

قیمت گذاری اختیار برق بر اساس تعادل بازار روز بعد و بازار اختیار

مجید علمی بایگی

دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

هانی رئوف شیبانی**

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه صنعتی قوچان

قوچان، ایران

گذاری قراردادهای مشتقات مالی، و یا استفاده از قیمت گذاری انجام شده توسط بهره بردار بازار مالی، پیشنهاد قیمت خود در بازار مالی را ارائه می کنند. با توجه به ارتباط بهره بردار بازار مالی برق با هیئت تنظیم مقررات بازارهای فیزیکی و مالی برق، پیش بینی شرایط آینده دو بازار می تواند در قیمت گذاری دقیق تر قراردادهای مشتقات مالی به بهره بردار بازار مالی برق کمک کند [۱-۲].

در برخی از مطالعات، تأثیر بازارهای مالی برق بر بازارهای فیزیکی برق از دیدگاه بازیگران بازار مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه معاملات مالی اختیار برق بعنوان یکی از مهمترین ابزارهای پوشش ریسک تولیدکنندگان ناشی از عدم قطعیت ها بکار گرفته می شود، در این بخش مطالعات صورت گرفته برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان در بازارهای فیزیکی و مالی اختیار برق بررسی می شوند.

در مرجع [۳]، با در نظر گرفتن عدم دسترس پذیری گاز طبیعی، بازار فیزیکی برق در کنار بازار قراردادهای اختیار معامله بلند مدت مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف دنبال شده در این مرجع، تعیین راهبرد بهینه بازیگران برای شرکت در بازار فیزیکی برق بوده است. در مرجع [۳] بمنظور تعیین راهبرد بهینه یک تولیدکننده در بازار اختیار خرید، یک مدل بهینه سازی تصادفی ارائه شده است. در این مدل، تولیدکنندگان قیمت اختیار و قیمت اجرا را به بازار اختیار پیشنهاد می دهند. در مرجع [۴] قراردادهای اختیار بر روی پیمان آبی تعریف شده است. در این مرجع راهبرد بهینه تولیدکنندگان برای استفاده از قراردادهای اختیار بر روی پیمان آبی جهت پوشش ریسک قیمت در بازار انرژی ارائه شده است. در مرجع [۵] تولیدکنندگان برای پوشش ریسک مربوط به حجم توان تولیدی در بازار انرژی، در بازار مالی شرکت می کنند. بدین منظور، راهبرد بهینه تولیدکنندگان برای پوشش ریسک توان با استفاده از خرید قراردادهای پیمان آبی و اختیار در مرجع [۵] ارائه

چکیده — با توجه به گسترش روز افزون بازارهای مالی برق، تولیدکنندگان انرژی الکتریکی نیازمند بکارگیری روش های قیمت گذاری نوین برای پوشش حداکثری ریسک خود در بازارهای مختلف می باشند. با توجه به حضور این تولیدکنندگان بصورت همزمان در بازارهای فیزیکی و مالی برق، لازم است روش قیمت گذاری قراردادهای مالی آنها، ریسک های توأمان تولیدکنندگان در هر دو بازار را پوشش دهد. در این مقاله، روشی نوین برای قیمت گذاری قراردادهای اختیار فروش بر مبنای شرایط تعادل توأمان بازار روز بعد و بازار اختیار ارائه شده است. بر اساس روش ارائه شده، ناحیه ای اجرای اختیار که بیان کننده بخشی از صفحه قیمت اجرا-قیمت اختیار است که در آن بازیگران بازار مالی مشتاق به انعقاد قراردادهای اختیار هستند، معرفی می شود. نتایج شبیه سازی انجام شده بر روی یک سیستم قدرت نمونه، قابلیت های روش قیمت گذاری ارائه شده و میزان تأثیرگذاری متقابل قراردادهای اختیار فروش و بازار روز بعد انرژی الکتریکی را نشان می دهد.

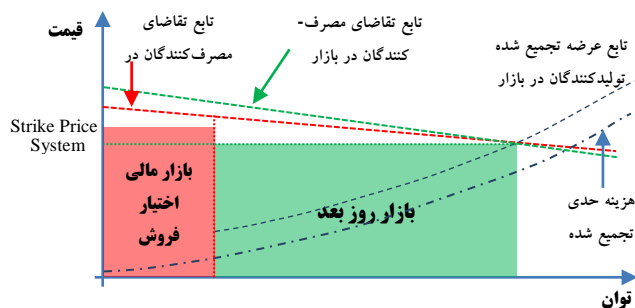
واژه های کلیدی — بازار اختیار فروش؛ تعادل توأمان بازارها؛

قیمت گذاری قرارداد اختیار؛ تأثیر متقابل بازار فیزیکی و بازار مالی؛

۱. مقدمه

تعیین قیمت پایه قراردادهای مشتقات مالی برق یا قیمت گذاری قراردادهای مالی برق معمولاً توسط بهره بردار بازار مالی برق انجام می شود. این قیمت گذاری، سیگنالی از طریق بهره بردار بازار مالی برق به بازیگران آن بازار ارائه می کند [۱-۲]. البته قیمت واقعی قراردادهای مشتقات مالی بر اساس رقابت بازیگران در این بازار تعیین می گردد. هر یک از بازیگران نیز بر اساس تخمین خود از شرایط بازار، استفاده از روش های متداول قیمت-

بازار می‌تواند برای اجرای قرارداد اختیار تصمیم‌گیری کند [۸]. در این مقاله، در بازار مالی مورد مطالعه فقط امکان معامله قراردادهای اختیار فروش اروپایی با تحویل فیزیکی برای بازیگران وجود دارد. در این بازار مالی، تولیدکنندگان حجم و قیمت پیشنهادی خود را به بهره‌بردار بازار اعلام می‌کنند. مصرف‌کنندگان نیز در قالب یک مصرف‌کننده تجمیع شده نقش طرف معامله مرکزی (CCP^۱) را در مقابل تولیدکنندگان اجرا می‌کنند. در شکل ۱، منحنی توابع تقاضای تجمیع شده مصرف‌کنندگان در بازارهای فیزیکی و مالی و همچنین منحنی هزینه حدی و تابع عرضه تجمیع شده تولیدکنندگان در بازار روز بعد نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی هزینه حدی و تابع عرضه تجمیع شده تولیدکنندگان

مطابق با شکل ۱، CCP تا زمانی که قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان کمتر از تابع تقاضای تجمیع شده مصرف‌کنندگان در بازار مالی است، اقدام به معامله در بازار اختیار فروش می‌نماید. بر اساس شکل ۳-۱، شیب تابع تقاضا بار در بازار مالی کمتر از شیب تابع تقاضای بار در بازار روز بعد است، زیرا کشش تقاضا در بازار مالی بیشتر از کشش تقاضا در بازار روز بعد است. بازار فیزیکی بصورت یک بازار روز بعد با قیمت‌گذاری یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. رقابت در بازار فیزیکی می‌تواند بصورت کورنات و یا تابع عرضه مدل‌سازی شود.

۲.۱. فرضیات

در این مقاله، بار مصرفی بصورت یک متغیر تصادفی با کشش تقاضای ثابت در نظر گرفته می‌شود. شرکت‌کنندگان در بازار فیزیکی روز بعد، امکان انعقاد قراردادهای استاندارد شده اختیار فروش در بازار مالی اختیار فروش را دارند. هر قرارداد اختیار فروش استاندارد شده، دارای حجم مشخص بر حسب مگاوات، قیمت اجرای معین و بازه تحویل مشخص شده می‌باشد. بازه تحویل و قیمت اجرای هر بسته قرارداد اختیار استاندارد شده توسط بهره‌بردار بازار مالی اختیار فروش تعیین می‌گردد. یک بازیگر بازار اختیار

شده است. در مرجع [۶] بازار اختیار در کنار بازار انرژی در نظر گرفته شده است. در این مرجع، روشی برای محاسبه قیمت‌های اجرای بهینه از دیدگاه یک بازارساز ارائه شده است. در مراجع [۷] و [۸] یک مدل تصادفی چند مرحله‌ای برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان ریسک‌گریز در بازارهای پیمان آتی، اختیار و حوضچه توان ارائه شده است. در این مدل ریسک قیمت در بازار انرژی و ریسک عدم دسترسی واحدها در زمان تحویل انرژی در نظر گرفته شده است. چهارچوب مدیریت ریسک یکپارچه برای معاملات راهبردی یک تولیدکننده در بازار فیزیکی، بازار اختیار و بازار سوخت در مرجع [۹] ارائه شده است.

پژوهش‌های انجام شده از دیدگاه‌های مختلف تأثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی برق را بررسی کرده‌اند. برخی از پژوهش‌ها با ارائه روش‌هایی برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان، از دیدگاه آن‌ها به تأثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی پرداخته‌اند. برخی دیگر از پژوهش‌ها نیز با محاسبه نقطه تعادل بازارهای فیزیکی و مالی به بررسی تأثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی پرداخته‌اند. اما حلقه مفقوده تمام این پژوهش‌ها، عدم در نظر گرفتن تأثیر متقابل این دو بازار بر یکدیگر است. در اکثر این روش‌ها، تأثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی بررسی شده است بدون اینکه راهبردهای انتخابی تولیدکنندگان در بازار فیزیکی بر راهبرد آن‌ها در بازار مالی تأثیری داشته باشد. در این مطالعات، قیمت دارایی پایه و یا فراریت آن در مدل بازار مالی از داده‌های تاریخی بازار فیزیکی بدست آمده است. از آنجا که راهبرد تولیدکنندگان بر قیمت بازار فیزیکی تأثیرگذار است، قیمت دارایی پایه و یا فراریت آن نیز از راهبرد انتخابی تولیدکنندگان در بازار فیزیکی متأثر خواهد شد.

در این مقاله ابتدا مدل تعادل توأمان بازار فیزیکی و مالی برق تعریف می‌شود. سپس تأثیرات متقابل بازارهای فیزیکی و مالی اختیار برق بر یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز، روشی جدید برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار فروش برق با استفاده از شرایط تعادل توأمان بازارهای فیزیکی و مالی برق ارائه می‌گردد.

۲. مدل‌سازی تعادل بازار روز بعد و بازار اختیار فروش

برق

برای پوشش ریسک تولیدکنندگان در بازارهای فیزیکی، ابزارهای مالی مختلفی مانند قراردادهای آتی، پیمان آتی و یا اختیار وجود دارد. قرارداد اختیار فروش نسبت به قراردادهای آتی و یا پیمان آتی انعطاف‌پذیری بیشتری برای یک تولیدکننده فراهم می‌کند، زیرا دارنده حق اختیار فروش یا همان تولیدکننده بر اساس در دسترس بودن واحد خود و تغییرات قیمت

¹ Central Counter Party

بدلیل وجود عدم قطعیت سناریوهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود. لذا فرض می‌شود تولیدکننده i توان Q_{ist}^{Dh} مگاوات را برای ساعت t از سناریوی S بازه تحویل در بازار روز بعد پیشنهاد می‌دهد.

۳. یک روز قبل از هر روز از بازه تحویل و پس از بسته شدن بازار روز بعد و تعیین قیمت بازار، هر تولیدکننده می‌بایست در رابطه با اجرای تمام یا بخشی از حجم قرارداد اختیار فروش خود در هر ساعت از روز بعد تصمیم‌گیری کند. در این مدل‌سازی فرض شده است که تولیدکننده i توان Q_{it}^O مگاوات از حجم معاملاتی Q_i^O مگاوات را در ساعت t از بازه تحویل اجرا نماید. برای در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، فرض می‌شود تولیدکننده i توان Q_{ist}^O مگاوات از حجم معاملاتی Q_i^O مگاوات را در ساعت t از سناریوی S بازه تحویل اجرا نماید. در اینجا فرض شده است که حجم قابل اجرا متغیری پیوسته است. البته در بازارهای واقعی اختیار، این حجم بصورت ضربی از یک مگاوات در نظر گرفته می‌شود.

عکس تابع تقاضا در ساعت t از سناریوی S بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\lambda_{st} = N_{st}^{Dh} - \gamma^{Dh} Q_{st}^L, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T, S = 1, 2, \dots, S \quad (1)$$

که در آن λ_{st} و Q_{st}^L به ترتیب قیمت برق در بازار روز بعد و بار مصرفی شبکه در ساعت t از سناریوی S هستند. N_{st}^{Dh} و γ^{Dh} عرض از مبدا و شیب عکس تابع تقاضا در ساعت t از سناریوی S به ترتیب بر حسب $\$/MWh$ و $\$/MW^2h$ هستند. تابع هزینه تولید توسط تولیدکننده i نیز در ساعت t از سناریوی S بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$C_i(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}) = a_i(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}) + \frac{1}{2} b_i(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh})^2 \quad (2)$$

که در آن a_i و b_i ضرایب تابع هزینه تولیدکننده i به ترتیب بر حسب $\$/MWh$ و $\$/MW^2h$ هستند.

۲.۲. مدل‌سازی رقابت بر اساس مدل کورنات

در این مقاله فقط تولیدکنندگان بعنوان بازیگران راهبردی بازارها در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین هر تولیدکننده با توجه به متغیرهای تصمیم‌گیری خود در بازار اختیار و بازار روز بعد، بدنبال بیشینه‌سازی سود انتظاری خود در بازه تحویل می‌باشد. در این بخش فرض شده است که تولیدکنندگان هم

فروش می‌تواند بسته اختیار فروش مطلوب خود را بر اساس بازه تحویل مورد نظر و قیمت اجرای مورد نظر انتخاب نماید. سپس برای خرید یا فروش آن، حجم بسته و قیمت اختیار (حق اختیار) مورد نظر خود را پیشنهاد دهد. اگر پیشنهادهای خریدار و فروشنده با یکدیگر مطابقت داشته باشند، معامله بسته مورد نظر بین خریدار و فروشنده مذکور انجام خواهد شد. پس از آن، در بازه تحویل بسته معامله شده، اگر قیمت بازار روز بعد کمتر از قیمت اجرای بسته مورد نظر باشد، خریدار بسته اختیار فروش، که همان تولیدکننده انرژی می‌باشد، آن بسته را اجرا کرده و تمام یا بخشی از حجم مورد توافق در قرارداد را به فروشنده اختیار، که همان مصرف‌کننده تجمیع شده است، در قیمت اجرای توافق شده می‌فروشد. اگرچه بازارهای اختیار فروش و روز بعد از لحاظ بهره‌برداری بصورت مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند، ولی بازیگران این بازارها که شامل تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی هستند این دو بازار را به یکدیگر وابسته می‌سازند، بالاخص زمانی که قراردادهای اختیار فروش دارای تحویل فیزیکی باشند [۱۰].

بازه تحویل یک قرارداد اختیار معمولاً می‌تواند شامل تمام ساعات یا ساعات مشخصی از یک هفته، یک ماه، یک فصل و یا حتی یک سال مشخص باشد. در این مقاله فرض می‌شود بازه تحویل شامل ساعات مشخصی از T روز متوالی است که با $t_j, j = 1, 2, \dots, T$ نشان داده می‌شود.

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار مصرفی، S سناریو برای بار مصرفی در بازه تحویل بر اساس تابع توزیع بار مصرفی در نظر گرفته می‌شود. برای یک بازه تحویل مشخص، تولیدکنندگان می‌بایست برای بیشینه‌سازی سود خود در هر دو بازار اختیار فروش و بازار روز بعد در بازه تحویل، تصمیمات زیر را در نظر بگیرند:

۱. چندین ماه قبل از شروع بازه تحویل، هر تولیدکننده پس از انتخاب بسته اختیار فروش مورد نظر می‌بایست در مورد حجم معاملاتی و قیمت اختیار بسته مورد نظر خود تصمیم‌گیری نماید. همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، در زمان t_f تولیدکننده i حجم Q_i^O و قیمت اختیار f_{iK} را برای بسته با قیمت اجرای K تعیین می‌کند.
۲. با توجه به اینکه از مدل رقابت کورنات در این بخش استفاده شده است، یک روز قبل از هر روز از بازه تحویل، هر تولیدکننده می‌بایست در مورد میزان پیشنهاد تولید خود در ساعت t از بازار روز بعد نیز تصمیم‌گیری نماید. فرض می‌شود تولیدکننده i توان Q_{it}^{Dh} مگاوات را برای ساعت t از بازه تحویل در بازار روز بعد پیشنهاد می‌دهد. از آنجا که مطالعه بازارها مدت‌ها قبل از اجرای بازار روز بعد انجام می‌شود،

جملات اول و دوم تابع هدف (۳) بیان‌کننده درآمد انتظاری تولیدکننده i به ترتیب از بازار مالی اختیار فروش و بازار روز بعد در طول بازه تحویل می‌باشند. جمع جملات سوم تا ششم تابع هدف (۳) که داخل پراکنز قرارداده شده‌اند بیان‌کننده هزینه انتظاری تولید توسط تولیدکننده i در بازه تحویل است. آخرین جمله (۳) هزینه خرید بسته اختیار فروش توسط تولیدکننده i در بازه تحویل مورد نظر می‌باشد.

تصمیم‌گیری برای اجرای قرارداد اختیار فروش تولیدکننده i در ساعت t از سناریوی s ، بصورت بیشینه‌سازی عبارت $(Q_{ist}^O K + Q_{ist}^{Dh} \lambda_{st})$ در تابع هدف مدل شده است. در هر ساعت از بازه تحویل اگر قیمت اجرای K از قیمت بازار روز بعد λ_{st} بیشتر باشد، سود تولیدکننده در صورتی بیشینه می‌شود که Q_{ist}^O در بیشترین مقدار خود یعنی برابر با Q_i^O باشد که مبین اجرای خودکار قرارداد اختیار فروش تولیدکننده i است. بالعکس، اگر قیمت اجرای K از قیمت بازار روز بعد λ_{st} کمتر باشد، سود تولیدکننده زمانی حداکثر خواهد شد که Q_{ist}^{Dh} بیشینه شود که با توجه به قید (۴) در این حالت Q_{ist}^O باید صفر شود که بیان‌کننده عدم اجرای قرارداد اختیار فروش تولیدکننده i است.

دسته قیود (۴) محدودیت ظرفیت تولید مربوط به تولیدکننده i در هر ساعت از هر سناریو در بازه تحویل را بیان می‌کند. دسته نامعادلات (۵) قیود مربوط به حداکثر توان قابل اجرا توسط تولیدکننده i در هر ساعت از هر سناریو در بازه تحویل را مدل می‌کند. دسته قیود (۶) ارتباط بین قیمت بازار روز بعد و مصرف کل شبکه را بیان می‌کند. نامعادله (۷) نیز کشش تقاضای بار در بازار مالی به قیمت اجرا و قیمت اختیار تولیدکننده i را مدل می‌کند. بر اساس قید (۷) حجم قراردادی مصرف‌کننده تجمیع شده در بازار مالی اختیار فروش محدود به تابع تقاضای بار آن در بازار مالی است.

تولیدکننده k از گروه B ، فقط در بازار فیزیکی شرکت می‌کند. بنابراین، متغیرهای تصمیم‌گیری این بازیگر فقط توان پیشنهادی قابل تولید در بازار فیزیکی خواهد بود. مسئله بهینه‌سازی مربوط به این تولیدکننده نیز بصورت زیر قابل تعریف است.

$$\max_{Q_{kst}^{Dh}} \sum_{s=1}^S \sum_{t=t_0}^{t_T} p_s \left(Q_{kst}^{Dh} \lambda_{st} - \left(a_k Q_{kst}^{Dh} + \frac{1}{2} b_k Q_{kst}^{Dh^2} \right) \right) \quad (9)$$

s. t.:

$$Q_{kst}^{Dh} \leq \bar{Q}_k, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \mu_{kst} \quad (10)$$

$$\lambda_{st} = N_{st}^{Dh} - \gamma^{Dh} \left(\sum_{m \in A} (Q_{mst}^O + Q_{mst}^{Dh}) + \sum_{m \in B} Q_{mst}^{Dh} \right), \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \theta_{st} \quad (11)$$

قیمت اختیار و هم حجم قرارداد را بعنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بازار اختیار فروش در مسئله بهینه‌سازی خود در نظر می‌گیرند. همچنین، با توجه به رقابت کورنات در بازار روز بعد، حجم قابل تولید هر تولیدکننده در بازار روز بعد نیز بعنوان متغیر تصمیم‌گیری در این بازار در نظر گرفته می‌شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، تولیدکنندگان به دو گروه A و B تقسیم‌بندی می‌شوند. تولیدکنندگان گروه A در هر دو بازار اختیار و بازار روز بعد شرکت می‌کنند در حالیکه تولیدکنندگان گروه B فقط در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. مسئله بهینه‌سازی تولیدکننده i از گروه A را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت.

$$\max_{Q_i^O, Q_{ist}^O, f_{iK}, Q_{ist}^{Dh}} \sum_{s=1}^S \sum_{t=t_0}^{t_T} p_s \left(Q_{ist}^O K + Q_{ist}^{Dh} \lambda_{st} - \left(a_i (Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}) + \frac{1}{2} b_i (Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh})^2 \right) \right) - Q_i^O f_{iK} T e^{rTc} \quad (3)$$

s. t.:

$$Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh} \leq \bar{Q}_i, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \mu_{ist} \quad (4)$$

$$Q_{ist}^O \leq Q_i^O, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \omega_{ist} \quad (5)$$

$$\lambda_{st} = N_{st}^{Dh} - \gamma^{Dh} \left(\sum_{m \in A} (Q_{mst}^O + Q_{mst}^{Dh}) + \sum_{m \in B} Q_{mst}^{Dh} \right), \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \theta_{st} \quad (6)$$

$$K - f_{iK} e^{rTc} \leq N^O - \gamma^O \sum_{m \in A} Q_m^O, \quad : \beta_i \quad (7)$$

$$Q_i^O \geq 0, Q_{ist}^O \geq 0, f_{iK} \geq 0, Q_{ist}^{Dh} \geq 0, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T} \quad (8)$$

که در آن، K قیمت اجرای قرارداد اختیار بر حسب $\$/MWh$ ، f_{iK} قیمت اختیار تولیدکننده i بر حسب $\$/MWh$ ، r نرخ بهره، T_C طول دوره معاملاتی یا زمان باقیمانده تا شروع بازه تحویل بر حسب سال، N^O و γ^O به ترتیب عرض از مبدأ و شیب عکس تابع تقاضا در بازار مالی اختیار فروش، \bar{Q}_i ظرفیت تولید مربوط به تولیدکننده i بر حسب MW ، \mathcal{T} مجموعه ساعات بازه تحویل، Ω مجموعه سناریوهای بار مصرفی در بازه تحویل، p_s احتمال وقوع سناریوی s ، μ_{ist} متغیر دوگان محدودیت ظرفیت تولید تولیدکننده i در ساعت t از سناریوی s ، ω_{ist} متغیر دوگان محدودیت توان قابل اجرای تولیدکننده i در ساعت t از سناریوی s در بازار مالی اختیار فروش، و β_i متغیر دوگان قید مربوط به مصرف‌کننده تجمیع شده در بازار مالی اختیار فروش هستند.

$$\{(f, K) | Tfe^{rTc}/\eta + \bar{\lambda}^0 < K < N^0 + fe^{rTc}\} \quad (13)$$

که در آن f قیمت اختیار در بازار اختیار فروش است و η و $\bar{\lambda}^0$ بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\eta = \sum_{\{s,t|K>\lambda_{st}^0\}} p_s \quad (14)$$

$$\bar{\lambda}^0 = (1/\eta) \sum_{\{s,t|K>\lambda_{st}^0\}} p_s \lambda_{st}^0 \quad (15)$$

که در آن λ_{st}^0 قیمت بازار روز بعد در ساعت t از سناریوی s است هنگامیکه بازار اختیار وجود ندارد یا قرارداد اختیاری منعقد نمی‌شود.

نامعادله (۱۳) این امکان را به بهره‌بردار بازار مالی می‌دهد تا قیمت‌های اجرای اختیاری که در آن تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تمایل به انعقاد قرارداد اختیار فروش دارند را مشخص کند. نامعادله (۱۳) فقط به پارامترهای بازار روز بعد بدون وجود قرارداد اختیار فروش وابسته است. بنابراین قبل از انعقاد قرارداد اختیار، بهره‌بردار بازار مالی اختیار می‌تواند برای یک بازه تحویل مشخص، با استفاده از این نامعادله و اطلاعات گذشته بازار روز بعد، تخمینی از قیمت‌های اجرای مناسب در بازار مالی اختیار را بدست آورد. منظور از قیمت‌های اجرای مناسب، قیمت‌های اجرایی هستند که بهترین نقطه کار مشترک را برای عملکرد همزمان بازار مالی اختیار و بازار روز بعد ایجاد کنند. با در نظر گرفتن یک بازه تحویل در حال حاضر، فقط یک سناریو وجود دارد و آن سناریو، رخدادی است که در بازار روز بعد بوقوع پیوسته است. بنابراین η مجموع ساعاتی از این بازه تحویل است که در آن قیمت اجرای مفروض از قیمت بازار روز بعد بیشتر است و همچنین $\bar{\lambda}^0$ نیز میانگین قیمت بازار روز بعد در ساعاتی از این بازه تحویل است که قیمت اجرای مفروض از قیمت بازار روز بعد در آن ساعات بیشتر است.

از طرف دیگر، نامعادله (۱۳) برای هر قیمت اجرای مشخص، قیمت‌های اختیاری که در آنها قرارداد اختیار منعقد می‌شود را مشخص می‌کند. بنابراین از این نامعادله می‌توان برای تعیین یک بازه برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار نیز استفاده نمود.

۳. شبیه‌سازی

در این بخش، مدل ارائه شده در این مقاله به یک سیستم قدرت شامل بازار روز بعد و بازار مالی اختیار فروش اعمال می‌شود. ناحیه اجرای اختیار مشخص شده و نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های مختلف تحلیل می‌گردند.

$$Q_{kst}^{Dh} \geq 0, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in T \quad (12)$$

برای بدست آوردن نقطه تعادل توأمان بازار روز بعد و بازار اختیار فروش، می‌بایست دستگاهی شامل شرایط KKT مسائل بهینه‌سازی تمام تولیدکنندگان بازارهای فیزیکی و مالی را حل کرد.

۲.۱. ناحیه اجرای اختیار (OCA)²

هیئت قانون‌گذاری بازارهای مالی اختیار، برای اتخاذ تصمیم‌های درست در مورد بهره‌برداری و توسعه شبکه نیاز به تحلیل عملکرد بازیگران این بازار در نقاط کار مختلف آن دارد. دو متغیر اساسی در تصمیم‌گیری بازیگران بازارهای مالی اختیار، قیمت اختیار و قیمت اجرای اختیار هستند. بازیگران این بازارها، با در نظر گرفتن قیمت اجرا و پیش‌بینی قیمت اختیار از طرق مختلف، در رابطه با حجم بسته پیشنهادی خود در بازارهای مالی اختیار تصمیم‌گیری می‌کنند. از این رو، هیئت قانون‌گذاری بازارهای مالی اختیار بدنال بررسی عملکرد بازار مالی در قیمت‌های مختلف اختیار و قیمت‌های مختلف اجرای اختیار است.

در بازارهای مالی اختیار معمولاً قیمت اختیار برای یک بازه مشخص و قیمت اجرای مشخص، در طول یک روز از دوره معاملاتی تغییرات کمی دارد. در پایان هر روز از دوره معاملاتی، یک قیمت بعنوان قیمت تسویه آن روز تعیین می‌شود. برای مطالعه عملکرد بازار در قیمت‌های مختلف، فرض می‌شود که قیمت اختیار تمام تولیدکنندگان راهبردی در بازار مالی اختیار فروش در یک روز با قیمت تسویه آن روز برابر باشد. با این فرض، اکنون می‌توان قیمت اختیار را مانند قیمت اجرای اختیار بعنوان یک متغیر از قبل معین در بهینه‌سازی تولیدکنندگان در نظر گرفت. بنابراین، عملکرد بازار مالی اختیار را می‌توان در صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا مورد تحلیل قرارداد. یعنی به ازای هر نقطه از این صفحه که مبین یک قیمت اختیار و یک قیمت اجرای مشخص است، نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد و در پی آن، قیمت بازار روز بعد، توان تولیدی تولیدکنندگان در بازار روز بعد و توان اجرا شده آن‌ها در بازار اختیار بدست می‌آید.

در این مقاله مجموعه‌ای از نقاط صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا که به ازای آنها قرارداد اختیار فروش در بازار مالی منعقد و اجرا می‌شود، به عنوان **ناحیه اجرای اختیار** تعریف می‌شود. تعیین محدوده ناحیه اجرای اختیار می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر قانون‌گذار بازار مالی کمک کند. **ناحیه اجرای اختیار** توسط نامعادله زیر در صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا تعریف می‌شود.

² Option Contract Area

۳.۱. شبکه مورد مطالعه

در این مقاله فرض می‌شود بار مصرفی دارای عدم قطعیت است. عدم قطعیت بار مصرفی با اختصاص یک تابع توزیع احتمال نرمال مدل شده است. میانگین و انحراف معیار بار در ساعات‌های مختلف دوره تحویل در جدول ۲ داده شده است. شیب معکوس تابع تقاضای بار تجمیع شده این سیستم قدرت $0.003 \$/MW^2h$ در نظر گرفته می‌شود. شیب تابع تقاضا در ساعات مختلف ثابت فرض شده است. عرض از مبدأ و شیب عکس تابع تقاضا در بازار مالی به ترتیب برابر با $54 \$/MWh$ و $0.002 \$/MW^2h$ است.

در صورتیکه بازار مالی اختیار فروش وجود نداشته باشد و همه تولیدکنندگان توان خود را در بازار روز بعد تولید کنند، با محاسبه نقطه تعادل بازار روز بعد برای نقاط کار مختلف سیستم قدرت فوق، حداقل و حداکثر قیمت بازار روز بعد در بازه تحویل به ترتیب برابر با $29/87 \$/MWh$ و $39/23 \$/MWh$ می‌شود.

در بازار مالی اختیار فروش، قیمت اجرا توسط بهره‌بردار بازار مالی تعیین می‌شود. به منظور امکان انعقاد قراردادهای اختیار با قیمت^۳، به قیمت^۴ و بی قیمت^۵، فرض می‌شود قیمت اجرا از $25 \$/MWh$ تا $60 \$/MWh$ با پله-های $1 \$/MWh$ تغییر کند. در هر قیمت اجرا، نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد محاسبه می‌شود.

۳.۲. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده بر روی سیستم قدرت مورد مطالعه، بررسی می‌شود. بر این اساس، ابتدا با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر ورودی معلوم در بازار مالی اختیار فروش، ناحیه اجرای اختیار در شرایط تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد تعیین می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر تصمیم‌گیری برای تولیدکنندگان گروه A نقاط تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد برای قیمت‌های اجرای مختلف تعیین می‌شود. بدین منظور، نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد در هر قیمت اجرا محاسبه می‌شود. قیمت اختیار بهینه هر یک از تولیدکنندگان گروه A در شرایط تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، قیمت اختیار بهینه تولیدکنندگان اول و دوم در گروه A در شرایط تعادل توأمان بازارها با یکدیگر برابر هستند. اگر این

سیستم قدرت مورد مطالعه شامل چهار تولیدکننده می‌باشد. اطلاعات مربوط به هر تولیدکننده با تجمیع اطلاعات ژنراتورها در نواحی چهارگانه شبکه ۳۰۰ گره IEEE بدست می‌آید. در هر ناحیه شبکه ۳۰۰ گره IEEE تعدادی ژنراتور با توابع هزینه حدی مشخص قرار دارند. توابع هزینه حدی کل هر ناحیه محاسبه و با یک تابع خطی تقریب زده می‌شود. تابع خطی ناحیه Am شبکه ۳۰۰ گره IEEE به ژنراتور تولیدکننده Am شبکه مورد مطالعه اختصاص داده شده است. اطلاعات مربوط به هزینه حدی و ظرفیت تولیدکننده‌های سیستم قدرت مورد مطالعه در جدول ۱ داده شده است.

سیستم قدرت مورد مطالعه شامل یک بازار مالی اختیار فروش و یک بازار روز بعد می‌باشد. در این مقاله بازه معامله بازار اختیار فروش، یعنی فاصله بین زمان انعقاد قرارداد اختیار فروش تا زمان آغاز تحویل بسته‌های معامله شده، یکسال در نظر گرفته می‌شود. بازه تحویل قرارداد اختیار فروش نیز، یک ساعت مشخص از روز در ده روز متوالی فرض می‌شود. نرخ بهره نیز ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم قدرت فرض شده است که تولیدکننده‌های اول و دوم در هر دو بازار روز بعد و بازار اختیار فروش شرکت می‌کنند و تولیدکننده‌های سوم و چهارم فقط در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. به عبارت دیگر، تولیدکننده‌های اول و دوم در گروه A و تولیدکننده‌های سوم و چهارم در گروه B قرار دارند. عرض از مبدأ معکوس توابع تقاضا برای ساعات‌های مختلف دوره تحویل در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۱: مشخصات واحدهای تولیدکننده در سیستم قدرت

شماره تولیدکننده	ضرایب تابع هزینه خطی واحدها		ظرفیت تولید (GW)
	a(\$/MWh)	b(\$/MW ² h)	
گروه A	۱	۳/۶۵۷	۱۱/۴۰
	۲	۹/۰۵۴	۱۲/۰۰
گروه B	۳	۹/۵۳۳	۸/۷۲۱
	۴	۶/۴۷۲	۰/۵۵۸

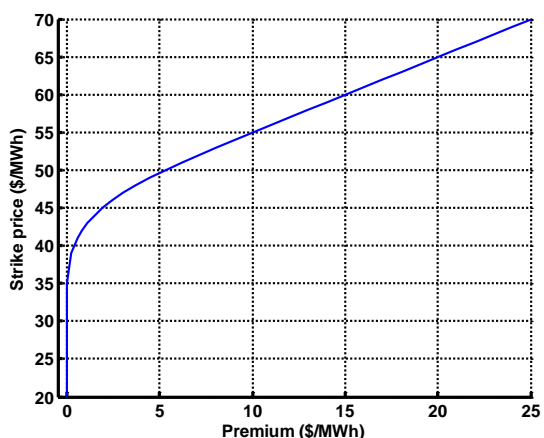
جدول ۲: عرض از مبدأ عکس تابع تقاضا در ساعات مختلف بازه تحویل

روز t از بازه تحویل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میانگین N_{St}^{Dh} (\$/MWh)	۹۲/۴	۸۱/۹	۱۰۲/۹	۱۰۰/۰	۱۰۱/۸۵	۹۸/۰	۱۰۰/۰	۹۰/۳	۸۴/۰	۹۶/۶
انحراف معیار N_{St}^{Dh} (\$/MWh)	۲/۲۴	۱/۳	۲/۲۹	۲/۸۲	۳/۲۶	۲/۹۲	۲/۶۶	۲/۱۷	۱/۶۱	۲/۸۸

³ In the money

⁴ At the money

⁵ Out of the money



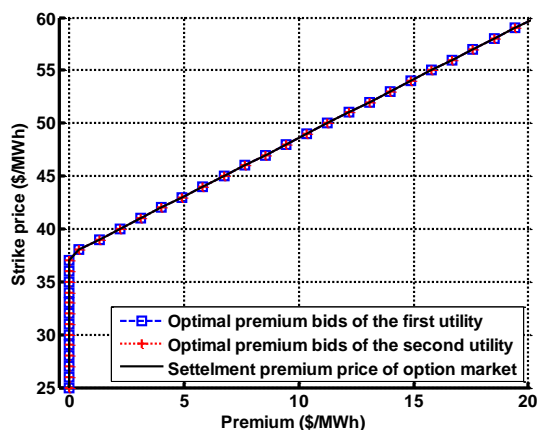
شکل ۳: قیمت‌گذاری اختیار فروش بسته NSWs Base Load Strip Options در Calendar Year 2017 در بورس استرالیا [۱۲]

۳.۳. ناحیه اجرای اختیار (OCA)

برای تعیین ناحیه اجرای اختیار در این سیستم قدرت فرض می‌شود قیمت اجرا از $25\$/MWh$ تا $60\$/MWh$ با پله‌های $1\$/MWh$ تغییر کند. در هر قیمت اجرا نیز، قیمت اختیار از $0\$/MWh$ تا $7\$/MWh$ با پله‌های $0.2\$/MWh$ تغییر می‌کند. سپس برای هر جفت از قیمت‌های اجرا و قیمت‌های اختیار، نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر معلوم محاسبه می‌شود. قیمت انتظاری بازار روز بعد بر روی تمام ساعات و سناریوهای ممکن در بازه تحویل در صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا در شکل ۴ نشان داده شده است. اکنون فرض کنید قیمت اختیار بعنوان متغیر تصمیم‌گیری برای هر یک از تولیدکنندگان گروه A در نظر گرفته شود و نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در این شرایط، قیمت انتظاری بازار روز بعد در هر قیمت اجرا مطابق منحنی سیاه رنگ توپر شکل ۴ می‌باشد. در این شکل، دو پاره صفحه افقی قابل مشاهده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انجام شده، در این پاره صفحات هیچ قرارداد اختیاری در بازار اختیار فروش معامله نمی‌شود. بنابراین، قیمت انتظاری بازار روز بعد مقداری ثابت و برابر با قیمت انتظاری بازار روز بعد در شرایط عدم وجود بازار اختیار فروش است. تصویر منحنی شکل ۴ بر روی صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجا که در پاره صفحات افقی بیان شده، هیچ اختیاری معامله نمی‌شود، این نواحی، نواحی عدم اجرای اختیار^۸ (NOCA) نامیده می‌شوند.

قیمت‌ها با یکدیگر برابر نباشند، تمام سهم بازار اختیار توسط تولیدکننده پیشنهاد دهنده قیمت اختیار پائین‌تر تصرف می‌شود. در برخی از بازارهای اختیار بر اساس آخرین معاملات انجام شده در هر روز از بازه معامله، یک قیمت تسویه حق اختیار^۷ برای آن روز تعیین می‌شود که مبنای به روز کردن قیمت^۷ قراردادها قرار می‌گیرد. قیمت تسویه حق اختیار در هر روز برابر با میانگین وزنی قیمت اختیار قراردادهای اختیار معامله شده در آن روز یا در بخشی از آن روز است [۱۱]. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از آنجا که قیمت اختیار بهینه تمام تولیدکنندگان در شرایط تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد برابر هستند، قیمت تسویه روزانه نیز برابر با قیمت اختیار بهینه هر یک از تولیدکنندگان گروه A می‌باشد. بنابراین، محاسبه نقطه تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد می‌تواند بعنوان روشی برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار در نظر گرفته شود. لذا منحنی نشان داده شده در شکل ۲، می‌تواند برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار در سیستم قدرت مورد مطالعه یکسال قبل از زمان تحویل مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج قیمت‌گذاری اختیار فروش برق در بورس اوراق بهادار استرالیا (ASX) در تاریخ ۲۸ فوریه ۲۰۱۶ در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۲]. در این شکل، قیمت‌گذاری اختیار فروش برای بسته NSWs Base Load Strip Options Calendar Year 2017 نشان داده شده است. مقایسه شکل ۲ و شکل ۳ نشان می‌دهد که از لحاظ شکل کلی، منحنی قیمت اختیار بدست آمده از روش ارائه شده در این مقاله شبیه به منحنی واقعی قیمت اختیار رخ داده در بازار اختیار فروش استرالیا است.



شکل ۲: قیمت اختیار بهینه تولیدکنندگان اول و دوم و قیمت تسویه بازار اختیار در نقطه تعادل توأمان دو بازار

^۶ Settlement premium price

^۷ Mark-to-marketing

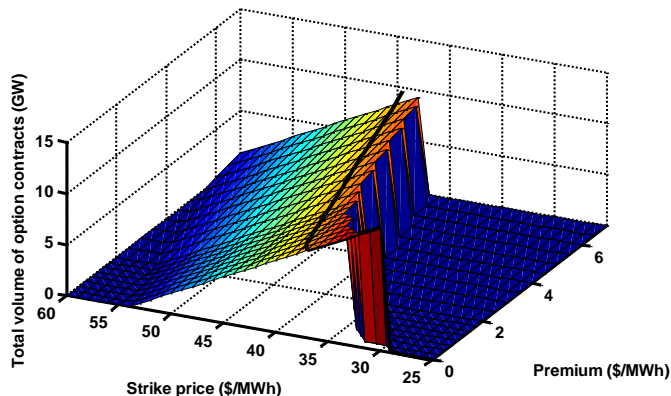
^۸ No Option Contract Area

نتیجه η به T همگرا می‌شود. $K - \lambda_{st}$ افزایش یافته، احتمال اجرای قرارداد اختیار افزایش یافته و در

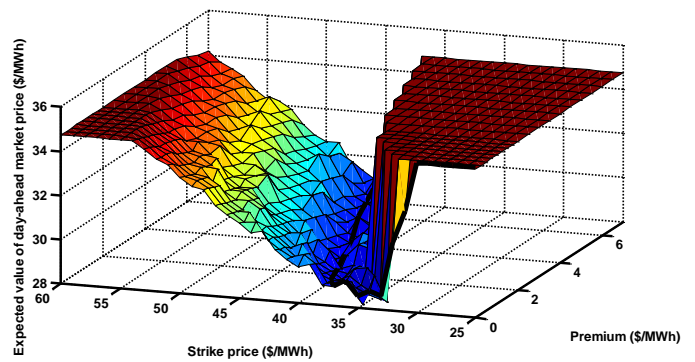
در شکل ۵، هنگامیکه K بیشتر از λ^{max} می‌شود تمام قراردادهای اختیار منعقد شده، اجرا می‌شوند و η برابر با T شده و بر اساس رابطه (۱۳) کران پائین قیمت اجرا بصورت یک خط موازی با کران بالای قیمت اختیار می‌شود. در شکل ۵، ناحیه اجرای اختیار به دو بخش $OCA1$ و $OCA2$ تقسیم شده است. در ناحیه $OCA2$ ، قیمت‌های اجرا بیشتر از λ^{max} هستند و در نتیجه قراردادهای اختیار در تمام ساعات از تمام سناریوها در بازه تحویل اجرا می‌شوند. در ناحیه $OCA1$ قیمت‌های اجرا بین λ^{min} و λ^{max} هستند، در نتیجه قراردادهای اختیار در برخی از ساعات از برخی از سناریوها در بازه تحویل اجرا می‌شوند.

حجم کل قراردادهای اختیار با معلوم در نظر گرفتن قیمت اختیار در صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا در شکل ۶ نشان داده شده است. حجم کل قراردادهای اختیار با متغیر تصمیم در نظر گرفتن قیمت اختیار بصورت یک منحنی سیاه رنگ توپر در شکل ۶ نشان داده شده است.

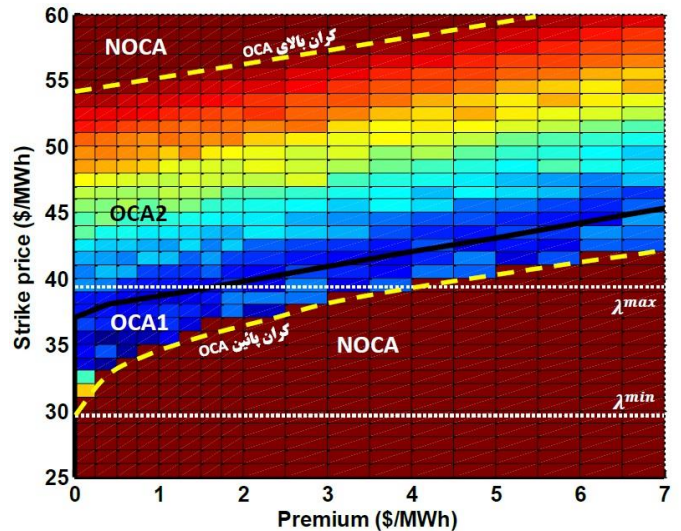
حجم قراردادهای منعقد شده در بازار مالی اختیار فروش بر اساس رابطه (۷) توسط مصرف‌کنندگان محدود می‌شود. بر اساس رابطه (۷)، در یک قیمت اختیار و یک قیمت اجرای مشخص، مصرف‌کنندگان بیشتر از حجم معینی اقدام به عقد قرارداد اختیار فروش نمی‌کنند. در شکل ۵، یک قیمت اختیار مشخص و یک قیمت اجرا بین کران پائین و کران بالای قیمت اجرای ناحیه اجرای اختیار در نظر بگیرید و قیمت اجرای اختیار را در قیمت اختیار ثابت افزایش دهید. بر اساس رابطه (۷) با افزایش قیمت اجرای اختیار مصرف‌کنندگان حجم قراردادهای اختیار خود را کاهش می‌دهند و در نتیجه قیمت انتظاری بازار روز بعد افزایش می‌یابد. هنگامی که قیمت اجرا به کران بالای قیمت اجرای ناحیه اجرای اختیار برسد، هیچ قراردادی توسط مصرف‌کنندگان در بازار اختیار منعقد نمی‌شود.



شکل ۶: حجم کل قراردادهای اختیار؛ رویه برای قیمت اختیار به صورت متغیر معلوم، خط توپر برای قیمت اختیار بصورت متغیر تصمیم‌گیری



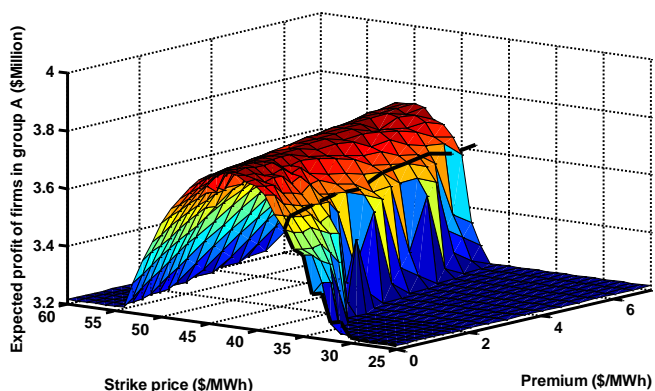
شکل ۸: قیمت انتظاری بازار روز بعد در بازه تحویل؛ رویه برای قیمت اختیار به صورت متغیر معلوم، خط توپر برای قیمت اختیار بصورت متغیر تصمیم‌گیری



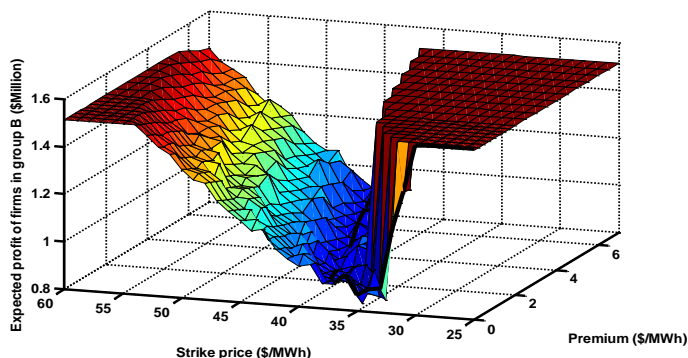
شکل ۵: تصویر قیمت انتظاری بازار روز بعد بر روی صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا؛ منحنی بهینه قیمت اختیار بصورت منحنی سیاه‌رنگ توپر

نواحی عدم اجرای اختیار در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. ناحیه اجرای اختیار در شکل ۵ توسط کران‌های بالا و پائین قیمت اجرای این ناحیه مشخص شده است. این کران‌ها بوسیله منحنی خط‌چین نشان داده شده‌اند. در شکل ۵، λ^{min} حداقل و حداکثر λ_{st} در تمام ساعات و سناریوهای بازه تحویل در شرایطی که قرارداد اختیار منعقد نشده باشد، هستند. بر اساس رابطه (۱۳) کران بالای قیمت اجرا یک خط با شیب e^{rTc} است. در سیستم قدرت مورد مطالعه، شیب کران بالای قیمت اجرا تقریباً برابر با ۱/۱ است. کران بالای قیمت اجرای نشان داده شده در شکل ۵ که از محاسبه نقطه تعادل برای نقاط مختلف صفحه قیمت اختیار-قیمت اجرا بدست آمده است، فرمول ارائه شده برای کران بالای قیمت اجرا در رابطه (۱۳) را تأیید می‌نماید.

یک نقطه روی کران پائین قیمت اجرای اختیار در شکل ۵ در نظر بگیرید. فرض کنید K این نقطه روی این کران افزایش یابد. با افزایش K ، مقدار



شکل ۷: مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A در شرایط تعادل توأمان دو بازار؛ رویه برای قیمت اختیار به صورت متغیر معلوم، خط توپر برای قیمت اختیار بصورت متغیر تصمیم‌گیری



شکل ۸: مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه B در شرایط تعادل توأمان دو بازار؛ رویه برای قیمت اختیار به صورت متغیر معلوم، خط توپر برای قیمت اختیار بصورت متغیر تصمیم‌گیری

۴. جمع‌بندی

در این مقاله روش جدیدی برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار فروش بر مبنای تعادل توأمان بازار روز بعد و بازار اختیار ارائه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد حضور راهبردی تولیدکنندگان در هر دو بازار اختیار و بازار روز بعد منجر به افزایش سود آنها و کاهش سود تولیدکنندگانی است که فقط در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. انعقاد قراردادهای اختیار منجر به افزایش رقابت در بازار روز بعد و در پی آن، کاهش قیمت بازار روز بعد می‌گردد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، هیئت تنظیم مقررات بازار می‌تواند با استفاده از مدل تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد، محدوده مناسبی از قیمت‌های اجرایی که در آنها بیشترین حجم قرارداد اختیار منعقد می‌گردد را مشخص کند. بدین ترتیب، تمرکز بازیگران بازار اختیار بر این قیمت‌های اجرا بیشتر شده و باعث افزایش رفاه اجتماعی در دو بازار می‌گردد.

شکل ۶ این مطلب را تأیید می‌کند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است باید توجه داشت که در ناحیه OCA2، همزمان با بیشتر بودن قیمت اجرا نسبت به λ^{max} قیمت اختیار نیز در این ناحیه بالا است. در نتیجه در ناحیه OCA2 هنوز مصرف‌کنندگان تمایل به انعقاد قرارداد اختیار فروش دارند. برای افزایش حجم قراردادهای اختیار در بازار مالی اختیار بهتر است رقابت بازیگران در قیمت‌های اجرایی که در آنها امکان انعقاد حجم بیشتری از قراردادهای اختیار وجود دارد، متمرکز شود. بنابراین مقدار قیمت‌های اجرا می‌بایست در محدوده مناسب انتخاب شده و تعداد آن نیز زیاد نباشد. بر اساس شکل ۶، در صورت انتخاب تعداد محدودی قیمت اجرا در ناحیه OCA1 و قراردادن آنها در بازار اختیار فروش، تمرکز رقابت در این قیمت‌های اجرا افزایش یافته و در نتیجه آن حجم قراردادهای اختیار افزایش می‌یابد.

مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A با معلوم در نظر گرفتن قیمت اختیار برای قیمت‌های اجرا و قیمت‌های اختیار مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A با متغیر تصمیم در نظر گرفتن قیمت اختیار نیز با یک منحنی سیاه رنگ توپر در این شکل نشان داده شده است. بر اساس شکل ۷، مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A در ناحیه اجرای اختیار افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، سود انتظاری این تولیدکنندگان در ناحیه OCA2 بیشتر از مقدار آن در ناحیه OCA1 است، زیرا با توجه به بیشتر بودن قیمت اجرا از قیمت بازار روز بعد در تمام ساعات و سناریوهای بازه تحویل، حجم قراردادهای اختیار اجرا شده در ناحیه OCA2 بیشتر از حجم قراردادهای اختیار اجرا شده در ناحیه OCA1 است.

مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه B با معلوم در نظر گرفتن قیمت اختیار برای قیمت‌های اجرا و قیمت‌های اختیار مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه B با متغیر تصمیم در نظر گرفتن قیمت اختیار نیز با یک منحنی سیاه رنگ توپر در این شکل نشان داده شده است.

بر اساس شکل ۸ مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه B که فقط در بازار روز بعد شرکت می‌کنند در ناحیه اجرای اختیار نسبت به نواحی عدم اجرای اختیار کاهش یافته است. این در حالی است که سود تولیدکنندگانی که در بازار اختیار نیز مشارکت داشته‌اند در ناحیه اجرای اختیار نسبت به نواحی عدم اجرای اختیار افزایش یافته است (شکل ۷). افزایش سود تولیدکنندگان گروه A در ناحیه اجرای اختیار و کاهش سود تولیدکنندگان گروه B در این ناحیه می‌تواند بعنوان یک سیگنال مشوق برای حضور تولیدکنندگان در بازار اختیار در نظر گرفته شود.

معمولاً در بازارهای مالی اختیار، تخمینی از قیمت اختیار به بازیگران بازار اختیار اعلام می‌شود. مدل تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان متغیر تصمیم‌گیری تولیدکنندگان می‌تواند بعنوان روشی برای قیمت‌گذاری اختیار فروش در بازارهای مالی در نظر گرفته شود. ناحیه اجرای اختیار که با استفاده از مدل تعادل توأمان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان متغیر معلوم تعیین می‌شود نیز می‌تواند بعنوان ناحیه ممکن قیمت‌گذاری قرارداد اختیار فروش در نظر گرفته شود.

منابع

- [1] European energy exchange, "Market surveillance", available at: <https://www.eex.com/en/trading/trading-forms-and-documentation/market-surveillance>, accessed: 2017-09-08.
- [2] Australian security exchange, "Volatility", available at: http://www.asx.com.au/prices/pricing_models.htm, accessed: 2017-09-08.
- [3] B. Bezerra, L. A. Barroso, and M. V. Pereira, "Bidding strategies with fuel supply uncertainty in auctions of long-term energy call options," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 653-660, May 2011.
- [4] T. W. Gedra, "Optional forward contracts for electric power markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1766-1773, Nov. 1994.
- [5] Y. Oum, S. S. Oren, and S. J. Deng, "Hedging quantity risks with standard power options in a competitive wholesale electricity market," *Naval Research Logistics*, vol. 53, no. 7, pp. 697-712, Oct. 2006.
- [6] G. A. V. Sánchez, J. M. Alzate, A. I. Cadena, and J. M. Benavides, "Setting up standard power options to hedge price-quantity risk in a competitive electricity market: the colombian case," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1493-1500, Aug. 2011.
- [7] S. Pineda and A. J. Conejo, "Managing the financial risks of electricity producers using options," *Energy Economics*, vol. 34, no. 6, pp. 2216-2227, Nov. 2012.
- [8] S. Pineda and A. J. Conejo, "Using electricity options to hedge against financial risks of power producers," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 101-109, Sep. 2013.
- [9] P. Mathuria and R. Bhakar, "Integrated risk management model for portfolio selection in multiple markets," in *Proc. of IEEE PES General Meeting*, July 2014, pp. 1-5.
- [10] European energy exchange, "Power derivatives market", available at: <https://www.eex.com/en/products/power/power-derivatives-market>, accessed: 2016-05-30.
- [11] Nordpool, "Nordpool financial market", available at: <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/Financial-market/>, accessed: 2016-05-30.
- [12] Australian security exchange, "Australian electricity futures and options", available at: <https://asxenergy.com.au/products/electricity-futures>, accessed: 2015-09-30.