مدیریت ریسک سرمایه‌گذاری استراتژیک در تولید با روش برنامه‌ی ریاضی با قیود تعادلی تصادفی

محمد اسمعیلی جونوشی[1] محمد احمدیان[2] محمد حیدری‌زاده[3]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد- دانشکده‌ی مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
m67.esmaili@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده‌ی مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
m_ahmadian@sbu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری- دانشکده‌ی مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
m_heidarizadeh@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی برای کمک به اتخاذ تصمیم‌های صحیح سرمایه‌گذاری در تولید توسط یک تولیدکننده‌ی استراتژیک در فضای بازار برق ارائه می‌شود. این تولیدکننده در کنار بیشینه کردن سود انتظاری خود، مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت در عوامل مؤثر بر سود مورد انتظار خود را نیز دنبال می‌کند. به‌منظور بیان رفتار استراتژیک این تولیدکننده، از تابع عرضه و در قالب یک مدل دوسطحی تصادفی دومرحله‌ای مقید به ریسک استفاده شده است. مسئله‌ی سطح بالاتر، دربرگیرنده‌ی تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و تولید استراتژیک با ریسک مدیریت‌شده است و مسائل سطح پایین‌تر، بیان‌کننده‌ی تسویه‌ی بازار حوضچه در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌باشند. ماهیت تصادفی مسئله، مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در پیشنهاددهی مقدار و قیمت بارها، سرمایه‌گذاری رقبا و پیشنهاددهی قیمت آنان است که در قالب سناریوهای مختلف بیان شده‌اند. برای مدل کردن مدیریت ریسک تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر، یک معیار ریسک از نوع مقدار در ریسک شرطی استفاده شده است. سرمایه‌گذاری به‌صورت استاتیک بوده و یک سال هدف در آینده همراه با تغییرات بار در قالب بلوک‌های بار مختلف، در نظر گرفته شده است. کارآمدی این روش با انجام یک مطالعه‌ی عددی در شبکه‌ی ۲۴ شینه‌ی IEEE و ارائه‌ی نتایج، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سرمایه‌گذاری در تولید، مدیریت ریسک، تولیدکننده‌ی استراتژیک، تابع عرضه، مدل دوسطحی تصادفی دومرحله‌ای مقید به ریسک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۲
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۸
نام نویسنده‌ی مسئول: محمد احمدیان
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – فلکه‌ی چهارم تهرانپارس – بلوار وفادار شرقی – بلوار شهید عباسپور – دانشگاه شهید بهشتی – پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3- Fall 2017

۱- مقدمه

امروزه، با توجه به توسعه‌ی روزافزون کشورها، نیروی برق یک نیاز اساسی برای رشد اقتصادی به شمار می‌آید [۱], [۲]. با تجدید ساختار صنعت برق، مسئله‌ی سرمایه‌گذاری در تولید، ابعاد جدیدی یافته است که بر پیچیدگی‌های آن می‌افزاید [۳]. درنتیجه، مدل نمودن صحیح عملکرد بازار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود مانند پیشنهاددهی مقدار و قیمت بارها، سرمایه‌گذاری رقبا و پیشنهاددهی قیمت آنان که در فضای تجدید ساختاریافته به‌عنوان عواملی تأثیرگذار بر روی قیمت برق مطرح می‌باشند، از اهمیت دوچندانی برخوردار شده است. برای یک تولیدکننده‌ی استراتژیک[۱] که می‌تواند از طریق تصمیم‌گیری‌های خود در خصوص سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی در تولید، خروجی‌های تسویه‌ی بازار را تغییر دهد، عدم قطعیت‌های یادشده منجر به نوسان‌های زیادی در توزیع سود و درنتیجه ایجاد ریسک مالی در تصمیم‌گیری می‌گردند. از آنجائی که تولیدکننده‌ی استراتژیک تمایل دارد متناسب با سود مورد انتظار و سطح ریسک-پذیری خود اقدام به تصمیم‌گیری نماید، ارائه‌ی روشی برای کمک به این تصمیم‌گیری از اهمیت بالائی برخوردار است.

می‌توان گفت، مسئله‌ی سرمایه‌گذاری در تولید در محیط رقابتی، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی دوسطحی است. برای حل چنین مسائلی از روش‌هایی همچون شرایط کاروش-کان-تاکر (KKT)[۲] [۴]–[۱۱] و مبتنی بر تکرار [۱۲]–[۱۸] استفاده شده است.

در [۴]، [۵]و [۶]، مسئله‌ی سرمایه‌گذاری در تولید در محیط رقابتی به صورت یک مسئله‌ی دوسطحی بیان شده است که در سطح بالاتر، تصمیم به سرمایه‌گذاری و راهبرد مشارکت در بازار و در سطح پایین‌تر، عملیات تسویه‌ی بازار انجام می‌شود. در [۴]، عدم قطعیت موجود در رفتار رقبا جهت سرمایه‌گذاری و قیمت‌دهی در بازار حوضچه در قالب سناریو مدل‌سازی شده است و مسئله به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP)[۳] بیان شده و با استفاده از روش برنامه‌ی ریاضی با قیود تعادلی (MPEC)[۴] حل شده است. در [۵]، علاوه بر بازار حوضچه، بازار آتی نیز در نظر گرفته شده است. در [۶]، برای حل مسئله‌ی دوسطحی از تجزیه‌ی بندرز و روش برنامه‌ی ریاضی با قیود تعادلی استفاده شده است.

در [۷]، مدلی دوسطحی برای توسعه‌ی ظرفیت تولید چندمرحله‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به سرمایه‌گذاری رقبا در قالب سناریوهای مختلف ارائه شده است. در مسئله‌ی سطح بالاتر، تولیدکننده، سود مورد انتظار خود را بیشینه می‌کند و در مسئله‌ی سطح پایین‌تر، تسویه‌ی بازار به صورت پاسخ قیمت تخمینی[۵] ارائه شده است. در [۱۱]، یک مدل دوسطحی برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مقید به ریسک به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های بهینه در خصوص سرمایه‌گذاری در واحدهای بادی از سوی یک تولیدکننده‌ی غیراستراتژیک (قیمت پذیر)، ارائه شده است. در این مرجع، عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و میزان تولید توان بادی می‌باشند.

در [۱۴]، برنامه‌ریزی توسعه‌ی تولید در محیط رقابتی به صورت یک مسئله‌ی دوسطحی بیان شده است. در سطح بالاتر، با استفاده از نظریه‌ی بازی اصلاح‌شده‌ی مرکب[۶]، نحوه‌ی مشارکت تولیدکنندگان توسط بهره‌بردار مستقل شبکه (ISO)[۷]، بررسی و در سطح پایین‌تر با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تصمیم به سرمایه‌گذاری بهینه اتخاذ شده است. در [۱۵]، در ادامه‌ی کار [۱۴]، به جای الگوریتم ژنتیک از روش بهینه‌سازی گروهی ذرات استفاده شده و در هر دو مقاله انواع مختلف نیروگاه به عنوان نامزد سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده‌اند. در [۱۸]، برنامه‌ریزی توسعه‌ی ظرفیت تولید استراتژیک توسط یک تولیدکننده با اطلاعات غیر کامل از تولیدکنندگان رقیب از طریق یک مسئله‌ی بهینه‌سازی دوسطحی، مدل‌سازی و برای حل آن از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در هیچ‌یک از مراجع مذکور، موضوع مدیریت ریسک[۸] موجود در سرمایه‌گذاری استراتژیک در تولید که ناشی از عدم قطعیت در پیشنهاددهی مقدار و قیمت بارها و همچنین عدم قطعیت موجود در رفتار رقبا از نظر میزان سرمایه‌گذاری و قیمت‌دهی در بازار برق می-باشد، در نظر گرفته نشده است.

در مقاله‌ی حاضر، با توسعه‌ی آنچه که در [۴] بیان شده است، مدیریت ریسک موجود در سرمایه‌گذاری استراتژیک در تولید، ناشی از عدم قطعیت‌های یاد شده، در نظر گرفته شده است.

به منظور مدل‌سازی رقابت در بازار، از مدل تابع عرضه[۹] استفاده شده است. این مدل، نسبت به مدل‌های دیگر به آنچه در فضای بازار برق در دنیای واقعی وجود دارد، نزدیک‌تر است و تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر بر اساس آن و عدم قطعیت‌های یادشده در بازار حوضچه، شرکت می‌نماید. مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از طریق سناریوهای مختلف انجام گرفته است. همچنین، به منظور مدیریت ریسک و لحاظ نمودن میزان ریسک‌پذیری تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر، از معیار مقدار در ریسک شرطی (CVaR)[۱۰] استفاده شده است.

هدف از این مقاله، ارائه‌ی مدلی است که تولیدکننده‌ی موردنظر با استفاده از آن و بر اساس سطح ریسک‌پذیری و رفتار استراتژیک خود، بتواند از میان گزینه‌های سرمایه‌گذاری با فن‌آوری‌ها و ظرفیت‌های مختلف، سودمندترین گزینه را انتخاب نماید.

در بخش دوم این مقاله، روش پیشنهادی معرفی خواهد شد. در بخش سوم، روابط مسئله و فرمول‌بندی ریاضی آن بیان شده‌اند. سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ارائه می‌شوند. درنهایت، در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری کار، ارائه شده است.

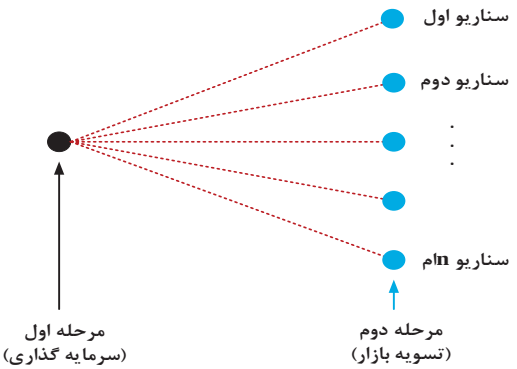
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

۲- توصیف مدل

ساختار کلی مدل ارائه‌شده در این مقاله، به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی دوسطحی تصادفی دومرحله‌ای مقید به ریسک می‌باشد. دلیل استفاده از مدل دوسطحی، دو مزیت اصلی آن است که عبارت‌اند از: ۱) امکان بیان توابع هدف مختلف برای تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر و ISO و ۲) تابع هدف و قیود مسئله‌ی سطح بالاتر می‌توانند به صورت تابعی از متغیرهای هر دو سطح بالاتر و پایین‌تر بیان شوند، در حالی که این امر از طریق مدل‌های بیشینه‌سازی - کمینه‌سازی، امکان‌پذیر نیست.

در برنامه‌ریزی تصادفی، سود، یک متغیر تصادفی است که می‌تواند توسط یک توزیع احتمال بیان شود. اگر در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با یک تابع هدف تصادفی، فقط مقدار مورد انتظار سود، بهینه گردد، این امر به تنهایی، باعث می‌شود که سایر پارامترهای مشخص‌کننده‌ی توزیع مرتبط با متغیر تصادفی موردنظر، نادیده گرفته شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مشخص‌کننده‌ی توزیع سود، ریسک است [۱۹]. در این مقاله، به منظور اعمال مدیریت ریسک موجود در سرمایه‌گذاری در تولید، معیار CVaR در فرمول‌بندی مسئله وارد شده است.

عدم قطعیت‌های موجود در مسئله، شامل عدم قطعیت در پیشنهاددهی مقدار و قیمت بارها، سرمایه‌گذاری رقبا و پیشنهاددهی قیمت آنان می‌باشند. این عوامل غیرقطعی، به عنوان متغیرهای تصادفی و از طریق محتمل‌ترین سناریوها بیان شده‌اند. یک درخت سناریوی دومرحله‌ای متشکل از n سناریو در شکل (۱) نشان داده شده است که شاخه‌های موجود در آن بیانگر حالت‌های مختلفی از تحقق پارامترهای غیرقطعی هستند.



شکل (۱): درخت سناریوی دومرحله‌ای

مطابق شکل (۱)، تصمیم‌های سرمایه‌گذاری در مرحله‌ی اول (حال حاضر) و مستقل از سناریوهای مختلف و تصمیم‌های بهره‌برداری در مرحله‌ی دوم (سال هدف) و متناظر با سناریوهای مختلف اتخاذ می‌شوند. تعداد سناریوهای در نظر گرفته‌شده بر روی ابعاد مسئله تأثیرگذار است و بنابراین، باید سناریوها به تعدادی باشند که همگرایی مسئله تأمین گردد و عدم قطعیت موجود در مسئله به طور مناسب مدل گردد؛ البته، موضوع سناریوسازی و کاهش سناریو مورد بحث این مقاله نیست.

به‌این‌ترتیب، مدیریت ریسک تصمیم‌گیری در سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی استراتژیک تولیدکننده‌ی موردنظر، توسط یک مدل دوسطحی ارائه شده است که مسئله‌ی سطح بالاتر، بیان‌کننده‌ی تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی استراتژیک این تولیدکننده در هر بلوک بار و هر سناریو با در نظر گرفتن مدیریت ریسک می‌باشد. پیشنهاددهی مربوط به تولیدکننده‌ی موردنظر و رقبا و همچنین پیشنهاددهی بارهای موجود در شبکه به صورت تابع عرضه و در قالب بلوک‌های تولید - پیشنهاد[۱۱] و مصرف - پیشنهاد[۱۲] مختلف بیان شده‌اند که شامل ظرفیت‌های تولید/مصرف و قیمت‌های پیشنهادی مربوط به این ظرفیت‌ها هستند.

مسئله‌ی سطح بالاتر مقید به مجموعه‌ای از مسائل سطح پایین‌تر است. مسائل سطح پایین‌تر، بیان‌کننده‌ی تسویه‌ی بازار در شرایط مختلف بهره‌برداری هستند و هدف از آن‌ها، بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی[۱۳] است. مهم‌ترین دلیل لحاظ نمودن تسویه‌ی بازار به عنوان مسئله‌ی سطح پایین‌تر، دستیابی تولیدکننده‌ی موردنظر به سیگنال‌های قیمتی (قیمت‌های تسویه‌ی بازار) به منظور ارائه‌ی پیشنهادهای مناسب به بازار، می‌باشد [۱۸]. قیمت‌های تسویه‌ی بازار به عنوان متغیرهای دوگان مربوط به قیود تعادل توان در بلوک‌های بار مختلف تعیین می‌شوند.

در مسئله‌ی بیان‌شده، ظرفیت بهینه‌ی سرمایه‌گذاری برای تولیدکننده‌ی موردنظر در واحد جدید با فن‌آوری f به عنوان متغیر تصمیم مرحله‌ی اول[۱۴] (سرمایه‌گذاری) و سایر متغیرها شامل قیمت-های پیشنهادی این تولیدکننده، قیمت‌های تسویه‌ی بازار (به صورت قیمت‌های یکنواخت[۱۵]) و مقادیر تولید/مصرف مربوط به تمامی واحدها/بارهای موجود به عنوان متغیرهای تصمیم مرحله‌ی دوم[۱۶] (بهره‌برداری)، مطرح شده‌اند.

جایگذاری مسائل سطح پایین‌تر با شرایط KKT آن‌ها، به عنوان شرایط بهینگی مرتبه اول[۱۷]، به یک مسئله‌ی تک سطحی غیرخطی MPEC منجر می‌شود. از طریق خطی‌سازی بخش‌های غیرخطی موجود در مسئله‌ی MPEC با استفاده از قضیه‌ی دوگانی قوی[۱۸] و تبدیل فورتونی - آمات[۱۹] [20]، یک MILP به دست می‌آید که از طریق فن‌های شاخه و برش[۲۰]، قابل حل است.

۳- فرمول‌بندی مسئله

۳-۱- معیار مقدار در ریسک شرطی

ریسک مربوط به نوسان‌های سود، از طریق معیار CVaR در نظر گرفته شده است. CVaR، به صورت مقدار انتظاری سود در کمتر از $1-\alpha$ چندک از توزیع سود تعریف می‌شود که α، به عنوان پارامتر سطح اطمینان و عددی بین صفر و یک است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

در حالت کلی، می‌توان $CVaR(\alpha, x)$، که x، متغیر تصمیم مرحله‌ی اول است را در یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری ریسک خنثی[۲۱] با تابع هدف بیشینه‌سازی $\sum_\omega p(\omega)q(\omega)^\top y(\omega)$ اعمال نمود و به مسئله‌ی تصمیم‌گیری مخالف ریسک[۲۲] به صورت روابط (۵-۱) رسید.

$$\text{Maximize}_{x,y(\omega),\eta,s(\omega)}(1-\beta)\left(c^\top x+\sum_\omega p(\omega)q(\omega)^\top y(\omega)\right)+\beta\left(\eta-\frac{1}{1-\alpha}\sum_\omega p(\omega)s(\omega)\right) \quad (۱)$$

مقید به:

$$Ax = b \quad (۲)$$

$$T(\omega)x + W(\omega)y(\omega) = h(\omega) \quad \forall\omega \quad (۳)$$

$$\eta - \left(c^\top x + q(\omega)^\top y(\omega)\right) \le s(\omega) \quad \forall\omega \quad (۴)$$

$$s(\omega) \ge 0 \quad \forall\omega \quad (۵)$$

رابطه‌ی (۱)، بیانگر تابع هدف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای همراه با ریسک مدیریت‌شده می‌باشد و روابط (۲) و (۳)، قیود مربوط به مسئله‌ی ریسک خنثی را نشان می‌دهند. روابط (۴) و (۵) نیز قیود ناشی از اعمال معیار مقدار در ریسک شرطی در مسئله هستند. در روابط (۵-۱)، $y(\omega)$، متغیر تصمیم مرحله‌ی دوم، η، یک متغیر کمکی، $p(\omega)$، برابر با احتمال وقوع سناریوی ω، $f(x,\omega)$، نشان‌دهنده‌ی تابع سود و $s(\omega)$، یک متغیر کمکی پیوسته‌ی غیر منفی و برابر با اختلاف بین η و سود متناظر با سناریوی ω است درصورتی‌که این اختلاف غیر منفی باشد و اگر این اختلاف مقداری منفی باشد، برابر با صفر است. همچنین، c، $q(\omega)$، b، $h(\omega)$، A، $T(\omega)$ و $W(\omega)$ نمادهایی از بردارها و ماتریس‌های معلوم در مسئله هستند و β، یک پارامتر وزنی است که به منظور برقرار نمودن تعادل بین سود مورد انتظار و سطح ریسک‌پذیری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر $\beta = 0$، معیار ریسک در تابع هدف نادیده گرفته می‌شود و مسئله‌ی موردنظر، یک مسئله‌ی ریسک خنثی خواهد بود. هرچقدر β بزرگ‌تر شود، بخش مربوط به سود مورد انتظار نسبت به معیار ریسک از اهمیت کمتری برخوردار می‌گردد و اگر $\beta = 1$، مسئله‌ی موردنظر، یک مسئله‌ی مخالف ریسک خواهد بود. در بخش بعدی، فرمول‌بندی مدل دوسطحی تصادفی دومرحله‌ای مقید به ریسک مورد نظر، ارائه می‌گردد.

۳-۲- مدل دوسطحی تصادفی دومرحله‌ای مقید به ریسک

ساختار دوسطحی مدل، در شکل (۲) نشان داده شده است.

مسئله سطح بالاتر: بیشینه سازی سود مورد انتظار تولیدکننده استراتژیک موردنظر با ریسک مدیریت شده

مقید به:

۱. **قیود سطح بالاتر** شامل محدودیت‌های سرمایه‌گذاری و قیود مربوط به مدیریت ریسک

۲. **مسئله سطح پایین‌تر**: بیشینه سازی رفاه اجتماعی (تسویه بازار)

مقید به:

محدوده های بهره برداری

شکل (۲): ساختار دوسطحی مدل سرمایه‌گذاری با مدیریت ریسک

روابط حاکم بر مدل دوسطحی پیشنهادی، به صورت روابط (۱۷-۶) هستند و متغیرهای دوگان هر مسئله‌ی سطح پایین‌تر نیز در سطر مربوط به همان قید نشان داده شده‌اند.

$$\underset{vars^{UL}}{\text{maximize}}(1-\beta)\left(\sum_\omega p_\omega \sum_t \sigma_t\left[\left(\sum_f\sum_o P^S_{tfo\omega}\lambda_{t\omega} - \sum_f\sum_o P^S_{tfo\omega}C^S_{fo}\right)+\left(\sum_a\sum_o P^{ES}_{tao\omega}\lambda_{t\omega} - \sum_a\sum_o P^{ES}_{tao\omega}C^{ES}_{ao}\right)\right] - \sum_f C_f Y_f\right) + \beta\left(\eta - \frac{1}{1-\alpha}\sum_\omega p_\omega S_\omega\right) \quad (۶)$$

که $vars^{UL} = \{\gamma^S_{tfo\omega}, \gamma^{ES}_{tao\omega}, Y_f, u_{fc}, \eta, S_\omega\}$، بیانگر متغیرهای بهینه‌سازی مربوط به مسئله‌ی سطح بالاتر بوده و رابطه‌ی (۶)، نشان‌دهنده‌ی بیشینه‌سازی سود تولیدکننده‌ی موردنظر (بخش اول) با لحاظ مدیریت ریسک این تولیدکننده (بخش دوم) می‌باشد. بخش اول، به صورت بیشینه‌سازی درآمد ناشی از تولید و فروش برق در بازار منهای هزینه‌ی سرمایه‌گذاری با وزن $(1-\beta)$ بیان شده است و معیار CVaR در خط آخر این رابطه اعمال گردیده که در پارامتر وزنی β ضرب شده است. تابع هدف (۶)، با توجه به قیود (۱۲-۷) حل می‌شود.

$$\eta - \left(\sum_t \sigma_t\left[\left(\sum_f\sum_o P^S_{tfo\omega}\lambda_{t\omega} - \sum_f\sum_o P^S_{tfo\omega}C^S_{fo}\right)+\left(\sum_a\sum_o P^{ES}_{tao\omega}\lambda_{t\omega} - \sum_a\sum_o P^{ES}_{tao\omega}C^{ES}_{ao}\right)\right] - \sum_f C_f Y_f\right) \le S_\omega \quad \forall\omega \quad (۷)$$

$$S_\omega \ge 0 \quad \forall\omega \quad (۸)$$

$$Y_f = \sum_c u_{fc} Y_{fc} \quad \forall f \quad (۹)$$

$$\sum_c u_{fc} = 1 \quad \forall f \quad (۱۰)$$

$$u_{fc} \in \{0,1\} \quad \forall f, \forall c \quad (۱۱)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

$$P^{S}_{tfo\omega}, P^{ES}_{tao\omega}, \lambda_{t\omega} \in \arg\underset{vars^{LL}}{\text{minimize}} \sum_{f}\sum_{o} \gamma^{S}_{tfo\omega} P^{S}_{tfo\omega} + \sum_{a}\sum_{o} \gamma^{ES}_{tao\omega} P^{ES}_{tao\omega} + \sum_{r}\sum_{o} C^{R}_{tro\omega} P^{R}_{tro\omega} - \sum_{d}\sum_{b} B^{D}_{tdb\omega} P^{D}_{tdb\omega} \qquad \forall t, \forall \omega \qquad (۱۲)$$

که $vars^{LL} = \{P^{S}_{tfo\omega}, P^{ES}_{tao\omega}, \lambda_{t\omega}, P^{R}_{tro\omega}, P^{D}_{tdb\omega}, \text{dual variables}\}$، بیانگر متغیرهای بهینه‌سازی موجود در هر مسئله‌ی سطح پایین‌تر می‌باشد. روابط (۷) و (۸)، قیود مربوط به اعمال معیار ریسک CVaR هستند که مطابق با روابط (۴) و (۵)، بیان شده‌اند. رابطه‌ی (۹)، تعیین‌کننده‌ی ظرفیت سرمایه‌گذاری انتخاب‌شده برای فن‌آوری f است و روابط (۱۰) و (۱۱)، نشان‌دهنده‌ی محدودیت در تعداد واحدهای جدید انتخابی از هر فن‌آوری نامزد می‌باشند. رابطه‌ی (۱۲)، به عنوان مسئله‌ی سطح پایین‌تر، بیان‌کننده‌ی تسویه‌ی بازار حوضچه و به صورت کمینه‌سازی اختلاف بین مجموع دریافتی تولیدکنندگان موجود در بازار (با در نظر گرفتن قیمت‌های پیشنهادی آنان) و مقادیر پرداختی بارهای موجود در شبکه (با در نظر گرفتن قیمت‌های پیشنهادی آنان)، بیان شده است که حل آن با توجه به قیود (۱۷-۱۳) حاصل می‌گردد.

$$\sum_{d}\sum_{b} P^{D}_{tdb\omega} - \sum_{f}\sum_{o} P^{S}_{tfo\omega} - \sum_{a}\sum_{o} P^{ES}_{tao\omega} - \sum_{r}\sum_{o} P^{R}_{tro\omega} = 0 \;:\; \lambda_{t\omega} \quad \forall t, \forall \omega \qquad (۱۳)$$

$$0 \le P^{S}_{tfo\omega} \le Y_{fo} \;:\; \mu^{S^{min}}_{tfo\omega}, \mu^{S^{max}}_{tfo\omega} \quad \forall t, \forall f, \forall o, \forall \omega \qquad (۱۴)$$

$$0 \le P^{ES}_{tao\omega} \le P^{ES^{max}}_{ao} \;:\; \mu^{ES^{min}}_{tao\omega}, \mu^{ES^{max}}_{tao\omega} \quad \forall t, \forall a, \forall o, \forall \omega \qquad (۱۵)$$

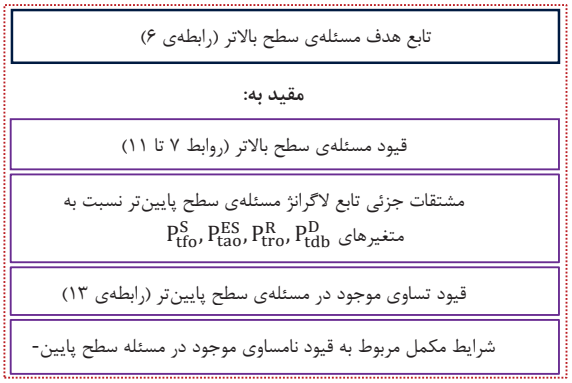
$$0 \le P^{R}_{tro\omega} \le P^{R^{max}}_{ro\omega} \;:\; \mu^{R^{min}}_{tro\omega}, \mu^{R^{max}}_{tro\omega} \quad \forall t, \forall r, \forall o, \forall \omega \qquad (۱۶)$$

$$0 \le P^{D}_{tdb\omega} \le P^{D^{max}}_{tdb\omega} \;:\; \mu^{D^{min}}_{tdb\omega}, \mu^{D^{max}}_{tdb\omega} \quad \forall t, \forall d, \forall b, \forall \omega \qquad (۱۷)$$

رابطه‌ی (۱۳)، بیان‌کننده‌ی تعادل بار در هر بلوک بار و در هر سناریو است. این قید، الزاماً به مفهوم تأمین کل بار موجود در شبکه نیست و ممکن است بخشی از بار تأمین نشود. روابط (۱۶-۱۴)، به ترتیب، بیان‌کننده‌ی محدوده‌های ظرفیت تولید واحدهای جدید و موجود تولیدکننده‌ی استراتژیک و تولیدکنندگان رقیب در بلوک‌های تولید - پیشنهاد مختلف هستند. رابطه‌ی (۱۷)، توان مصرفی توسط هر بار در بلوک مصرف - پیشنهاد مربوطه را محدود می‌کند. تولیدکننده‌ی موردنظر بر اساس تصمیم‌های استراتژیک شامل تصمیم‌های سرمایه‌گذاری استراتژیک (Y_f) و تصمیم‌های پیشنهاددهی قیمت استراتژیک (γ^{S}_{tfo} و γ^{ES}_{tao}) که در مسئله‌ی سطح بالاتر اتخاذ می‌نماید، رفتاری استراتژیک را از خود نشان می‌دهد و انتظار دارد تا بر اساس این تصمیم‌های او، خروجی‌های بازار شامل قیمت‌های تسویه‌ی بازار و مقادیر تولید تغییر نمایند. به همین منظور، تسویه بازار حوضچه مسئله سطح بالاتر را مقید می‌کند. این امر به تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر امکان می‌دهد تا از تأثیر اقدام‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی خود بر روی بازار مطلع گردد.

همچنین، از آنجائی که مسئله‌ی سطح پایین‌تر به عنوان قیدی برای مسئله‌ی سطح بالاتر می‌باشد، مجموعه‌ی متغیرهای سطح پایین‌تر در مجموعه‌ی متغیرهای مسئله‌ی سطح بالاتر نیز قرار دارند. بنابراین، $\gamma^{ES}_{tao\omega}$ ، $\gamma^{S}_{tfo\omega}$ و Y_f، به عنوان متغیرهایی در مسئله‌ی سطح بالاتر و پارامترهایی در مسئله‌ی سطح پایین‌تر، می‌باشند. این امر باعث می‌شود که مسئله‌ی سطح پایین‌تر، خطی و در نتیجه محدب باشد.

از آنجائی که حل مسئله‌ی (۱۷-۶) به دلیل دوسطحی بودن آن مشکل است، از طریق جایگذاری مسائل سطح پایین‌تر با شرایط KKT آن‌ها [20]، مسئله‌ی تک سطحی MPEC با ساختاری به صورت شکل (۳)، حاصل می‌گردد.



شکل (۳): ساختار تک سطحی مسئله‌ی MPEC

دو بخش غیرخطی در مسئله‌ی MPEC بیان‌شده وجود دارند که عبارت‌اند از:

۱. بخش مربوط به حاصل‌ضرب مقادیر تولید واحدهای جدید و واحدهای موجود متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر و قیمت تسویه‌ی بازار که این بخش در تابع هدف وجود دارد و به منظور خطی‌سازی آن از قضیه‌ی دوگانی قوی استفاده می‌شود. بر اساس این نظریه، اگر یک مسئله محدب باشد، توابع هدف مربوط به مسئله‌های اصلی و دوگان در مقدار بهینه با یکدیگر یکسان هستند [21]. به‌این‌ترتیب، با استخراج مسئله‌ی دوگان متناظر با هر مسئله‌ی سطح پایین‌تر و با استفاده از برخی از شرایط KKT بیان‌شده، معادل خطی مربوط به این بخش غیرخطی، به صورت رابطه‌ی (۱۸) خواهد بود [4].

$$\sum_{f}\sum_{o} P^{S}_{tfo\omega}\lambda_{t\omega} + \sum_{a}\sum_{o} P^{ES}_{tao\omega}\lambda_{t\omega} = -\sum_{r}\sum_{o} C^{R}_{tro\omega} P^{R}_{tro\omega} + \sum_{d}\sum_{b} B^{D}_{tdb\omega} P^{D}_{tdb\omega} - \sum_{r}\sum_{o} \mu^{R^{max}}_{tro\omega} P^{R^{max}}_{ro\omega} - \sum_{d}\sum_{b} \mu^{D^{max}}_{tdb\omega} P^{D^{max}}_{tdb\omega} \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

۲. قیود مکمل موجود در مسئله‌ی MPEC، به منظور خطی‌سازی این قیود از تبدیل فورتونی - آمات [20] استفاده می‌شود که بر اساس آن، اگر a و b دو متغیر باشند، می‌توان قید مکمل به صورت $0 \le a \perp b \ge 0$ را با مجموعه‌ی قیود (۱۹) جایگزین نمود.

$$a \ge 0, \quad b \ge 0, \quad a \le \psi M, \quad b \le (1-\psi)M \qquad (۱۹)$$

که ψ، یک متغیر باینری است و M، یک ثابت به اندازه‌ی کافی بزرگ می‌باشد. با خطی‌سازی‌های بیان‌شده، یک MILP حاصل می‌شود.

۴- مطالعه‌ی عددی

این قسمت، نتایج مربوط به یک مطالعه‌ی عددی بر اساس شبکه‌ی آزمون ۲۴ شینه IEEE [22] را ارائه می‌دهد. مسئله‌ی نهایی بیان‌شده در این مقاله، یک MILP بوده و برای حل آن از CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS و نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۴-۱- مفروضات

برای سال هدف، یک منحنی تداوم بار شامل هفت بلوک بار تکه‌ای خطی در نظر گرفته شده است. تداوم زمانی بلوک‌ها توسط یک ضریب وزنی نشان داده شده است. این ضریب برای بلوک‌های مختلف بار به ترتیب برابر با حاصل‌ضرب (۸۷۶۰/۷) در مقادیر ۰/۵، ۰/۵، ۱/۰، ۱/۰، ۱/۰، ۱/۵ و ۱/۵ می‌باشد. بارهای موجود در بلوک بار اول، مشابه [4] با ضریب ۱/۲ هستند و برای شش بلوک بعدی، تمامی بارهای موجود در بلوک بار اول به ترتیب در مقادیر ۰/۹، ۰/۷۵، ۰/۶۵، ۰/۶، ۰/۵۵ و ۰/۵ ضرب شده‌اند. هر بار خود دارای دو بلوک مصرف - پیشنهاد می‌باشد که ۷۵ درصد میزان بار پیشنهادی در بلوک اول و ۲۵ درصد آن نیز متعلق به بلوک دوم است.

قیمت پیشنهادی بارها در بلوک بار اول بر حسب یورو بر مگاوات‌ساعت به صورت است. در شش بلوک بار بعدی، قیمت‌های پیشنهادی بیان‌شده به ترتیب در مقادیر ۰/۹۵، ۰/۹، ۰/۸۵، ۰/۸، ۰/۷۵ و ۰/۷ ضرب می‌شوند.

جدول (۱): قیمت پیشنهادی بارها در بلوک بار اول

بار	قیمت در بلوک پیشنهادی اول	قیمت در بلوک پیشنهادی دوم
بارهای موجود در شین‌های (۱۳-۱)	۳۵	۳۳
بارهای موجود در شین‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۸	۴۰	۳۸
سایر بارها	۳۸	۳۶

اطلاعات مربوط به واحدهای موجود متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر و واحدهای رقیب مشابه [4] بوده و اطلاعات مربوط به واحدهای نامزد برای سرمایه‌گذاری شامل سه فن‌آوری پایه، میانی و اوج در جدول (۲) بیان شده‌اند. ظرفیت مربوط به هریک از بلوک‌های تولید - پیشنهاد اول و دوم برای واحدهای نامزد برابر با نیمی از ظرفیت کل آن واحد در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به واحدهای نامزد برای سرمایه‌گذاری

نوع واحد	هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه C_f[€/MW]	ظرفیت سرمایه‌گذاری در دسترس Y_{fc}[MW]	هزینه تولید در بلوک پیشنهادی ۱	هزینه تولید در بلوک پیشنهادی ۲
فن‌آوری پایه	۷۵۰۰۰	۲۰۰:۵۰:۱۰۰۰	۶/۰۰	۶/۳۰
فن‌آوری میانی	۴۰۰۰۰	۲۰۰:۵۰:۱۰۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۵۰
فن‌آوری اوج	۱۵۰۰۰	۲۰۰:۵۰:۱۰۰۰	۱۴/۷۰	۱۵/۲۰

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

حالت تصادفی با ده سناریوی محتمل در نظر گرفته شده است. این سناریوها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که عدم قطعیت موجود در پارامترهای غیرقطعی را به صورتی مناسب نمایش دهند. سناریوهای مربوط به پیشنهاددهی رقبا باید تمامی استراتژی‌های ممکن در پیشنهاددهی رقبا را پوشش دهند، سناریوهای مربوط به سرمایه‌گذاری رقبا باید بر اساس شرایط و اظهارات مالی آنان باشند و سناریوهای مربوط به مقدار بار و پیشنهاددهی قیمت آنان نیز می‌توانند براساس سوابق رفتار بارها تعیین شوند. جزئیات مربوط به حالت تصادفی در جدول (۳) بیان شده است که شامل ده سناریو بوده و احتمال وقوع آن‌ها یکسان فرض شده است (برابر با ۰/۱) و سرمایه‌گذاری رقبا و همچنین ضرایب مربوط به پیشنهاددهی قیمت رقبا، مقدار بار و پیشنهاددهی قیمت بارها در ستون‌های این جدول بیان شده‌اند، یعنی ضرایب موجود در جدول (۳) در مقادیر بیان‌شده در بخش مفروضات ضرب می‌شوند و مقادیر پارامترهای غیرقطعی در سناریوهای مختلف حاصل می‌گردند.

جدول (۳): اطلاعات مربوط به سناریوهای مختلف

سناریو	سرمایه‌گذاری رقبا (MW)	ضریب مربوط به پیشنهاددهی قیمت رقبا	ضریب مربوط به پیشنهاددهی مقدار بار	ضریب مربوط به پیشنهاددهی قیمت بار
۱	-	۰/۹	۱/۰	۰/۹
۲	-	۰/۹	۱/۱	۰/۹۵
۳	-	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۴	-	۱/۰	۱/۱	۱/۱
۵	-	۱/۰	۱/۲	۱/۲
۶	۳۵۰	۰/۹	۱/۰	۰/۹
۷	۳۵۰	۰/۹	۱/۱	۰/۹۵
۸	۳۵۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۹	۳۵۰	۱/۰	۱/۱	۱/۱
۱۰	۳۵۰	۱/۰	۱/۲	۱/۲

مسئله‌ی MILP بیان‌شده، به ازای مقادیر مختلفی از پارامتر وزنی β حل می‌شود. نتایج بدست‌آمده در خصوص سرمایه‌گذاری، در جدول

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14 No.3- Fall 2017

(۴) ارائه شده است. پارامتر سطح اطمینان α برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

جدول (۴): نتایج سرمایه‌گذاری در سطوح مختلف ریسک‌پذیری

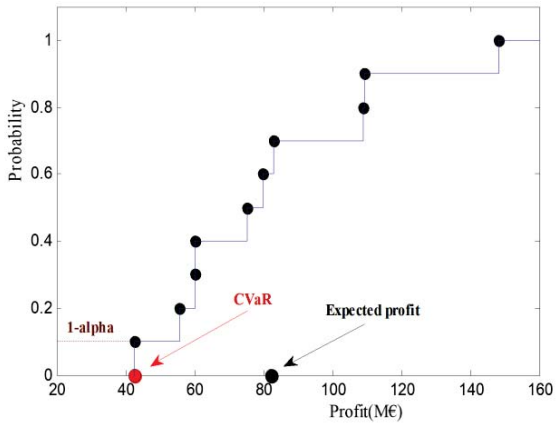
β	فن‌آوری پایه (MW)	فن‌آوری میانی (MW)	فن‌آوری اوج (MW)	کل ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)	سود انتظاری (M€)
۰/۰	۲۰۰	–	٤۰۰	٦۰۰	۸۲/۲۸
۰/۲	۲۰۰	–	۳۵۰	۵۵۰	۸۲/۱۷
۰/٤	–	–	۵۰۰	۵۰۰	۸۱/۹۸
۰/٦	۲۰۰	–	۳۰۰	۵۰۰	۷۹/۷٦
۰/۸	–	–	۲۰۰	۲۰۰	۷۸/۰۰
۱/۰	–	–	–	–	۵۱/۱۳

به ازای $\beta = ۰$، مسئله‌ی موردنظر، ریسک‌خنثی است (تولیدکننده‌ی موردنظر، کاملاً ریسک‌پذیر است) و همان‌طور که مشاهده می‌شود، سود انتظاری در این حالت دارای بیشترین مقدار است. با افزایش β، بخش مربوط به سود انتظاری نسبت به ریسک از اهمیت کمتری برخوردار خواهد بود، سود انتظاری به تدریج کاهش یافته و سطح ریسک‌گریزی تولیدکننده‌ی موردنظر افزایش می‌یابد و این بدان معناست که با احتمال بالاتری به سود موردنظر دست خواهد یافت. همچنین، با افزایش β، کل ظرفیت سرمایه‌گذاری دارای روند کاهشی است؛ به طوری که در حالت ریسک‌خنثی، کل ظرفیت سرمایه‌گذاری دارای بیشترین مقدار و برابر با ۶۰۰ مگاوات است که ۴۰۰ مگاوات آن از فن‌آوری اوج و ۲۰۰ مگاوات آن از فن‌آوری پایه است و هر چقدر رفتار تولیدکننده‌ی موردنظر به حالت ریسک‌گریز نزدیک‌تر می‌شود، کل ظرفیت سرمایه‌گذاری نیز کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در حالت کاملاً ریسک‌گریز، هیچ سرمایه‌گذاری جدیدی انجام نمی‌دهد. مقادیر سود، بر حسب میلیون یورو، به ازای مقادیر مختلف β در سناریوهای مختلف، مطابق جدول (۵)، حاصل شده‌اند.

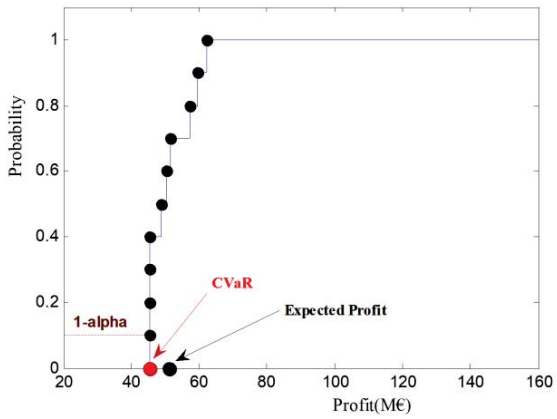
جدول (۵): مقادیر سود به ازای مقادیر مختلف β در سناریوهای مختلف

	مقادیر پارامتر وزنی β					
	صفر	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱
س. ۱	۶۰/۰۲	۵۹/۷۴	۶۱/۶۶	۵۹/۹۸	۵۹/۹۸	۴۵/۳۶
س. ۲	۸۲/۸۱	۸۲/۶۲	۸۲/۳۵	۸۱/۴۹	۷۷/۱۶	۵۷/۲۲
س. ۳	۷۵/۱۹	۷۵/۲۳	۷۶/۱۲	۷۴/۸۹	۷۳/۸۰	۵۱/۶۷
س. ۴	۱۰۸/۹۳	۱۰۸/۷۱	۱۰۷/۷۶	۱۰۶/۷۹	۱۰۰/۵۷	۶۲/۳۹
س. ۵	۱۴۸/۲۲	۱۴۶/۷۶	۱۴۳/۴۹	۱۳۰/۶۸	۱۲۴/۶۴	۵۹/۴۳
س. ۶	۴۲/۵۶	۴۲/۴۵	۴۴/۷۴	۴۳/۴۳	۴۶/۸۰	۴۵/۳۶
س. ۷	۶۰/۰۴	۶۰/۴۱	۶۰/۵۹	۶۰/۵۱	۶۰/۱۳	۴۵/۳۶
س. ۸	۵۵/۷۷	۵۶/۳۵	۵۷/۵۱	۵۳/۶۲	۵۷/۸۴	۴۵/۳۸
س. ۹	۷۹/۹۸	۸۰/۴۲	۷۸/۱۹	۸۰/۳۲	۷۷/۹۵	۵۰/۲۵
س. ۱۰	۱۰۹/۲۸	۱۰۸/۹۹	۱۰۷/۴۲	۱۰۵/۸۳	۱۰۱/۱۴	۴۸/۸۸

در جدول (۵)، ستون اول، نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی سناریو است. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، مقادیر سود از حالت ریسک‌خنثی تا حالت ریسک‌گریز، به طور کلی دارای روند نزولی است که این امر با توجه به آنچه در [19] بیان شده است، امری منطقی است. توابع توزیع تجمعی در دو حالت ریسک‌خنثی و ریسک‌گریز، به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): تابع توزیع تجمعی در حالت ریسک‌خنثی ($\beta = ۰$)



شکل (۵): تابع توزیع تجمعی در حالت ریسک‌گریز ($\beta = ۱$)

همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، در حالت ریسک‌گریز، پراکندگی مقادیر سود در سناریوهای مختلف نسبت به حالت ریسک‌خنثی به شدت کاهش یافته و CVaR افزایش یافته است. به این ترتیب، تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر می‌تواند متناسب با سطح ریسک‌پذیری و سود مورد انتظار خود، تصمیم‌های بهینه را اتخاذ نماید. قیمت‌های تسویه‌ی بازار در بلوک‌های بار و سناریوهای مختلف، در دو حالت کاملاً ریسک‌خنثی و کاملاً ریسک‌گریز به ترتیب، مطابق با جدول‌های (۶) و (۷) حاصل شده‌اند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

جدول (۶): قیمت‌های تسویه‌ی بازار برحسب یورو بر مگاوات‌ساعت در بلوک‌های بار و سناریوهای مختلف در حالت ریسک‌خنثی ($\beta = ۰$)

	ب. ۱	ب. ۲	ب. ۳	ب. ۴	ب. ۵	ب. ۶	ب. ۷
س. ۱	۳۱/۵	۲۸/۱	۲۶/۵	۲۵/۰	۲۳/۴	۱۸/۰	۱۸/۰
س. ۲	۳۳/۲	۳۱/۶	۲۸/۰	۲۶/۴	۲۴/۷	۲۳/۰	۱۸/۰
س. ۳	۳۵/۰	۳۱/۲	۲۹/۵	۲۷/۷	۲۶/۰	۲۰/۰	۲۰/۰
س. ۴	۳۸/۵	۳۶/۶	۳۲/۴	۳۰/۵	۲۸/۶	۲۶/۷	۲۰/۰
س. ۵	۴۲/۰	۳۹/۹	۳۵/۴	۳۳/۳	۳۱/۲	۲۹/۱	۲۷/۰
س. ۶	۲۹/۷	۲۸/۱	۲۶/۵	۱۸/۰	۱۷/۳	۱۶/۷	۱۶/۷
س. ۷	۳۳/۲	۲۹/۷	۲۸/۰	۲۶/۴	۱۸/۰	۱۷/۳	۱۶/۷
س. ۸	۳۳/۰	۳۱/۲	۲۹/۵	۱۹/۲	۱۹/۲	۱۸/۶	۱۸/۶
س. ۹	۳۸/۵	۳۴/۴	۳۲/۴	۳۰/۵	۱۹/۲	۱۹/۲	۱۸/۶
س.۱۰	۴۲/۰	۳۷/۵	۳۵/۴	۳۳/۳	۳۱/۲	۱۹/۲	۱۹/۲

جدول (۷): قیمت‌های تسویه‌ی بازار برحسب یورو بر مگاوات‌ساعت در بلوک‌های بار و سناریوهای مختلف در حالت ریسک‌گریز ($\beta = ۱$)

	ب. ۱	ب. ۲	ب. ۳	ب. ۴	ب. ۵	ب. ۶	ب. ۷
س. ۱	۳۲/۴	۲۹/۹	۲۸/۳	۲۵/۰	۲۳/۴	۲۱/۸	۲۰/۲
س. ۲	۳۴/۲	۳۱/۶	۲۹/۹	۲۶/۴	۲۴/۷	۲۳/۰	۱۰/۸
س. ۳	۳۵/۰	۳۳/۲	۳۱/۵	۲۷/۷	۲۰/۰	۲۳/۴	۲۰/۰
س. ۴	۳۹/۶	۳۶/۶	۳۴/۶	۳۲/۷	۲۸/۶	۲۳/۴	۱۸/۶
س. ۵	۴۲/۰	۳۹/۹	۳۷/۸	۳۵/۷	۳۳/۶	۲۹/۱	۲۷/۰
س. ۶	۳۱/۵	۲۸/۱	۲۶/۵	۱۸/۰	۱۸/۰	۱۷/۳	۱۷/۳
س. ۷	۳۳/۲	۳۱/۶	۲۹/۹	۲۶/۴	۲۱/۴	۱۸/۳	۱۸/۰
س. ۸	۳۵/۰	۳۳/۲	۲۹/۵	۲۰/۰	۱۹/۲	۲۰/۰	۱۸/۶
س. ۹	۳۸/۵	۳۶/۶	۳۲/۴	۲۳/۸	۱۹/۲	۱۸/۶	۱۸/۶
س.۱۰	۴۲/۰	۳۹/۹	۳۵/۴	۳۳/۳	۲۳/۸	۲۳/۴	۲۰/۳

قیمت‌های تسویه‌ی بازار، به عنوان متغیرهای تصمیم مرحله‌ی دوم می‌باشند. در مدل ارائه‌شده، قیمت‌های تسویه‌ی بازار از نوع قیمت‌های یکنواخت هستند. همانطور که در جدول‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، به طور کلی، این قیمت‌ها از بلوک بار اول (ب. ۱) تا بلوک بار هفتم (ب. ۷) دارای روند نزولی هستند که این امر با توجه به نزولی بودن پیشنهادهای مربوط به مقدار و قیمت بار از بلوک بار اول تا بلوک بار هفتم، امری منطقی است.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله، مدلی را ارئه می‌دهد که بر اساس آن، یک تولیدکننده‌ی استراتژیک می‌تواند تصمیم‌هایی بهینه را در خصوص سرمایه‌گذاری در تولید در یک فضای تجدید ساختاریافته اتخاذ نماید. با توجه به مدل ارائه شده و شبیه‌سازی صورت گرفته، نتایج زیر حاصل شده‌اند:

۱. رفتار استراتژیک تولیدکننده‌ی موردنظر از طریق تابع عرضه در مدل ارائه‌شده بیان گردیده است.

۲. فضای تجدید ساختاریافته به گونه‌ای مناسب و در قالب مسائل سطح پایین‌تر (تسویه‌ی بازار) در یک مدل دوسطحی بیان شده است.

۳. عدم قطعیت‌های موجود در پیشنهاددهی مقدار و قیمت بارها، سرمایه‌گذاری رقبا و پیشنهاددهی قیمت آنان به صورتی مناسب از طریق سناریوهای مختلف بیان شده‌اند.

۴. تأثیر سطح ریسک‌پذیری تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر بر روی تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی وی از طریق اعمال یک معیار خطی اندازه‌گیرنده‌ی ریسک (CVaR) در مسئله‌ی سطح بالاتر، مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی بخوبی نشان می‌دهد که اگرچه نادیده گرفتن ریسک به سود مورد انتظار بیشتری منجر می‌شود، اما ممکن است در عمل با وقوع یکی از سناریوهای نامطلوب، سودی حاصل گردد که با مقدار مورد انتظار سود بسیار متفاوت است. در نتیجه، تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس بیشینه کردن سود انتظاری و بدون در نظر گرفتن ریسک می‌تواند گمراه‌کننده باشد. بنابراین، سرمایه‌گذار استراتژیک می‌تواند با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله، با تعریف رفتار بارها و رفتار رقبا در قالب یک مجموعه سناریوی واقع‌بینانه و با در نظر گرفتن یک معیار اندازه‌گیرنده‌ی ریسک در کنار بیشینه‌سازی سود انتظاری و با وزن‌دهی این دو عامل متناسب با سطح ریسک‌پذیری خود، تصمیم‌های مناسب‌تری اتخاذ نماید.

ضمایم

فهرست علائم و اختصارها

در این بخش، اندیس‌ها، ثابت‌ها و متغیرهای استفاده‌شده در مدل موردنظر ارائه شده‌اند. برخی از ثابت‌ها و متغیرهای بیان‌شده، در صورتی که در سناریوهای مختلف دارای مقادیر متفاوتی باشند، شامل اندیس ω نیز خواهند بود.

اندیس‌های بکاررفته در مدل ارائه‌شده

اندیس مربوط به بلوک‌های بار	t
اندیس مربوط به فن‌آوری موجود در واحد جدید	f
اندیس مربوط به واحدهای موجود تولیدکننده‌ی استراتژیک موردنظر	a
اندیس مربوط به واحدهای متعلق به تولیدکنندگان رقیب	r
اندیس مربوط به بارها	d
اندیس مربوط به ظرفیت‌های سرمایه‌گذاری در دسترس	c
اندیس مربوط به بلوک‌های تولید - پیشنهاد	o
اندیس مربوط به بلوک‌های مصرف - پیشنهاد	b
اندیس مربوط به سناریوهای مختلف	ω

ثابت‌های بکاررفته در مدل ارائه‌شده

ضریب وزنی بلوک بار t	σ_t
احتمال وقوع سناریوی ω	p_ω
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالیانه‌ی واحد جدید با فن‌آوری f	C_f
گزینه‌ی c برای ظرفیت سرمایه‌گذاری واحد جدید با فن‌آوری f	Y_{fc}
ظرفیت واحد موجود a متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک تولید - پیشنهاد o	$P_{ao}^{ES^{max}}$
ظرفیت واحد r متعلق به تولیدکنندگان رقیب در بلوک تولید - پیشنهاد o	$P_{ro}^{R^{max}}$
بیشینه‌ی مصرف بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف - پیشنهاد b	$P_{tdb}^{D^{max}}$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14 No.3- Fall 2017

C^{S}_{fo}	هزینه‌ی مرزی واحد جدید با فن‌آوری f در بلوک تولید - پیشنهاد o
C^{S}_{ao}	هزینه‌ی مرزی واحد موجود a متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک تولید - پیشنهاد o
C^{R}_{tro}	پیشنهاد قیمت واحد r تولیدکنندگان رقیب در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
B^{D}_{tdb}	پیشنهاد قیمت بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف - پیشنهاد b
α	سطح اطمینان استفاده‌شده برای محاسبه‌ی مقدار در ریسک شرطی
β	پارامتر وزنی استفاده‌شده برای مدل‌سازی تعادل بین سود انتظاری و مقدار در ریسک شرطی

متغیرهای بکاررفته در مدل ارائه‌شده

Y_f	ظرفیت بهینه‌ی سرمایه‌گذاری برای تولیدکننده‌ی استراتژیک در واحد جدید با فن‌آوری f
Y_{fo}	ظرفیت واحد جدید با فن‌آوری f در بلوک تولید - پیشنهاد o
γ^{S}_{tfo}	پیشنهاد قیمت واحد جدید با فن‌آوری f متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
γ^{ES}_{tao}	پیشنهاد قیمت واحد موجود a متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
P^{S}_{tfo}	توان تولیدی توسط واحد جدید با فن‌آوری f متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
P^{ES}_{tao}	توان تولیدی توسط واحد موجود a متعلق به تولیدکننده‌ی استراتژیک در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
P^{R}_{tro}	توان تولیدی توسط واحد r متعلق به تولیدکنندگان رقیب در بلوک بار t و در بلوک تولید - پیشنهاد o
P^{D}_{tdb}	توان مصرفی توسط بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف - پیشنهاد b
η, S_{ω}	متغیرهای کمکی برای محاسبه‌ی مقدار در ریسک شرطی

مراجع

[۱] صادقی هادی، محمدیان محسن، عبداللهی امیر، رشیدی‌نژاد مسعود، **"برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و طرح‌های حمایتی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی"**، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[۲] خراسانی حمید، رشیدی‌نژاد مسعود، **"یک روش ترکیبی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال"**، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره اول، ۱۳۹۱.

[۳] گلدانی سعیدرضا، رجبی مشهدی حبیب، قاضی رضا، **"ارائه یک مدل تحلیلی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در محیط رقابتی بر مبنای تعادل دینامیکی عرضه و تقاضای انرژی"**، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۰.

[4] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "*Strategic generation investment using a complementarity approach,*" IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 2, pp. 940–948, 2011.

[5] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, C. Ruiz, and S. Member, *"Strategic Generation Investment Considering Futures and Spot Markets,"* IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 3, pp. 1467–1476, 2012.

[6] S. J. Kazempour and A. J. Conejo, *"Strategic generation investment under uncertainty via Benders decomposition,"* IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 1, pp. 424–432, 2012.

[7] S. Wogrin, E. Centeno, and J. Barquín, *"Generation capacity expansion in liberalized electricity markets: A stochastic MPEC approach,"* IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 4, pp. 2526–2532, 2011.

[8] B. F. Hobbs, C. B. Metzler, and J.-S. Pang, *"Strategic gaming analysis for electric power systems: An MPEC approach,"* Power Syst. IEEE Trans., vol. 15, no. 2, pp. 638–645, 2000.

[9] M. Ventosa, R. Denis, and C. Redondo, *"Expansion planning in electricity markets. Two different approaches,"* Proceeding 14th PSCC, Sevilla, pp. 24–28, 2002.

[10] E. Centeno, S. Wogrin, A. López-Peña, and M. Vázquez, *"Analysis of investments in generation capacity: a bilevel approach,"* IET Gener. Transm. Distrib., vol. 5, no. 8, pp. 842–849, 2011.

[11] L. Baringo and A. J. Conejo, *"Risk-constrained multi-stage wind power investment,"* IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 1, pp. 401–411, 2013.

[12] A. J. C. Pereira and J. T. Saraiva, *"Generation expansion planning (GEP)--a long-term approach using system dynamics and genetic algorithms (GAs),"* Energy, vol. 36, no. 8, pp. 5180–5199, 2011.

[13] S. M. Moghaddas Tafreshi, A. Saliminia Lahiji, J. Aghaei, and A. Rabiee, *"Reliable generation expansion planning in pool market considering power system security,"* Energy Convers. Manag., vol. 54, no. 1, pp. 162–168, 2012.

[14] H. A. Shayanfar, a. S. Lahiji, J. Aghaei, and A. Rabiee, *"Generation Expansion Planning in pool market: A hybrid modified game theory and improved genetic algorithm,"* Energy Convers. Manag., vol. 50, no. 5, pp. 1149–1156, 2009.

[15] S. M. Moghddas-Tafreshi, H. A. Shayanfar, A. Saliminia Lahiji, A. Rabiee, and J. Aghaei, *"Generation expansion planning in Pool market: A hybrid modified game theory and particle swarm optimization,"* Energy Convers. Manag., vol. 52, no. 2, pp. 1512–1519, 2011.

[16] A. J. C. Pereira and J. T. Saraiva, *"A decision support system for generation expansion planning in competitive electricity markets,"* Electr. power Syst. Res., vol. 80, no. 7, pp. 778–787, 2010.

[17] A. J. C. Pereira and J. T. Saraiva, *"A long term generation expansion planning model using system dynamics--Case study using data from the Portuguese/Spanish generation system,"* Electr. Power Syst. Res., vol. 97, pp. 41–50, 2013.

[18] J. Wang, M. Shahidehpour, Z. Li, and a. Botterud, *"Strategic Generation Capacity Expansion Planning With Incomplete Information,"* Power Syst. IEEE Trans., vol. 24, no. 2, pp. 1002–1010, 2009.

[19] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*, vol. 1. Springer, 2010.

[20] S. A. Gabriel, A. J. Conejo, J. D. Fuller, B. F. Hobbs, and C. Ruiz, *"Complementarity Modeling in Energy Markets,"* vol. 1, p. 655, 2012.

[21] J. C. Antonio, M. Roberto, C. Enriqne, and others, "*Decomposition techniques in mathematical programming*." New York: Engineering and Science Application, 2006.

[22] P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, R. Billinton, Q. Chen, C. Fong, S. Haddad, W. Li, R. Mukerji, D. Patton, and others, "*The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee*," Power Syst. IEEE Trans., vol. 14, no. 3, pp. 1010–1020, 1999.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3- Fall 2017

زیرنویس‌ها

[1] Strategic Producer
[2] Karush-Kuhn-Tucker
[3] Mixed Integer Linear Programming
[4] Mathematical Program with Equilibrium Constraints
[5] Conjectured-Price Response
[6] hybrid modified game theory
[7] Independent System Operator
[8] Risk Management
[9] Supply Function
[10] Conditional Value at Risk
[11] Production-offer blocks
[12] Demand-bid blocks
[13] Social Welfare
[14] First-stage decision variable
[15] Uniform Price
[16] Second-stage decision variable
[17] First order optimality conditions
[18] Strong duality theorem
[19] Fortuny-Amat transformation
[20] branch-and-cut algorithms
[21] Risk-Neutral Decision Making
[22] Risk-Averse Decision Making

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.1.6]