدف این مقاله پیشنهاد یک روش مبتنی بر تعیین بهینه تعاملات استراتژیک عامل‌های بازار برق است به نحوی که منجر به دست‌یابی نقطه تعادل نش گردد. در این راستا، از یک روش ابتکاری بر مبنای الگوریتم یادگیری تقویتی در ساختار بازار اشتراکی برای تعیین استراتژی‌های بهینه پیشنهاد قیمت واحدهای تولید استفاده می‌شود. از سوی دیگر، در این مقاله با در نظر گرفتن تأثیر ظرفیت شبکه انتقال یک سیستم چندناحیه‌ای، فرآیند تسویه بازار بر اساس قیمت‌گذاری حدی محلی (LMP) در شرایط مالکیت تک و چندژنراتوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. استراتژی پیشنهادشده بر روی بازار چهار ناحیه‌ای Nord Pool آزمایش گردیده است. نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده بر روی این شبکه بیانگر توانایی الگوریتم یادگیری تقویتی پیشنهادی در تعیین استراتژی بهینه شرکت‌های تولید و دستیابی به نقطه تعادل بازار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استراتژی پیشنهاد قیمت، تعادل نش، قیمت‌گذاری حدی محلی، فرآیند یادگیری تقویتی، بازار اشتراکی.

Strategic Bidding for GENCOs using Reinforcement Learning Methodology based on LMP in Electricity Market

M. Ramezaniann Langeroudi¹, MSc Student; S. M. Mirhosseini Moghaddam², Assistant Professor; B. Alizadeh³, Assistant Professor

1- Dept. of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: ramezaniannmaryam9@gmail.com

2- Dept. of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: m.mirhosseini@liau.ac.ir

3- Dept. of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, Email: behnam_alizadeh@liau.ac.ir

Abstract: The structure of competition among energy suppliers in the production sector of electricity markets has made generation companies search for maximization of their profits by making strategic decisions. In this regard, generation companies try to bid a suitable price higher than their marginal costs to get a larger share of supply of electricity in the power market in their competitions with other generators. The research objective was to propose a method based on identification of optimal strategic interactions of agents in the electricity market to allow for achievement of the Nash equilibrium point. To this end, a heuristic method based on the reinforcement learning algorithm in the pool market structure was used to determine optimal bidding strategies for generation units. On the other hand, considering the effect of the transmission network capacity in a multi-area system, the market clearing process based on local marginal price (LMP) was studied in the single- and multi-generator states. The proposed strategy was tested on the Nord Pool four-area market. Simulations results of this network reflect the capability of the proposed learning algorithm for determining the optimal strategy of generation companies and achieving the market equilibrium point.

Keywords: Bidding strategy, nash equilibrium, local marginal price, reinforcement learning process, pool market.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷

نام نویسنده مسئول: سیدمازیا میرحسینی مقدم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - لاهیجان - خیابان شقایق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

قیمت‌گذاری به‌عنوان ابزار اصلی بازار جهت ایجاد مصالحه بین مباحث اقتصادی و فنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از زمان پیدایش مبحث بازار برق در دهه ۹۰ موضوع قیمت‌گذاری چالشی جدی برای متخصصان بوده است. اما شروع عینی این مقوله را می‌توان از زمانی دانست که قیمت‌گذاری حدی محلی توسط اکثر بازارهای ایالت متحده آمریکا پذیرفته شد. به‌طور کلی قیمت یک محصول در هر نوع بازار بر اساس میزان تولید و تقاضا محاسبه می‌شود. قیمت‌گذاری در بازارهای برق نیز از این قاعده کلی مستثنی نمی‌باشد. مبتنی بر این اصل، در حال حاضر دو روش قیمت‌گذاری یکپارچه و غیریکپارچه در بازارهای برق به کار گرفته می‌شوند [۴-۱]. روش قیمت‌گذاری یکپارچه، اصلی‌ترین مفهوم قیمت‌گذاری در بازارهای برق می‌باشد که در آن بدون در نظر گرفتن مکان واحدهای تولید و محدودیت ظرفیت خطوط انتقال، قیمت تسویه بازار بر اساس دریافت کمیت و قیمت‌های پیشنهادی از سوی بخش تولید و مصرف توسط بهره‌بردار مستقل سیستم^۱ (ISO) تعیین می‌شود. در مقابل، روش قیمت‌گذاری غیریکپارچه، بیانگر دو نوع سیستم قیمت‌گذاری است که با روش‌های قیمت‌گذاری حدی محلی^۲ (LMP) یا گره‌ای و قیمت‌گذاری ناحیه‌ای^۳ (ZMP) شناخته می‌شوند. این روش‌ها جزء معروف‌ترین شیوه‌های قیمت‌گذاری می‌باشند که اساس شکل‌گیری آن‌ها بر تئوری هزینه حدی استوار می‌باشد. قیمت حدی، طبق تعریف برابر با نسبت افزایش هزینه تولید، در ازای افزایش یک واحد بار به سیستم می‌باشد. این شیوه‌های قیمت‌گذاری بر لحاظ نمودن پیشنهاد قیمت ژنراتورها، توپولوژی سیستم قدرت مورد بهره‌برداری و قیود انتقال، استوار می‌باشند. در صورت وجود محدودیت در ظرفیت حرارتی خطوط انتقال توان و شکل‌گیری تراکم در شبکه انتقال انرژی، دیگر نمی‌توان بازار را به‌طور یکپارچه تسویه نمود. در چنین شرایطی بازار انرژی الکتریکی در سطح شین‌ها یا مابین نواحی در صورت در نظر گرفتن محدودیت خطوط بین‌ناحیه‌ای تسویه می‌شوند.

به‌واسطه محدودیت‌های موجود در ظرفیت شبکه انتقال، پیشنهاد قیمت یکسان در تمام شبکه، نمی‌تواند رضایت تولیدکنندگان و مشتریان را تأمین نماید. بر این اساس، اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روش قیمت‌گذاری LMP متمرکز شده است. با وجود پیچیدگی محاسباتی در این روش، با استفاده از تئوری هزینه حاشیه‌ای و در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه انتقال می‌توان به قیمت‌گذاری منطقی دست یافت [۵]. LMP، قیمتی لحظه‌ای است که به‌صورت هزینه اضافی برای تأمین یک مگاوات انرژی بیش‌تر در یک شین از شبکه قدرت، تعریف می‌شود [۶ و ۷]. این روش قیمت‌گذاری از حل مسئله پخش بار بهینه تعیین می‌شود. آشنایی با حساسیت‌های قیمت حدی محلی در نقاط مختلف سیستم، تأثیر بسزایی در تخمین و پیش‌بینی قیمت توسط شرکت‌کنندگان بازار و ارائه پیشنهاد‌های آن‌ها به بهره‌بردار مستقل سیستم و در نتیجه دستیابی به اهداف از پیش

تعیین‌شده شرکت‌کنندگان بازار دارد [۸]. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت‌های قیمت حدی محلی، اهداف مهم زیر تأمین خواهند شد:

- ارتقاء آگاهی و بینش شرکت‌کنندگان بازار نسبت به عملکرد و رفتار سیستم انرژی الکتریکی
- کمک به اتخاذ راهبردهای مناسب پیشنهاد قیمت برای شرکت‌های تولید برق و خریداران انرژی الکتریکی
- امکان ارزیابی و تخمین درجه رقابت بازار

در بازار رقابتی متمرکز، استراتژی پیشنهاد قیمت بهینه برای یک تولیدکننده، پیشنهاد قیمتی مساوی هزینه حاشیه‌ای می‌باشد. وقتی یک ژنراتور به دلیل غیررقابتی بودن بازار، به‌منظور افزایش سود، قیمتی بالاتر از هزینه حاشیه‌ای پیشنهاد دهد، به این رفتار پیشنهاد قیمت استراتژیک می‌گویند. اگر واحد تولیدی در یک بازار الکتریکی بتواند با ارائه پیشنهاد قیمت استراتژیک سود خود را ماکزیمم نماید، در این حالت قدرت بازار وجود دارد. بازارهای برق جدید کاملاً رقابتی نیستند. یک تولیدکننده می‌تواند سودش را با استفاده از قدرت بازار و از طریق پیشنهاد قیمت استراتژیک افزایش دهد. بنابراین مسئله پیشنهاد قیمت در بازارهای برق به نوع معاملات در بازارهای اشتراکی وابسته است [۵]. عامل‌های عرضه‌کننده انرژی الکتریکی، قدرت بازار را از طریق روش‌های مختلف نظیر احتکار فیزیکی، مالی و استراتژی‌های مرتبط با انتقال اعمال می‌کنند. در این مقاله فرض می‌شود قدرت بازار از طریق تنظیم استراتژی قیمت‌دهی مرتبط با تراکم انتقال اعمال می‌شود. اگرچه قدرت بازار شکل گرفته توسط تأمین‌کننده انرژی الکتریکی به برخی عوامل نظیر بار محلی، محدودیت ظرفیت خطوط انتقال موجود در هر ناحیه، رفتار حریفان و غیره بستگی دارد [۹]. در مرجع [۱۰] بر اساس قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی، یک شاخص برای ردیابی قدرت بازار گره‌ای در بازار توان الکتریکی پیشنهاد شد. با محاسبه این شاخص ناظر بازار می‌تواند بر وضعیت اعمال قدرت بازار توسط شرکت‌های تولید نظارت داشته باشد. در مرجع [۱۱] رابطه بین مقادیر قیمت‌گذاری، هزینه حاشیه‌ای و تدابیر قدرت بازار در بازار برق عمده‌فروشی اسپانیا برای دو دوره متفاوت ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ تنظیم شده است. این نتایج اشاره به اثربخشی قدرت بازار در بازار برق اسپانیا دارد. در مرجع [۱۲] قیمت حاشیه‌ای محلی به‌منظور نظارت بر توانایی شرکت‌های تولیدی در اعمال قدرت بازار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. روش حل پیشنهادی را می‌توان مانند یک استراتژی مؤثر در بهره‌برداری شبکه برای شناسایی ساختار قدرت بازار به کار گرفت. در مرجع [۱۳] از مفهوم جدیدی موسوم به تراکم تعمیم‌یافته، برای توصیف عوامل تأثیرگذار در سطح رقابت و بهره‌وری بازارهای توان استفاده شده است. مرجع [۱۴] از روش تغییرات حدسی، برای تحلیل نحوه تأثیرپذیری قیمت شرکت‌های تولیدی از قدرت بازار، استفاده نموده است. روشی که در مرجع [۱۵] برای تحلیل قدرت بازار به کار گرفته شده است، شبیه‌سازی رفتار استراتژیک

هدف اصلی این مقاله محاسبه قیمت‌دهی تأمین‌کنندگان در یک بازار برق، بر پایه رسیدن به تعادل نش است. در این مقاله یک الگوریتم یادگیری تقویتی پیشنهادی به‌منظور پیدا کردن استراتژی‌های قیمت‌دهی بهینه ارائه شده است. ویژگی کلیدی این روش، استفاده از یک الگوریتم یادگیری تقویتی قوی و ساده برای یافتن استراتژی‌های عامل‌ها به بازار در شرایطی است که هر عامل از تعاملات بازار در جهت ماکزیمم کردن سود خود استفاده می‌کند. علاوه بر این، عامل‌ها قادر به تغییر رفتار و اتخاذ استراتژی‌های جدید با توجه به شرایط بازار هستند. بر این اساس نوآوری‌های این مقاله شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

- ارائه یک الگوریتم یادگیری تقویتی پیشنهادی به‌منظور یافتن استراتژی قیمت‌دهی بهینه و رسیدن به تعادل نش
- امکان تغییر در تصمیم‌های استراتژیک عامل‌ها در راستای ماکزیمم‌سازی سود آن‌ها با توجه به شرایط بازار
- استفاده از راهکارهای هوشمندسازی به‌منظور دستیابی به رفتار معقول‌تر بازیگران

- آزمودن تأثیر قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی بر استراتژی پیشنهاد قیمت شرکت‌کنندگان بازار

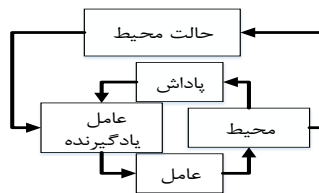
سازمان‌دهی مقاله پیش رو به این شکل است که در بخش دوم صورت مسئله و مدل بازار بیان می‌شود. در بخش سوم، بر اساس روش یادگیری پیشنهادی، مدلی بر اساس مدل قیمت‌دهی پیشنهاد می‌شود. بخش ۴ شامل یک مطالعه موردی، نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل بازار است. در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲- تئوری مسئله

رقابت بین تولیدکنندگان انرژی الکتریکی در محیط بازار برق، در شرایط تراکم می‌تواند سبب افزایش ناخواسته قیمت گردد. به‌طور کلی، دو موضوع تحقیقاتی مهم مرتبط با استراتژی قیمت‌دهی در بازارهای برق وجود دارد. اولین مورد مطالعاتی چگونگی ساخت استراتژی قیمت‌دهی بهینه برای یک واحد تولید می‌باشد. معمولاً، مسئله ساخت استراتژی قیمت‌دهی بهینه برای یک تولیدکننده جهت دستیابی به پیشنهاد قیمت بهینه، بر اساس اطلاعات هزینه تولید و توقعات تولیدکننده در مورد رفتار سایر بازیگران و همچنین اطلاعات بازار صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار شبکه و عدم قطعیت‌های قیمت‌های پیشنهادی حریف، استراتژی قیمت‌دهی می‌تواند به‌عنوان یک مسئله ماکزیمم‌سازی سود مورد انتظار فرمول‌بندی شود که از طریق روش‌های بهینه‌سازی احتمالاتی/ تصادفی مختلف نظیر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، برنامه‌نویسی دینامیکی گسسته، بهینه‌سازی ترتیبی، بهینه‌سازی تصادفی با الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، آزادسازی لاگرانژ و برنامه‌نویسی دینامیکی احتمالاتی حل شود. از سوی دیگر، استراتژی قیمت‌دهی بهینه می‌تواند از طریق روش‌های غیرمستقیم نظیر روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی قیمت تسویه بازار و روش‌های ابتکاری به‌دست آید.

بنگاه‌های موجود در بازار است. این شبیه‌سازی‌ها بر اساس مشخصه‌های هزینه و تولید ژنراتورهایی که یک بنگاه در اختیار دارد، انجام شده است. در مرجع [۱۶] استراتژی قیمت‌دهی، بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی فرمول‌بندی شده است. در سطح اول از این روش، یک شرکت‌کننده بازار برای پیشینه کردن سود خود در معرض تخمین رفتار رقبای پیش‌بینی بار شین‌های شبکه تلاش می‌کند. در سطح دوم، بهره‌بردار مستقل سیستم، مسئله پخش بار بهینه را برای حداقل کردن هزینه کل سیستم حل می‌کند. از این‌رو بهره‌بردار مستقل بازار قابل‌اطمینان و ایمن بودن را در سیستم قدرت تضمین می‌کند و رفاه اجتماعی را در معاملات بازار ماکزیمم می‌کند؛ از این‌رو برای هیچ سازمانی سودآور نیست. در مرجع [۱۷] از یک فرآیند یادگیری بر اساس حافظه عامل از گذشته بازار استفاده شده است. به عبارت دیگر، رفتارهای عامل و حریفانش در گام‌های قبلی بازار به‌عنوان یک حالت محیط فرض می‌شود. این شکل تعریف حالت ممکن است مؤثر نباشد، چون پاداش مرتبط با عملکرد عامل در هر حالت متغیر است. پاداش عامل تابعی از نوع عملکرد همه عامل‌ها در همان گام زمانی است. بنابراین، عامل‌ها باید پیش‌بینی‌های مناسبی از اعمال حریف به‌منظور تصمیم‌گیری مناسب برای تکرار بعدی بازار داشته باشند. چنانکه در مرجع [۱۸] برای پیش‌بینی قیمت روزانه برق از روش ترکیبی تبدیل موجک و از ایده ترکیبی جدید نظریه آشوب با فن جستجوی گرانشی استفاده کرده است. نتایج نشان از دقت بالا و خطای کم‌تر در پیش‌بینی می‌دهد. در مرجع [۱۹] از یک الگوریتم یادگیری تکاملی برای تعیین استراتژی‌های منفرد و تعاملی مابین خریداران توان الکتریکی در بازار برق استفاده شده است که در آن قیود فیزیکی شبکه مدنظر قرار گرفته است. این مطالعه شرایط رسیدن به حداکثر سود خریداران در دو حالت عدم لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در بازار و مدل‌سازی آن‌ها، مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی معرف آن است تعامل مابین خریداران می‌تواند در حداکثرسازی سود آن‌ها تأثیرگذار باشد. در این راستا برای تعیین استراتژی‌های تعاملی بهینه از روش تئوری بازی همکارانه استفاده شده است. در مرجع [۲۰] از یک روش حل تحلیلی برای تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت بهینه شرکت‌های تولید مقید به قید انتقال در بازارهای برق استفاده شده است. در این مقاله برای مدل‌سازی مسئله استراتژی بهینه، از یک روش برنامه‌نویسی دوسطحی استفاده شده است که در سطح بالا، سود هر یک از شرکت‌های تولید ماکزیمم می‌شود و در سطح پایین، تسویه بازار بر اساس توزیع اقتصادی با قید امنیت^۴ (SCED) به‌وسیله ISO تحت استراتژی‌های پیشنهاد قیمت شرکت‌های تولید انجام می‌شود. برای دستیابی به پاسخ‌های بهینه در سطح پایین و به کمک آن در سطح بالا، روش‌های بهینه‌سازی ریاضی در هر سطح استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های این گونه روش‌ها رشد پیچیدگی حل با ارتقاء ابعاد مسئله می‌باشد.

چندین منطقه یا ناحیه هستند و آن‌ها می‌توانند در سرتاسر نواحی متفاوت باشند اگر یک نسبت از شبکه متراکم شود و به همین ترتیب از کل شبکه جدا شود. ساختار کلی مسئله یادگیری تقویتی^۵ (Q-learning) در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تعامل عامل و محیط در الگوریتم یادگیری تقویتی

در مدل پیشنهادی در این مقاله، عامل‌ها از طریق یک مکانیسم یادگیری بر اساس مفهوم روش Q-learning در جهت بهبود استراتژی‌های قیمت‌دهی خود عمل می‌کنند. در روش ارائه‌شده، هر عامل تأثیر قیود شبکه انتقال را در سرتاسر استراتژی‌های قیمت‌دهی و کمیت‌های توزیع‌شده درک می‌کند. بازیگران اصلی مدل در نظر گرفته‌شده شامل شرکت‌های تولید و ناظر بازار (ISO) می‌باشد. با توجه به اینکه توانی که توسط هر شرکت تولید به فروش می‌رسد تنها تابع تصمیمات اخذشده او نیست بلکه به عملکرد رقبا او در بازار نیز وابسته است، سؤال اساسی برای شروع فرآیند یادگیری قیمت‌دهی شرکت‌های تولید این است که تولیدکنندگان چگونه با اتخاذ استراتژی بهینه قیمت‌دهی و هوشمندسازی نحوه قیمت‌دهی خود به تعادل نش می‌رسند. از این‌رو هدف اصلی در ادامه این مقاله ارائه راهکاری به‌منظور استراتژی بهینه قیمت‌دهی شرکت‌های تولید جهت رسیدن به نقطه تعادل نش با انتخاب بهترین راهبرد پیشنهاد قیمت است.

۳- بهینه‌سازی پیشنهاد قیمت

پیشنهاد قیمت واحدهای تولید موجود در بازار به عوامل مختلفی همچون تکنولوژی منابع تولید، تأثیر مبادله توان در شبکه انتقال، محدودیت ظرفیت حرارتی خطوط انتقال، نحوه توزیع انرژی الکتریکی منابع تولید و میزان سرمایه مالکان، میزان تقاضا در هر ناحیه وابسته می‌باشد. با توجه به نوع تکنولوژی، توابع هزینه منابع تولید متفاوت می‌باشند. از آنجایی که هدف در مسئله تسویه بازار، ماکزیمم‌سازی رفاه اجتماعی با رعایت قیود برابری تولید و بار و محدودیت‌های بهره‌برداری است، نیاز است تا اطلاعاتی از نحوه قیمت‌دهی واحدهای تولیدی در اختیار باشد تا پخش بار صورت گرفته به لحاظ اقتصادی هم توجیه‌پذیر باشد. از این‌رو در این قسمت از مقاله با در نظر گرفتن رفتار استراتژیک تولیدکنندگان در محیط بازار و بر اساس اطلاعات گذشته، یک بازه قیمتی از میزان پیشنهادی واحدهای تولیدی به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر با توجه به تکنولوژی‌های متفاوت تولید، بازه‌ای از قیمت‌ها متناسب با هر تکنولوژی در نظر گرفته می‌شود که در آن a_i و b_i به ترتیب عرض از مبدأ و شیب تابع خطی قیمت

پیش‌بینی قیمت تسویه بازار بر اساس روش‌های ارائه استراتژی قیمت‌دهی برای قیمت‌گیری یک واحد تولید است [۲۱].

از اواخر دهه ۸۰ مقالات بسیاری به‌منظور درک، مدل‌کردن و تحلیل بازارهای برق منتشر شده است. محققان بسیاری مسئله استراتژی‌های قیمت‌دهی را برای تأمین‌کنندگان در بازارهای برق عمده‌فروشی با قوانین قیمت‌گذاری متفاوت توسعه دادند. کریشنا و رامش عامل‌هایی را طراحی کردند که استراتژی‌های قیمت‌دهی خود را با استفاده از رفتار بشر ارائه می‌کنند [۲۲]. ایده ایجاد ماشین‌هایی که رفتار هوشمندانه انسان را تقلید می‌کنند، بدون الهام‌گرفتن از هوشمندی انسان‌ها، هیچ‌گاه کامل نخواهد بود و به ثمر نخواهد نشست. از این‌رو هوشمندی با توانایی یادگیری از طریق تجربه، مرتبط دانسته می‌شود. مهم‌ترین کاری که غالباً یک سیستم هوشمند انجام می‌دهد، امکان یادگیری است و اگر یک سیستم هوشمند بتواند یادگیری انسان را شبیه‌سازی کند، تا حدود زیادی در پیاده‌سازی هوش مصنوعی، موفق خواهد بود. هدف اصلی از یادگیری یافتن شیوه‌ای برای عملکرد در حالات مختلف است که این شیوه در مقایسه با سایرین، با در نظر گرفتن معیارهایی، بهتر است. هنگامی می‌توان گفت یادگیری اتفاق افتاده است که عاملی بر اساس تجربیاتی که کسب می‌کند به نحوی دیگر و به احتمال زیاد، بهتر عمل کند. در این صورت می‌بایست نحوه عملکرد عامل در اثر کسب اطلاعات جدید، متفاوت از نحوه عملکرد در زمان قبل از کسب این اطلاعات و تجارب باشد. یادگیری تقویتی یکی از روش‌های یادگیری در سیستم‌های هوشمند است که بر اساس رابطه علت و معلول عمل می‌کند. در این روش یادگیری عامل هوشمند با توجه به وضعیتی که در محیط دارد عملی را بر روی محیط انجام می‌دهد و منتظر نتیجه عملش می‌ماند. این نتیجه می‌تواند در قالب یک پاداش یا تنبیه باشد. اگر نتیجه در قالب پاداش باشد، عمل انجام‌شده مطلوب بوده و عامل به هدفی که در آن محیط دارد نزدیک شده است. ولی اگر نتیجه در قالب تنبیه باشد، عمل انجام‌شده نامطلوب بوده و عامل از هدفش دور شده است. عامل باید یاد بگیرد که چه اعمالی را انجام دهد تا پاداش بیش‌تری را کسب کند و در نهایت به هدفش برسد. در یادگیری تقویتی، هیچ‌گاه به عامل گفته نمی‌شود که عمل صحیح در هر وضعیت چیست، بلکه فقط به‌وسیله معیاری، به عامل گفته می‌شود که یک عمل چقدر خوب و چقدر بد است. این وظیفه عامل یادگیرنده است که با در دست داشتن این اطلاعات، یاد بگیرد که بهترین عمل در هر وضعیت کدام است. این موضوع، بخشی از نقاط قوت خاص یادگیری تقویتی است. از این طریق، مسائل پیچیده تصمیم‌گیری در اغلب اوقات می‌توانند با فراهم کردن کم‌ترین میزان اطلاعات موردنیاز برای حل مسئله، حل شوند. مطابق با شایستگی انتخاب اقتصادی و محدودیت‌های ظرفیت خطوط انتقال بین نواحی و سایر قیود، پیشنهادها و قیمت‌ها پذیرفته می‌شوند. با پذیرفته شدن پیشنهادی عرضه، قیمت تسویه ناحیه ارزیابی می‌شود. قیمت‌های تسویه بازار ناحیه‌ای، قیمت‌های مشاهده‌شده در

$$\pi = 2a_i P_{G_i} + B'_i \quad (3)$$

در این صورت فرمول محاسبه سود بر اساس قیمت پیشنهادی هر عامل و با فرض صفر بودن c_i ، برابر است با:

$$\Omega = a_i P_{G_i}^2 + (B'_i - b_i) P_{G_i} \quad (4)$$

در این روابط B'_i متغیر استراتژیک مسئله می باشد. افراد بازنده در بازار با کم کردن B'_i و ثابت نگه داشتن a_i و b_i تلاش می کنند برنده بازار شوند. کم شدن B'_i باید به حدی باشد که منجر به منفی شدن سود نگردد یعنی:

$$a_i P_{G_i}^2 + (B'_i - b_i) P_{G_i} \geq 0 \quad (5)$$

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 ساده سازی معادله (۵) به مقدار زیر برای پیشنهاد دادن حداقل مقدار ممکن برای B'_i می توان رسید:

$$B'_{\min_i} \geq b_i - a_i P_{G_i}^{\max} \quad (6)$$

بر اساس معادله (۱۰) همه افراد بازنده در بازار مجاز هستند که B'_i خود را حداکثر تا این مقدار کاهش دهند و در صورت خارج شدن از محدوده تعیین شده، $B'_{\min_i}$ را در تکرار بعد پیشنهاد دهند. چنانچه با وجود چنین شرایطی مقدار سود یک عامل در حین فرآیند یادگیری منفی شد، این بار سقف متغیر استراتژیک که از جانب ISO تعیین شده است، برای تکرار بعد مورد پیشنهاد قرار می گیرد تا اگر عاملی نتوانست برنده بازار شود، حداقل متحمل ضرر نگردد و در صورت برنده شدن نیز بتواند به منظور کسب سهم تولید و سود بیش تر، مجدد به صحنه رقابت بازگردد. از طرفی افراد برنده در بازار نیز تلاش می کنند که سود خود را افزایش دهند. برای این دسته از افراد یک سقف برای پارامتر استراتژیک واحدهای تولید در نظر گرفته می شود. بر اساس روش پیشنهادی یک بازیگر تنها از اطلاعات خود پس خوراند می گیرد هر چند که می داند سایرین در تکرارهای مختلف استراتژی خود را تغییر می دهند. برای یک بازیگر خاص توجه تنها معطوف به اطلاعات خود بازیگر است و نه سایر بازیگران که اطلاعات آن ها در دسترس نیست. بنابراین شروع فرآیند یادگیری در روش پیشنهادی به این صورت است که ابتدا با استفاده از اطلاعات ورودی، پیشنهاد قیمت بازیگران برای ISO ارسال می شود. ISO پخش بار بهینه را با توجه به قیود شبکه و رفتار قیمت دهی سایر بازیگران انجام داده و بازار بر اساس ساختار LMP مسئله پیش رو تسویه شده و در نتیجه میزان تولید هر شرکت کننده و قیمت تسویه بازار بر اساس قیمت هر ناحیه مشخص می شود. در ابتدا همه مالکین خواستار افزایش قیمت پیشنهادی و در نتیجه رسیدن به سود بالاتری می باشند و تنها یک عده قیمت خود را افزایش نمی دهند و آن هم افرادی هستند که تولیدی نداشته و توان عبوری شان صفر است. باید توجه داشت که کم کردن متغیر استراتژیک سبب خارج شدن از محدوده مجاز آن نشود، چون در این صورت منجر

پیشنهادهای برحسب تولید هستند. در این مقاله فرض شد که شرکت های تولیدی برای تغییر در مقدار پیشنهاد قیمت خود، عرض از مبدأ تابع پیشنهاد قیمت خود را تغییر می دهند. مشخص است که هرچه مقادیر b_i کم تر باشد، شرکت تولید دارای هزینه کم تری است یا به عبارت دیگر از تکنولوژی مناسب تری برخوردار است. قیمت های بازار توسط بهره بردار مستقل سیستم با هدف ارضای تعادل عرضه و تقاضا در بازار تسویه می شود. برای ترغیب ژنراتورها به ارائه قیمت پیشنهادی کم تر، قیمت گذاری مزایده به صورت یک نواخت در نظر گرفته شده است. به منظور محدود کردن ژنراتورها به قیمت پیشنهادی بالا در مقایسه با هزینه تولید واقعی، سقف قیمت برای بازار در نظر گرفته شده است. بنابراین، مطابق با هزینه حدی و سقف قیمت، ژنراتورها به دنبال جستجوی استراتژی بهینه خود خواهند بود.

۳-۱- تعیین استراتژی بهینه قیمت دهی

در دهه های اخیر، صنعت برق در سراسر جهان با تغییرات بسیاری که از آن به عنوان تجدید ساختار یاد می شود؛ مواجه بوده است. صنعت برق به یک صنعت رقابتی که در آن بازار، تعیین کننده قیمت برق است تبدیل شده است [۲۳]. در محیط بازار برق یک سو، تقاضای مصرف کنندگان از بازار برق تأمین می گردد و قیمت تسویه بازار، پس از دریافت پیشنهاد قیمت واحدهای تولید توسط ISO تعیین می شود.

تابع هزینه هر واحد تولید مفروض نام با رابطه زیر تعریف می شود:

$$Cost(P_{G_i}) = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i \quad (1)$$

در رابطه فوق، a_i ، b_i و c_i ضرایب تابع هزینه و P_{G_i} میزان توان تولیدی توسط هر واحد تولید می باشد.

هر واحد تولیدی می کوشد سود حاصل از فروش انرژی الکتریکی خود را بیشینه سازد. بیشینه سازی سود هر واحد تولید مفروض نام را می توان به صورت اختلاف بین درآمد حاصل از فروش انرژی تولید شده و هزینه تولید این انرژی به صورت زیر بیان کرد:

$$\max Profit_i = \max[\pi \cdot P_{G_i} - Cost(P_{G_i})] \quad (2)$$

سود یک عامل مطابق معادله (۲) از تفاضل درآمد و هزینه آن به دست می آید که درآمد کسب شده توسط هر عامل برابر حاصل ضرب قیمت تسویه بازار در میزان توان الکتریکی تولید شده می باشد. اگر بازار تحت رقابت کامل باشد، قیمت ثابت مانده و هیچ شرکت تولیدی توانایی تغییر قیمت بازار را ندارد. ولی به جهت ناکامل بودن رقابت در بسیاری از موارد، بازار غیر رقابتی است و تغییر قیمت و یا تغییر میزان تولید هر بازیگر در تغییر قیمت بازار مؤثر است. بنابراین زمانی که رقابت کامل نیست، شرکت های تولید می توانند با اقدامات خود بر قیمت بازار تأثیر بگذارند. از این رو در این مقاله فقط در تکرار اول فرض شده که قیمت پیشنهادی در نقطه شروع ثابت است ولی در سایر تکرارها، دیگر یک متغیر خارج از کنترل بازیگران بازار نیست بلکه با تغییر میزان تولید و سود هر شرکت تولید، قیمت پیشنهادی به صورت معادله زیر تغییر کرده و در نتیجه منجر به تغییر قیمت بازار خواهد شد:

$$P_G - P_D = B\theta$$

$$0 \leq P_G \leq P_{G_{\max}}$$

$$-P_i^{\min} \leq PTDF(P_G - D) \leq P_i^{\max}$$

(۹) به ضرر کردن حتمی واحد تولید می‌گردد. با مشخص شدن میزان

(۱۰) تولید می‌توان شاخص رقابت‌پذیری را در هر تکرار محاسبه کرد و

(۱۱) میزان رقابت در بازار را سنجید. با حل مسئله پخش بار بهینه و

مشخص شدن میزان تولید و قیمت هر ناحیه، می‌توان سود هر مالک را به‌دست آورد. در فرمول محاسبه سود هر مالک باید توجه داشت که درآمد از حاصل ضرب قیمت ناحیه در میزان تولید واحدها به‌دست می‌آید و از تابع هزینه نیروگاه کم می‌شود تا سود متناظر هر عامل به‌دست آید. لازم به ذکر است که در بازار برق، هدف شرکت‌های تولید که مالکیت چندین منابع تولید را در اختیار دارند (دیدگاه چندژنراتوری)، حداکثرسازی سود کلی خود می‌باشد. در این راستا، به‌جای بیشینه‌سازی سود هر یک از منابع تولید، به دنبال حداکثرسازی مجموع سودهای حاصله از این منابع می‌باشند.

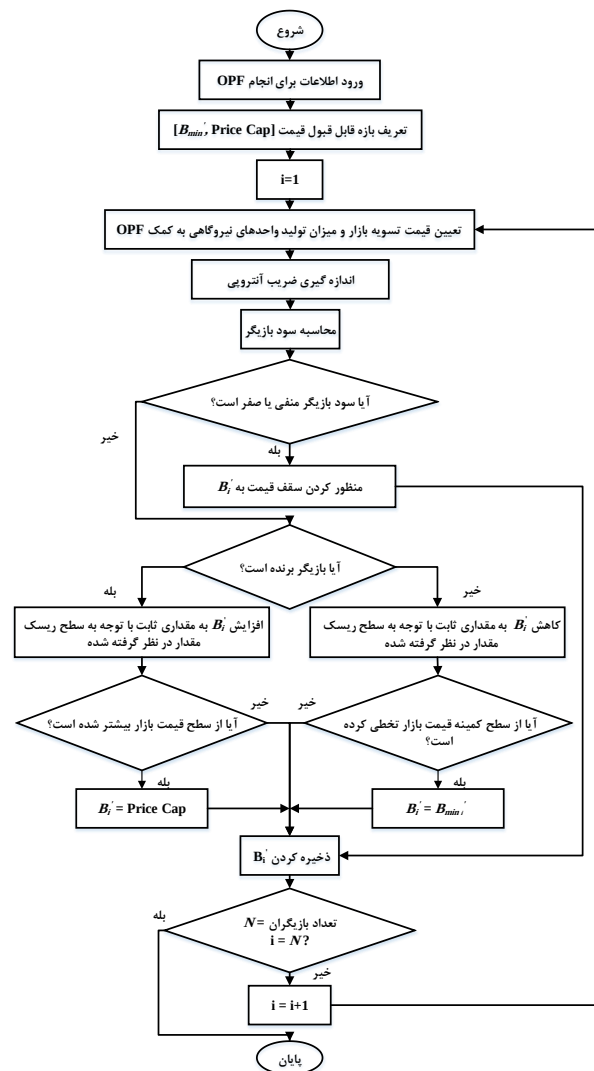
به‌منظور بررسی وضعیت رقابت در بازار از شاخص ضریب آنتروپی مطابق رابطه (۷) استفاده می‌شود و بر اساس آن میزان رقابت در هر تکرار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع آنتروپی معیار معکوس تمرکز است. هنگامی که آنتروپی افزایش یابد، تمرکز کاسته می‌شود.

$$E = \sum_{i=1}^N S_i \log\left(\frac{1}{S_i}\right) \quad (7)$$

$$0 \leq E \leq \log(N)$$

در رابطه (۷) S_i سهم بازار و N تعداد مالک‌ها است. مقدار این شاخص برای بازار تک انحصاری برابر صفر است و با رقابتی شدن بازار به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد [۲۴].

برای هوشمند کردن قیمت پیشنهادی، بازیگران را به ۳ دسته محتاط، نرمال و ریسک‌پذیر تقسیم‌شده و بسته به نوع بازیگر دو ضریب ثابت برای افزایش یا کاهش قیمت پیشنهادی آن‌ها در نظر گرفته شده است که با توجه به میزان ریسک‌پذیری بازیگران، ضریب این افزایش یا کاهش متفاوت خواهد بود. استفاده از راه‌کار هوشمندسازی به رفتار معقول‌تر بازیگران و رسیدن به تعادل نش کمک می‌کند. بررسی وضعیت روند تغییرات میزان سود و تولید بازیگران، برتری این روش را در همگرایی به نقطه تعادل نش نشان می‌دهد. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی استراتژی قیمت در هر تکرار

در روابط بالا P_G بردار مشخص‌کننده میزان تولید هر یک از عامل‌ها است که نشان‌دهنده متغیر مسئله بهینه‌سازی است. P_D میزان تقاضا و ماتریس $PTDF$ ، ماتریس ضرایب توزیع انتقال توان است که بر اساس تحلیل حساسیت در مدل پخش بار DC تعیین می‌شود. از سوی دیگر، B و θ به‌ترتیب ماتریس ادمیتانس خطوط با مقاومت صفر و بردار زوایای باس‌های شبکه می‌باشد. $P_i^{\max}$ ، $P_{G_{\max}}$ و $P_{G_{\min}}$ به‌ترتیب بیشینه توان عبوری از خطوط، بیشینه ظرفیت تولید واحدها و کمینه ظرفیت تولید واحدها است. سطح تولید واحدها و قیمت تسویه بازار متغیرهای تصمیم‌گیری هستند که در هر تکرار با حل مسئله بهینه‌سازی به‌دست می‌آیند.

۳-۲- مسئله پخش بار بهینه

فرم کلی مسئله پخش بار بهینه بر اساس حداقل‌سازی هزینه تأمین انرژی از دید ISO تعریف می‌گردد. برای سیستمی با N واحد تولید، هزینه تأمین انرژی بر اساس مجموع حاصل ضرب قیمت تسویه انرژی در میزان توان الکتریکی هر تولیدکننده به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

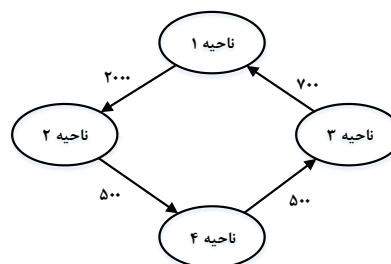
$$\min \sum_{i=1}^N (2a_i P_{G_i} + B_i) P_{G_i} \quad (8)$$

محدودیت‌های شبکه که توسط ISO لحاظ می‌شود شامل قیدهای تساوی و نامساوی می‌باشد. قید تساوی مربوط به معادله پخش بار DC و قیود نامساوی شامل محدودیت‌های بهره‌برداری و انتقال توان می‌باشند، که به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

۴- سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه سازی

در این بخش، استراتژی قیمت دهی واحدهای تولید برای تحلیل سیستم چند ناحیه ای توان الکتریکی مورد مطالعه قرار می گیرد. به منظور رسیدن به این هدف، بازار برق برای یک سیستم چند ناحیه ای شبیه سازی می شود. استراتژی قیمت دهی هر واحد تولید بر اساس الگوریتم یادگیری تقویتی پیشنهادی تعیین می شود. با الگوریتم پیشنهادی می توان استراتژی قیمت دهی هر واحد تولید را بر اساس دینامیک بازار تعیین نمود که ناشی از تغییر رفتار حریف است. به منظور اثبات توانایی های الگوریتم پیشنهادی، مطالعه ای بر قیمت پیشنهادی واحد تولید در دو حالت مالکیت تک ژنراتوری و چند ژنراتوری صورت می گیرد.

شبکه مورد مطالعه، یک سیستم ۴ ناحیه ای و متشکل از ۱۲ واحد تولیدی است که برگرفته شده از بازار Nord Pool می باشد و در مطالعه فقط شبکه انتقال بین ناحیه ای مدل سازی می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولید در جدول ۱ آورده شده است. میزان تقاضا برای نواحی نشان داده شده در شکل ۳ به ترتیب برابر ۲۳۰۰، ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۸۰۰ مگاوات است [۲۵].



شکل ۳: ساختار شبکه سیستم مورد مطالعه

جدول ۱: اطلاعات واحدهای تولید

ناحیه i	واحد تولید i ام	$P_{G_{min_i}}$ MW	$P_{G_{max_i}}$ MW	$Cost(P_{G_i}) = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i$		
				a_i	b_i	c_i
۱	۱	۰	۵۰۰	۰/۰۰۴	۱۰	۰
	۲	۰	۵۰۰	۰/۰۰۶	۱۵	۰
	۳	۰	۱۰۰۰	۰/۰۰۸	۵۰	۰
۲	۴	۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۵	۱۲	۰
	۵	۰	۲۰۰۰	۰/۰۰۶	۱۵/۵	۰
	۶	۰	۲۰۰۰	۰/۰۰۷	۱۵/۵	۰
	۷	۰	۱۵۰۰	۰/۰۰۸	۲۱/۵	۰
۳	۸	۰	۱۵۰۰	۰/۰۰۶	۱۶	۰
	۹	۰	۱۵۰۰	۰/۰۰۵	۱۴	۰
	۱۰	۰	۱۵۰۰	۰/۰۰۴	۱۳	۰
۴	۱۱	۰	۷۰۰	۰/۰۰۶	۱۶	۰
	۱۲	۰	۲۰۰۰	۰/۰۰۹	۳۱	۰

۴-۱- نتایج شبیه سازی رسیدن به تعادل نش شرکت های تولید

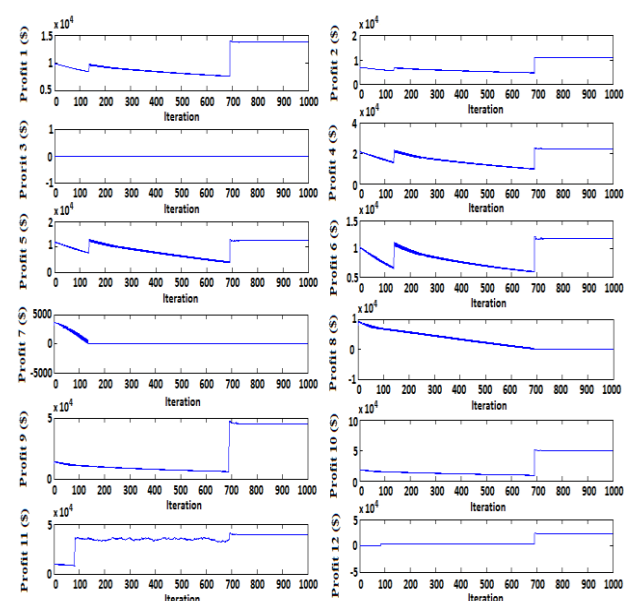
۴-۱-۱- تک ژنراتوری

وضعیت میزان سود، تولید و قیمت تسویه بازار به ترتیب در شکل های ۴ تا ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان دهنده این است که عامل ها بعد از یک تکرار معقول از اجرای سیستم توانسته اند طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی به تعادل نش برسند. نتایج رسیدن به تعادل نش واحدهای تولید در جدول ۲ آورده شده است. میزان تقاضا در ناحیه ۴ برابر ۱۸۰۰ مگاوات است و بیشینه ظرفیت تولید در این ناحیه برابر ۲۷۰۰ مگاوات است اما طبق جدول ۲ مشاهده می شود که این ناحیه در مجموع توانسته ۱۲۷۱/۴۳ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل تولید کند. در نتیجه این ناحیه نیاز به دریافت توانی معادل با ۵۲۸/۵۷ مگاوات برای تأمین تقاضای خود دارد. از طرفی واحد ۱۱ چون دارای ضرایب پیشنهاد قیمت کمتر یا به عبارتی دارای تابع هزینه کمتر با تکنولوژی مناسب تر است، توانسته تا سقف ظرفیت مجاز خود، یعنی ۷۰۰ مگاوات، تولید کند. ولی از آن جا که واحد ۱۲ نسبت به واحد ۱۱، واحد گران تری است از دیدگاه ISO مقرون به صرفه نمی باشد که برای تأمین بار این ناحیه اجازه دهد که واحد ۱۲ تا سقف ظرفیت مجاز خود، یعنی ۲۰۰۰ مگاوات، تولید کند. بنابراین بهتر این است که واحد ۴ به واسطه خط انتقال و ظرفیت آن، از نواحی ارزان تر توان مورد نیاز خود را خریداری کند. با مشاهده مقادیر LMP در جدول ۲ می توان دریافت که ناحیه ۲ از قیمت کمتری نسبت به سایر نواحی برخوردار است. از طرفی میزان تقاضا در ناحیه ۲ برابر ۴۰۰۰ مگاوات است و این ناحیه در مجموع توانسته ۵۸۲۸/۶ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل نش تولید کند. بنابراین ناحیه ۲ می تواند مازاد توان خود را بسته به نیاز ناحیه ۴ و در صورت وجود ظرفیت خط انتقال کافی به این ناحیه بفروشد و بار مورد نیاز ناحیه ۴ را تأمین کند. میزان تقاضا در ناحیه ۱ برابر ۲۳۰۰ مگاوات است در صورتی که این ناحیه در مجموع توانسته ۱۰۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل نش تولید کند. لازم به ذکر است که واحدهای ۱ و ۲ به خاطر تابع هزینه کمتر، توانسته اند تا سقف ظرفیت مجاز خود که برابر ۵۰۰ مگاوات است، تولید کنند ولی از آن جا که واحد ۳، واحد بسیار گرانی است از دیدگاه ISO مقرون به صرفه نمی باشد که برای تأمین بار این ناحیه، واحد ۳ تا سقف ظرفیت مجاز خود که برابر ۱۰۰۰ مگاوات است، تولید کند. بنابراین بهتر این است که ناحیه ۱ به واسطه خط انتقال و ظرفیت آن، از نواحی ارزان تر میزان توان مورد نیاز خود را تأمین کند. همان طور که قبلاً گفته شد چون ناحیه ۲ نسبت به سایر نواحی ارزان تر است و همچنین ظرفیت انتقال کافی بین این ناحیه و ناحیه ۱ وجود دارد، بنابراین راهبرد پیشنهادی این است که ناحیه ۱ برای تأمین میزان بار ناحیه خود از ناحیه ۲ انرژی خریداری نماید. یادآوری می شود که ناحیه ۲ در مجموع توانسته ۵۸۲۸/۶ مگاوات تولید کند که از این مقدار ۴۰۰۰ مگاوات متعلق به تأمین بار در ناحیه خود است. بنابراین می تواند مازاد توان ناحیه خود را که برابر ۱۸۲۸/۶

انتقال است افزایش می‌یابد. با توجه به اختلاف قیمتی که در جدول ۲ بین واحدها مشاهده می‌شود، می‌توان به این نتیجه رسید که خطوط ارتباطی دچار تراکم شده‌اند و در نتیجه افزایش ظرفیت خط انتقال به هر نحو میزان رقابت‌پذیری بازار را افزایش خواهد داد؛ چراکه امکان ورود برخی واحدها به بازار را فراهم می‌کند. جهت بررسی تأثیر محدودیت انتقال بر مسئله پیش رو، ظرفیت خط انتقال بین دو ناحیه ۲ و ۴ را که در نقطه تعادل به بیشینه مقدار ظرفیت مجاز توان عبوری خود رسیده بود از مقدار ۵۰۰ مگاوات به مقدار ۱۰۰۰ مگاوات افزایش داده شد.

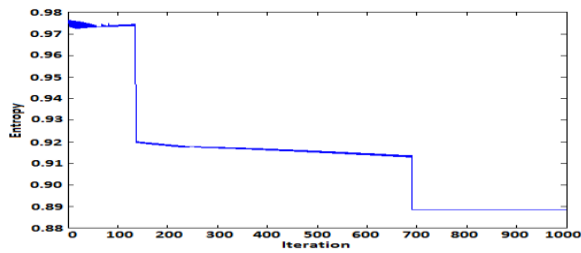
وضعیت میزان سود، تولید و قیمت تسویه بازار به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که بر اثر پر شدن یک خط از شبکه (خط ۲-۴) عامل‌ها بعد از یک تکرار به نسبت طولانی‌تری از اجرای سیستم توانسته‌اند به تعادل نش برسند. نتایج رسیدن به تعادل نش واحدهای تولید طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان توان عبوری بین دو ناحیه ۲ و ۴ در اثر افزایش ظرفیت انتقال، بیش‌تر شده و به مقدار ۹۰۰ مگاوات رسیده است؛ دلیل این رخداد این است که قیمت‌ها در ناحیه ۴، به دلیل گران بودن واحد ۱۲ و ضرایب تابع هزینه بالای آن، زیاد بوده و از دیدگاه ISO، تولید واحد ۱۲ مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد و بهتر آن است که این ناحیه از شرکت‌های موجود در نواحی دیگر میزان بار موردنیاز خود را تأمین کند. از طرفی با مشاهده نتایج تولید بازیگران در جدول ۳ می‌توان پی برد که با افزایش ظرفیت انتقال بین دو ناحیه ۲ و ۴، ناحیه ۲ در تأمین توان سهم بیش‌تری داشته است. از این‌رو سهم بازار ناحیه ۲ افزایش یافته و از قدرت بازار ناحیه ۴ به‌واسطه تولید بیش‌تر ناحیه ۲ کاسته شده است. از این‌رو، مقدار شاخص ضریب آنتروپی در جدول ۳ نشان می‌دهد که رقابت‌پذیری بازار پس از افزایش ظرفیت انتقال نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده و بازار انحصاری‌تر شده است. قیمت حاشیه‌ای محلی نیز در اثر افزایش ظرفیت انتقال مطابق با جدول ۳ برای تمامی بازیگران در نقطه تعادل ثابت شده و به مقدار ۴۰/۶۵۰۹ رسیده است؛ بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت اختلاف قیمت بین نواحی بر اثر افزایش ظرفیت انتقال از بین رفته است. لازم به ذکر است که خط انتقال منتهی به نواحی ۲، ۴، ۱، ۱ و ۳، ۳ و ۴ تنها مختص توان عبوری در بین این نواحی نیست و نواحی دیگر نیز بسته به نوع تکنولوژی و ظرفیتی که در اختیار دارند، می‌توانند مقداری توان از طریق این خطوط به نواحی دیگر انتقال دهند. شکل ۱۱ وضعیت رقابت در بازار را نشان می‌دهد؛ مطابق با این شکل واحدهای تولید با استفاده از روش یادگیری تقویتی و تغییر متغیر استراتژیک B' توانسته‌اند آموزش ببینند و سود خود را بیش‌تر کنند.

مگاوات است، بسته به نیاز نواحی ۱ و ۴، به واسطه خطوط انتقال بین ناحیه‌ای و ظرفیت آن، به این نواحی بفروشد و بار موردنیاز این نواحی را تأمین نماید. میزان تقاضا در ناحیه ۳ برابر ۳۰۰۰ مگاوات است و این ناحیه در مجموع نیز توانسته ۳۰۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل نش تولید کند. بنابراین نیاز به خرید توان از نواحی دیگر برای تأمین بار خود ندارد. همچنین لازم به ذکر است که واحد ۹ و ۱۰ چون ضرایب پیشنهاد قیمت کم‌تر به‌واسطه تابع هزینه کم‌تر خود دارا هستند، توانسته‌اند تا سقف ظرفیت مجاز خود یعنی ۱۵۰۰ مگاوات تولید کنند. در نتیجه میزان بار این ناحیه تأمین شده و دیگر نیازی به تولید کردن واحد گران‌تر شماره ۸ نمی‌باشد. لازم به ذکر است که خط انتقال منتهی به نواحی ۲ و ۴، ۲ و ۱، ۱ و ۳، ۳ و ۴ تنها مختص توان عبوری در بین این نواحی نیست و نواحی دیگر نیز بسته به نوع تکنولوژی و ظرفیتی که در اختیار دارند، می‌توانند مقداری توان از طریق این خطوط به نواحی دیگر انتقال دهند. شکل ۷ وضعیت رقابت در بازار را نشان می‌دهد؛ مطابق با این شکل واحدهای تولیدی با استفاده از روش یادگیری تقویتی و تغییر متغیر استراتژیک B' توانسته‌اند آموزش ببینند و سود خود را بیش‌تر کنند.

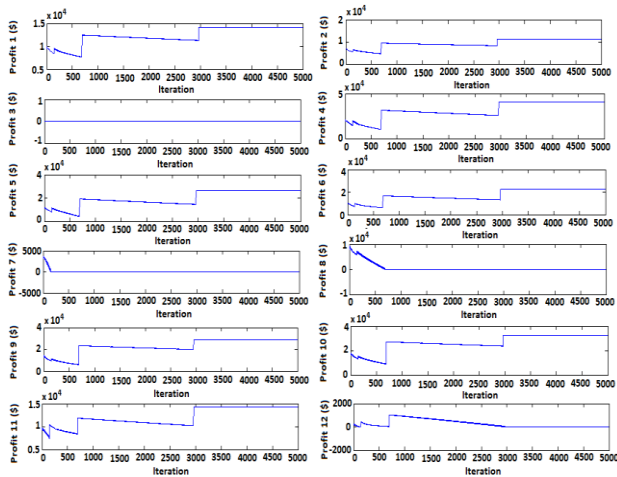


شکل ۴: نمودارهای سود بازیگران در حالت تک‌زناتوری

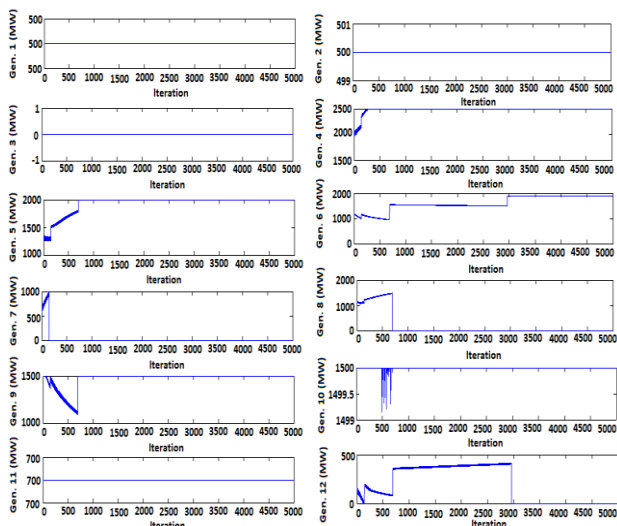
محدودیت‌های انتقال از جمله عوامل ساختاری تأثیرگذار بر قدرت بازار است. در صورتی که خطوط انتقال منتهی به یک ناحیه دچار تراکم شوند، واحدهای موجود در آن ناحیه می‌توانند قیمت‌های بالایی پیشنهاد دهند. در چنین شرایطی به‌واسطه محدودیت‌های انتقال، واحدهای ارزان موجود در نواحی دیگر نمی‌توانند با قیمت پائین‌تر را انتقال دهند. از این‌رو قیمت‌های ناحیه‌ای که خطوط آن تحت تراکم



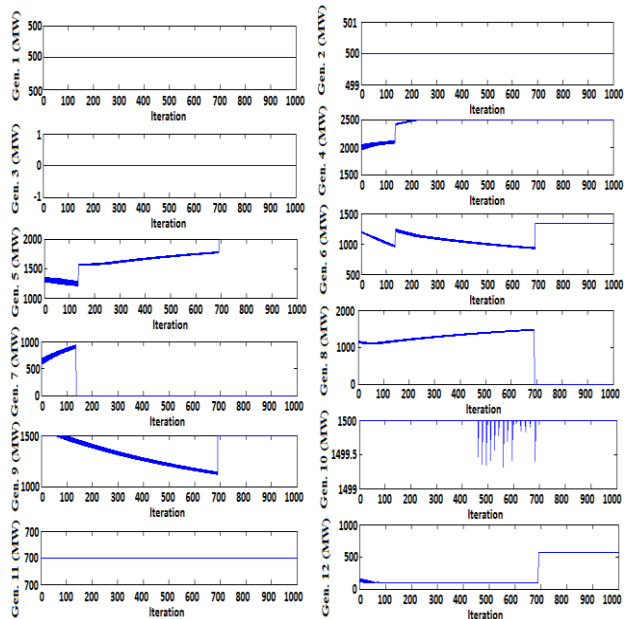
شکل ۷: نمودار وضعیت رقابت بازار در حالت تک‌ژنراتوری



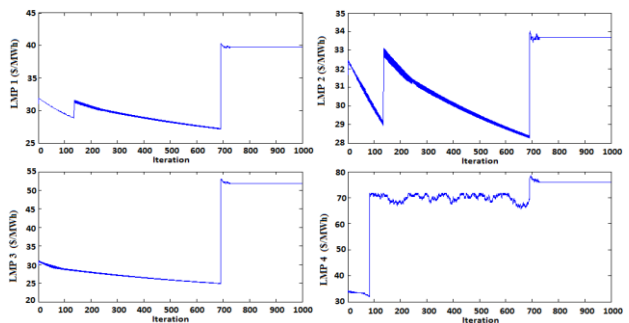
شکل ۸: نمودارهای سود بازیگران در حالت تک‌ژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال



شکل ۹: نمودارهای تولید بازیگران در حالت تک‌ژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال



شکل ۵: نمودارهای تولید بازیگران در حالت تک‌ژنراتوری



شکل ۶: نمودارهای قیمت حاشیه‌ای محلی در حالت تک‌ژنراتوری

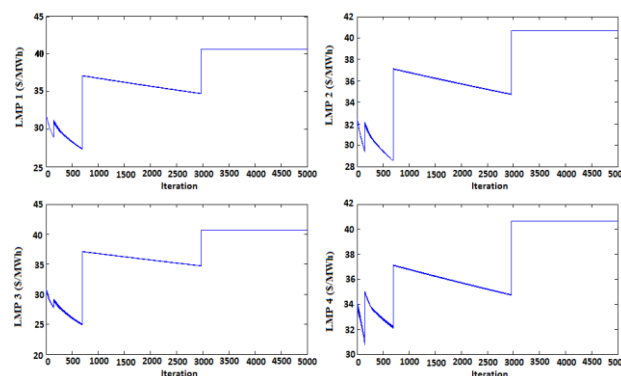
جدول ۲: تعادل نش در حالت تک‌ژنراتوری

واحد تولید	LMP (\$/MWh)	تولید (MW)	سود (\$)	ضریب آنتروپی
۱	۳۹/۷۲۴۵	۵۰۰	۱۳۸۶۲	۰/۸۸۸۵
۲	۳۹/۷۲۴۵	۵۰۰	۱۰۸۶۲	
۳	۳۹/۷۲۴۵	۰	۰	
۴	۳۳/۷۰۲۹	۲۵۰۰	۲۳۰۰۷	
۵	۳۳/۷۰۲۹	۲۰۰۰	۱۲۴۰۶	
۶	۳۳/۷۰۲۹	۱۳۲۸/۶	۱۱۸۲۸	
۷	۳۳/۷۰۲۹	۰	۰	
۸	۵۱/۷۶۷۷	۰	۰	
۹	۵۱/۷۶۷۷	۱۵۰۰	۴۵۴۰۲	
۱۰	۵۱/۷۶۷۷	۱۵۰۰	۴۹۱۵۲	
۱۱	۷۵/۸۵۴۱	۷۰۰	۳۸۹۵۸	
۱۲	۷۵/۸۵۴۱	۵۷۱/۴۳	۲۲۶۹۲	

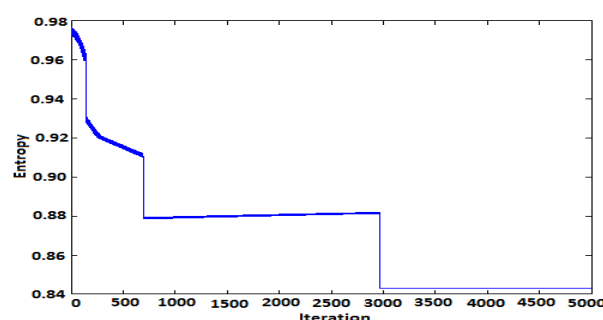
نسبت به سایر مالکین برخوردار است از طرفی میزان تقاضا در ناحیه ۲ برابر ۴۰۰۰ مگاوات است و این ناحیه در مجموع توانسته ۵۲۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل تولید کند. بنابراین مالک ۲ می‌تواند بسته به نیاز مالک ۴، مازاد توان تولیدی خود را در صورت وجود ظرفیت خط انتقال کافی به این مالک بفروشد و بار موردنیاز ناحیه ۴ را تأمین نماید. همچنین میزان تقاضا در ناحیه ۱ برابر ۲۳۰۰ مگاوات است در صورتی که این ناحیه در مجموع توانسته ۱۰۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل تولید کند. بنابراین بهتر این است که ناحیه ۱ به واسطه خط انتقال و ظرفیت آن، از نواحی ارزان‌تر میزان توان موردنیاز خود را خریداری کند. بایستی یادآوری نمود که ناحیه ۲ در مجموع توانسته است ۵۲۰۰ مگاوات تولید کند که از این مقدار، ۴۰۰۰ مگاوات متعلق به تأمین بار در ناحیه خود می‌باشد بنابراین می‌تواند مازاد توان ناحیه خود را که برابر ۱۲۰۰ مگاوات است، بسته به نیاز نواحی ۱ و ۴ و به واسطه ظرفیت کافی در خطوط انتقال بین نواحی به آن‌ها بفروشد و بار مورد نیاز مالک‌های این نواحی را تأمین نماید. میزان تقاضا در ناحیه ۳ برابر ۳۰۰۰ مگاوات است و این ناحیه نیز در مجموع توانسته ۴۱۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل نش تولید کند. بنابراین نیازی به خرید توان از نواحی دیگر برای تأمین بار خود ندارد ولی می‌تواند مازاد توان تولیدی خود را که برابر ۱۱۰۰ مگاوات است بسته به نیاز نواحی و بیشینه ظرفیت خطوط انتقال به نواحی دیگر بفروشد. لازم به ذکر است که خط انتقال منتهی به نواحی ۲ و ۴، ۱ و ۲، ۱ و ۳، ۳ و ۴ تنها مختص توان عبوری در بین این نواحی نیست و نواحی دیگر نیز بسته به نوع تکنولوژی و ظرفیتی که در اختیار دارند، می‌توانند مقداری توان از طریق این خط به نواحی دیگر انتقال دهند. شکل ۱۵ وضعیت رقابت در بازار را نشان می‌دهد؛ مطابق با این شکل شرکت‌های تولید با استفاده از روش یادگیری تقویتی و تغییر متغیر استراتژیک B^i توانسته‌اند آموزش ببینند و سود خود را بیش‌تر کنند.

جدول ۳: تعادل در حالت تک‌ژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال

واحد تولید	LMP (\$/MWh)	تولید (MW)	سود (\$)	ضریب آنتروپی
۱	۴۰/۶۵۰۹	۵۰۰	۱۴۳۲۵	۰/۸۴۳۰
۲	۴۰/۶۵۰۹	۵۰۰	۱۱۳۲۵	
۳	۴۰/۶۵۰۹	۰	۰	
۴	۴۰/۶۵۰۹	۲۵۰۰	۴۰۳۷۷	
۵	۴۰/۶۵۰۹	۲۰۰۰	۲۶۳۰۲	
۶	۴۰/۶۵۰۹	۱۹۰۰	۲۲۵۱۷	
۷	۴۰/۶۵۰۹	۰	۰	
۸	۴۰/۶۵۰۹	۰	۰	
۹	۴۰/۶۵۰۹	۱۵۰۰	۲۸۷۲۶	
۱۰	۴۰/۶۵۰۹	۱۵۰۰	۳۲۴۷۶	
۱۱	۴۰/۶۵۰۹	۷۰۰	۱۴۳۱۶	
۱۲	۴۰/۶۵۰۹	۰	۰	



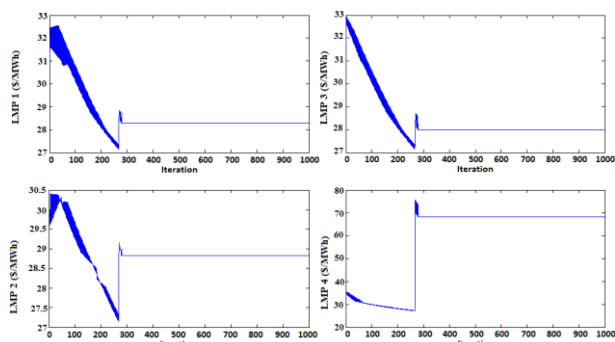
شکل ۱۰: نمودارهای قیمت حاشیه‌ای محلی در حالت تک‌ژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال



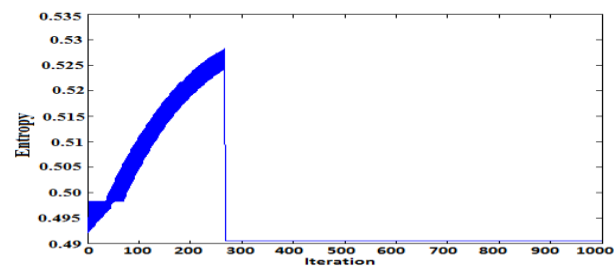
شکل ۱۱: نمودار وضعیت رقابت بازار در حالت تک‌ژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال

۴-۱-۲- چند ژنراتوری

در این حالت هر مالک با به کار بردن رفتار استراتژیکی قصد بیشینه‌کردن سود کلی خود را دارد. با این دیدگاه چهار مالک با یکدیگر به رقابت می‌پردازند که شرکت ۱ مالک ژنراتورهای ۱ و ۲ و ۳، شرکت ۲ مالک ژنراتورهای ۴ و ۵ و ۶ و ۷، شرکت ۳ مالک ژنراتورهای ۸ و ۹ و ۱۰ و شرکت ۴ مالک ژنراتورهای ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. وضعیت میزان سود، تولید و قیمت تسویه بازار به ترتیب در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نمایش داده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که عامل‌ها بعد از یک تکرار معقول از اجرای سیستم توانسته‌اند طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی به تعادل نش برسند. نتایج رسیدن به تعادل نش شرکت‌های تولید طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی در جدول ۴ آورده شده است که حاصل از استراتژی‌های بهینه یافت‌شده بعد از اجرای الگوریتم پیشنهادی بعد از ۱۰۰۰ تکرار می‌باشد. همان‌طور که گفته شد میزان تقاضا در ناحیه ۴ برابر ۱۸۰۰ مگاوات است و بیشینه ظرفیت تولید در این ناحیه برابر ۲۷۰۰ مگاوات است اما طبق جدول ۴ مشاهده می‌شود که این مالک در مجموع توانسته ۸۰۰ مگاوات در هنگام رسیدن به نقطه تعادل تولید کند. در نتیجه این ناحیه نیاز به دریافت توانی معادل با ۱۰۰۰ مگاوات برای تأمین بار ناحیه خود دارد. بهتر این است که مالک ۴ به واسطه خط انتقال، از نواحی ارزان‌تر میزان توان موردنیاز خود را تأمین کند. با مشاهده مقادیر LMP نواحی مختلف در جدول ۴ می‌توان دریافت که مالک ۲ از قیمت کم‌تری



شکل ۱۴: نمودارهای قیمت حدی محلی در حالت چندژنراتوری

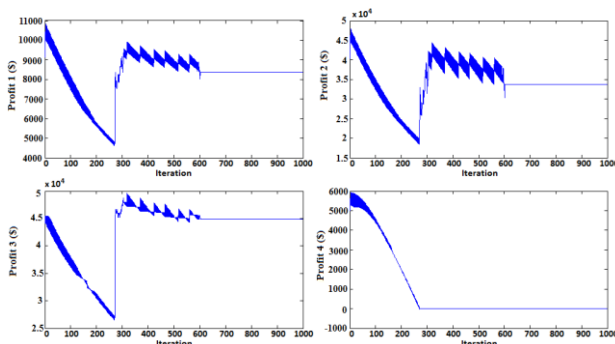


شکل ۱۵: نمودار وضعیت رقابت بازار در حالت چندژنراتوری

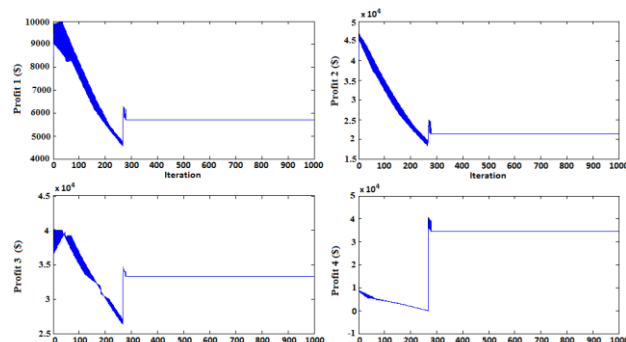
جدول ۴: تعادل نش در حالت چندژنراتوری

ضریب آنتروپی	سود (\$)	تولید (MW)	LMP (\$/MWh)	مالک
۰/۴۹۰۵	۵۷۰۵/۶	۱۰۰۰	۲۸/۲۷۴۸	۱
	۲۱۳۲۲	۵۲۰۰	۲۷/۹۹۹۱	۲
	۳۳۳۳۷	۴۱۰۰	۲۸/۸۲۶۰	۳
	۳۴۵۹۶	۸۰۰	۶۸/۱۲۵۴	۴

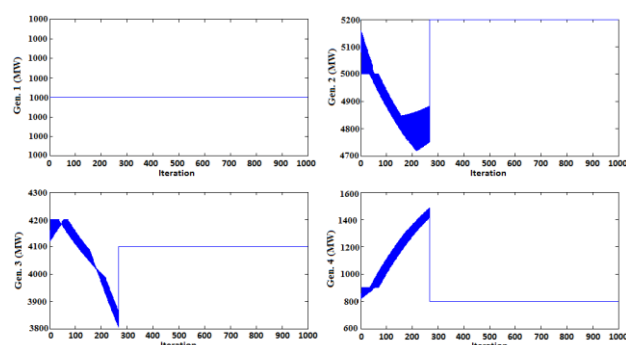
شکل ۱۹ وضعیت رقابت در بازار را نشان می‌دهد؛ مطابق با این شکل شرکت‌های تولید با تغییر متغیر استراتژیک B^i و بر اساس ساختار یادگیری تقویتی، سود خود را افزایش می‌دهند. با مقایسه مقدار شاخص آنتروپی در جدول ۲ و ۴، می‌توان دریافت هنگامی که یک مالک بیش از یک واحد در اختیار داشته باشد تأثیرگذاری بیش‌تری بر بازار خواهد داشت و بازار هرچه بیش‌تر به سمت انحصار چندقطبی پیش می‌رود. به همین دلیل میزان شاخص رقابت در حالت چندژنراتوری کم‌تر از حالت تک‌ژنراتوری شده و بازار انحصاری‌تر شده است.



شکل ۱۶: نمودارهای سود مالکان در حالت چندژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال



شکل ۱۲: نمودارهای سود مالکان در حالت چندژنراتوری



شکل ۱۳: نمودارهای تولید مالکان در حالت چندژنراتوری

جهت بررسی تأثیر محدودیت خطوط انتقال بر مسئله پیش رو، ظرفیت خط انتقال بین نواحی ۲ و ۴، ۳ و ۴ را که در نقطه تعادل به بیشینه مقدار ظرفیت مجاز توان عبوری خود رسیده بود، از مقدار ۵۰۰ مگاوات به مقدار ۱۰۰۰ مگاوات افزایش داده شد. وضعیت میزان سود، تولید و قیمت تسویه بازار به ترتیب در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که عامل‌ها بعد از یک تکرار معقول از اجرای سیستم توانسته‌اند به تعادل نش برسند. نتایج رسیدن به تعادل نش شرکت‌های تولید طبق روش یادگیری تقویتی پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان توان عبوری بین نواحی در اثر افزایش ظرفیت انتقال، بیش‌تر شده است و آن هم به این خاطر است که به‌دلیل قیمت پیشنهادی بالای مالک ۴، به‌صرفه است که از نواحی دیگر میزان بار درخواستی این ناحیه تأمین شود. با مشاهده نتایج میزان تولید بازیگران در جدول ۵ می‌توان پی برد که با افزایش ظرفیت انتقال، سهم توان تولیدی مالک ۲ افزایش می‌یابد. از این رو سهم مالک ۲ از بازار افزایش یافته و از قدرت بازار مالک ۴ به‌واسطه تولید بیش‌تر مالک ۲ کاسته شده است. مقدار شاخص ضریب آنتروپی در جدول ۵ نشان می‌دهد که رقابت‌پذیری بازار پس از افزایش ظرفیت انتقال، نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده و بازار انحصاری‌تر شده است. قیمت حاشیه‌ای محلی مطابق با جدول ۵ برای تمامی بازیگران در نقطه تعادل ثابت شده است؛ بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت اختلاف قیمت بین نواحی کاهش یافته است.

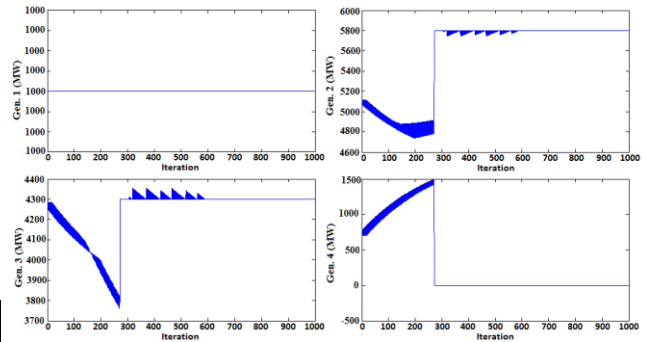
گردیده است درحالی که در مرجع [۲۶] از اثر سیستم انتقال چشم‌پوشی شده است. همچنین شایان ذکر است از آن جا که الگوریتم طرح‌شده از پخش بار بهینه در هر تکرار استفاده می‌نماید صحت نتایج حاصله به لحاظ بهینگی توسط روش پخش بار بهینه تضمین گردیده است.

جدول ۶: اعتبارسنجی روش پیشنهادی در مقایسه با مرجع [۲۶]

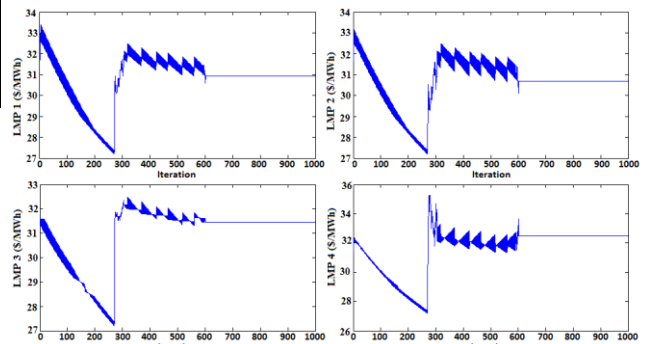
کل هزینه پرداخت‌شده توسط بهره‌بردار (\$)	قیمت بازار (\$/MWh)	ضریب آنتروپی	روش پیشنهادی
۴۸۷۹۲۹/۵	۴۲/۱۶۷	۰/۸۸۸۵	روش پیشنهادی
۳۸۶۸۱۸/۹	۳۸/۲۹۹	۱/۰۴۴	ساختار پرداخت یکنواخت [۲۶]
۴۴۸۶۵۱	۴۰/۴۱۹	۱/۰۴۴۶	ساختار پرداخت مطابق پیشنهاد قیمت [۲۶]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار یادگیری تقویتی جهت تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت مالک‌های تک‌ژنراتوری و چندژنراتوری ارائه گردید. در ساختار پیشنهادی، بازیگران بازار طبق روش یادگیری تقویتی، به آموزش مناسبی برای سطح تغییرات پیشنهاد قیمت خود دست یافتند به‌نحوی که هر تغییر رفتار دیگر آن‌ها با توجه به نوع رفتار سایر بازیگران، باعث کاهش سودشان می‌شد که به معنای رسیدن به نقطه تعادل نش می‌باشد. از سوی دیگر، مقایسه نتایج رفتار شرکت‌های تولید در حالت مالکیت تک و چندژنراتوری مؤید آن است که مالک‌ها در ساختار چندژنراتوری تأثیرگذاری بیش‌تری بر بازار خواهند داشت و بازار را هرچه بیش‌تر به سمت انحصار چندقطبی پیش می‌برند. به همین دلیل میزان شاخص رقابت در حالت چندژنراتوری کم‌تر از حالت تک‌ژنراتوری شده و بازار ساختار انحصاری‌تری پیدا کرده است. با افزایش ظرفیت خط انتقال در فرآیند تسویه بازار به شیوه پرداخت بر اساس قیمت حدی محلی، انتظار می‌رفت که مقدار شاخص رقابت‌پذیری بازار افزایش یابد؛ اما ملاحظه شد که مقدار شاخص رقابتی، تنها به افزایش ظرفیت انتقال بین دو ناحیه بستگی ندارد و متأثر از نوع تکنولوژی مورد استفاده، هزینه تولید و استراتژی‌های قیمت‌دهی هر یک از مالکین نیز می‌باشد. بر اساس نتایج حاصله مشخص گردید که استراتژی تعدادی از بازیگران وابسته به شرایط تراکم انتقال بوده است به‌نحوی که برای افزایش سود خود، اقدام به پیشنهاد قیمت تا نزدیکی سقف بازار نموده و همزمان تولید خود را در رقابت با دیگر حریفان کاهش داده‌اند. در مقابل، تعدادی از بازیگران برای افزایش سطح توان تولیدی خود، سطح قیمت پیشنهادی خود را با توجه به هزینه حاشیه‌ای‌شان، پایین آوردند. به‌طور کلی رفتار پیشنهاد قیمت شرکت‌های تولید مؤید آن است که هرچند ممکن است برخی اقدامات اشتباه را در تکرارهای اولیه از خود نمایش دهند اما در نهایت بعد از یک دوره زمانی، استراتژی قیمت‌دهی بهینه را با کاوش در فضای تصمیم‌گیری و یادگیری تجارب گذشته به‌دست آورده‌اند.



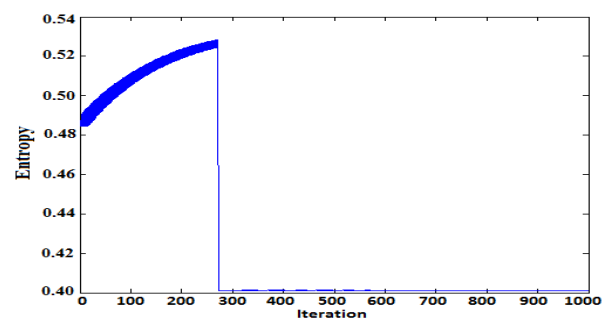
شکل ۱۷: نمودارهای تولید مالکان در حالت چندژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال



شکل ۱۸: نمودارهای قیمت حدی محلی در حالت چندژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال

جدول ۵: تعادل در حالت چندژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال

مالک	LMP (\$/MWh)	تولید (MW)	سود (\$)	ضریب آنتروپی
۱	۳۰/۹۴۱۱	۱۰۰۰	۸۳۷۱/۹	۰/۴۰۱۰
۲	۳۰/۶۸۴۲	۵۸۰۰	۳۳۷۸۷	
۳	۳۱/۴۵۵۰	۴۳۰۰	۴۴۸۹۲	
۴	۳۲/۴۸۲۹	۰	۰	



شکل ۱۹: نمودار وضعیت رقابت بازار در حالت چندژنراتوری بعد از افزایش ظرفیت انتقال

جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مطابق جدول ۶ نتایج حاصله از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از تعادل نش در مرجع [۲۶] مقایسه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود نتایج با نقطه تعادل نش قدری فاصله داشته و از آن غیررقابتی‌تر می‌باشد زیرا نقطه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی مطرح‌شده در حالت مقید به قیود انتقال ارزیابی

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری جناب آقای مهندس سجاد جلیل‌زاده کمال سپاس‌گزاری را دارند.

مراجع

- [14] Ch.Graf and D. Wozabal, "Measuring competitiveness of the EPEX spotmarket for electricity," *Energ Policy*, vol. 62, pp. 948–958, 2013.
- [15] S. Borenstein, J. Bushnell and C.R. Knittel, "Market power in electricity markets: beyond concentration measures," *University of California Energy Institute*, vol. 20, no. 4, pp. 65–83, 1999.
- [16] P. Gountis and G. Bakirtzis, "Bidding strategy for electricity producers in a competitive electricity marketplace," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 19, no. 1, pp. 356–365, 2004.
- [17] L. Waltman and U. Kaymak, "Q-learning agents in a cournot oligopoly model," *J. Econ Dyn Control*, vol. 32, no. 10, pp. 3275–3293, 2008.
- [۱۸] حسین شایقی و علی قاسمی، «پیش‌بینی قیمت روزانه برق با شبکه عصبی بهبودیافته مبتنی بر تبدیل موجک و روش آشوبناک جستجوی گرانشی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحات ۱۰۳–۱۱۳، زمستان ۱۳۹۴.
- [19] D. Srinivasan, L. T. Trung and C. Singh, "Bidding and cooperation strategies for electricity buyers in power markets," *IEEE Sys. J*, vol. 10, pp. 422–433, 2016.
- [20] I. Taheri, M. Rashidinejad, A. Badri and A. Rahimi-Kian, "Analytical approach in computing Nash equilibrium for oligopolistic competition of transmission-constrained GENCOs," *IEEE Sys. J*, vol. 9, pp. 1452–1462, 2015.
- [21] Y. Liu and F. F. Wu, "Impacts of network constraints on electricity market equilibrium," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 22, no. 1, pp. 126–135, 2007.
- [22] A. Rahimi-Kian, H. Tabarraei and B. Sadeghi, "Reinforcement learning Based supplier-agents for electricity markets," *In Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pp. 1405–1410, 2005.
- [۲۳] حسام گل‌محمدی، رضا کی‌پور و آرمان حسن‌پور، «بهینه‌سازی سبد تولید سبز در بازار خرده‌فروشی برق با در نظر گرفتن کشسانی مصرف‌کنندگان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۷۷–۳۰۱، زمستان ۱۳۹۵.
- [۲۴] جعفر رزمی، سیدفرید قادری و امین ذکایی آشتیانی، «تحلیل شاخص‌های ارزیابی رقابتی بودن بازار برق ایران: مطالعه موردی»، *نشریه مدیریت بازرگانی*، دوره ۲، شماره ۵، صفحات ۴۱–۶۰، پاییز ۱۳۸۹.
- [25] M. Rahimiyan and H. Rajabi Mashhadi, "Evaluating the efficiency of divestiture policy in promoting competitiveness using an analytical method and agent-based computational economics," *Energ Policy*, vol. 38, no. 3, pp. 1588–1595, 2009.
- [26] P. Couchman, B. Kouvaritakis, M. Cannon and F. Prashad, "Gaming Strategy for Electric Power with Random Demand," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 20, no. 3, pp. 1283 – 1292, 2005.
- [1] G. Hamoud and I. Bradley, "Assessment of transmission congestion cost and locational marginal pricing in a competitive electricity market," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 19, no. 2, pp. 769 - 775, 2004.
- [2] M. Shahidehpour, H. Yamin and Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management*, New York: Wiley, 2002.
- [3] D. Srinivasan, K.W. Lye and D.Woo, "Evolving cooperative bidding strategies in a power market," *Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Canada, July 2006.
- [4] Z. Li and H. Daneshi, "Some observations on market clearing price and locational marginal price," *Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 2005.
- [5] H. Rudnick, R. Palma and J.E. Fernandez, "Marginal pricing and supplement cost allocation in transmission open access," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 10, no. 2, pp. 1125–1132, 1995.
- [6] Y. Fu and Z. Li, "Different models and properties on LMP calculations," *Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 2006.
- [7] D. Kirschen and A. Papalexopoulos, "Theoretical and practical considerations in developing and using LMPs," *Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 2006.
- [8] A.J. Conejo, E. Castillo, R. Mingues and F. Milano, "Locational marginal price sensitivities," *IEEE Trans. On Power Sys*, vol. 21, no. 4, pp. 2026–2032, 2005.
- [9] M. Rahimiyan and H. Rajabi Mashhadi, "Supplier's optimal bidding strategy in electricity pay as bid auction: comparison of the Q-learning and a model-based approach," *Electric Power Sys. Res*, vol. 78, no. 1, pp. 165–175, 2008.
- [10] A. Soofiabadi and A. Akbari Foroud, "Nodal market power detection under locational marginal pricing," *Iran J. Electric Electron Eng*, vol. 10, no. 1, pp. 45–54, 2014.
- [11] V. Moutinho, A.C. Moreira and J. Mota, "Do regulatory mechanisms promote competition and mitigate market power? Evidence from spanish electricity market," *Energ Policy*, vol. 68, pp. 403–412, 2014.
- [12] M.E. Hajiabadi and H. Rajabi Mashhadi, "LMP decomposition: a novel approach for structural market power monitoring," *Elect. Power Sys. Res*, vol. 99, pp. 30–37, 2013.
- [13] M.B. Nappu, R.C. Bansal and T.K. Saha, "Market power implication on congested power system: A case study of financial withheld strategy," *Int. J. Electric Power Energy Sys*, vol. 47, pp. 408–415, 2013.

زیرنویس‌ها

² Local Marginal Price³ Zonal Marginal Price⁴ Security Constraint Economic Dispatch⁵ Reinforcement learning¹ Independent System Operator