برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت کارلو در فضای نظریه بازی‌ها با اطلاعات ناقص

علیرضا شیخی فینی[۱] محسن پارسا مقدم[۲] محمد کاظم شیخ‌الاسلامی[۳]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
arshf2@ieee.org
۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
parsa@modares.ac.ir
۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
aleslam@modares.ac.ir

چکیده: این مقاله روشی را بر مبنای نظریه بازی پویا با اطلاعات ناقص برای برنامه‌ریزی توسعه تولید منابع انرژی گسترده از دیدگاه سرمایه‌گذار ارایه می‌دهد. چارچوب ابتکاری ارایه شده در مقاله، جنبه‌ها و ویژگی‌های مختلف برنامه‌ریزی این منابع را دربر می‌گیرد. در این مطالعه منابع بادی، گازی و منابع تولید همزمان برق و گرما به عنوان منابع انرژی گسترده در نظر گرفته شده‌اند. برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری، حمایت‌هایی برای منابع بادی و تولید همزمان برق و گرما در نظر گرفته شده است. همچنین عدم قطعیت استراتژیک رفتار رقبا به عنوان یکی از مهمترین عدم‌قطعیت‌های موجود در بازار با استفاده از نظریه بازی با اطلاعات ناقص مدل شده است. با استفاده از مدل ارایه شده، رفتار پویای سرمایه‌گذاران منابع انرژی گسترده و اثرات مداخلات سیاستگذار بر توسعه آنها تجزیه و تحلیل شده است. این مدل از قابلیت نشان دادن اثر متقابل سیاستهای حمایتی بر نرخ نفوذ سایر منابع به صورت مدل کردن حمایت از چند منبع به‌طور همزمان برخوردار است .

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه، حمایت چند منبعی، منابع انرژی گسترده، نظریه بازی با اطلاعات ناقص.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۸/۲۷
تاریخ قبول مشروط: ۱۳۹۲/۲/۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۳۰
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محسن پارسا مقدم
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – بزرگراه جلال آل احمد– پل نصر– دانشگاه تربیت مدرس – دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

۱- مقدمه

توافقات بین‌المللی جهت کاهش آلودگی از یکسو و کاهش منابع سوخت فسیلی، لزوم بهبود قابلیت اطمینان سیستم، کاهش تلفات و به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه از سوی دیگر سبب شده است توجه ویژه‌ای به منابع انرژی گسترده[1] شود. منابع انرژی گسترده، منابع تولید با ظرفیت پایین می‌باشند که در نزدیکی مراکز بار قرار می‌گیرند و بازه وسیعی از فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی، تجدید پذیر، تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌های مدیریت سمت مصرف را دربرمی گیرند [۱]- [۳]. از آنجا که اغلب کشورها در برنامه توسعه خود نرخ نفوذ انتظاری این منابع را تعیین کرده‌اند، یکی از دغدغه‌های سیاستگذاران سیستم قدرت این است که راهکار دستیابی به نرخ نفوذ و نحوه توسعه آن را برنامه‌ریزی نمایند. از طرفی به دلیل اینکه محیط بازار برق یک محیط رقابتی است و بخش خصوصی سرمایه‌گذاری روی منابع را به عهده دارد، سیاستگذار باید به گونه‌ای سیاستها را تنظیم کند تا سرمایه‌گذاران انگیزه لازم را برای سرمایه‌گذاری کافی بر روی هر یک از منابع داشته باشند.

یکی از مسائل مهمی که در برنامه‌ریزی منابع انرژی گسترده باید به آن توجه شود، عدم قطعیت‌های موجود در بازار برق است. در بازار برق، سرمایه‌گذاران علیرغم وجود ریسک، به دنبال بیشینه کردن سود خود هستند. در مساله توسعه منابع انرژی، رقبا از راهبرد یکدیگر اطلاعی ندارند که این یکی از عدم‌قطعیت‌های موجود در بازار برق است و به آن عدم قطعیت راهبردی اطلاق می‌شود. روش نظریه بازی[2] یکی از بهترین روش‌ها برای مدلسازی رقابت غیرهمکارانه پویای[3] بازیگران در محیط بازار برق یا همان عدم‌قطعیت راهبردی است.

مدل‌های اولیه توسعه تولید در محیط رقابتی در مرجع [۴] ارایه شده است. این مدل یک بازی کارنو برای تعیین قیمت برق و میزان توسعه تولید برای بازار کالیفرنیا را شبیه‌سازی نمود. در این مدل، بازی کارنو به صورت خیلی ساده در نظر گرفته شده و فرض شده است هر تولیدکننده اطلاعات کامل رفتار تولیدکنندگان دیگر را در اختیار دارد. در مرجع [۵] یک مدل کارنو که در آن تصمیم‌گیری به صورت همزمان توسط تولیدکنندگان صورت می‌گیرد، ارایه شد. در این مقاله، مساله در قالب تعادل نش دو مرحله‌ای حل شده است که در مرحله اول سرمایه‌گذاری صورت می‌گیرد و در مرحله دوم بهره‌برداری مدل می‌شود. مرجع [۶] از نظریه بازی و الگوریتمی که ریسک سود بازیگران را مدل می‌کند، برای مساله توسعه تولید استفاده کرده است. در زمینه مدلسازی مساله توسعه تولید با استفاده از نظریه بازی مطالعات مختلفی در سالهای اخیر انجام شده است [۷]. همچنین مرجع [۸] ادعا کرده است که مساله توسعه تولید و مساله توسعه منابع انرژی گسترده را به طور همزمان و با استفاده از نظریه بازی حل نموده است.

در اغلب کارهایی که در زمینه توسعه منابع انرژی تا کنون انجام شده است، مساله به صورت بازی با اطلاعات کامل مدلسازی شده است.

در مرجع [۹] مدل مبتنی بر تئوری بازی بر اساس مدل بازی با اطلاعات کامل ارایه شده است. در عمل، برنامه‌ریزی توسعه تولید به شکل قیمت پیشنهاد شده در حراج است که شرکت‌های تولیدی[4] اطلاعات ناقصی از برنامه‌ریزی سایر شرکت‌ها دارند [۱۰]. این ویژگی سبب می‌شود که این برنامه‌ریزی از سایر مدل های بازی با اطلاعات کامل متفاوت باشد.

از آنجا که مساله بهره‌برداری در لایه داخلی مساله توسعه تولید انجام می‌شود، در مرحله قیمت‌دهی نیز تئوری بازی کاربرد دارد. تحقیقات گسترده ای در تجزیه و تحلیل راهبردهای قیمت‌دهی در بازارهای انرژی ارائه شده است. ائتلاف و تبانی‌های شرکت کنندگان در بازارهای برق با یک رویکرد بازی تعاونی در مراجع [۱۱]، [۱۲] [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۴] رویکرد بازی‌های غیر همکارانه با اطلاعات ناقص برای مدل استراتژی قیمت‌دهی بهینه شرکت‌های تولیدی به عنوان مجموعه‌ای از قیمت‌گذاری گسسته استفاده شده است. در مرجع [۱۵] بازی با اطلاعات ناقص با قیود انتقال مورد مطالعه قرار گرفته است. هر شرکت‌تولیدی قیمت‌دهی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که با توجه به اطلاعات و تخمین‌هایی که از سایر رقبا دارد، تابع بهره‌وری[5] خود را بیشینه نماید. مرجع [۱۶] از بازی با اطلاعات ناقص برای مساله توسعه تولید استفاده کرده است. در این مقاله، هر شرکت‌تولیدی بر اساس تخمینی که از راهبرد توسعه رقبا دارد، برای توسعه تولید خود تصمیم‌گیری می کند. مرجع [۱۷] نظریه بازی را برای مطالعه اثرات مداخلات سیاستگذار روی پویایی سرمایه‌گذاری در بازار برق ارائه داده است. مرجع [۱۸] با استفاده از نظریه بازی سیاستهای حمایتی تک منبعی را برای افزایش نرخ نفوذ منابع بادی بررسی کرده است.

در مطالعاتی که برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر صورت گرفته است، حمایتهای در نظر گرفته شده به صورت تک منبعی بوده است، یعنی تاثیر مداخلات سیاستگذار فقط به ازای حمایت از یک منبع مطالعه شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

در این مقاله تاثیر مداخلات سیاستگذار بر روی دینامیک رفتار سرمایه‌گذاران در برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده بررسی شده است. از آنجا که سیاستهای حمایتی چند منبعی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، تاثیر متقابلی که این حمایتها بر نرخ نفوذ و توسعه منابع دیگر می‌گذارند، نیز بررسی شده است. چارچوب ارایه شده این امکان را فراهم می‌آورد که برای هر نوع منبع با هر مشخصه و هر نوع سیاست حمایتی، تجزیه و تحلیل کاملی صورت پذیرد. بدیهی است که این نوع تجزیه و تحلیل از یک سو برای سیاست‌گذاران سودمند است چرا که می‌توانند پیش از اتخاذ سیاست‌های حمایتی، اثرات احتمالی آن را بر توسعه منابع گسترده بررسی کنند و از سوی دیگر برای سرمایه‌گذارانی که قصد سرمایه‌گذاری در این حوزه را دارند نیز ابزاری مطمئن فراهم می‌آورد.

یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله در نظر گرفتن مسئله نظریه بازی با اطلاعات ناقص جهت برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده با در نظر گرفتن تاثیر متقابل سیاست‌های حمایتی است. در بازی با اطلاعات ناقص، رقبا از راهبرد اطلاعات یکدیگر آگاهی ندارند و هر یک تنها از اطلاعات اقتصادی و فنی خود باخبرند. این شرایط باعث می‌شود که نتوانند قیمت را به درستی تخمین بزنند و در نتیجه عدم‌قطعیت مربوط به شرکت آن‌ها در محیط رقابتی افزایش یابد. در این مقاله، این مساله به دو لایه تقسیم شده است؛ لایه بیرونی که عدم قطعیت مربوط به اطلاعات رقبا را با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی می کند و لایه داخلی که عدم قطعیت استراتژیک بازیگران را با استفاده از روش نظریه بازی پویا مدلسازی می‌کند.در ادامه، ابتدا در بخش ۲ چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده ارایه شده است. در بخش ۳ منابع انرژی گسترده و خصوصیات آن‌ها توضیح داده شده است. حل مساله با استفاده از نظریه بازی با اطلاعات ناقص[۶] در بخش ۴ مدلسازی شده است. در بخش ۵ مدل‌سازی ریاضی مساله آورده شده است. بخش ۶ مربوط به مطالعات عددی است و در نهایت در بخش ۷ نتایج حاصل از تحقیق ارایه می‌گردد.

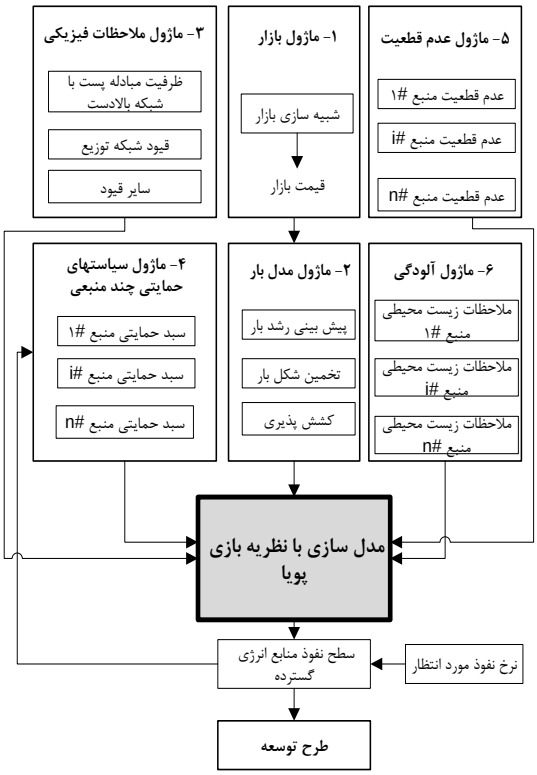
۲- چارچوب برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری منابع انرژی گسترده

در این بخش چارچوبی برای مساله برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری منابع انرژی گسترده از دیدگاه سرمایه‌گذار ارایه شده است. این چارچوب ماژولار در شکل (۱) نشان داده شده است و شامل ۶ بلوک می‌باشد. ایده طراحی ماژولار بر مبنای تنوع در ماهیت منابع انرژی گسترده شکل گرفته است. بنابراین چارچوب برنامه ریزی بسیار انعطاف پذیر بوده و با الگوریتم پیشنهادی، هر نوع منبع با هر ویژگی که داشته باشد قابل ورود به مساله برنامه‌ریزی خواهد بود.

بلوک‌های ۱ تا ۶ ورودیهای مساله بهینه‌سازی است. قیمت بازار به عنوان خروجی شبیه‌سازی بازار، ورودی ماژول "مدلسازی بار" و برنامه بهینه سازی است و برای اینکه سرمایه‌گذاران بتوانند برای سرمایه‌گذاری تصمیم درستی اتخاذ نمایند، باید سیگنال قیمت درستی را دریافت نمایند. بلوک ۲ نشاندهنده مدلسازی بار و بلوک ۳ بیانگر تمام قیودی است که در شبکه و بازار وجود دارد. بلوک ۴ شامل ماژول سیاستهای حمایتی چند منبعی سیاستگذار[۷] می‌باشد. از آنجا که برخی منابع از نظر اقتصادی ممکن است قابل رقابت با سایر منابع نباشند، بنابراین برای ترغیب به سرمایه‌گذاری بر روی این منابع بایستی مشوق‌هایی به این سرمایه‌گذاران داده شود. عدم‌قطعیت‌های موجود در مساله از جمله عدم قطعیت‌های تولید منابع، در بلوک ۵ آورده شده است. در بلوک ۶ ماژول آلودگی برای در نظر گرفتن جریمه (یا اعمال هر سیاست دیگری) به واحدهای آلاینده قرار داده شده است. از آنجا که هدف هر سرمایه‌گذار بیشینه کردن سود خود است، درآمد هر سرمایه‌گذار در طول دوره بهره‌برداری باید محاسبه گردد که خود نیازمند محاسبه قیمت برق در هر مرحله از برنامه ریزی پویا است. برای محاسبه قیمت برق، تحلیل نقطه تعادل صورت می‌گیرد و در آن از نظریه بازی برای مدل‌سازی رفتار استراتژیک بازیگران استفاده خواهد شد. در صورتی که نرخ نفوذ منبعی به میزان معینی که از پیش تعریف شده است، نرسد، بازخورد اصلاحی برای تغییر سیاست حمایتی تا آنجا ادامه داده می‌شود که هدف دستیابی شود. خروجی این چارچوب عبارتست از رفتار پویای سرمایه‌گذاران و میزان توسعه هر یک از منابع انرژی گسترده و میزان بهینه تشویقی اعطا شده به هر یک از سرمایه‌گذاران (در اینجا واحدهای بادی و منابع تولید همزمان برق و گرما).

چارچوب معرفی شده یک چارچوب جامع برای مساله توسعه منابع می‌باشد که تمام ماژول‌های مورد نظر در آن لحاظ شده است. لیکن در این مقاله به مباحث زیست محیطی پرداخته نشده است.

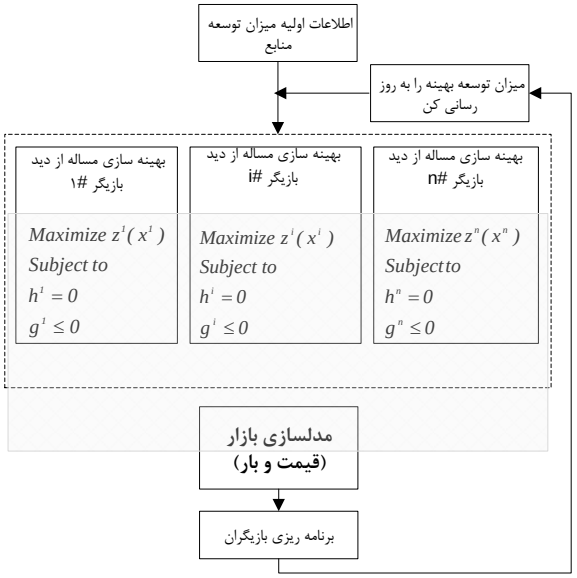
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]



شکل(۱): چارچوب ماژولار برای مساله توسعه منابع انرژی گسترده

۳- مدل بازی پویای کارنو برای مساله توسعه منابع انرژی گسترده

اغلب مدل‌هایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، برنامه‌ریزی ایستا بود که سبب افزایش ریسک سرمایه‌گذار می‌شود. در مدل‌های بازی ایستا[۸] که برای حل مساله توسعه منابع استفاده می‌شود، اطلاعات قبل از سال مورد مطالعه، در نظر گرفته نمی‌شود که سبب می‌گردد زمان درست سرمایه‌گذاری قابل تعیین نباشد. از طرفی عدم توجه به رفتار رقبا و سایر سرمایه‌گذاران، سبب افزایش ریسک و زیان سرمایه‌گذار خواهد شد. از آنجا که تصمیم گیران و سرمایه‌گذاران بنا به ماهیت بازار برق، از هزینه یا راهبردهای بازیگران رقیب بی‌اطلاع هستند، نظریه بازی می‌تواند به بازیگران برای تجزیه و تحلیل راهبردشان در برابر محتمل‌ترین راهبرد و هزینه رقیب‌شان کمک نماید [۱۹] . در بازی با اطلاعات ناقص، رفتار بازیگران بوسیله تابع توزیع احتمال مدل سازی می‌شود و این امکان را به بازیگر می‌دهد که راهبرد مناسبی را در مقابل رقبایش اتخاذ نماید. در این تحقیق از روش شناخته شده نش-کارنو برای مدلسازی رفتار بازار استفاده شده است. در این مدل، رقابت فقط روی مقدار انجام می‌شود؛ محصول قابل ذخیره سازی نیست، هیچ منبعی در هنگام اجرای بازی به مساله اضافه نمی‌شود و تصمیم‌گیری رقبا همزمان انجام می‌شود. با شروع بازی، هر بازیگر سطح تولید خود را به منظور بیشینه کردن سود خود انتخاب می‌نماید و فرض می‌کند که تولید سایر بازیگران تغییر نمی‌کند. در این مدل بازار، مساله بیشینه سازی سود باید برای تمام بازیگران به طور همزمان اجرا گردد. بازیگران استراتژیک بازار، هریک از تکنولوژیهای تولید می باشند. ساختار کلی مدل ارایه شده برای بازی پویا در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): چارچوب بازی پویا برای مساله توسعه منابع انرژی گسترده

مساله‌ای که در این مقاله به آن پرداخته شده است، برنامه‌ریزی بلند مدت توسعه منابع انرژی گسترده با در نظر گرفتن ویژگی های متفاوت منابع و سیاستهای حمایتی مختلف می‌باشد. تابع هدف مساله، بیشینه سازی سود بازیگران است. در اینجا چندین بازیگر وجود دارند که برای بیشینه کردن سود خود با هم رقابت می‌کنند. سود هر یک از این بازیگران در یک مرحله زمانی مشخص (t) شامل درآمد (حاصل از فروش برق و حاصل حمایت) منهای هزینه (ثابت و متغیر) است که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$Profit_j(t) = R_j(t) - C_j(t) = R(t) - FC_j(t) - VC_j(t) \quad (۱)$$

که در آن، R_j ، C_j ، FC_j و VC_j به ترتیب درآمد حاصل از فروش برق و کسب حمایت، هزینه کل، هزینه ثابت و هزینه متغیر jامین منبع می‌باشد. معادلات (۲) تا (۴) درآمد منابع انرژی از

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.12- No.1 Spring & Summer 2015

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

فروش برق و همچنین درآمد ناشی از حمایت‌ها را نشان می دهند.

$$R_G(t)=\sum_{i=1}^{nlb} PG(i,t)\cdot\pi(t) \qquad (۲)$$

$$R_W(t)=\sum_{i=1}^{nlb} Pr\,ob_W(i,t)\cdot PW(i,t)\cdot Sup_W(t) \qquad (۳)$$

$$R_{CHP}(t)=\sum_{i=1}^{nlb}(PChp(i,t)\cdot Sup_{chp}(t)\cdot Eff_{CHP}+ PChp(i,t)\cdot\pi_{heat}\cdot HTER) \qquad (٤)$$

که در آن nlb عبارتست از تعداد شین‌های بار. $\pi(t)$ قیمت برق و $PG(i,t)$، $PW(i,t)$ و $PChp(i,t)$ به ترتیب توان منابع گازی، بادی و تولید همزمان برق و گرما در شین i و زمان t است. $Sup_W(t)$ و $Sup_{chp}(t)$ عبارتست از تابع حمایت از منابع بادی و تولید همزمان برق و گرما. $Prob_w(i,t)$ تابع توزیع احتمال تولید منابع بادی در شین i و زمان t است. Eff_{CHP} بازده واحد تولید همزمان برق و گرما و $HTER$ نسبت انرژی گرمایی قابل تبدیل به انرژی الکتریسیته است. π_{heat} عبارتست از قیمت گرما.

از آنجا که هدف از به‌کارگیری منابع تولید همزمان برق و گرما، استفاده از توان الکتریکی آن می‌باشد، درآمد حاصل از فروش گرما نیز به الکتریسیته تبدیل شده است. از اینرو تابع درآمد آن به صورت رابطه (۴) نشان داده شده است. هزینه هر واحد منبع تولید پراکنده عبارتست از هزینه ثابت (سرمایه‌گذاری) به علاوه هزینه متغیر (بهره‌برداری) که با روابط (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

$$C_j = FC_j + VC_j \qquad (۵)$$

$$\widetilde{FC}_j=\sum_{i=1}^{nlb}\sigma_j\cdot P_{j,i} \qquad (٦)$$

$$VC_j(t)=\sum_{i=1}^{nlb}\alpha_j\cdot PG(i,t) \qquad (۷)$$

که در آن σ_j عبارتست از هزینه سرمایه‌گذاری یک واحد از منبع jام و α_j هزینه بهره‌برداری یک واحد از منبع jام. هزینه سرمایه گذاری (ثابت) به صورت هزینه سالانه در رابطه (۸) ارایه شده است.

$$FC_j=\frac{IntR\cdot\widetilde{FC}_j}{1-\frac{1}{1+(IntR)^{T_j}}} \qquad (۸)$$

$$j\in Technology\ (Gas\ engine\ or\ Wind)$$

که در آن، $IntR$ عبارتست از نرخ بهره.

فرض می‌شود مشترکین می‌توانند مصرف خود را با بازخورد قیمت تغییر دهند. رابطه (۹) نشان‌دهنده پاسخگویی مصرف برق به تغییرات بلندمدت قیمت است که به صورت سالانه اندازه‌گیری می‌شود.

$$\pi(t)=a-\frac{b}{2}d(t-1) \qquad (۹)$$

که در آن، d نشان‌دهنده مقدار بار سیستم است. ضرایب a و b احتمالاتی و دارای تابع توزیع نرمال می‌باشند. چنانچه از تلفات صرفنظر شود:

$$d(t)=\sum_{i=1}^{nlb}(PG(i,t)+PW(i,t)+PChp(i,t)) =\sum_{i=1}^{nlb}\sum_{j=1}^{Tech}P_j(i,t) \qquad (۱۰)$$

$$\pi(t)=a-\frac{b}{2}\sum_{i=1}^{nlb}\sum_{j=1}^{Tech}P_j(i,t) \qquad (۱۱)$$

که در آن $Tech$ عبارتست از تعداد تکنولوژی‌های تولید که با تعداد بازیگران برابر است. رابطه (۱۰) برابری تولید و بار را نشان می‌دهد که با جای‌گذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۰)، رابطه (۱۱) که نشان‌دهنده کشش‌پذیری[۹] قیمتی بار است به دست می‌آید. باید در نظر داشت که در اینجا از مدل پویای بازی برای حل مساله سرمایه‌گذاری استفاده شده است. از آنجا که در این مقاله، مساله توسعه منابع انرژی گسترده به صورت تک شینه مدلسازی شده است؛ بنابراین رابطه (۱۰) و (۱۱) به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) درخواهد آمد.

$$d(t)=\sum_{j=1}^{Tech}P_j(t) \qquad (۱۲)$$

$$\pi(t)=a-\frac{b}{2}\sum_{j=1}^{Tech}P_j(t) \qquad (۱۳)$$

با استفاده از توابع سود حاشیه‌ای رابطه (۱)، میزان سرمایه‌گذاری بهینه را می‌توان از صورت رابطه (۱۴) به دست آورد.

$$\frac{\partial Profit_j(t)}{\partial P_j(t)}=0 \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۵) مدل ریاضی بازی پویای کارنو را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

$$P_j(t+1)=P_j(t)+\gamma P_j(t)\frac{\partial Profit_j(t)}{\partial P_j(t)} \qquad (۱۵)$$

که در آن γ ضریب تسریع حل معادله است. تابع حمایت متغیر با قیمت برق در رابطه (۱۶) بیان شده است. همچنین روابط (۱۷) تا (۱۹) روابط مدل پویای مساله را نشان می‌دهند.

$$Sup_j(t)=s_{1j}+s_{2j}\cdot\pi(t) \qquad (۱۶)$$

$$P_1(t+1)=P_1(t)+\gamma P_1(t)\Big[a-\frac{b}{2}(2P_1(t)+P_2(t)+P_3(t))-\sigma_1-\alpha_1\Big] \qquad (۱۷)$$

$$P_2(t+1)=P_2(t)+\gamma P_2(t)\Big[Prob_W(t)\cdot\{s_{12}+a\cdot s_{22}-\frac{b}{2}s_{22}(P_1(t)+2P_2(t)+P_3(t))\}-\sigma_2-\alpha_2\cdot Prob_W(t)\Big] \qquad (۱۸)$$

$$P_3(t+1)=P_3(t)+\gamma P_3(t)\Big[s_{12}+a\cdot s_{23}-\frac{b}{2}s_{23}(P_1(t)+P_2(t)+2P_3(t))+\pi_{heat}\cdot HTER-\sigma_3-\alpha_3\Big] \qquad (۱۹)$$

در این مساله چند نوع سیاست حمایتی مختلف از جمله حمایت ثابت و حمایت متغیر با قیمت برق برای منابع انرژی گسترده در نظر گرفته شده است. در حالت حمایت ثابت، ضریب s_{2j} در رابطه (۱۶) صفر در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که در روابط فوق نشان داده شده است، تاثیر سیاست‌های حمایتی از یک منبع بر روی منابع دیگر و اثر متقابل آنها بر یکدیگر در این مدل لحاظ شده است. از روابط (۱۷) تا (۱۹) می‌توان دریافت که سودی که توسط هر سرمایه‌گذار کسب می‌شود نه تنها به راهبرد خودش بلکه به راهبرد رقبایش و همچنین به میزان حمایت از خودش و رقبایش نیز بستگی دارد. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای احتمالاتی در مسئله توسعه تولید منابع انرژی گسترده زیاد می‌باشد، تحلیل این مساله پیچیده است و اصولا به یکسری فرضیاتی برای ساده سازی توابع توزیع احتمالاتی نیاز است. در مرجع [۲۰] ، بازی با اطلاعات ناقص با حدس بعضی از مقادیر در ابتدای بازی، به صورت ساده‌تری مدل‌سازی شده است. این نوع نگاه سبب می‌گردد مساله بازی با اطلاعات ناقص به بازی با اطلاعات کامل تبدیل شود. بدین منظور در اینجا از روش نمونه برداری مونت کارلو برای تولید سناریوهای مختلف برای بازی با اطلاعات ناقص استفاده شده است. این روش به صورت خلاصه عبارتست از:

۱) ایجاد بازی با اطلاعات کامل با استفاده از مجموعه‌ای از تخمین‌ها برای سایر بازیگران؛
۲) حل تعادل نش برای هر بازی؛
۳) به‌روز کردن سیاستهای توسعه هر بازیگر؛
۴) تکرار فرآیند تا رسیدن به نقطه تعادل نهایی.

برای تحلیل تعادل نش بازار برق بر اساس بازی منطقی بازیگران بازار از مدل کارنو ایستا استفاده شده است. درصورتی که اطلاعات کامل وجود داشته باشد، هر بازیگر تصمیم می‌گیرد میزان بهینه تولید خود را انجام دهد که سبب می‌گردد بازار به سمت تعادل نش سوق یابد [۲۱]. لیکن در بازار برق واقعی، هر بازیگر فقط بخشی از اطلاعات بازار را در اختیار دارد. از اینرو این بازیگران، در هر دوره باید میزان تولید خود را بر اساس سیگنال سود حاشیه‌ای خود تصحیح نمایند. به عبارتی یک بازی کارنو را به صورت پویا انجام دهند [۲۲].

مدل پیشنهادی در این مقاله علاوه بر اینکه مورد استفاده سرمایه گذاران در این بخش است ابزار مناسبی برای رگولاتور سیستم در تدوین سیاستهای تنظیمی به شمار می رود.

۴- روش تخمین مونت کارلو[۱۰]

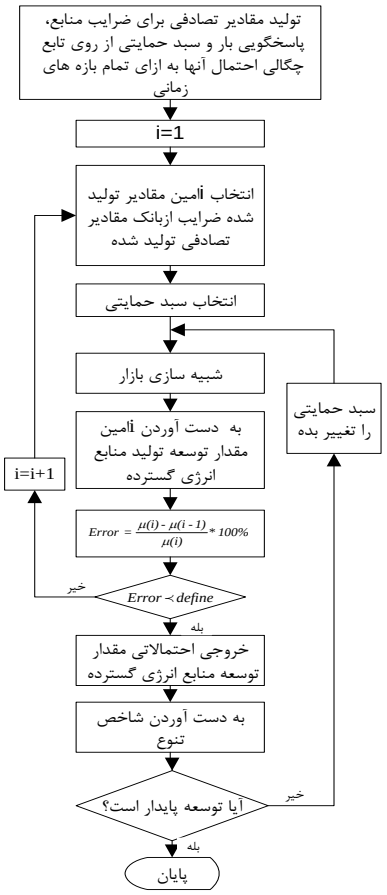
روش مونت کارلو با انجام نمونه‌برداری آماری راه حل‌های تقریبی را برای بسیاری از مسائل ریاضی فراهم می‌کند. شبیه‌سازی مونت کارلو برای تجزیه و تحلیل همه سناریوهای ممکن سیستم تحت مطالعه به کار گرفته می‌شود. این روش مستقیما برای حل مسائلی با ساختار احتمالاتی به کار می‌رود. پارامترهای مدل مونت کارلو شامل تابع چگالی احتمال از ضرایب روابط مساله توسعه منابع و ضرایب رابطه کشش‌پذیری است. مساله توسعه منابع انرژی گسترده معرفی شده را می‌توان با استفاده از روش مونت کارلو حل نمود. فرآیند اصلی عبارتست از نمونه‌برداری تصادفی از تمام ضرایب تابع بهره‌وری بر اساس تابع چگالی احتمال آنها و پس از آن در هر مرحله از شبیه‌سازی مونت کارلو، با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای ضرایب رقبا، مساله بازی پویا حل شود. به این ترتیب، در هر مرحله از شبیه‌سازی مونت کارلو، بازی پویا با اطلاعات ناقص به بازی پویا با اطلاعات کامل تبدیل می‌شود. پس از انجام تعداد مشخصی تکرار شبیه‌سازی، میزان سرمایه‌گذاری انتظاری به عنوان راهبرد بهینه سرمایه‌گذاری سرمایه‌گذار jام به‌دست خواهد آمد. شکل (۳) فلوچارت شبیه سازی مونت کارلو را در مساله بازی با اطلاعات ناقص برای کاربرد در توسعه منابع انرژی گسترده نشان می‌دهد.

در این مقاله، مقادیر سبد حمایتی به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که سبب افزایش نرخ نفوذ منابع تولیدپراکنده گردد؛ ضمن اینکه مقادیر تشویقی در نظر گرفته شده باید منجر به توسعه پایدار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

گردد. همانگونه که در فلوچارت نشان داده شده است، چنانچه سبد حمایتی تعریف شده در ابتدای برنامه‌ریزی، سبب شود که توسعه پایدار تامین نگردد، میزان سبد حمایتی تغییر داده می شود و با مقادیر جدید سبد حمایتی، مساله توسعه تولید دوباره حل می‌شود. در این مقاله منظور از توسعه پایدار، متنوع بودن منابع تولیدی است که به عنوان یک شاخص برای سنجش توسعه پایدار، در فلوچارت نشان داده شده است.

همانگونه که در روابط مساله مشاهده شد، تغییر حمایت اختصاص داده شده به هر یک از منابع روی نرخ نفوذ منابع دیگر و به تبع روی مقدار مورد نظر حمایت آن منابع تاثیر می‌گذارد. میزان این تاثیر متقابل در بخش مطالعات عددی نشان داده شده است.



شکل (۳): شبیه‌سازی مونت کالو برای مدل‌سازی بازی با اطلاعات ناقص

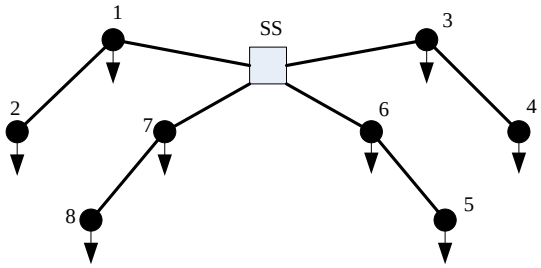
شاخص همگرایی که با μ در فلوچارت مشخص شده است، مقدار سرمایه‌گذاری هر یک از بازیگران در کل دوره برنامه‌ریزی است.

۵- مطالعات عددی

الگوریتم پیشنهاد شده برای توسعه منابع انرژی گسترده، بر روی یک شبکه نمونه اجرا شده است. در ادامه این شبکه معرفی می گردد.

۵-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه توزیع مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است [۲۳]. این شبکه 132/33 kV دارای ۸ باس است که بوسیله پست ۴۰ مگاولت‌آمپری به شبکه بالا دست متصل می‌شود. دوره مطالعه ۱۰ ساله در نظر گرفته شده است. سود هر یک از سرمایه گذاران تحت تاثیر تغییرات قیمت نقطه‌ای برق ناشی از کشش پذیری منحنی بار خواهد بود. تابع عدم قطعیت تولید منابع بادی در هر مرحله برنامه‌ریزی محاسبه شده است. مشخصات فنی سیستم توزیع در ضمیمه ۱ آورده شده است. داده‌های فنی تولید در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل(۴): سیستم توزیع مورد مطالعه

جدول (۱): داده‌های تکنولوژی‌های تولید[۲۴و ۲۵]

تکنولوژی تولید	هزینه سرمایه گذاری ($/kW)	هزینه متغیر ($/MWh)	کاندید توسعه ظرفیت (MW)	طول عمر مفید	NOx (lb/MWh)	CO_2 (lb/MWh)
گازی	۳۰۰	۳۰	۱	۲۰	۱/۱۵	۱/۴۹۴
بادی	۱۹۰۰	۱/۵	۱	۳۰	۰	۰
تولید همزمان برق و گرما	۱۱۰۰	۲۰	۱	۳۰	۰	۰

داده‌های رقبا به صورت احتمالاتی با توزیع احتمال نرمال $(\mu, \pm 20\%*\mu)$ و سطح اطمینان به میزان ٪۹۰ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه نرخ بهره ٪۱۲ و نرخ رشد سالانه بار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

٪۵ و مقـادیر a= ۹۰$/MWh و b=۰/۵۶ $/(MW)^{2}h در نظـر گرفته شده است. میزان اوج بار پـیش‌بینـی شـده شـبکه توزیـع ۵۷/۲۷ مگاوات است. برای انجـام مطالعـات سـه حالـت در نظـر گرفته شده است که در جدول ۲ آمده است. این جدول با هـدف در نظر گرفتن تاثیر تغییر سیاست‌هـا و اعمـال سیاسـت تشـویق برای چند منبع به صورت همزمان ارایه شده است.

جدول (۲): حالتهای در نظر گرفته شده برای مساله توسعه

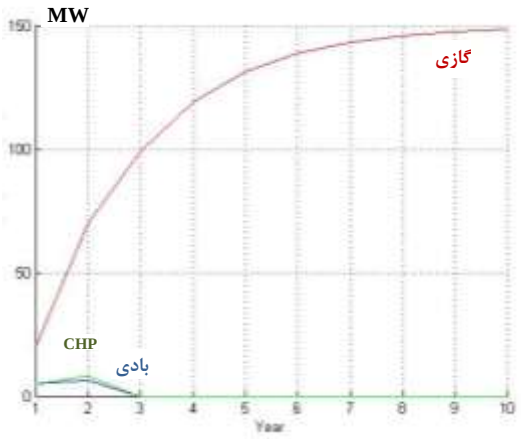
حالت اول	میزان حمایت از منابع به اندازه کافی نیست.
حالت دوم	سه نوع حمایت متفاوت برای منابع
حالت سوم	مقایسه بین حمایت منفرد[11] و حمایت چند منبعی

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

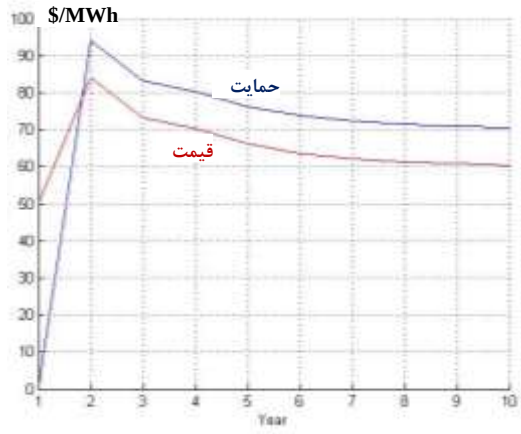
در این قسمت نتایج مطالعـات عـددی آورده شـده اسـت. نتـایج نشان‌دهنده راهبردهای برنامه‌ریزی توسعه منابع انـرژی گسـترده برای یک شبکه نمونه است. خروجی حاصل از اجرای این برنامـه به صورت احتمالاتی بوده و یک محدوده را در بر می‌گیـرد ولـی برای نمایش بهتر خروجی، میزان میانگین آن در شکل‌هـا نشـان داده شده است. سه نوع مطالعه عددی که در جدول ۲ بیان شده بود در نظر گرفته شده است. میزان سـرمایه‌گـذاری انتظـاری بـر روی هر منبع در نتایج ارایه شده است.

۵-۲-۱- مطالعه حالت اول:

در این حالت فرض می‌شود به میزان کافی از منابع حمایت نشده است و یا هیچ حمایتی صورت نگرفتـه اسـت. شـکل (۵) میـزان انتظاری سرمایه‌گذاری سرمایه‌گذاران را نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل پیداست، در صورتی که میزان حمایت بـه انـدازه کافی نباشد و یا حمایتی از منابع مورد نظر صورت نگیرد، سرمایه گذاری روی این منابع صورت نخواهد گرفت؛ ایـن مسـئله باعـث می‌شود که تنوع در منابع تولید انرژی نداشته باشیم. ازآنجایی‌که منابع بادی و منابع تولید همزمان بـرق و گرمـا بـرای توسـعه بـه حمایت نیاز دارند، بنابراین بدون در نظر گرفتن سیاست حمایتی، این منابع رشد نمی‌کنند. از آنجا کـه یکـی از معیارهـای توسـعه پایدار انرژی، تنوع و تکثر در منابع تولید انرژی است لـذا نتیجـه آن این خواهد بود که توسعه پایـداری در زمینـه انـرژی نداشـته باشیم. این حالت، اهمیت حمایت از منابع بخصوص منـابع بـادی را به سبب کاهش دادن مشکلات زیست محیطـی بخـوبی نشـان می‌دهد.



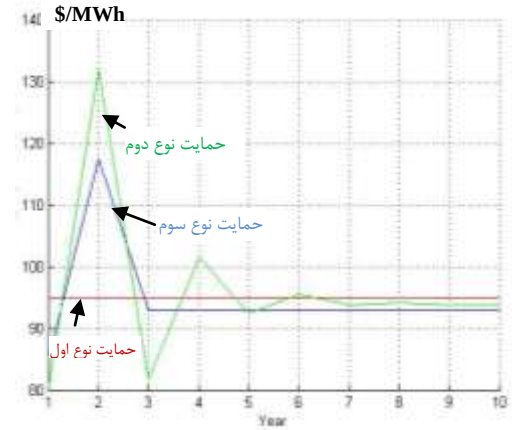
شکل (۵): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده در حالت ۱



شکل (۶): حمایت و قیمت حاشیه‌ای محلی در حالت ۱

۵-۲-۲- مطالعه حالت دوم

در این حالت تاثیر سه نوع سیاست حمایتی را بـر توسـعه منـابع بررسی می‌کنیم. این سه نوع حمایـت عبارتنـد از حمایـت ثابـت (خریـد تضـمینی $s_{22}=s_{23}=0$)، حمایـت متغیـر بـا قیمـت بـرق ($s_{12}=s_{13}=0$) و حمایت سوم حمایت متغیر با قیمت برق که تـرم ثابت در رابطه حمایت صفر نباشد. شکل (۷) هر سه نوع حمایـت را نشان می‌دهد.



شکل(۷): سیاستهای حمایتی مورد استفاده در حالت ۲

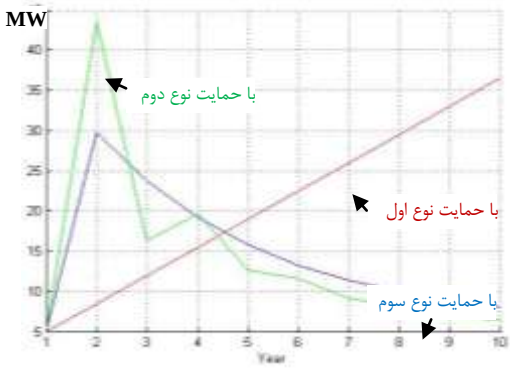
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

ابتدا حمایت ثابت را به هر دو نوع منبع بـادی و تولیـد همزمـان برق و گرما اعمال می‌کنیم. به این معنی که خرید از این واحـدها به صورت تضمینی و با قیمت ثابت صورت می‌گیرد. رفتار پویـای هر سرمایه‌گذار با سطح اطمینان ٪۹۵ در بازه زمانی مورد مطالعه در شکل‌های (۸) تا (۱۰) آورده شده اسـت. بـا توجـه بـه اینکـه قیمت خرید از منابع بادی و تولید همزمان برق و گرما، تضـمینی بوده و ارتباطی به قیمت بازار ندارد، مانند این است که این منابع در بـازی شـرکت ندارنـد و همانگونـه کـه از شـکلهای (۸) و (۹) پیداست، میزان سرمایه‌گذاری روی این منابع همواره با یک نـرخ رشد مشخص صورت می‌پذیرد. لیکن در مورد منبع گازی که بـه قیمت بازار وابسته است (شکل ۱۰)، توسعه متناسب بـا تغییـرات قیمت بازار انجام می‌شود. بدیهی است که هـر گـاه قیمـت بـازار کاهش یابـد، میـزان سـرمایه‌گـذاری روی منـابع بـادی و تولیـد همزمان برق و گرما بیشتر خواهد شد. علت این امر این است کـه با کاهش قیمت، منابع گازی که سودشان وابسته به قیمـت بـازار است، تمایل کمتری به سرمایه‌گذاری پیدا می‌کنند.

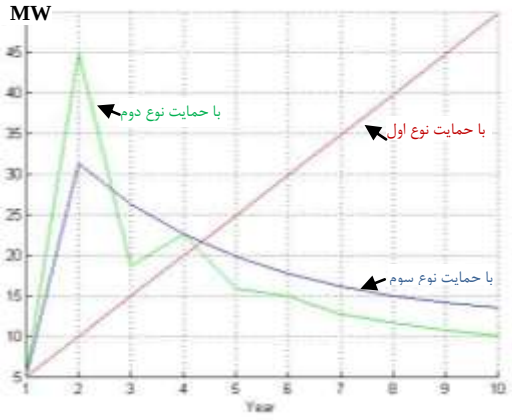
شکل (۱۱) قیمت برق را در سه حالت حمایـت نشـان مـی‌دهـد. علت کاهش قیمت در حالـت حمایـت ثابـت، افـزایش مشـارکت منابعی است که قیمت بهره‌برداری پایینی دارند.

عیب حمایت نوع اول (حمایت ثابت) این است که با وجود اینکـه قیمت بازار در این حالت افت می‌کند، ولی به دلیـل ثابـت بـودن مقدار تشویقی، میزان پرداختی به واحدهای تحت پوشش نسـبت به سایر منابع تولید بسیار زیاد است و تامین این هزینـه حمایـت نگران کننده خواهد بود و منبع مالی پرداخت حمایت نامشـخص است.

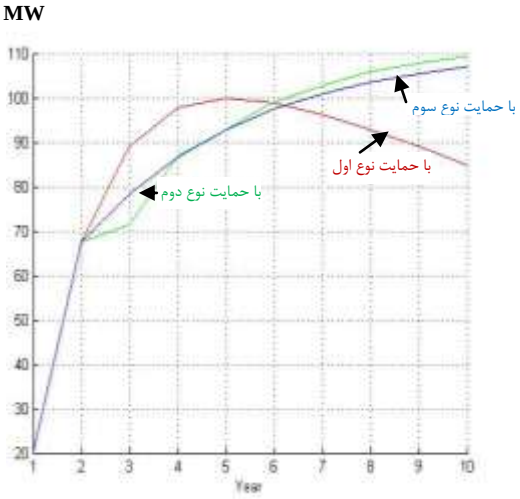
در حالت حمایت متغیر، تشویقی بر اساس قیمت بـرق بـه منـابع بـادی و منـابع تولیـد همزمـان بـرق و گرمـا داده خواهـد شـد. همانگونه که در



شکل (۸): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده منابع بادی در حالت ۲



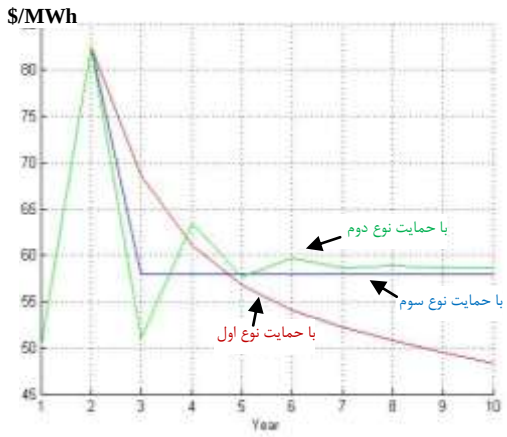
شکل (۹): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده منابع تولید همزمان برق و گرما در حالت ۲



شکل (۱۰): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده منابع گازی در حالت ۲

شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است، پس از چند مرحلـه تبادل اطلاعات (از جمله قیمت و مقدار) بین بازیگران و متصـدی حراج، بـازیگران میـزان واقعـی سـرمایه‌گـذاری خـود را انتخـاب خواهند کرد. تعداد تکرارها در هـر حالـت و بـازه زمـانی، ممکـن است متغیر باشد. پس از اینکه چندین مرحله اجرا با پارامترهـای مختلف انجام شد، مشاهده می‌شود مقـدار اولیـه در نظـر گرفتـه شده تاثیر چندانی بر نقطه تعادل بازی ندارد و فقط ممکن اسـت روی تعداد تکرارها تاثیر داشته باشد. در مقایسه بـا نتـایج حالـت قبل می‌توان دریافت کـه حمایـت ثابـت مقـرون بـه صـرفه‌تـر از حمایت متغیر با قیمت است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]



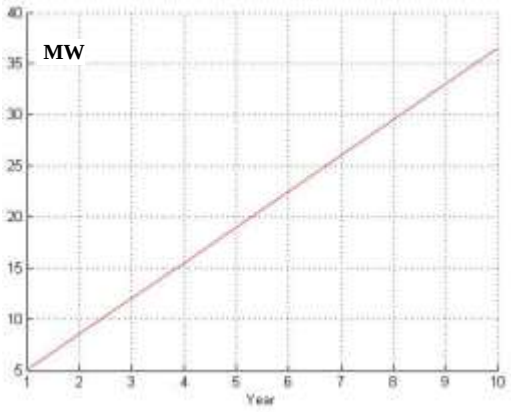
شکل (۱۱): قیمت حاشیه‌ای محلی در حالت ۲

رفتار سرمایه‌گذاری منابع بادی و منابع تولید همزمان برق و گرما متناسب با میزان حمایتی است که از آنها بـه عمـل آمـده اسـت. میزان حمایت در این حالت متناسب با قیمت بازار است. تغییرات سیاست حمایتی به گونه‌ای است که پس از یکسری نوسانات بـه همراه قیمت بازار روند نزولی دارد که این امـر منجـر بـه کـاهش میزان توسعه واحدهای بادی و واحدهای تولیـد همزمـان بـرق و گرما در افق برنامه‌ریزی گردیده است.

در حالتی که سیاست حمایتی متغیر دارای ترم ثابت باشد (حالت سوم)، با توجه به شکل‌های (۸) تـا (۱۱) مـی‌تـوان دریافـت کـه نسبت به حالت دوم که ترم ثابت تابع حمایت صـفر بـود (میـزان حمایت ضریبی از قیمت برق بود)، هم قیمت برق کمتـر خواهـد شد و هم میزان رشد منابع بیشتر از حالت دوم می‌شود. علاوه بـر اینکه تغییرات میزان سرمایه‌گذاری کمتر شده و زودتر به حالـت پایدار خواهد رسید. به عبارتی اگر تـرم ثابـت در رابطـه سیاسـت حمایتی، غیر صفر باشد، تمایل برای سرمایه‌گذاری بیشتر خواهد شد.

۵-۲-۳- حالت سوم

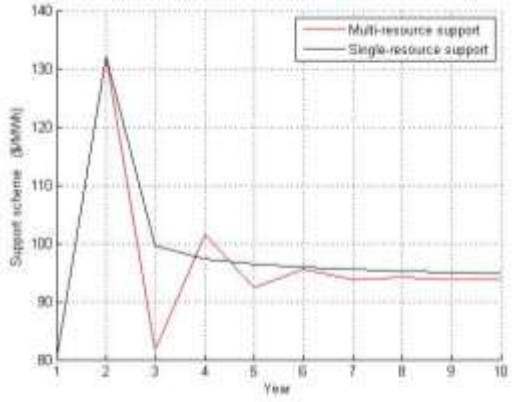
در این حالت مقایسه‌ای بین سیاست پشتیبانی منفرد و سیاسـت حمایتی چند منبعی انجام می‌گیرد. در حالتی که خرید تضمینی با قیمت ثابت به عنـوان حمایـت در نظـر گرفتـه شـود (حمایـت ثابت)، چون مستقل از هم هستند و خرید تضمینی بـوده اسـت، همانگونه که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، حمایت چه به صورت منفرد و چه چند منبعـی باشـد تفـاوتی نـدارد کـه مـدل پیشنهادی نیز این نتیجه را می‌دهد. ولی باید توجه داشت که در حالتی که حمایت متغیر با قیمـت بـازار اسـت، نتـایج حاصـل از سیاست پشتیبانی منفرد را نمی‌تـوان بـه حمایـت چنـد منبعـی تعمیم داد که این موضوع در شکل (۱۳) برای منابع بادی نشـان داده شده است.



شکل (۱۲): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده منابع بادی در حالت حمایت ثابت منفرد / چند منبعی

شکل (۱۳): میزان سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری شده منابع بادی در حالت حمایت متغیر منفرد و چند منبعی

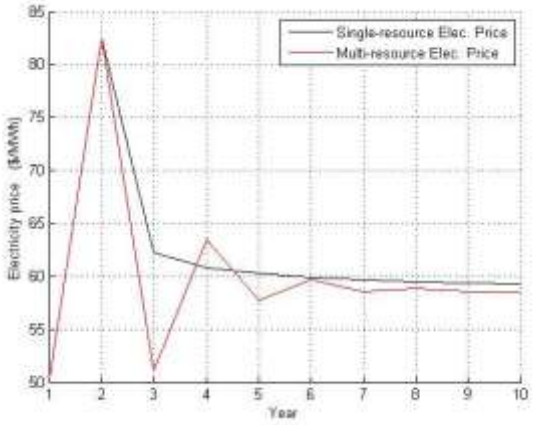
منحنی‌هـای پرداخـت حمایـت بـرای منـابع بـادی در دو حالـت حمایت منفرد متغیر با قیمت و حمایـت چنـد منبعـی متغیـر بـا قیمت در شکل (۱۴) نشان داده شده اسـت. همانگونـه کـه قـبلا بیان شد و این نمودار نیز موید آن است، میزان حمایت در حالت چند منبعی بیشتر از حالت منفرد خواهد بود.



شکل (۱۴) منحنی حمایت پرداخت شده به منابع بادی در دو حالت منفرد و چند منبعی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

در شکل (۱۵) منحنی قیمت برق برای حالت حمایت منفرد و چند منبعی نشان داده شده است. هر چند در حمایت چند منبعی، قیمت برق دیرتر از حالت حمایت منفرد به پایداری می رسد؛ لیکن میانگین قیمت برق در حالت حمایت چند منبعی تقریبا به اندازه۱/۵ $/MWh کاهش نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): قیمت برق در دو حالت حمایت منفرد و چند منبعی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله برنامه ریزی منابع انرژی گسترده با در نظر گرفتن سیاستهای حمایتی در محیط رقابتی صورت گرفته است. مدل پیشنهادی در این مقاله علاوه بر اینکه مورد استفاده سرمایه گذاران در این بخش است ابزار مناسبی برای رگولاتور سیستم در تدوین سیاستهای تنظیمی به شمار می رود. عدم قطعیت استراتژیک بازیگران با استفاده از نظریه بازی پویا با اطلاعات ناقص مدل شده است. با استفاده از روش مونت-کارلو بازی با اطلاعات ناقص به بازی با اطلاعات کامل تبدیل شد. سه نوع سیاست حمایتی برای منابع بادی و منابع تولید همزمان برق و گرما در نظر گرفته شد. در حالتی که سیاستهای حمایتی به اندازه کافی نبود، منابع انرژی گسترده متنوع نمی‌شدند که یک توسعه پایدار نبود. در حالتی که حمایت ثابت از منابع انجام شد نسبت به حالتی که حمایت متغیر با قیمت بازار بود، ترغیب بیشتری برای سرمایه‌گذاری صورت گرفت ولی عیب آن این است که با وجود اینکه قیمت بازار در این حالت افت می‌کند، ولی میزان پرداختی به واحدهای تحت پوشش نسبت به سایر منابع تولید بسیار زیاد است و تامین این هزینه حمایت نگران کننده خواهد بود. حالتی که حمایت هم ترم ثابت و هم ترم متغیر با قیمت برق را داشته باشد، یک حالت بینابینی از نتایج دو حمایت دیگر خواهد بود.

میزان بهینه حمایتی که سبب رشد منابع شده است تعیین شد. مقایسه حالت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که حمایت‌های چند منبعی از منابع تولید گوناگون انرژی بر یکدیگر به‌صورت کامل تأثیرگذار خواهند بود به‌گونه‌ای که برآیند حاصل، با جمع نتایج حاصل از حمایت‌های منفرد از هر منبع می‌تواند به‌کلی متفاوت باشد، بنابراین نتایج حاصل از سیاست پشتیبانی منفرد به‌هیچ وجه قابل تعمیم نیست و در صورتی که سیاست‌گذار بخواهد از چند منبع به‌صورت همزمان پشتیبانی کند، باید در این زمینه مطالعات مفصل و جداگانه‌ای انجام دهد.

مراجع

[۱] سعید رضا گلدانی، حبیب رجبی مشهدی، رضا قاضی "ارائه یک مدل تحلیلی برای برنامه ریزی توسعه تولید در محیط رقابتی ب مبنای تعادل دینامیکی عرضه و تقاضای انرژی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۰.

[۲] احمد صالحی، محمود فتوحی فیروزآباد "برنامه ریزی توسعه واحدهای تولیدی در حضور نیروگاه های بادی از نقطه نظر قابلیت اطمینان"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۵، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۸۷.

[3] A.J. Conejo, J.M. Morales nad L. Baringo, "Real-time demand response model", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp.236-242, 2010.

[4] A. S. Chuang, F. Wu, and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning: Problem formulation and numerical comparisons", IEEE Trans. Power Systems, vol.16, no.4, pp.885–891, 2001.

[5] F. Murphy and Y. Smeers, "Generation capacity expansion in imperfectly competitive restructured electricity markets", Operations Research, vol.53, no.4, pp.646–661, 2005.

[6] A.H. Parsaeifard, M. Manbachi, M.B. Abaee Kopayi and M.R. Haghifam, "A market-based generation expansion planning in deregulated environment based on distributed generations development", In the proceeding of IEEE 11th International Conference on PMAPS, pp.677-684, 2010.

[7] A. Chuang, F. Wu, and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning: Problem formulation and numerical comparisons," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 885–891, 2001.

[8] W. Vick, "Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders," J. Fin., vol. 16, no. 1, pp. 8–37, 1961.

[9] R. Ferrero, M. Shahidehpour, and V. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 3, pp. 1340–1347, 1997.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

[10] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems. New York: Wiley, 2002.
[11] X. Bai, M. Shahidehpour, V. Ramesh, and E. Yu, "Transmission analysis by Nash game method," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 3, pp. 1046–1052, 1997.
[12] R. Ferrero, J. Rivera, and M. Shahidehpour, "Applications of games with incomplete information for pricing electricity in deregulated power pools," IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, no. 1, pp. 184–189, 1998.
[13] T. Li and M. Shahidehpour, "Strategic bidding of transmission-constrained GENCOs with incomplete information," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 1, pp. 437–447, 2005.
[14] J. Wang, M. Shahidehpour, Z. Li, and A. Botterud, "Strategic Generation Capacity Expansion Planning With Incomplete Information", IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 2, pp. 1002-1010, 2009.
[15] T. Barforoushi, M. Parsa Moghaddam, H. Javidi and M.K. Sheikh-El-Eslami, "Evaluation of regulatory impacts on dynamic behavior of investments in electricity markets: A new hybrid DP/GAME framework", IEEE Trans. Power Systems, vol. 25, no.4, pp.1978-1986, 2010.
[16] E. Alishahi, M. Parsa Moghaddam and MK. Sheikh-El-Eslami, "An investigation on the impacts of regulatory interventions on wind power expansion in generation planning", Energy Policy, vol. 39, pp. 4614–4623, 2011.
[17] V. Nanduri, "Generation Capacity Expansion in Restructured Energy Markets", Ph.D. dissertation, University of South Florida, 2009.
[18] S.M. Moghaddas Tafreshi, A. Saliminia Lahiji, J. Aghaei nad A. Rabiee, "Reliable generation expansion planning in pool market considering power system security", Energy Conversion and Management, vol. 54, no.1, pp. 162–168, 2012.
[19] A.G. Morinec and F.E. Villaseca. "Optimal generator bidding strategies for power and ancillary services using game theory", In the proceeding of 40th North American power symposium (NAPS'08), pp.1-8, 2008.
[20] G.W. Ault, J.R. McDonald and G.M. Burt, "Strategic analysis framework for evaluating distributed generation and utility strategies", In the proceeding of IEE Generation, Transmission and Distribution, vol.150, no.4, pp. 475-481, 2003.
[21] H. Yang, R. Zhou and M. Lai, "Dynamics of Cournot game of electricity market with bounded rationality considering transmission constraints", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp.511-516, 2006.
[22] F.S. Wen and A.K. David, "Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators", IEEE Trans. Power System, vol.16, no.1, pp. 15-21, 2001.
[23] H. Falaghi and MR. Haghifam, "ACO based algorithm for distributed generation sources allocation and sizing in distributed systems", In the proceeding of IEEE Power Tech, pp.555-560, 2007.
[24] N. D. Strachan, and A. E. Farrell, "Emissions from distributed generation," Carnegie Mellon Electricity Industry Center, 2004.
[25] S. Carter, "Emissions from distributed generation," California Energy Commission Siting Committee Workshop Evaluating Distributed Generation CEQA and Permit Streamlining, April 20, 2000.

ضمیمه ۱:

جدول : مشخصات فنی سیستم توزیع در مطالعه عددی

فیدر		R (Ω)	X(Ω)	حد حرارتی (A)
شین ابتدا	شین انتها			
SS	۱	۱/۳۹۰	۲/۲۵۵	۲۱۰
۱	۲	۲/۷۸۰	٤/٥۱۰	۲۱۰
SS	۳	۲/۰۸٥	۳/۳۸۳	۲۱۰
۳	٤	۲/۷۸۰	٤/٥۱۰	۲۱۰
SS	۷	۱/۷۳۸	۲/۸۱۹	۲۱۰
۷	۸	۲/۰۸٥	۳/۳۸۳	۲۱۰
SS	٦	۲/۲٥۹	۳/٦٦٤	۲۱۰
٦	٥	۲/٤۳۳	۳/۹٤٦	۲۱۰

[1] Distributed energy resources
[2] Game theory
[3] Dynamic non-cooperative competition
[4] Gencos
[5] Payoff function
[6] Incomplete information game
[7] Multi-resource regulatory support schemes
[8] Static game model
[9] Elasticity
[10] Monte Carlo approximation
[11] Single-resource support scheme

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]