

مقایسه رویکردهای استراتژیک و غیراستراتژیک یک شرکت تولیدی در راستای سرمایه‌گذاری در تولید در فضای بازار برق

محمد اسمعیلی جونوشتی، محمد احمدیان، محمد حیدریزاده

دانشکده برق

دانشگاه شهید بهشتی

تهران، ایران

m67.esmaili@gmail.com, m_ahmadian@sbu.ac.ir, m_heidarizadeh@sbu.ac.ir

سال هدف در آینده اتخاذ نماید. به منظور نشان دادن قابلیت مدل ارائه‌شده، نتایج مربوط به یک مطالعه موردی در شبکه ۲۴ شینه استاندارد IEEE بیان می‌شود.

واژه‌های کلیدی — شرکت تولیدی؛ سرمایه‌گذاری در تولید؛ پیشنهاددهی استراتژیک و غیراستراتژیک؛ مسئله بهینه‌سازی دوسطحی؛ برنامه ریاضی با قیود تعادلی؛

فهرست علائم و اختصارات

در این بخش، اندیس‌ها، ثابت‌ها و متغیرهای استفاده‌شده در مدل موردنظر ارائه شده‌اند.

اندیس‌های به‌کاررفته در مدل ارائه‌شده

t	اندیس مربوط به بلوک‌های بار
f	اندیس مربوط به فن‌آوری موجود در واحد جدید
a	اندیس مربوط به واحدهای موجود GENCO موردنظر
r	اندیس مربوط به واحدهای متعلق به GENCOهای رقیب
d	اندیس مربوط به بارها
c	اندیس مربوط به ظرفیت‌های سرمایه‌گذاری در دسترس
o	اندیس مربوط به بلوک‌های تولید - پیشنهاد

چکیده — در این مقاله، دو رویکرد استراتژیک و غیراستراتژیک یک شرکت تولیدی در راستای تصمیم‌گیری صحیح در مورد سرمایه‌گذاری در احداث واحد نیروگاهی جدید و بهره‌برداری در فضای تجدید ساختاریافته موردبررسی قرار می‌گیرند. رقابت در نظر گرفته‌شده در بازار برق از نوع رقابت مقداری و قیمتی (ترکیبی از مدل‌های کورنات و برتراند) است. بر این اساس، شرکت تولیدی موردنظر، پیشنهادهای قیمت و مقدار خود را در بازار حوضچه ارائه می‌دهد و در این خصوص می‌تواند دو رفتار استراتژیک و غیراستراتژیک را از خود نشان دهد. به‌منظور پیاده‌سازی دو مرحله سرمایه‌گذاری در تولید و بهره‌برداری، از یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی استفاده می‌شود. در این مدل دوسطحی، مسئله سطح بالاتر و پایین‌تر به ترتیب مربوط به حوزه سرمایه‌گذاری با هدف بیشینه‌سازی سود شرکت تولیدی موردنظر و حوزه بهره‌برداری (تسویه بازار) با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی هستند. به‌منظور حل، مدل دوسطحی ارائه‌شده به یک مسئله تک‌سطحی غیرخطی به‌صورت برنامه ریاضی با قیود تعادلی تبدیل می‌شود و با خطی‌سازی، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح قابل‌حل ایجاد می‌گردد. مدل ارائه‌شده، به‌گونه‌ای است که یک شرکت تولیدی می‌تواند بر اساس آن، تصمیم‌هایی استراتژیک و بهینه در زمینه سرمایه‌گذاری در تولید برای یک

اندیس مربوط به بلوک‌های مصرف-پیشنهاد

b

ثابت‌های به‌کاررفته در مدل ارائه‌شده

ضریب وزنی بلوک بار t هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه واحد جدید با فن‌آوری f گزینه c برای ظرفیت سرمایه‌گذاری واحد جدید با فن‌آوری f

ظرفیت واحد موجود a متعلق به GENCO موردنظر در بلوک تولید-پیشنهاد o

ظرفیت واحد r متعلق به GENCOهای رقیب در بلوک تولید-پیشنهاد o

بیشینه مصرف بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف-پیشنهاد b

هزینه مرزی واحد جدید با فن‌آوری f در بلوک تولید-پیشنهاد o

هزینه مرزی واحد موجود a متعلق به GENCO موردنظر در بلوک تولید-پیشنهاد o

پیشنهاد قیمت واحد r متعلق به GENCOهای رقیب در بلوک بار t و در بلوک

تولید-پیشنهاد o

پیشنهاد قیمت بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف-پیشنهاد b

متغیرهای به‌کاررفته در مدل ارائه‌شده

ظرفیت بهینه سرمایه‌گذاری برای GENCO موردنظر در واحد جدید با فن‌آوری f

ظرفیت واحد جدید با فن‌آوری f در بلوک تولید-پیشنهاد o (برابر با نیمی از ظرفیت

واحد جدید در نظر گرفته شده است)

پیشنهاد قیمت واحد جدید با فن‌آوری f متعلق به GENCO موردنظر در بلوک بار

t و در بلوک تولید-پیشنهاد o

پیشنهاد قیمت واحد موجود a متعلق به GENCO موردنظر در بلوک بار t و در

بلوک تولید-پیشنهاد o

توان تولیدی توسط واحد جدید با فن‌آوری f متعلق به GENCO موردنظر در

بلوک بار t و در بلوک تولید-پیشنهاد o

توان تولیدی توسط واحد موجود a متعلق به GENCO موردنظر در بلوک بار t و

در بلوک تولید-پیشنهاد o

توان تولیدی توسط واحد r متعلق به GENCOهای رقیب در بلوک بار t و در

بلوک تولید-پیشنهاد o

توان مصرفی توسط بار d در بلوک بار t و در بلوک مصرف-پیشنهاد b

۱. مقدمه

در سیستم‌های برق تجدید ساختاریافته با وجود بازیگران مختلف در

فضای رقابتی و به‌ویژه در بازارهای با رقابت غیر کامل، تصمیم به سرمایه-

گذاری با چالش‌های زیادی روبرو شده است. در چنین فضایی، یک شرکت

تولیدی^۱ (GENCO) به‌منظور تصمیم‌گیری جهت سرمایه‌گذاری در تولید و

بهره‌برداری، باید عملکرد بازار را به‌درستی مدل نماید. تولیدکننده

استراتژیک، تولیدکننده‌ای قیمت‌گذار است که می‌تواند از طریق تصمیم‌های

^۱ Generation Company

خود در خصوص سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی در تولید خروجی‌های تسویه بازار را تغییر دهد و تولیدکننده غیراستراتژیک نیز تولیدکننده‌ای قیمت‌پذیر می‌باشد. در چنین شرایطی که خروجی‌های تسویه بازار، تحت تأثیر رفتار استراتژیک و یا غیراستراتژیک GENCO موردنظر هستند، پرداختن به دو موضوع (۱) ارائه روشی برای کمک به اتخاذ تصمیم‌های صحیح سرمایه‌گذاری در تولید و بهره‌برداری و (۲) ارائه تحلیلی در خصوص نتایج حاصل از دو رویکرد استراتژیک و غیراستراتژیک از سوی GENCO موردنظر، از اهمیت بالایی برخوردار است.

کارهای زیادی در زمینه تصمیم‌گیری جهت سرمایه‌گذاری در تولید از سوی یک تولیدکننده در بازار برق صورت گرفته است. در [۱]، از یک مدل تک‌سطحی بهینه‌سازی تصادفی دینامیک به‌منظور ارزیابی سرمایه‌گذاری در تولید در فضاهای متمرکز و غیرمتمرکز استفاده شده است. در این مرجع، پیشنهاددهی به‌صورت غیراستراتژیک بوده و عدم قطعیت در رشد بار از طریق زنجیره‌های مارکوف گسسته مدل‌سازی شده است. مرجع [۲]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید^۲ (GEP) را در یک فضای انحصاری با استفاده از یک مدل تک‌سطحی کورنات و به‌صورت استاتیکی در نظر گرفته است که با فرض وجود اطلاعات کامل از رقبای با استفاده از یک فرایند جستجوی مبتنی بر تکرار حل می‌شود. در [۳]، در قالب مدل کورنات، تأثیرهای رقابت و تراکم خطوط انتقال بر روی GEP، در نظر گرفته شده‌اند.

در [۴]، دو روش متفاوت برای توسعه ظرفیت تولید در بازار برق ارائه شده‌اند. هر دو مدل کورنات را در نظر گرفته‌اند، اما در یافتن ظرفیت بهینه سرمایه‌گذاری با یکدیگر متفاوت هستند. در روش اول، از یک مسئله مکمل ترکیبی^۳ (MCP) و در روش دوم از یک برنامه ریاضی با قیود تعادلی^۴ (MPEC) استفاده شده است. در [۵]، توسعه ظرفیت تولید از سوی یک تولیدکننده استراتژیک با در نظر گرفتن اطلاعات غیر کامل از تولیدکنندگان رقیب با استفاده از یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی^۵ مدل‌سازی شده است. به‌منظور حل این مسئله، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مراجع دیگری مانند [۶]–[۸]، در زمینه GEP، از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند.

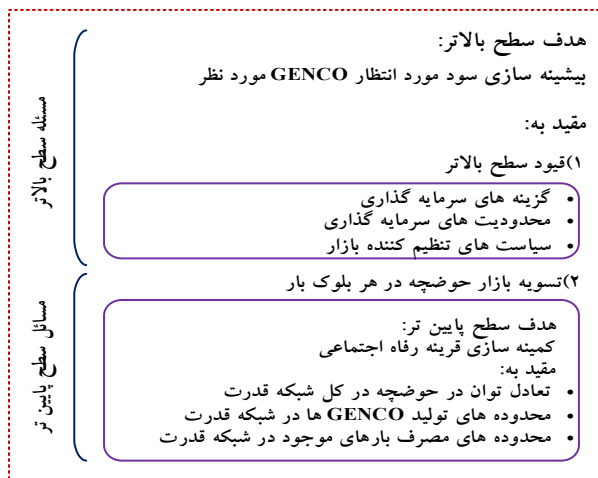
در [۹]، مسئله سرمایه‌گذاری در تولید در محیط رقابتی به‌صورت یک مسئله دوسطحی بیان شده است که در سطح بالاتر تصمیم به سرمایه‌گذاری و راهبرد مشارکت در بازار و در سطح پایین‌تر عملیات تسویه بازار انجام شده است. مرجع [۱۰]، یک مدل دوسطحی را به‌منظور تصمیم‌گیری یک

^۲ Generation Expansion Planning^۳ Mixed Complementary Problem^۴ Mathematical Program with Equilibrium Constraints^۵ Bi-level optimization problem

بیشینه‌سازی سود GENCO موردنظر، تعیین‌کننده تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی در هر بلوک بار است. پیشنهاددهی مربوط به واحدهای تولیدی اعم از GENCO موردنظر و GENCOهای رقیب و همچنین بارهای موجود در شبکه به‌صورت ترکیبی از مقدار و قیمت بیان می‌گردد که شامل ظرفیت‌های تولید/مصرف پیشنهادی و قیمت‌های پیشنهادی آنها است. به این صورت که GENCOها و بارهای موجود، پیشنهادهای مقدار و قیمت خود را به ترتیب از طریق بلوک‌های تولید-پیشنهاد^{۱۱} و بلوک‌های مصرف-پیشنهاد^{۱۲} به بازار ارائه می‌دهند.

در این مدل، یک سال هدف در آینده (مثلاً ده سال بعد) همراه با تغییرات بار در قالب یک منحنی تداوم بار در نظر گرفته می‌شود و بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی توسعه استاتیکی است.

ساختار دوسطحی مدل بیان‌شده، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار دوسطحی مربوط به GENCO موردنظر

مسئله سطح بالاتر مقید به مجموعه‌ای از مسائل سطح پایین‌تر است. مسائل سطح پایین‌تر بیان‌کننده تسویه بازار حوضچه در شرایط مختلف بهره‌برداری با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی هستند.

۳. فرمول‌بندی مسئله

در این بخش، فرمول‌بندی مدل دوسطحی پیشنهادشده در این مقاله ارائه می‌شود. در این مدل، مسئله‌ی سطح بالاتر مقید به قیود سطح بالاتر و مسائل سطح پایین‌تر است. همچنین، متغیرهای دوگان هر مسئله سطح پایین‌تر در سطر مربوط به همان قید نشان داده شده‌اند. از میان متغیرهای دوگان، λ_t

تولیدکننده غیراستراتژیک در زمینه سرمایه‌گذاری در تولید با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در سرمایه‌گذاری تولیدکنندگان رقیب ارائه می‌دهد. در مسئله سطح بالاتر، تولیدکننده سود مورد انتظار خود را بیشینه می‌کند و مسئله سطح پایین‌تر بیان‌کننده تسویه‌ی بازار است که توسط یک مدل تغییرات تخمینی^۶ بیان می‌شود.

در [۱۱]، توسعه ظرفیت تولید در محیط رقابتی به‌صورت یک مسئله دوسطحی بیان شده است. در سطح بالاتر با استفاده از تئوری بازی اصلاح شده مرکب^۷، نحوه مشارکت تولیدکنندگان توسط بهره‌بردار مستقل شبکه^۸ (ISO) بررسی و در سطح پایین‌تر با استفاده از الگوریتم ژنتیک تصمیم سرمایه‌گذاری بهینه اتخاذ شده است. در [۱۲]، این کار با روش بهینه‌سازی گروهی ذرات^۹ (PSO) انجام شده است.

در این مقاله، سرمایه‌گذاری در تولید و بهره‌برداری به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی مطرح شده است. در سطح بالاتر، GENCO موردنظر به دنبال بیشینه کردن سود حاصل از سرمایه‌گذاری و تولید خود بوده و سطح پایین‌تر ناظر بر تسویه بازار حوضچه^{۱۰} از سوی ISO است. مدل ارائه‌شده در مقاله حاضر، هم رقابت مقداری و هم رقابت قیمتی تولیدکنندگان موجود در بازار را در نظر می‌گیرد. همچنین، مقایسه‌ای از تأثیرات رویکردهای استراتژیک و غیراستراتژیک بر روی نتایج سرمایه‌گذاری و نیز خروجی‌های بازار را ارائه می‌دهد.

هدف از این مقاله، ارائه مدلی است که GENCO موردنظر با استفاده از آن و بر اساس رفتار استراتژیک و یا غیراستراتژیک خود بتواند از میان گزینه‌های سرمایه‌گذاری با فن‌آوری‌ها و ظرفیت‌های مختلف، سودمندترین گزینه را انتخاب نماید. همچنین، مدل ارائه‌شده، راهبرد استراتژیک پیشنهاد قیمت بهینه برای GENCO مورد نظر را مشخص می‌کند. در بخش دوم این مقاله، مدل مسئله معرفی می‌شود. در بخش سوم، روابط ریاضی و فرمول‌بندی ارائه شده است. سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم بیان می‌شود. در بخش پنجم، نتیجه‌گیری کار بیان شده است.

۲. توصیف مدل

تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری در تولید GENCO موردنظر توسط یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود. مسئله سطح بالاتر با هدف

⁶ Conjectural variations

⁷ hybrid modified game theory

⁸ Independent System Operator

⁹ Particle Swarm Optimization

¹⁰ Pool market

¹¹ Production-offer blocks

¹² Demand-bid blocks

اختلاف بین مجموع دریافتی تمامی GENCOهای موجود در بازار (با در نظر گرفتن قیمت‌های پیشنهادی آن‌ها) و مقادیر پرداختی بارهای موجود در شبکه (با در نظر گرفتن قیمت‌های پیشنهادی آن‌ها) بیان شده است. مجموعه متغیرهای اصلی بهینه‌سازی در مسائل سطح پایین‌تر (\mathcal{E}_t^{Primal}) شامل P_{tfo}^S , P_{tro}^R , P_{tao}^{ES} و P_{tdb}^D می‌باشند. حل مجموعه مسائل سطح پایین‌تر با توجه به قیود (۱۰) - (۶) حاصل می‌گردد.

$$\sum_d \sum_b P_{tdb}^D - \sum_f \sum_o P_{tfo}^S - \sum_a \sum_o P_{tao}^{ES} - \sum_r \sum_o P_{tro}^R = 0 : \lambda_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq P_{tfo}^S \leq Y_{fo} : \mu_{tfo}^{Smin}, \mu_{tfo}^{Smax} \quad \forall t, \forall f, \forall o \quad (7)$$

$$0 \leq P_{tao}^{ES} \leq P_{ao}^{ESmax} : \mu_{tao}^{ESmin}, \mu_{tao}^{ESmax} \quad \forall t, \forall a, \forall o \quad (8)$$

$$0 \leq P_{tro}^R \leq P_{ro}^{Rmax} : \mu_{tro}^{Rmin}, \mu_{tro}^{Rmax} \quad \forall t, \forall r, \forall o \quad (9)$$

$$0 \leq P_{tdb}^D \leq P_{tdb}^{Dmax} : \mu_{tdb}^{Dmin}, \mu_{tdb}^{Dmax} \quad \forall t, \forall d, \forall b \quad (10)$$

رابطه (۶)، بیان‌کننده تعادل بار در هر بلوک بار است، اما الزاماً به مفهوم تأمین کل بار موجود در شبکه نیست. روابط (۷) - (۹)، به ترتیب بیان‌کننده محدوده‌های ظرفیت تولید واحدهای جدید GENCO موردنظر، واحدهای موجود GENCO موردنظر و واحدهای متعلق به GENCOهای رقیب در بلوک‌های بار و بلوک‌های تولید-پیشنهاد مختلف هستند. رابطه (۱۰)، توان مصرفی توسط هر بار در هر بلوک بار و هر بلوک مصرف-پیشنهاد را محدود می‌کند. متغیرهای دوگان بهینه‌سازی در مسائل سطح پایین‌تر شامل μ_{tdb}^{Dmin} , μ_{tro}^{Rmax} , μ_{tro}^{Rmin} , μ_{tao}^{ESmax} , μ_{tao}^{ESmin} , μ_{tfo}^{Smax} , μ_{tfo}^{Smin} و λ_t می‌باشند.

از آنجا که مجموعه مسائل سطح پایین‌تر به‌عنوان قیدی برای مسئله سطح بالاتر است، مجموعه متغیرهای اصلی و دوگان در مسائل سطح پایین‌تر، در مجموعه متغیرهای مسئله سطح بالاتر نیز قرار دارند؛ بنابراین، مجموعه متغیرهای اصلی مسئله سطح بالاتر (\mathcal{E}^{UL})، شامل مجموعه متغیرهای اصلی و دوگان در مسائل سطح پایین‌تر، γ_{tfo}^S , γ_{tao}^{ES} و u_{fc} است.

GENCO موردنظر، بر اساس تصمیم‌های سرمایه‌گذاری استراتژیک (Y_f) و تصمیم‌های پیشنهاد قیمت استراتژیک (γ_{tfo}^S و γ_{tao}^{ES}) خود که در مسئله سطح بالاتر اتخاذ می‌نماید، رفتاری استراتژیک را از خود نشان می‌دهد. بر اساس این تصمیم‌های او، خروجی‌های بازار شامل قیمت‌های تسویه بازار و مقادیر تولید تغییر می‌کنند. متغیرهای γ_{tfo}^S و γ_{tao}^{ES} در مسئله سطح بالاتر، به‌عنوان پارامترهایی در مسائل سطح پایین‌تر می‌باشند. زیرا، تمامی پیشنهادهای قیمت و مقدار GENCOها و بارها را دریافت

بیشترین مفهوم و کاربرد را دارد که بیان‌کننده قیمت تسویه بازار در هر بلوک بار است.

$$\begin{aligned} \max_{\mathcal{E}^{UL}} \left(\sum_t \sigma_t \left[\left(\sum_f \sum_o P_{tfo}^S \lambda_t \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_f \sum_o P_{tfo}^S C_{fo}^S \right) \right. \\ \left. + \left(\sum_a \sum_o P_{tao}^{ES} \lambda_t \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_a \sum_o P_{tao}^{ES} C_{ao}^{ES} \right) \right] \\ \left. - \sum_f C_f Y_f \right) \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه (۱)، نشان‌دهنده تابع هدف مسئله سطح بالاتر است که به‌صورت بیشینه‌سازی درآمد ناشی از تولید و فروش برق در بازار منهای هزینه سرمایه‌گذاری بیان شده است. تابع هدف (۱)، با توجه به قیود (۵) - (۲) حل می‌شود:

$$Y_f = \sum_c u_{fc} Y_{fc} \quad \forall f \quad (2)$$

$$\sum_c u_{fc} = 1 \quad \forall f \quad (3)$$

$$u_{fc} \in \{0,1\} \quad \forall f, \forall c \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{tfo}^S, P_{tao}^{ES}, \lambda_t \in \arg \min_{\mathcal{E}_t^{Primal}} \sum_f \sum_o \gamma_{tfo}^S P_{tfo}^S \\ + \sum_a \sum_o \gamma_{tao}^{ES} P_{tao}^{ES} \\ + \sum_r \sum_o C_{tro}^R P_{tro}^R \\ - \sum_d \sum_b B_{tdb}^D P_{tdb}^D \quad \forall t \end{aligned} \quad (5)$$

روابط (۲) - (۴) این امکان را به GENCO موردنظر می‌دهند تا از میان ظرفیت‌های سرمایه‌گذاری موجود با فن‌آوری‌های مختلف (شامل فن‌آوری‌های تأمین بار پایه، تأمین بار میانی و تأمین بار پیک)، سودمندترین گزینه‌ها را برگزینند. رابطه (۲)، تعیین‌کننده ظرفیت سرمایه‌گذاری انتخاب‌شده برای فن‌آوری f است. روابط (۳) و (۴)، نشان‌دهنده محدودیت در تعداد واحدهای جدید انتخابی از هر فن‌آوری نامزد می‌باشند. رابطه (۵)، بیان‌کننده تسویه بازار حوضچه با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی در سال هدف به ازای هر بلوک بار است. مجموعه مسائل سطح پایین‌تر به‌صورت کمینه‌سازی

$$\begin{aligned}
& \sum_f \sum_o P_{tfo}^S \lambda_t + \sum_a \sum_o P_{tao}^{ES} \lambda_t \\
& = - \sum_r \sum_o C_{tro}^R P_{tro}^R \\
& + \sum_d \sum_b B_{tdb}^D P_{tdb}^D \\
& - \sum_d \sum_b \mu_{tro}^{Rmax} P_{ro}^{Rmax} \\
& + \sum_r \sum_b \mu_{tdb}^{Dmax} P_{tdb}^{Dmax}
\end{aligned} \quad (27)$$

$$a \geq 0, b \geq 0, a \leq \psi M, b \leq (1 - \psi)M \quad (28)$$

که ψ یک متغیر باینری و M یک ثابت به‌اندازه کافی بزرگ است.

۴. مطالعه موردی

این بخش، نتایج مربوط به یک مطالعه عددی را بر اساس شبکه آزمون ۲۴ شینه IEEE [۱۴] ارائه می‌دهد. هدف این بخش، نشان دادن قابلیت مدل ارائه‌شده در کمک به یک GENCO به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های بهینه جهت سرمایه‌گذاری در تولید و بهره‌برداری و نیز تحلیل اثر رفتار استراتژیک و غیراستراتژیک GENCO موردنظر بر روی تصمیم‌های وی در حوزه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و خروجی‌های بازار 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 به کمک یک ضریب وزنی نشان داده شده است. این ضریب برای بلوک‌های بار مختلف به ترتیب برابر با حاصل‌ضرب (۸۷۶۰/۷) در مقادیر ۰/۵، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۵ می‌باشد. حداکثر مقادیر پیشنهادی بارهای موجود در بلوک بار اول مشابه آنچه در [۱۴] بیان شده است و با ضریب ۱/۲ می‌باشند. حداکثر مقادیر پیشنهادی بارهای موجود در بلوک‌های بار دوم تا هفتم، برابر با مقدار موجود در بلوک بار اول با ضرایب ۰/۷۵، ۰/۶۵، ۰/۶۰، ۰/۵۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۰ می‌باشند. قیمت‌های پیشنهادی بارها در بلوک بار اول، مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱: قیمت‌های پیشنهادی بارها در بلوک بار اول

بلوک مصرف-پیشنهاد	بلوک مصرف-پیشنهاد	دوم (€/MWh)	اول (€/MWh)
۳۳	۳۵	۱۲-۱۱	بارهای موجود در شین‌های ۱۲-۱۱
۳۶	۳۸	۲۴-۱۴	بارهای موجود در شین‌های ۲۴-۱۴ به جز شین‌های ۱۵ و ۱۸
۳۸	۴۰	۱۳، ۱۵ و ۱۸	بارها در شین‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۸

نموده و بر اساس آن‌ها بازار را تسویه می‌نماید. این امر باعث می‌شود که مسائل سطح پایین‌تر خطی باشند. به‌منظور تبدیل مدل دوسطحی (۱۰)-(۱) به یک مدل تک‌سطحی MPEC، مسائل سطح پایین‌تر با شرایط بهینگی مرتبه اول (کاروش-کان-تاکر) [۱۳] آن‌ها جایگزین شده و MPEC تک‌سطحی غیرخطی (۲۶)-(۱۱) حاصل می‌شود.

$$(1) \quad (11)$$

مقید به:

$$(2) - (4) \quad (12)$$

$$\gamma_{tfo}^S - \lambda_t + \mu_{tfo}^{Smax} - \mu_{tfo}^{Smin} = 0 \quad \forall t, \forall f, \forall o \quad (13)$$

$$\gamma_{tao}^{ES} - \lambda_t + \mu_{tao}^{ESmax} - \mu_{tao}^{ESmin} = 0 \quad \forall t, \forall a, \forall o \quad (14)$$

$$C_{tro}^R - \lambda_t + \mu_{tro}^{Rmax} - \mu_{tro}^{Rmin} = 0 \quad \forall t, \forall r, \forall o \quad (15)$$

$$-B_{tdb}^D + \lambda_t + \mu_{tdb}^{Dmax} - \mu_{tdb}^{Dmin} = 0 \quad \forall t, \forall d, \forall b \quad (16)$$

$$\sum_d \sum_b P_{tdb}^D - \sum_f \sum_o P_{tfo}^S - \sum_a \sum_o P_{tao}^{ES} - \sum_r \sum_o P_{tro}^R = 0 \quad \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{tfo}^S \pm \mu_{tfo}^{Smin} \leq 0 \quad \forall t, \forall f, \forall o \quad (18)$$

$$0 \leq P_{tao}^{ES} \pm \mu_{tao}^{ESmin} \leq 0 \quad \forall t, \forall a, \forall o \quad (19)$$

$$0 \leq P_{tro}^R \pm \mu_{tro}^{Rmin} \leq 0 \quad \forall t, \forall r, \forall o \quad (20)$$

$$0 \leq P_{tdb}^D \pm \mu_{tdb}^{Dmin} \leq 0 \quad \forall t, \forall d, \forall b \quad (21)$$

$$0 \leq \left(\frac{1}{2} Y_f - P_{tfo}^S \right) \pm \mu_{tfo}^{Smax} \leq 0 \quad \forall t, \forall f, \forall o \quad (22)$$

$$0 \leq (P_{tao}^{ESmax} - P_{tao}^{ES}) \pm \mu_{tao}^{ESmax} \leq 0 \quad \forall t, \forall a, \forall o \quad (23)$$

$$0 \leq (P_{tro}^{Rmax} - P_{tro}^R) \pm \mu_{tro}^{Rmax} \leq 0 \quad \forall t, \forall r, \forall o \quad (24)$$

$$0 \leq (P_{tdb}^{Dmax} - P_{tdb}^D) \pm \mu_{tdb}^{Dmax} \leq 0 \quad \forall t, \forall d, \forall b \quad (25)$$

$$\lambda_t: free \quad \forall t \quad (26)$$

دو بخش غیرخطی در مسئله MPEC (۲۶)-(۱۱) وجود دارند که به‌صورت زیر خطی‌سازی می‌شوند:

الف) بخش غیرخطی موجود در تابع هدف که به‌منظور خطی‌سازی آن از نظریه دوگان تقویت‌شده^{۱۳} استفاده می‌شود [۱۳]. معادل خطی مربوط به این بخش غیرخطی به‌صورت (۲۷) است.

ب) قیود مکمل موجود در مسئله MPEC که به‌منظور خطی‌سازی این قیود از روش فورتونی-آمات^{۱۴} [۱۳] استفاده می‌شود. بر اساس این روش، اگر a و b دو متغیر باشند، قید مکمل به‌صورت $0 \leq a \perp b \leq 0$ با مجموعه قیود خطی (۲۸) قابل جایگزینی است.

¹³ Strong duality theorem

¹⁴ Fortuny-Amat

در این حالت، تصمیم‌های سرمایه‌گذاری GENCO موردنظر (Y_f) از آن‌جهت که دربرگیرنده فن‌آوری‌ها و ظرفیت‌های متنوع است، به صورت استراتژیک می‌باشند؛ اما این GENCO از نظر پیشنهاددهی قیمت رفتاری غیراستراتژیک را از خود نشان می‌دهد، به این صورت که پیشنهادهای قیمت خود را برابر با هزینه تولید ارائه می‌دهد. به این منظور، باید در (۵) متغیرهای پیشنهاددهی استراتژیک γ_{tfo}^S و γ_{tfo}^{ES} به ترتیب با پارامترهای هزینه C_{fo}^S و C_{ao}^{ES} جایگزین شوند. نتایج سرمایه‌گذاری مربوط به این حالت در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳: نتایج سرمایه‌گذاری در حالت تصمیم‌های سرمایه‌گذاری استراتژیک و پیشنهاددهی غیراستراتژیک

فن‌آوری پایه (MW)	-
فن‌آوری میانی (MW)	-
فن‌آوری اوج (MW)	۲۰۰
کل ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)	۲۰۰
هزینه سرمایه‌گذاری (M€)	۳/۰۰
سود حاصل از بهره‌برداری (M€)	۸۱/۳۲
سود (M€)	۷۸/۳۲

۴, ۲, ۲. تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی استراتژیک

در این حالت، GENCO موردنظر هم از نظر تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و هم پیشنهاددهی قیمت، رفتاری استراتژیک را از خود نشان می‌دهد، به این صورت که تصمیم‌های سرمایه‌گذاری GENCO موردنظر (Y_f) دربرگیرنده فن‌آوری‌ها و ظرفیت‌های مختلف است و نیز، در (۵)، قیمت‌های پیشنهادی به صورت متغیرهای استراتژیک γ_{tfo}^S و γ_{tfo}^{ES} در نظر گرفته شده‌اند. نتایج سرمایه‌گذاری مربوط به این حالت در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴: نتایج سرمایه‌گذاری در حالت تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و پیشنهاددهی استراتژیک

فن‌آوری پایه (MW)	۳۰۰
فن‌آوری میانی (MW)	-
فن‌آوری اوج (MW)	۸۰۰
کل ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)	۱۱۰۰
هزینه سرمایه‌گذاری (M€)	۳۴/۵
سود حاصل از بهره‌برداری (M€)	۱۴۳/۵۴
سود (M€)	۱۰۹/۰۴

در این حالت، ظرفیت بهینه سرمایه‌گذاری و مقدار سود نسبت به حالتی که پیشنهاددهی قیمت به صورت غیراستراتژیک انجام می‌شود، بیشتر است. دلیل این موضوع، آن است که پیشنهاددهی استراتژیک از سوی GENCO

در بلوک‌های بار دوم تا هفتم، قیمت‌های پیشنهادی بیان شده در جدول ۱ به ترتیب در مقادیر ۰/۹۵، ۰/۹۰، ۰/۸۵، ۰/۸۰، ۰/۷۵ و ۰/۷۰ ضرب می‌شوند. هر بار خود دارای دو بلوک مصرف-پیشنهاد است که ۷۵ درصد میزان بار پیشنهادی متعلق به بلوک مصرف-پیشنهاد اول و ۲۵ درصد آن نیز متعلق به بلوک مصرف-پیشنهاد دوم است (البته، در مدل ارائه شده هیچ‌گونه محدودیتی در خصوص تعداد بلوک‌های تولید-پیشنهاد و مصرف-پیشنهاد وجود ندارد). اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی موجود متعلق به GENCO موردنظر و GENCOهای رقیب، مطابق [۱۵] در نظر گرفته شده‌اند. مدل ارائه شده، به گونه‌ای است که می‌تواند تنوع وسیعی از فن‌آوری‌های مختلف واحدهای تولیدی جدید را برای سرمایه‌گذاری در نظر بگیرد. اطلاعات مربوط به واحدهای نامزد برای سرمایه‌گذاری در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به واحدهای نامزد برای سرمایه‌گذاری

فن‌آوری پایه	فن‌آوری میانی	فن‌آوری اوج
۷۵۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۵۰۰۰
هزینه سرمایه‌گذاری سالانه C_f (€/MW)		
ظرفیت سرمایه‌گذاری در دسترس Y_{fc} [MW]		
۲۰۰:۵۰:۱۰۰۰		
۶/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۵۰
هزینه تولید در بلوک تولید-پیشنهاد اول (€/MWh)		
۶/۳۰	۱۰/۵۰	۱۵/۲۰
هزینه تولید در بلوک تولید-پیشنهاد دوم (€/MWh)		

مطابق جدول ۲، فن‌آوری پایه دارای هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر و هزینه جاری تولید پایین‌تر، فن‌آوری اوج دارای هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر و هزینه جاری تولید بالاتر و فن‌آوری میانی نیز دارای هزینه‌هایی مابین هزینه‌های دو فن‌آوری پایه و اوج است. 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.

۴, ۲. حل مسئله

مسئله نهایی بیان شده در این مقاله، یک MILP بوده و برای حل آن از CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS [۱۶] و بر اساس اطلاعات ارائه شده در بخش ۱,۴ و در دو وضعیت رفتار استراتژیک و غیراستراتژیک GENCO موردنظر استفاده شده است.

۴, ۲, ۱. تصمیم‌های سرمایه‌گذاری استراتژیک و پیشنهاددهی غیراستراتژیک

(۴) مدل ارائه‌شده، قابلیت تعیین بهینه راهبرد ارائه پیشنهادها را قیمت استراتژیک برای یک GENCO، به‌منظور دستیابی به سود بالاتر را دارد.

(۵) در صورتی که شرایط حاکم بر فضای تجدید ساختاریافته به‌گونه‌ای باشد که امکان رفتار استراتژیک GENCOها در آن میسر باشد، یک GENCO می‌تواند با استفاده از مدل ارائه‌شده در مقاله حاضر و اتخاذ تصمیم‌های استراتژیک، به سود بیشتری دست یابد.

منابع

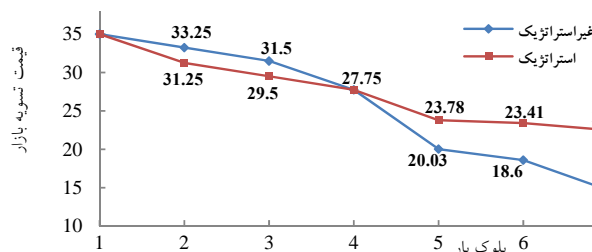
- [1] A. Botterud, M. D. Ilic, and I. Wangenstein, "Optimal investments in power generation under centralized and decentralized decision making," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 254–263, 2005.
- [2] A. S. Chuang, F. Wu, and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons," *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 885–891, 2001.
- [3] P. Kaymaz, J. Valenzuela, and C. S. Park, "Transmission Congestion and Competition on Power Generation Expansion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 156–163, 2007.
- [4] M. Ventosa, R. Denis, and C. Redondo, "Expansion planning in electricity markets. Two different approaches," In *Proceedings of the 14th Power System Computation Conference (PSCC)*, Sevilla, Spain, Jun. 2002.
- [5] J. Wang, M. Shahidepour, 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.
- [6] Y. Fukuyama, "A parallel genetic algorithm for generation expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 955–961, 1996.
- [7] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1790–1797, 2009.
- [8] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "NSGA-II algorithm for multi-objective generation expansion planning problem," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 4, pp. 622–628, 2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Reliability System Task Force. The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. IEEE Transactions on Power Systems, 14(3):1010–1020, Aug. 1999.
- [15] S. Jalal Kazempour, "Strategic Generation Investment and Equilibria in Oligopolistic Electricity markets," The University of Castilla-La Mancha for the Degree of PhD, 2014.
- [16] GAMS/CPLEX Solver Manual, 2013. URL: <http://www.gams.com/>.

موردنظر باعث می‌شود که قیمت‌های تسویه بازار در بلوک‌های بار مختلف نسبت به حالت پیشنهاددهی غیراستراتژیک با شیب کمتری کاهش یابد. مقادیر بهینه قیمت‌های پیشنهادی استراتژیک GENCO موردنظر در خصوص واحدهای جدید ۳۰۰ و ۸۰۰ مگاواتی در بلوک‌های تولید-پیشنهاد اول و دوم و بلوک‌های بار اول تا هفتم به ترتیب برابر با ۳۵، ۳۱/۲۵، ۲۹/۵، ۲۷/۷۵، ۲۳/۷۸، ۲۳/۴۱ و ۲۲/۵ یورو بر مگاوات-ساعت حاصل شده‌اند.

۴، ۲، ۳. مقایسه نموداری قیمت‌های تسویه بازار در دو حالت

پیشنهاددهی استراتژیک و غیراستراتژیک

قیمت‌های تسویه بازار (λ_t) در حالتی که GENCO، پیشنهادهای قیمت استراتژیک را ارائه می‌نماید نسبت به حالت غیراستراتژیک، به‌طور کلی با شیب کمتری کاهش می‌یابند. این موضوع، در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: قیمت‌های تسویه بازار در حالات استراتژیک و غیراستراتژیک

۵. نتیجه‌گیری

مشاهده شد که بر اساس مدل ارائه شده در این مقاله، یک GENCO می‌تواند تصمیم‌هایی بهینه در زمینه سرمایه‌گذاری در احداث واحد نیروگاهی جدید در فضای بازار برق اتخاذ نماید. مدل ارائه‌شده و شبیه‌سازی صورت گرفته نشان می‌دهند که:

- (۱) ارتباط بین حوزه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری (تسویه بازار) به‌صورت مناسب از طریق یک مدل دوسطحی بیان شده است و رویکردهای استراتژیک و غیراستراتژیک GENCO موردنظر در قالب رقابت مقداری و قیمتی در نظر گرفته شده‌اند.
- (۲) در حالتی که GENCO موردنظر به‌صورت استراتژیک رفتار می‌کند، سرمایه‌گذاری بهینه با ظرفیت بالاتر و مقدار سود بیشتر همراه است.
- (۳) دامنه تغییرات قیمت‌های تسویه بازار در بلوک‌های بار مختلف در حالتی که GENCO موردنظر پیشنهادهای قیمت استراتژیک را ارائه می‌نماید، نسبت به حالت غیراستراتژیک، کمتر است.