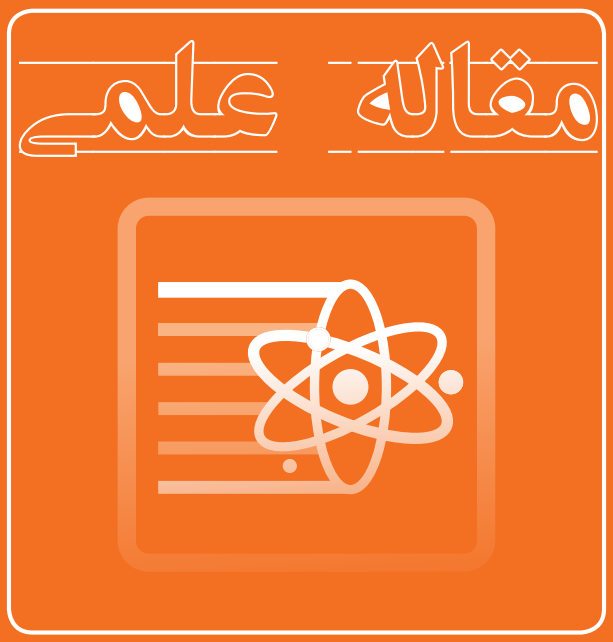

مقاله علمی

قیمت‌گذاری اختیار برق بر اساس تعادل بازار روز بعد و بازار اختیار

هانی رئوف شیبانی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه صنعتی قوچان
مجید علومی بایگی، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده :
با توجه به گسترش روز افزون بازارهای مالی برق، تولیدکنندگان انرژی الکتریکی نیازمند به‌کارگیری روش‌های قیمت‌گذاری نوین برای پوشش حداکثری ریسک خود در بازارهای مختلف هستند. با توجه به حضور این تولیدکنندگان به‌صورت همزمان در بازارهای فیزیکی و مالی برق، لازم است روش قیمت‌گذاری قراردادهای مالی آنها، ریسک‌های توامان تولیدکنندگان در هر دو بازار را پوشش دهد. در این مقاله، روشی نوین برای قیمت‌گذاری قراردادهای اختیار فروش بر مبنای شرایط تعادل توامان بازار روز بعد و بازار اختیار ارائه شده است. بر اساس روش ارائه‌شده، ناحیه‌ای اجرای اختیار که بیان‌کننده بخشی از صفحه قیمت اجرا-قیمت اختیار است که در آن بازیگران بازار مالی مشتاق به انعقاد قراردادهای اختیار هستند، معرفی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی یک سیستم قدرت نمونه، قابلیت‌های روش قیمت-گذاری ارائه‌شده و میزان تاثیرگذاری متقابل قراردادهای اختیار فروش و بازار روز بعد انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:
— بازار اختیار فروش؛ تعادل توامان بازارها؛ قیمت‌گذاری قرارداد اختیار؛ تاثیر متقابل بازار فیزیکی و بازار مالی؛

۱. مقدمه

تعیین قیمت پایه قراردادهای مشتقات مالی برق یا قیمت‌گذاری قراردادهای مالی برق معمولا توسط بهره‌بردار بازار مالی برق انجام می‌شود. این قیمت‌گذاری، سیگنالی از طریق بهره‌بردار بازار مالی برق به بازیگران آن بازار ارائه می‌کند [۱-۲]. البته قیمت واقعی قراردادهای مشتقات مالی بر اساس رقابت بازیگران در این بازار تعیین می‌شود. هریک از بازیگران نیز بر اساس تخمین خود از شرایط بازار، استفاده از روش‌های متداول قیمت-گذاری قراردادهای مشتقات مالی و یا استفاده از قیمت‌گذاری انجام‌شده توسط بهره‌بردار بازار مالی، پیشنهاد قیمت خود در بازار مالی را ارائه می‌کنند. با توجه به ارتباط بهره‌بردار بازار مالی برق با هیات تنظیم مقررات بازارهای فیزیکی و مالی برق، پیش‌بینی شرایط آینده دو بازار می‌تواند در قیمت-گذاری دقیق‌تر قراردادهای مشتقات مالی به بهره‌بردار بازار مالی برق کمک کند [۱-۲].

در برخی از مطالعات، تاثیر بازارهای مالی برق بر بازارهای فیزیکی برق از دیدگاه بازیگران بازار مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه معاملات مالی اختیار برق به‌عنوان یکی از مهمترین ابزارهای پوشش ریسک تولیدکنندگان ناشی از عدم قطعیت‌ها به‌کار گرفته می‌شود، در این بخش مطالعات صورت گرفته برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان در بازارهای فیزیکی و مالی اختیار برق بررسی می‌شوند.

در مرجع [۳]، با درنظرگرفتن عدم دسترس‌پذیری گاز طبیعی، بازار فیزیکی برق در کنار بازار قراردادهای اختیار معامله بلندمدت مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف دنبال‌شده در این مرجع، تعیین راهبرد بهینه بازیگران برای شرکت در بازار فیزیکی برق بوده است. در مرجع [۳] به‌منظور تعیین راهبرد بهینه یک تولیدکننده در بازار اختیار خرید، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی ارائه شده است. در این مدل، تولیدکنندگان قیمت اختیار و قیمت اجرا را به بازار اختیار پیشنهاد می‌دهند. در مرجع [۴] قراردادهای اختیار بر روی پیمان آتی تعریف شده است. در این مرجع راهبرد بهینه تولیدکنندگان برای استفاده از قراردادهای اختیار بر روی پیمان آتی 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 می‌کنند. بدین منظور، راهبرد بهینه تولیدکنندگان برای پوشش ریسک توان با استفاده از خرید قراردادهای پیمان آتی و اختیار در مرجع [۵] ارائه شده است. در مرجع [۶] بازار اختیار در کنار بازار انرژی در نظر گرفته شده

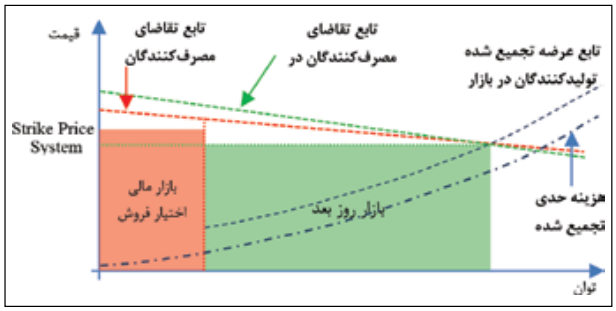
است. در این مرجع، روشی برای محاسبه قیمت‌های اجرای بهینه از دیدگاه یک بازارساز ارائه شده است. در مراجع [۷] و [۸] یک مدل تصادفی چند مرحله‌ای برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان ریسک گریز در بازارهای پیمان آتی، اختیار و حوضچه توان ارائه شده است. در این مدل ریسک قیمت در بازار انرژی و ریسک عدم دسترسی واحدها 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 انجام‌شده از دیدگاه‌های مختلف تاثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی برق را بررسی کرده‌اند. برخی از پژوهش‌ها با ارائه روش‌هایی برای تعیین راهبرد بهینه تولیدکنندگان، از دیدگاه آن‌ها به تاثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی پرداخته‌اند. برخی دیگر از پژوهش‌ها نیز با محاسبه نقطه تعادل بازارهای فیزیکی و مالی به بررسی تاثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی پرداخته‌اند. اما حلقه مفقوده تمام این پژوهش‌ها، عدم در نظر گرفتن تاثیر متقابل این دو بازار بر یکدیگر است. در اکثر این روش‌ها، تاثیر بازار مالی بر بازار فیزیکی بررسی شده است بدون اینکه راهبردهای انتخابی تولیدکنندگان در بازار فیزیکی بر راهبرد آن‌ها در بازار مالی تاثیری 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 تاثیرگذار است، قیمت دارایی پایه و یا فراریت آن نیز از راهبرد انتخابی تولیدکنندگان در بازار فیزیکی متاثر خواهد شد.

در این مقاله ابتدا مدل تعادل توامان بازار فیزیکی و مالی برق تعریف می‌شود. سپس تاثیرات 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 توامان 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 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[1]) 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 زمانیکه 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 فروش می‌تواند بسته اختیار فروش مطلوب خود را بر اساس بازه تحویل مورد نظر و قیمت اجرای مورد نظر انتخاب کند. 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 معامله‌شده، اگر قیمت بازار روز بعد کمتر از قیمت اجرای بسته مورد نظر باشد، خریدار بسته اختیار فروش، که همان تولیدکننده انرژی است، آن بسته را اجرا کرده و تمام یا بخشی از حجم مورد توافق در

1- Central Counter Party

قرارداد را به فروشنده اختیار، که همان مصرف‌کننده تجمیع شده است، در قیمت اجرای توافق‌شده می‌فروشد. اگرچه بازارهای اختیار فروش و روز بعد از لحاظ بهره‌برداری بصورت مستقل از یکدیگر عمل می-کنند، 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 معمولا 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 J=1,2,000,T, tj 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 می-بایست 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، به‌دلیل وجود عدم قطعیت سناریوهای مختلفی درنظر 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 کند. 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 کند. در اینجا فرض شده است که حجم قابل اجرا متغیری پیوسته است. البته در بازارهای واقعی اختیار، این حجم بصورت ضریبی از یک مگاوات در نظر گرفته می‌شود.

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

$$\lambda_{st} = N_{st}^{Dh} - \gamma^{Dh} Q_{st}^{L}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T, s = 1,2, \dots, S \qquad (۱)$$

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.

$$C_i\left(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}\right) = a_i\left(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}\right) + \frac{1}{2} b_i\left(Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh}\right)^2 \qquad (۲)$$

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، به‌دنبال بیشینه‌سازی سود انتظاری خود در بازه تحویل می‌باشد. در این بخش فرض شده است که تولیدکنندگان هم قیمت اختیار و هم حجم قرارداد را به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بازار اختیار فروش در مساله 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 به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری در این بازار در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که قبلا 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 حالی که تولیدکنندگان گروه B فقط در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. مساله بهینه‌سازی تولیدکننده i از گروه A را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت.

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

$$s.t.:$$

$$Q_{ist}^O + Q_{ist}^{Dh} \le \overline{Q_i}, \quad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T} : \mu_{ist}$$

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

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

$$K - f_{iK} e^{rT_C} \le N^O - \gamma^O \sum_{m \in A} Q_m^O, \quad : \beta_i$$

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

که در آن، K قیمت اجرای قرارداد اختیار بر حسب $/MWh، f_{iK} قیمت اختیار تولیدکننده i بر حسب $/MWh 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، $(\overline{Q_i})$ 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.

جملات اول و دوم تابع هدف (۳) بیان کننده 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 پرانتز قرارداده شده‌اند بیان کننده 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 بیان کننده 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. مساله بهینه‌سازی مربوط به این تولیدکننده نیز بصورت زیر قابل تعریف است.

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

$$s.t.:$$

$$Q_{kst}^{Dh} \le \overline{Q_k}, \qquad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}: \mu_{kst}$$

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

$$Q_{kst}^{Dh} \ge 0, \qquad \forall s \in \Omega, \forall t \in \mathcal{T}$$

برای به‌دست آوردن نقطه تعادل توامان 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])

هیات 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، هیات قانون‌گذاری بازارهای مالی اختیار بدنبال بررسی عملکرد بازار مالی در قیمت‌های مختلف اختیار و قیمت‌های مختلف اجرای اختیار است.

در بازارهای مالی اختیار معمولا 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 به‌عنوان قیمت تسویه آن روز تعیین می‌شود. برای مطالعه عملکرد بازار در قیمت‌های اختیار 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 به‌عنوان 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 توامان 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 به‌دست 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.

$$\left\{(f,K)\,|\,Tfe^{rT_C}/\eta + \overline{\lambda^0} < K < N^O + fe^{rT_C}\right\} \qquad (۱۳)$$

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

$$\eta = \sum\nolimits_{\{s,t|K>\lambda_{st}^0\}} p_s \qquad (۱۴)$$

$$\overline{\lambda^0} = \left(1/\eta\right)\sum\nolimits_{\{s,t|K>\lambda_{st}^0\}} p_s\lambda_{st}^0 \qquad (۱۵)$$

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

2- Option Contract Area

در بـازار روز بعـد به‌وقـوع پیوسـته اسـت. بنابرایـن η مجمـوع سـاعاتی از ایـن بـازه تحویـل اسـت کـه در آن قیمـت اجـرای مفـروض از قیمـت بـازار روز بعـد بیشـتر اسـت و همچنیـن ($\overline{\lambda^{\cdot}}$) نیـز میانگیـن قیمـت بـازار روز بعـد در سـاعاتی از ایـن بـازه تحویـل اسـت کـه قیمـت اجـرای مفـروض از قیمـت بـازار روز بعـد در آن سـاعات بیشـتر اسـت.

از طـرف دیگـر، نامعادلـه (۱۳) بـرای هـر قیمـت اجـرای مشـخص، قیمت‌هـای اختیـاری کـه درآنهـا قـرارداد اختیـار منعقـد می‌شـود را مشـخص می‌کنـد. بنابرایـن از ایـن نامعادلـه می‌تـوان بـرای تعییـن یـک بـازه بـرای قیمت‌گـذاری قراردادهـای اختیـار نیـز اسـتفاده کـرد.

شبیه‌سازی

در ایـن بخـش، مـدل ارائـه شـده در ایـن مقالـه بـه یـک سیسـتم قـدرت شـامل بـازار روز بعـد و بـازار مالـی اختیـار فـروش اعمـال می‌شـود. ناحیـه اجـرای اختیـار مشـخص شـده و نتایـج شبیه‌سـازی‌های مدل‌هـای مختلـف تحلیـل می‌شـوند.

شبکه مورد مطالعه

سیسـتم قـدرت مـورد مطالعـه شـامل چهـار تولیدکننـده می‌باشـد. اطلاعـات مربـوط بـه هـر تولیدکننـده بـا تجمیـع اطلاعـات ژنراتورهـا در نواحـی چهارگانـه شـبکه ۳۰۰ گرهـه IEEE به‌دسـت می‌آیـد. در هـر ناحیـه شـبکه ۳۰۰ گرهـه IEEE تعـدادی ژنراتـور بـا توابـع هزینـه حـدی مشـخص قـرار دارنـد. توابـع هزینـه حـدی کل هـر ناحیـه محاسـبه و بـا یـک تابـع خطـی تقریـب زده می‌شـود. تابـع خطـی ناحیـه iام شـبکه ۳۰۰ گرهـه IEEE بـه ژنراتـور تولیدکننـده i ام شـبکه مـورد مطالعـه اختصـاص داده شـده اسـت. اطلاعـات مربـوط بـه هزینـه حـدی و ظرفیـت تولیدکننده‌هـای سیسـتم قـدرت مـورد مطالعـه در جـدول ۱ داده شـده اسـت.

سیسـتم قـدرت مـورد مطالعـه شـامل یـک بـازار مالـی اختیـار فـروش و یـک بـازار روز بعـد می‌باشـد. در ایـن مقالـه بـازه معاملـه بـازار اختیـار فـروش، یعنـی فاصلـه بیـن زمـان انعقـاد قـرارداد اختیـار فـروش تـا زمـان آغـاز تحویـل بسـته‌های معاملـه شـده، یکسـال در نظـر گرفتـه می‌شـود. بـازه تحویـل قـرارداد اختیـار فـروش نیـز، یـک سـاعت مشـخص از روز در ده روز متوالـی فـرض می‌شـود. نـرخ بهـره نیـز ۱۰ درصـد در نظـر گرفتـه می‌شـود. در ایـن سیسـتم قـدرت فـرض شـده اسـت کـه تولیدکننده‌هـای اول و دوم در هـر دو بـازار روز بعـد و بـازار اختیـار فـروش شـرکت می‌کننـد و تولیدکننده‌هـای سـوم و چهـارم فقـط در بـازار روز بعـد شـرکت می‌کننـد. بـه عبـارت دیگـر، تولیدکننده‌هـای اول و دوم در گـروه A و تولیدکننده‌هـای سـوم و چهـارم در گـروه B قـرار دارنـد. عـرض از مبـدا معکـوس توابـع تقاضـا بـرای سـاعت‌های مختلـف دوره تحویـل در جـدول ۲ درج شـده اسـت.

در ایـن مقالـه فـرض می‌شـود بـار مصرفـی دارای عـدم قطعیـت اسـت. عـدم قطعیـت بـار مصرفـی بـا اختصـاص یـک تابـع توزیـع احتمـال نرمـال مـدل شـده اسـت. میانگیـن و انحـراف معیـار بـار در سـاعت‌های مختلـف

جدول ۱: مشخصات واحدهای تولیدکننده در سیستم قدرت

ظرفیت تولید	ضرایب تابع هزینه خطی واحدها $b(\$/MW^2h)$	$a(\$/MWh)$	شماره تولیدکننده	
۱۱/۴۰	۰/۰۰۱۸۶۹	۳/۶۵۷	۱	گروه
۱۲/۰۰	۰/۰۰۰۷۴۲	۹/۰۵۴	۲	A
۸/۷۲۱	۰/۰۰۰۸۸۸	۹/۵۳۳	۳	گروه
۰/۵۵۸	۰/۰۷۶۸۵۰	۶/۴۷۲	۴	B

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

t روز از بازه تحویل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میانگین N_{st}^{Dh} ($/MWh)	۹۲/۴	۸۱/۹	۱۰۲/۹	۱۰۰/۸	۱۰۱/۸۵	۹۸/۷	۱۰۰/۸	۹۰/۳	۸۴	۹۶/۶
میانگین N_{st}^{Dh} ($/MWh)	۲/۲۲	۱/۳۱	۳/۲۹	۲/۸۲	۳/۲۶	۲/۹۲	۲/۶۶	۲/۱۷	۱/۶۱	۲/۷۸

دوره تحویـل در جـدول ۲ داده شـده اسـت. شـیب معکـوس تابـع تقاضـای بـار تجمیع‌شـده ایـن سیسـتم قـدرت $0/003/MW^2 h$ در نظـر گرفتـه می‌شـود. شـیب تابـع تقاضـا در سـاعات مختلـف ثابـت فـرض شـده اسـت. عـرض از مبـدا و شـیب عکـس تابـع تقاضـا در بـازار مالـی بـه ترتیـب برابـر بـا $54/MWh و $0/002/MW^2 h اسـت.

در صورتـی کـه بـازار مالـی اختیـار فـروش وجـود نداشـته باشـد و همـه تولیدکننـدگان تـوان خـود را در بـازار روز بعـد تولیـد کننـد، بـا محاسـبه نقطـه تعـادل بـازار روز بعـد بـرای نقـاط کار مختلـف سیسـتم قـدرت فـوق، حداقـل و حداکثـر قیمـت بـازار روز بعـد در بـازه تحویـل بـه ترتیـب برابـر بـا $29/87/MWh و $39/23/MWh می‌شـود.

در بـازار مالـی اختیـار فـروش، قیمـت اجـرا توسـط بهره‌بـردار بـازار مالـی تعییـن می‌شـود. بـه منظـور امـکان انعقـاد قراردادهـای اختیـار بـا قیمـت[3]، بـه قیمـت[4] و بـی قیمـت[5]، فـرض می‌شـود قیمـت اجـرا از $25/MWh تا$60/MWhبـا پله‌هـای$1/MWh تغییـر کنـد. در هـر قیمـت اجـرا، نقطـه تعـادل توامـان بـازار اختیـار و بـازار روز بعـد محاسـبه می‌شـود.

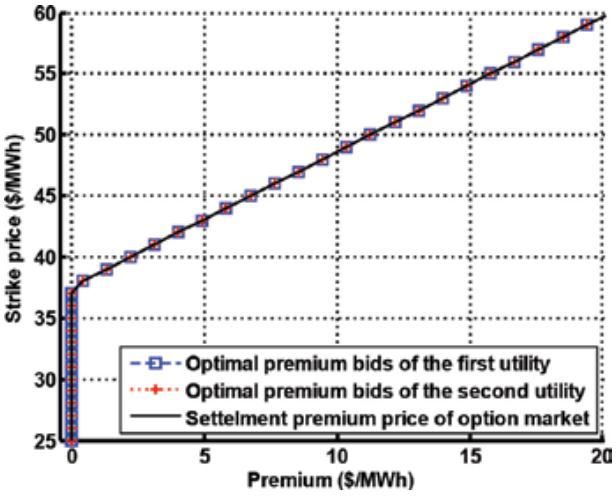
3- In the money 4- At the money 5- Out of the money

۳،۲. نتایج شبیه‌سازی

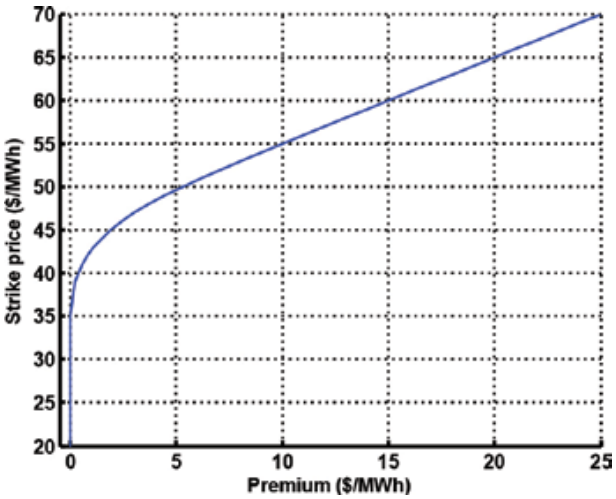
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده بر روی سیستم قدرت مورد مطالعه، بررسی می‌شود. بر این اساس، ابتدا با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر ورودی معلوم در بازار مالی اختیار فروش، ناحیه اجرای اختیار در شرایط تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد تعیین می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر تصمیم‌گیری برای تولیدکنندگان گروه A نقاط تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد برای قیمت‌های اجرای مختلف تعیین می‌شود. بدین منظور، نقطه تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد در هر قیمت اجرا محاسبه می‌شود. قیمت اختیار بهینه هر یک از تولیدکنندگان گروه A در شرایط تعادل توامان 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 توامان بازارها با یکدیگر برابر هستند. اگر این قیمت‌ها با یکدیگر برابر نباشند، تمام سهم بازار اختیار توسط تولیدکننده پیشنهاد دهنده قیمت اختیار پایین‌تر تصرف می‌شود.

در برخی از بازارهای اختیار بر اساس آخرین معاملات انجام شده در هر روز از بازه معامله، یک قیمت تسویه حق اختیار[6] برای آن روز تعیین می‌شود که مبنای به روز کردن قیمت[7] 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 توامان بازار اختیار و بازار روز بعد برابر هستند، قیمت تسویه روزانه نیز برابر با قیمت اختیار بهینه هریک از تولیدکنندگان گروه A می‌باشد. بنابراین، محاسبه نقطه تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد می‌تواند به‌عنوان 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 به‌دست‌آمده از روش ارائه‌شده در این مقاله شبیه به منحنی واقعی قیمت اختیار رخ داده در بازار اختیار فروش استرالیا است.

مقایسه شکل ۲ و شکل ۳ نشان می‌دهد که از لحاظ شکل کلی، منحنی قیمت اختیار به‌دست‌آمده از روش ارائه‌شده در این مقاله شبیه به منحنی واقعی قیمت اختیار رخ داده در بازار اختیار فروش استرالیا است.



شکل۲: قیمت اختیار بهینه تولیدکنندگان اول و دوم و قیمت تسویه بازار اختیار در نقطه تعادل توامان دو بازار



شکل ۳: قیمت‌گذاری اختیار فروش بسته NSWs Base Load Strip Options Calendar Year ۲۰۱۷ در بورس استرالیا [۱۲]

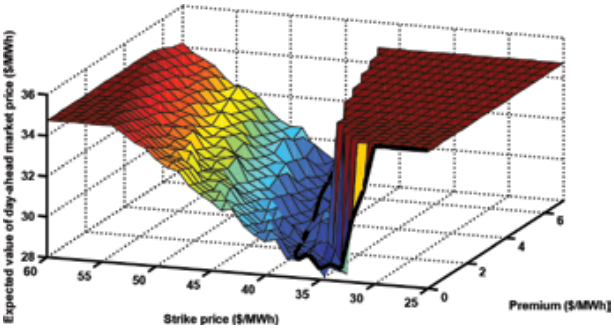
۳،۳. ناحیه اجرای اختیار (OCA)

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 توامان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان یک متغیر معلوم محاسبه می‌شود.

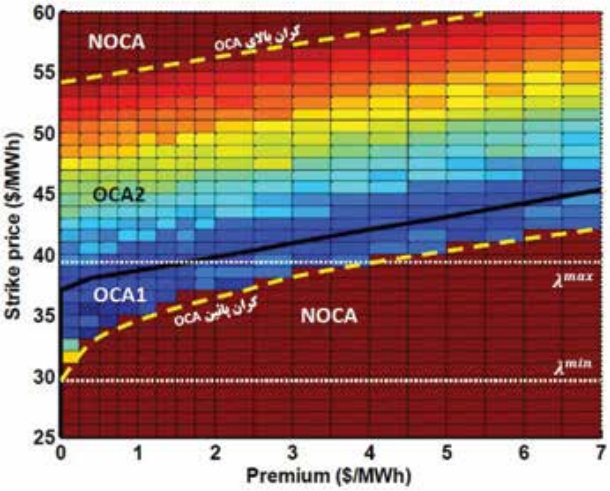
6- Settlement premium price
7- Mark-to-marketing

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 هریک از تولیدکنندگان گروه A در نظر گرفته شود و نقطه تعادل توامان 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 (NOCA[8]) نامیده می‌شوند.



شکل ۴: 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^{max} و 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 تایید می‌کند.

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

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. هنگامیه قیمت اجرا به کران بالای قیمت اجرای ناحیه اجرای اختیار برسد، هیچ قرارداد اختیاری توسط مصرف‌کنندگان در بازار اختیار منعقد نمی‌شود.

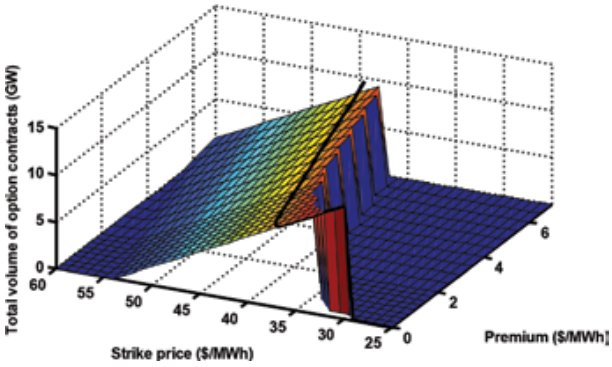
8- No Option Contract Area

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^{max} و 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 تایید می‌کند.

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

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. هنگامیه قیمت اجرا به کران بالای قیمت اجرای ناحیه اجرای اختیار برسد، هیچ قرارداد اختیاری 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

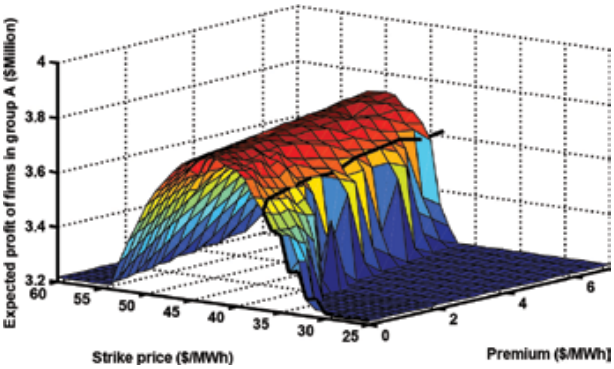
شکل ۶ این مطلب را تأئید می‌کند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است باید توجه داشت که در ناحیه OCA2، همزمان با بیشتر بودن قیمت اجرا نسبت به λ^{max}، قیمت اختیار نیز در این ناحیه بالا است. در نتیجه در ناحیه OCA2 هنوز مصرف‌کنندگان تمایل به انعقاد قرارداد اختیار فروش دارند. برای افزایش حجم قراردادهای 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 اننتخاب 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.

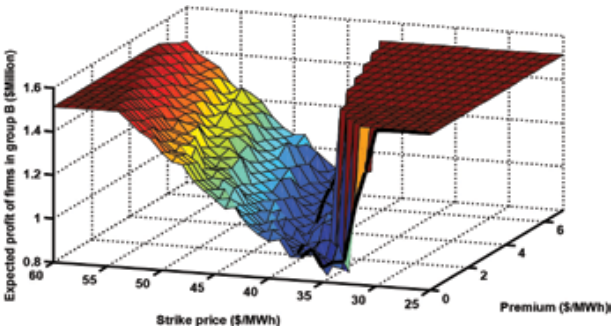
مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A با معلوم در نظر گرفتن قیمت اختیار برای قیمت‌های اجرا و قیمت‌های اختیار مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A با متغیر تصمیم در نظر گرفتن قیمت اختیار نیز با یک منحنی سیاه رنگ توپر در این شکل نشان داده شده است. بر اساس شکل ۷، مجموع 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 به‌عنوان یک سیگنال مشوق برای حضور تولیدکنندگان در بازار اختیار در نظر گرفته شود.



شکل ۷: مجموع سود انتظاری تولیدکنندگان گروه A در شرایط تعادل توامان 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 توامان 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 توامان 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، هیات تنظیم مقررات بازار می‌تواند با استفاده از مدل تعادل توامان 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 می‌شود.

معمولا در بازارهای مالی اختیار، تخمینی از قیمت اختیار به بازیگران بازار اختیار اعلام می‌شود. مدل تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار بعنوان متغیر تصمیم‌گیری تولیدکنندگان می‌تواند به‌عنوان روشی برای قیمت‌گذاری اختیار فروش در بازارهای مالی در نظر گرفته شود. ناحیه اجرای اختیار که با استفاده از مدل تعادل توامان بازار اختیار و بازار روز بعد با در نظر گرفتن قیمت اختیار به‌عنوان متغیر معلوم تعیین می‌شود نیز می‌تواند به‌عنوان 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: 08-09-2017.

[2] Australian security exchange, “Volatility”, available at: http://www.asx.com.au/prices/pricing_models.htm, accessed: 08-09-2017.

[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. 660-653, May 2011.

[4] T. W. Gedra, “Optional forward contracts for electric power markets,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 4, pp. 1773–1766, 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. 712–697, Oct. 2006.

[6] G. A. V. S´anchez, 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. 2227–2216, 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. 109–101, 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. 5–1.

[10] European energy exchange, “Power derivatives market”, available at: https://www.eex.com/en/products/power/power-derivatives-market, accessed: -05-2016 30.

[11] Nordpool, “Nordpool financial market”, available at: http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/Financial-market/, accessed: 30-05-2016.

[12] Australian security exchange, “Australian electricity futures and options”, available at: https://asxenergy.com.au/products/electricity futures, accessed: -2015 30-09.