بهبود دینامیک سرمایه‌گذاری تولید با تشویق به سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده

هاجر عبدالهی‌نیا[۱]، محمدامین لطیفی[۲]، استادیار، محمدرضا شیبانی[۳]، دانشجوی دکتری

۱- معاونت بازار برق - مدیریت شبکه برق ایران- تهران - ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران – latify@cc.iut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران – m.sheibani@ec.iut.ac.ir

چکیده: سرمایه‌گذاری در بخش تولید در سیستم قدرت تجدید ساختاریافته، بدون وجود سازوکارهای حمایت از احداث ظرفیت با پدیده سیکل‌های رونق و رکود در سرمایه‌گذاری مواجه است. این پدیده، به سبب سطح پایین پاسخ‌گویی تقاضا به قیمت، می‌تواند باعث به خطر افتادن کفایت عرضه (حتی بروز خاموشی) در دوره‌های رکود شود. در این مقاله، جهت کاهش نوسانات سرمایه‌گذاری، استفاده از سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات در تشویق به سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. به این منظور، یک مدل دینامیکی مرسوم در مدل‌سازی بلندمدت سرمایه‌گذاری، برای در نظر گرفتن سیاست‌های نهاد تنظیم مقررات در تشویق سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده، توسعه داده شده است. در این راستا، روشی برای بهینه‌سازی سیاست نهاد تنظیم مقررات در کنترل حاشیه ذخیره (و درنتیجه اطمینان نسبی از کفایت) سیستم ارائه شده است. سیاست مدنظر این مقاله، کنترل تسهیلات سرمایه‌گذاری قابل تخصیص به سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده است. مسئله بهینه‌سازی حاصل، توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات حل شده است. مدل پیشنهادی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و شبیه‌سازی‌ها انجام شده است. نتایج عددی به‌دست‌آمده، گویای توانمندی روش پیشنهادی در بهبود سیکل‌های رونق و رکود و کنترل کفایت بلندمدت عرضه است.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سرمایه‌گذاری تولید، تولید پراکنده، رونق و رکود سرمایه‌گذاری، سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات.

Improvement of Generation Investment Dynamics by Encouragement of Investment in Distributed Generation

H. Abdollahinia[1], M. A. Latify, Assistant professor[2], M. R. Sheibani, PhD student[3]

1- Deputy of Electricity Market Operation, Iran Grid Management Company, Tehran, Iran
1- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, Email: latify@cc.iut.ac.ir
3- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, Email: m.sheibani@cc.iut.ac.ir

Abstract: Without capacity mechanisms, generation investment in the deregulated power system tends towards boom and bust cycles. Due to lack of significant demand response to electricity price, the cycles may jeopardize supply adequacy or even leads to a black-out in the bust periods. In this paper, encouragement of investment in distributed generations, which is designed by the regulatory body is proposed to reduce the generation investment cycles. The traditional long-term model of generation investment dynamic is modified to model and consider the regulatory policies. Moreover, an optimization model of regulatory policies is also proposed in order to preserve the supply adequacy in power system. Particle swarm optimization algorithm is employed to solve the optimization problem. The proposed model is implemented in MATLAB software. The simulation results indicate the efficiency of the proposed model in improving the boom and bust cycles and preserving supply adequacy.

Keywords: Generation investment dynamic, distributed generation, boom and bust cycle, regulatory policy.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۵ و ۱۳۹۴/۰۳/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۶
نام نویسنده مسئول: محمدامین لطیفی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - میدان استقلال - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

طی سالیان اخیر، ساختار و مقررات حاکم بر صنعت برق بسیاری از کشورها با تغییرات قابل‌توجهی روبه‌رو بوده است. هدف اصلی این تغییرات، افزایش رقابت و به‌موجب آن افزایش کارایی اقتصادی سیستم‌های قدرت است. یکی از نتایج تجدید ساختار صنعت برق، تکیه‌بر سازوکار رقابتی در سرمایه‌گذاری بخش تولید است [۱]. در چنین محیطی، قیمت، نقشی اساسی در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران برای ایجاد ظرفیت جدید ایفا می‌کند؛ به این معنی که سرمایه‌گذار تنها در شرایطی اقدام به سرمایه‌گذاری در بخش تولید می‌نماید که قیمت آینده بازار برق سود موردنظر او را تضمین نماید [۳-۲].

دلایلی متعدد در نتایج تحقیق منتشرشده ارائه شده است که نشان می‌دهد، سازوکار بازار انرژی تنها[1]، مستعد بروز دوره‌های رونق و رکود[2] در سرمایه‌گذاری است [۹-۴]. عواملی از قبیل وجود نوسانات زیاد در قیمت برق، عدم اطمینان به پیش‌بینی‌های قیمت آینده، زیاد بودن طول دوره احداث، وجود عدم قطعیت‌های قانون‌گذاری و احتمال بروز دخالت در قیمت از سوی سیاست‌گذاران، ریسک‌گریزی سرمایه‌گذاران و طبیعت سرمایه‌بر بودن سرمایه‌گذاری در تولید، منجر به تأخیر در سرمایه‌گذاری تا زمانی می‌شود که سرمایه‌گذار از نیاز به ظرفیت جدید و قیمت‌های آینده مطمئن شود [۸]. علاوه بر آن، تأخیر در زمان اتمام احداث و تأخیر در صدور مجوزهای لازم، به تأخیر بیش‌تر در زمان به مدار آمدن نیروگاه‌های جدید دامن می‌زند [۴]. کشش پایین در سمت تقاضا و صاف بودن نسبی منحنی عرضه در بازار برق رقابتی، باعث می‌شوند که کاهش ظرفیت در مدار، زمانی در قیمت‌های بازار برق اثر خود را نشان دهد که سطح ذخیره، کاهش زیادی یافته باشد. قیمت‌های بالای برق در این دوره منجر به رونق در سرمایه‌گذاری می‌شود. اما تأخیر توضیح داده‌شده در به مدار آمدن ظرفیت جدید می‌تواند منجر به بالا رفتن بیش‌تر قیمت (حتی جهش قیمت) و کاهش سطح کفایت در تولید و حتی بروز کمبود در ظرفیت تولید شود که جهش قیمت منتج از آن می‌تواند سرمایه‌گذاری را بیش‌تر از مقدار لازم تحریک نماید. درنتیجه، حجم سرمایه‌گذاری بیش از مقدار نیاز صورت گرفته و قیمت‌های برق در بلندمدت به میزانی زیاد کاهش خواهد یافت که منجر به دوره رکود در سرمایه‌گذاری در آینده می‌شود. بدین ترتیب مشابه با دیگر صنایع سرمایه‌بر، بخش تولید در صنعت برق نیز مستعد بروز دوره‌های رونق و رکود در سرمایه‌گذاری است [۱۰].

تجربیاتی در بازارهای برق، بروز پدیده‌های ذکرشده را تأیید می‌کنند. در تابستان سال ۲۰۰۰ بازار برق کالیفرنیا کمبود عرضه و خاموشی سراسری شبکه برق را تجربه نمود. به دنبال این خاموشی قیمت برق به‌شدت افزایش یافت و سرمایه‌گذاران زیادی به سرمایه‌گذاری در تولید برق ترغیب شدند. درنتیجه، بازار برق با افت‌وخیزهای شدید سرمایه‌گذاری مواجه شد. مسبب اصلی خاموشی در آن سال، رشد تقاضا و فقدان سرمایه‌گذاری در چندین سال به سبب نبودن سیگنال‌های مناسب قیمت بود که باعث شد حاشیه ذخیره طی چند سال متوالی کاهش یابد [۴].

پایین بودن سطح کشش در تقاضا (و درنتیجه آن، بروز خاموشی در صورت کمبود ظرفیت تولید) و نگاه ویژه به برق به‌عنوان یک کالای حیاتی باعث می‌شود که دوره‌های رونق و رکود تناوبی در سرمایه‌گذاری پدیده‌ای نامطلوب باشد. دوره‌های رونق و رکود در سرمایه‌گذاری در بسیاری از صنایع سرمایه‌بر مشاهده شده و می‌شود که از آن جمله می‌توان به بازار مسکن اشاره کرد. در این بازارها، به سبب سطح مناسب پاسخ تقاضا به قیمت، کمبود عرضه از سوی مصرف‌کنندگان کنترل و مدیریت می‌شود، اما در صنعت برق به سبب عدم ایجاد امکان برای پاسخ‌گویی در سمت تقاضا، چنین رفتاری از سوی مصرف‌کننده صورت نمی‌گیرد. لذا بهره‌بردار سیستم قدرت رأساً اقدام به ایجاد خاموشی خواهد کرد که پدیده‌ای مذموم از دید تمامی ذی‌نفعان است.

تدوین مقررات مناسب در بخش تولید در بازار برق می‌تواند منجر به مسطح شدن دوره‌های تناوبی رونق و رکود در سرمایه‌گذاری شود [۱۱]. طی سالیان اخیر، مطالعات بسیاری به‌منظور بهبود دینامیک توسعه تولید در محیط بازار برق رقابتی انجام گرفته است. از این میان استفاده از انواع سازوکارهای ظرفیت[3] (سازوکارهای قیمت‌محور و مقدارمحور) توجهی زیاد را به خود جلب کرده است [۱۴-۱۱، ۷].

به‌موازات مباحث فوق، امروزه صنعت برق، با افزایش رشد منابع تولید پراکنده در مقایسه با کاهش رشد نیروگاه‌های بزرگ روبه‌رو است [۱۵]. ازجمله ویژگی‌های منابع تولید پراکنده می‌توان به تأخیر زمانی کوتاه بین تصمیم به سرمایه‌گذاری و ورود ظرفیت آن‌ها به شبکه اشاره کرد. در این مقاله، اثر این ویژگی منابع تولید پراکنده بر دینامیک توسعه تولید بررسی شده و نشان داده شده است که می‌تواند سبب مسطح شدن دوره‌های تناوبی رونق و رکود در سرمایه‌گذاری تولید شود. برای این منظور، مدلی مرسوم در مطالعه دینامیک بلندمدت توسعه تولید که در [۱۸-۱۶] معرفی شده مورداستفاده قرار گرفته و برای مطالعه حاضر توسعه داده شده است.

به سبب هزینه سرمایه‌گذاری بالا در مقایسه با فناوری‌های مرسوم تولید، توسعه استفاده از منابع تولید پراکنده به‌ویژه منابع متکی بر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر به کمک حمایت‌های ویژه (ازجمله تخصیص تسهیلات مالی برای سرمایه‌گذاری، قیمت خرید مشخص به میزانی بیش از قیمت برق، اجبار شرکت‌های تأمین انرژی الکتریکی به خرید حداقلی از منابع تولید پراکنده متکی بر انرژی‌های تجدید پذیر) میسر است که عموماً از سوی سیاست‌گذاران و نهادهای تنظیم‌کننده مقررات انرژی دنبال می‌شود [۱۹]. لذا، در این مقاله برای مدل‌سازی تأثیر سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده بر دینامیک بلندمدت سرمایه‌گذاری در تولید، روشی برای بهینه‌سازی سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات بازار برق در کنترل تسهیلات سرمایه‌گذاری توسعه منابع تولید پراکنده برای حفظ کفایت بلندمدت سیستم قدرت ارائه شده است.

در مدل پیشنهادی این مقاله، عرضه و تقاضا در بازار برق به‌صورت فرآیندهایی تصادفی مدل شده‌اند. دینامیک بلندمدت قیمت با استفاده از تعامل بین عرضه و تقاضا به‌صورت فرآیندی تصادفی به دست می‌آید. برای مدل‌سازی دینامیک سرمایه‌گذاری در تولید، دو روش مبتنی بر «نگاه به گذشته» و «نگاه به آینده» برای مدل‌سازی رفتار سرمایه‌گذاری مورداستفاده قرار گرفته است. در روش اول، سرمایه‌گذار با توجه به قیمت‌های گذشته در بازار برق برای تصمیم‌گیری به سرمایه‌گذاری اقدام می‌کند، اما در روش دوم، سرمایه‌گذار باید قیمت‌های آینده را پیش‌بینی نماید. برای پیش‌بینی قیمت آینده در روش مبتنی بر نگاه به گذشته، از دینامیک بلندمدت قیمت بیان‌شده استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی، قیمت‌های مختلف آینده به کمک روش مونت‌کارلو تولید شده و به‌وسیله روندهای قیمت تولیدشده، برآوردی از متوسط قیمت‌های آینده در ماه‌های مختلف حاصل می‌شود.

میزان حمایت از سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده می‌تواند رفتار دینامیک سرمایه‌گذاری در تولید را متأثر کند. لذا برای کنترل دینامیک بلندمدت سرمایه‌گذاری، مسئله بهینه‌سازی سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات در حمایت از منابع تولید پراکنده مدل می‌شود. در این مسئله بهینه‌سازی، حمایت از سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده به‌گونه‌ای صورت می‌پذیرد که اطمینان نسبی از حفظ قابلیت اطمینان در حد قابل‌قبول در دوره برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن دینامیک بلندمدت سرمایه‌گذاری در تولید حاصل شود. برای رسیدن به پاسخ‌های مناسب از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ذرات[۴] (PSO) استفاده شده است.

در انتها در بخش نتایج عددی، مطالعه بر روی یک سیستم تست نمونه ارائه شده است. در این بخش، روندهای مختلف حمایت از سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده (با توجه به دوره حمایت، زمان اعلام شرایط حمایتی در آینده و ...) موردمطالعه قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی تأثیر سیاست بهینه اتخاذشده در هر روند موردمطالعه، مجدداً از مدل دینامیک بلندمدت سرمایه‌گذاری تصادفی استفاده می‌شود. در هر یک از روندهای شبیه‌سازی‌شده، یک تحقق محتمل در آینده از رفتار سرمایه‌گذاری، توسط مدل تصادفی دینامیکی تولید می‌شود و ارزیابی سیاست بهینه اتخاذشده برای آن صورت می‌گیرد. طبیعتاً، ممکن است این روند مطابق با روند واقعی که در آینده به وقوع خواهد پیوست نباشد. برای ارزیابی نتیجه سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات شاید راه بهتر این باشد که تعداد بسیار زیادی از تحقق‌های محتمل در آینده تولید شود تا اطمینان نسبی از سیاست پیشنهادی برای نهاد تنظیم مقررات حاصل شود، اما ارائه این حجم زیاد از داده‌ها قابل گنجاندن در حجم محدود مقاله نیست.

ساختار ادامه مقاله به شرحی است که در ادامه ذکر می‌شود. در بخش دوم مدل دینامیکی بلندمدت عرضه و تقاضای مورداستفاده در این مقاله معرفی شده و توسعه مدل توضیح داده شده است. بخش سوم به ارائه مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری اختصاص داده شده است. نحوه مدل‌سازی و فرمول‌بندی پیشنهادی برای مسئله کنترل تسهیلات سرمایه‌گذاری در تولید پراکنده در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب ارائه و در بخش ششم نیز نتیجه‌گیری انجام شده است.

۲- مدل‌سازی دینامیکی بلندمدت عرضه و تقاضا

در این مقاله، دینامیک بلندمدت توسعه تولید بر اساس مدل تعامل بین عرضه و تقاضا به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۱ در نظر گرفته شده است. این مدل بر اساس مدل معرفی‌شده در [۱۸-۱۶] ارائه شده است. در مدل حاضر، بخش مدل‌سازی سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده به مدل قبلی افزوده شده و بخش سیاست‌گذاری تکمیل و اصلاح شده است.

در این مدل، محرک اصلی قیمت، تعامل عرضه و تقاضا است. در بازارهای برق، تابع تقاضا معمولاً کشش بسیار پایینی دارد یا حتی در مواردی، تقاضایی بی‌کشش است. اما در مقابل آن، عرضه کشش زیادی دارد که البته با سطح تقاضا تغییر می‌کند. به‌صورت کلی، کشش عرضه در زمان‌های با تقاضای کم، زیاد و در زمان‌های با تقاضای زیاد، کم است. در شکل ۲ برای مثال، قیمت‌های پیشنهادی در بازار روز قبل یک روز نمونه در بازار برق PJM، نمایش داده شده است که مؤید نکات ذکرشده است [۲۰]. رفتار قیمت در بازار برق از دو زاویه قابل‌تحلیل است [۱۶، ۲۱].

- اگر قیمت پیشنهادی واحدهای نیروگاهی بر اساس هزینه نهایی باشد، می‌توان این قیمت‌ها را از کم به زیاد مرتب کرده و منحنی عرضه را شکل داد. در زمان‌های با تقاضای کم، تولید به واحدهای با هزینه نهایی کم (عموماً واحدهای آبی و برخی از فناوری‌های حرارتی) تخصیص خواهد یافت. با افزایش کم تقاضا، تغییرات جدی در هزینه نهایی و درنتیجه در قیمت بازار وجود نخواهد داشت. با افزایش بیش‌تر تقاضا، واحدهای حرارتی دیگر که بازدهی کم‌تری دارند برای پاسخ به تقاضا در مدار قرار می‌گیرند. در این حالت با افزایش تقاضا، علاوه بر افزایش هزینه نهایی، درصد تغییرات آن نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع منجر به کاهش کشش در عرضه خواهد شد؛ و
- در سطح تقاضای کم، اختلاف بین عرضه کل (ظرفیت حداکثر) و تقاضا زیاد است که به معنی وجود رقابت در تعیین قیمت است. با افزایش تقاضا، مقدار آن به حداکثر ظرفیت در دسترس، نزدیک‌تر می‌شود. این موضوع، می‌تواند رقابت در بازار را کاهش داده و قدرت بازار را در اختیار واحدهای نیروگاهی کم‌بازده قرار دهد. در این حالت، امکان تأثیرگذاری بر قیمت توسط واحدهای نیروگاهی افزایش می‌یابد. درنتیجه در این حالت، در مقایسه با مقادیر کم تقاضا، قیمت، تأثیر بیش‌تری از عرضه خواهد پذیرفت.

از شکل ۲ مشخص است که تغییر شکل تابع عرضه در روزهای مختلف زیاد نیست و در روزهای مختلف دارای شکلی مشابه تابع نمایی

است. به همین منظور در [۱۸-۱۶] شکلی نمایی برای تابع عرضه فرض شده است. برای ایجاد دقت کافی در مدل، پارامترهایی نیز در مدل در نظر گرفته شده است که بتواند تغییرات محدود تابع عرضه در زمان‌های مختلف (مشابه با شکل ۲) را مدل کند. تابع پیشنهادی قیمت به‌صورت زیر است:

$$\rho(m) = e^{\alpha \times \delta(m) - S(m)} \quad (۱)$$

که در آن $\rho(m)$ قیمت ماهیانه، $\delta(m)$ تقاضای بار ماهیانه، $S(m)$ عرضه ماهیانه و α پارامتری ثابت است.

بر اساس مدل ارائه‌شده در [۱۷]، رفتار عرضه و تقاضا به‌صورت فرآیندهایی تصادفی قابل مدل‌سازی است. تقاضای ماهیانه با استفاده از روابط (۲) و (۳) مدل می‌شود [۱۷]:

$$\delta(m) = A^L(m) + U^L(m) \quad (۲)$$

$$U^L(m+1) - U^L(m) = \kappa(m) + \sigma^L(m).z^L(m) \quad (۳)$$

به‌طوری‌که $A^L(m)$ مبین رفتار متوسط فصلی[۵] بار شبکه بوده و $U^L(m)$ تغییرات ماهیانه بار سیستم را مشخص می‌کند. بخشی از تغییرات ماهیانه به‌صورت قطعی است که با رانش ماهیانه[۶] $\kappa(m)$ مدل شده است. بخش دیگر این تغییرات ، تصادفی است که به کمک توزیع نرمال $z^L(m)$ با متوسط صفر مدل شده است. $\sigma^L(m)$ انحراف معیار تغییرات ماهیانه بار است. با ضرب این پارامتر در $z^L(m)$ بخش رفتار تصادفی تغییرات ماهیانه بار دارای توزیع تصادفی گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار $\sigma^L(m)$ است.

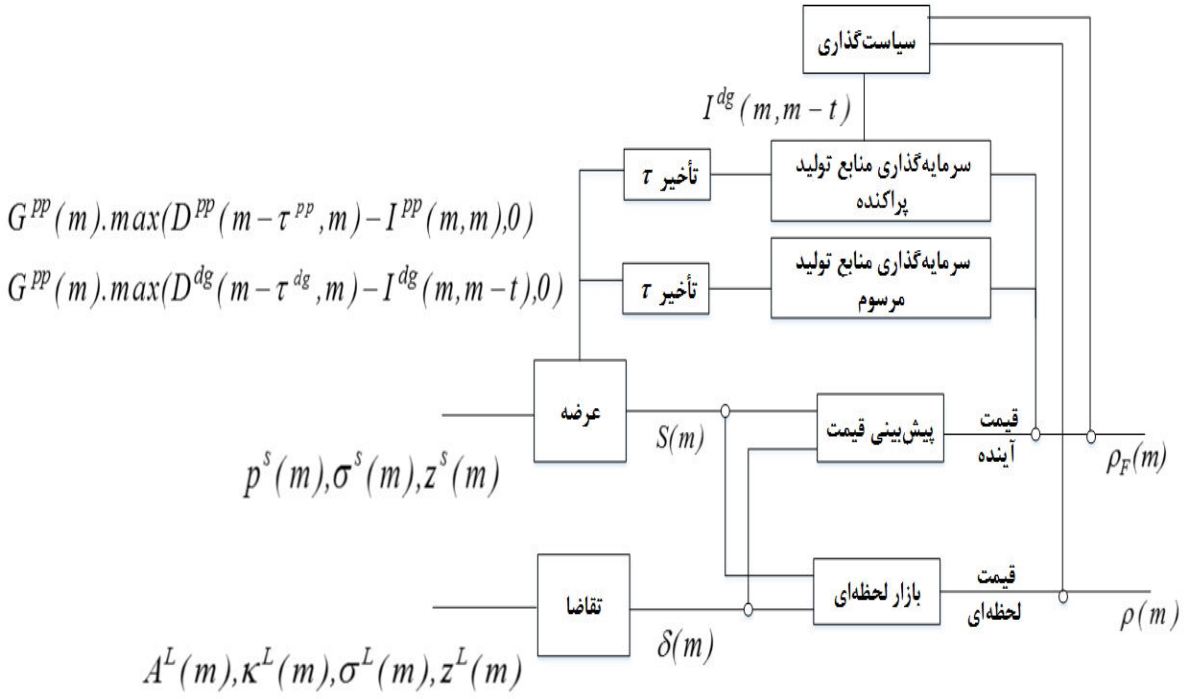
فرآیند تصادفی عرضه با استفاده از روابط زیر مدل می‌شود [۱۸]:

$$S(m) = p^S(m) + U^S(m) \quad (۴)$$

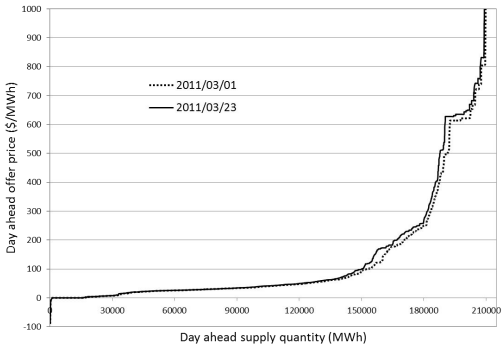
$$U^S(m+1) - U^S(m) = NC(m) + \sigma^S(m).z^S(m) \quad (۵)$$

به‌طوری‌که $p^S(m)$ بیان‌گر عرضه ماهیانه سیستم بوده و $U^S(m)$ نشان‌دهنده تغییرات عرضه ماهیانه است. این متغیر از حاصل‌جمع دو متغیر قطعی و تصادفی تشکیل می‌شود. متغیر قطعی مربوط به ظرفیت‌های جدید نصب‌شده در شبکه ($NC(m)$) است. بخش تصادفی به کمک توزیع نرمال $z^S(m)$ با متوسط صفر مدل شده است. $\sigma^S(m)$ انحراف معیار تغییرات ماهیانه عرضه است. با ضرب این پارامتر در $z^S(m)$ بخش تصادفی تغییرات ماهیانه عرضه دارای توزیع تصادفی گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار $\sigma^S(m)$ است.

تابع تقاضا که در روابط (۲) و (۳) معرفی شده است، بر اساس سه ویژگی اصلی رفتار تقاضا به نام‌های رفتار فصلی، رشد واقعی و رشد تصادفی (که می‌تواند منفی نیز باشد) مدل شده است. متوسط مقدار تقاضا در هرماه نسبت به ماه دیگر به‌صورت عمومی تغییر می‌کند که نشان‌دهنده رفتار فصلی بار است. این ویژگی به کمک پارامتر $A^L(m)$ مدل شده است. تقاضا در طول زمان عموماً دارای رشد است. برای این منظور، چنانچه رفتار تقاضا در ماه‌های یکسان در سال‌های مختلف مطالعه شود، واضح است که تقاضا در یک ماه نسبت به همان ماه در سال‌های قبل دارای یک رشد عمومی است. این رفتار در تقاضا به کمک پارامتر رانش $\kappa(m)$ مدل شده است که این پارامتر نیز بر اساس



شکل ۱: بلوک دیاگرام مدل دینامیکی بلندمدت عرضه و تقاضا



شکل ۲: تغییرات منحنی عرضه در دو روز نمونه از بازار روز قبل **PJM**

داده‌های تاریخی و رشد اقتصادی در آینده قابل‌محاسبه خواهد بود. علاوه بر دو رفتار قطعی مذکور، بار دارای رفتاری تصادفی نیز است. این رفتار تصادفی بار به‌صورت یک تابع توزیع تصادفی گوسی با متوسط صفر و انحراف معیار $\sigma^L(m)$ به‌صورت $\sigma^L(m).z^L(m)$ مدل شده است. مقدار انحراف معیار از داده‌های تاریخی قابل‌محاسبه است [۱۸-۱۶].

تابع عرضه که در روابط (۴) و (۵) معرفی شده است، بر اساس سه ویژگی اصلی عرضه به نام‌های رفتار فصلی، رشد واقعی و رشد تصادفی (که می‌تواند منفی نیز باشد) مدل شده است. متوسط مقدار عرضه در هرماه نسبت به ماه دیگر به‌صورت عمومی تغییر می‌کند که نشان‌دهنده رفتار فصلی عرضه است. این رفتار فصلی، عموماً به سبب تغییر در ظرفیت قابل‌تولید نیروگاه در ماه‌های مختلف، قیمت‌پذیر بودن مالکین نیروگاه‌ها (بدین معنی که با تغییر سطح تقاضا، قیمت پذیرفته‌شده در بازار نیز تغییر می‌کند) و نیز اعمال قدرت بازار و پیشنهاد قیمت راهبردی (که با تغییر تقاضای ماهیانه، مقدار آن نیز تغییر می‌کند) است. این تغییرات ماهیانه در عرضه، به کمک پارامتر $U^S(m)$ مدل شده است. تغییرات واقعی در عرضه به مقدار ظرفیت جدید نصب‌شده در مدار یا بازنشسته از سیستم بستگی دارد که این ویژگی در عرضه به کمک متغیر $NC(m)$ مدل شده است. تغییرات تصادفی در عرضه عموماً به سبب خروج ناگهانی نیروگاه‌ها و تغییرات قیمت سوخت برای واحدهای حرارتی حادث می‌شود. به سبب این‌که فرآیندهای متعددی در تغییرات تصادفی عرضه نقش دارند، این رفتار تصادفی می‌تواند به کمک تابع توزیع گوسی بیان شود. این توزیع تصادفی گوسی به‌صورت $\sigma^S(m).z^S(m)$ که دارای متوسط صفر و انحراف معیار $\sigma^S(m)$ است مدل شده است. مقدار انحراف معیار از داده‌های تاریخی قابل‌محاسبه است [۱۸-۱۶].

در [۱۸-۱۶] نشان داده شده است که برای اطلاعات نمونه در یک بازار برق، توابع عرضه و تقاضای پیشنهادی در روابط (۲) تا (۵) با دقت بسیار خوبی قابل تخمین هستند.

بردار $NC(m)$ نشان داده‌شده در رابطه (۵) بیان‌گر ظرفیت‌های جدید نصب‌شده در شبکه است. این بردار با در نظر گرفتن ظرفیت‌های منابع تولید پراکنده و منابع تولید مرسوم با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$NC(m) = G^{pp}(m) \times \max(D^{pp}(m-\tau^{pp},m) - I^{pp}(m,m),0) + G^{dg}(m) \times \max(D^{dg}(m-\tau^{dg},m) - I^{dg}(m,m-t),0) \quad (۶)$$

در رابطه فوق، بالانویس‌های dg و pp به ترتیب معرف منابع تولید پراکنده و منابع تولید مرسوم، τ تأخیر زمانی بین زمان تصمیم به سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از نیروگاه و $G(m)$ نرخ سرمایه‌گذاری در پاسخ به سیگنال سرمایه‌گذاری می‌باشند. $D(m-\tau,m)$ متغیر تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، بر اساس قیمت ماه‌های گذشته، برای ورود در ماه m است که می‌تواند τ ماه زودتر معلوم باشد.

در رابطه (۶)، I از یک‌سو نشان‌دهنده هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نصب و راه‌اندازی نیروگاه در ماه m و از سوی دیگر هزینه فرصت مدنظر سرمایه‌گذاران است. به‌عبارت‌دیگر، I آستانه تصمیم سرمایه‌گذار به سرمایه‌گذاری را تعیین می‌کند. این پارامتر سیگنالی است که سرمایه‌گذار بر مبنای آن تصمیم به سرمایه‌گذاری می‌گیرد، که برای منابع تولید مرسوم در ماه m معلوم بوده و برای منابع تولید پراکنده به‌منظور حمایت از سرمایه‌گذاری تولید، t ماه قبل می‌تواند معلوم باشد. چنانچه متغیر تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری، D، از I بزرگ‌تر باشد، سرمایه‌گذاری در ماه m با نرخ $G(m)$ انجام شده و ظرفیت‌های جدید در این ماه به مدار اضافه خواهد شد.

حمایت مالی از سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده ممکن است به‌صورت تضمین در خرید برق تولیدی، وام‌های کم‌بهره و یا هر نوع حمایت دیگر باشد [۱۹]. هر یک از این حمایت‌ها در قالب کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و درنتیجه کاهش نرخ بهره مورد انتظار سرمایه‌گذار، او را ترغیب به سرمایه‌گذاری می‌کند. برای مثال تضمین خرید برق منجر به کاهش ریسک سرمایه‌گذاری می‌شود. درنتیجه نرخ بهره مورد انتظار سرمایه‌گذار کاهش یافته و پروژه‌های سرمایه‌گذاری که بدون حمایت، ارزش اقتصادی کم‌تری داشته‌اند نیز می‌توانند سرمایه‌گذار را ترغیب نمایند. تمامی این موضوعات در مدل ارائه‌شده در رابطه (۶) به معنی کاهش I از دید سرمایه‌گذار در شرایط حمایت از سرمایه‌گذاری است. در این مقاله ارائه تسهیلات به سرمایه‌گذاران در منابع تولید پراکنده به‌عنوان سازوکار حمایتی موردمطالعه قرار می‌گیرد که در مدل فوق به معنی کنترل I^{dg} توسط نهاد تنظیم مقررات است (شکل ۱). به‌منظور حمایت از سرمایه‌گذاری، نهاد تنظیم مقررات می‌تواند تسهیلاتی که تصمیم دارد در آینده در اختیار سرمایه‌گذاران قرار دهد از قبل اعلام نماید که این موضوع تصمیم‌گیری را برای سرمایه‌گذار آسان‌تر می‌کند. به همین دلیل I^{dg} در رابطه (۶) برخلاف I^{pp} دارای اندیس زمان نیز هست.

در رابطه (۶) فرض بر این است که سرمایه‌گذاری با نگاه به قیمت‌های گذشته در بازار برق تحریک می‌شود. این در حالی است که سرمایه‌گذار عموماً نگاه به قیمت‌های آینده نیز دارد (در بخش ۳ توضیحات کافی در این خصوص ارائه شده است). در این حالت، تصمیم به سرمایه‌گذاری، متغیرهای حالت $U^S(m)$ را پس از τ ماه تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین در ماه جاری m، متغیر تصمیم‌گیری

به‌صورت $D(m,m+\tau)$ نمایش داده می‌شود. در این صورت، ظرفیت جدید طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$NC(m)=G^{pp}(m)\times\max(D^{pp}(m,m+\tau^{pp})-I^{pp}(m,m),0)+G^{dg}(m)\times\max(D^{dg}(m,m+\tau^{dg})-I^{dg}(m,m-t),0) \quad (۷)$$

ظرفیت $C(m)$ و درصد ذخیره ماهیانه $R(m)$ نیز به ترتیب با استفاده از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آیند [۱۸]:

$$C(m+1)=C(m)+\frac{U^S(m+1)-U^S(m)}{\alpha}=C(m)+\frac{G}{\alpha}.NC(m)+\sigma^S(\mathrm{m}).z^S(m) \quad (۸)$$

$$R(m)=\frac{C(m)-\delta(m)}{\delta(m)} \quad (۹)$$

۳- مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری

سرمایه‌گذار بر اساس اطلاعات قیمت ماه‌های گذشته بازار برق و یا پیش‌بینی قیمت‌های آینده، می‌تواند برای سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری نماید. سرمایه‌گذاری با نگاه به گذشته (استفاده از اطلاعات قیمتی ماه‌های گذشته) با استفاده از رابطه زیر مدل می‌شود [۱۸]:

$$D^i(m-\tau^i,m)=\frac{1}{12}.\sum_{j=1}^{12}\rho(m-\tau^i-j) \quad (۱۰)$$

در [۱۸]، مدلی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به آینده ارائه شده است. در این مدل، سرمایه‌گذاری بر اساس اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی قیمت‌های آینده در بازار برق انجام می‌گیرد. این مرجع با توجه به کوچک‌تر یا بزرگ‌تر بودن تأخیر زمانی نصب نیروگاه‌ها (τ^i) نسبت به دوره مطالعه برای تصمیم‌گیری در آینده (P)، دو حالت برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار ارائه نموده است که در ادامه ذکر می‌شود.

- دوره تصمیم‌گیری بزرگ‌تر از تأخیر در سرمایه‌گذاری ($P>\tau^i$)

در این حالت، ظرفیت جدید در دوره تصمیم‌گیری وارد شبکه می‌شود. درنتیجه استفاده از کل مجموعه قیمت‌های آینده (با قرار دادن ضرایب وزنی) می‌تواند یک روش برای تعیین مقدار متغیر تصمیم‌گیری باشد که در رابطه زیر آورده شده است:

$$D^i(m,m+\tau)=\frac{1}{P+1}.[\frac{P-\tau}{\tau+1}[\sum_{j=1}^{\tau+1}\rho_F(m,m+j)]+\frac{\tau+1}{P-\tau}[\sum_{j=\min(\tau+2,P)}^{P}\rho_F(m,m+j)] \quad (۱۱)$$

که m ماه تصمیم به سرمایه‌گذاری، $m+\tau$ ماه ورود ظرفیت به شبکه، τ تأخیر زمانی نصب نیروگاه‌ها و $\rho_F(m,m+j)$ قیمتی است که در زمان m برای $m+j$ محاسبه می‌شود.

- دوره تصمیم‌گیری کوچک‌تر از تأخیر در سرمایه‌گذاری ($P<\tau^i$)

در این حالت ظرفیت جدید در دوره قرارداد P وارد نمی‌شود. در این حالت متغیر تصمیم‌گیری با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D^i(m,m+\tau^i)=\frac{1}{P}.\sum_{j=m+1}^{m+P}\rho_F(m,m+j) \quad (۱۲)$$

در دو مدل فوق در آغاز هرماه m، مجموعه قیمت‌های آینده برق ($\rho_F(m)$) نشان‌داده‌شده در رابطه (۱۳)، برای ماه $m+1$ تا ماه $m+p$ پیش‌بینی می‌شود.

$$\rho_F(m)=\{\rho_F(m,m+1),\rho_F(m,m+2),\ldots,\rho_F(m,m+p)\} \quad (۱۳)$$

در این مدل قیمت آینده بازار در ماه $m+j$، امید ریاضی قیمت لحظه‌ای ماه $m+j$ است که در رابطه (۱۴) نشان داده شده است.

$$\rho_F(m,m+j)=E_m(\rho(m+j)) \quad (۱۴)$$

برای به دست آوردن مقادیر متوسط قیمت‌ها در رابطه فوق، ابتدا با فرض مشخص بودن سیاست نهاد تنظیم مقررات (مشخص بودن مقدار I_{dg})، شبیه‌سازی تصادفی NC و قیمت‌های آینده با استفاده از روابط (۱) تا (۵) انجام می‌شود. به کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو، در ابتدا مقادیر مختلف برای متغیرهای تصادفی z^S و z^L در طول دوره تولید می‌شود که درنتیجه آن، روندهای مختلف قابل مدل‌سازی است. در هر روند برای هرماه یک مقدار مشخص برای z^S و z^L تولید می‌شود. به ازای مقادیر z^S و z^L در هر روند، یک‌بار روابط (۱) تا (۵) حل می‌شود. درنتیجه به ازای هر روند، زنجیره‌ای از قیمت‌های آینده تولید می‌شود که این زنجیره‌ها را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۵) نمایش داد. به کمک این قیمت‌ها می‌توان قیمت متوسط آینده را با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه کرد.

مراحل تعیین قیمت $\rho_F(m,m+j)$ برای ماه m به‌صورت زیر است، که در آن قیمت ماه $m-1$ به‌عنوان شرایط اولیه برای شبیه‌سازی قیمت‌های آینده استفاده می‌شود:

۱- معادلات (۱) الی (۷) در ابتدای هرماه m برای $m+1$ تا $m+p$ حل می‌شوند.

۲- به‌منظور رسیدن به N سری از قیمت‌های لحظه‌ای برای هرماه، مرحله قبل برای N تکرار مونت‌کارلو به‌صورت نشان‌داده‌شده در رابطه (۱۵) حل می‌شود.

$$\begin{Bmatrix}\hat{\rho}^1_{(m+1)},\hat{\rho}^1_{(m+2)},\ldots,\hat{\rho}^1_{(m+p)}\\ \vdots\\ \hat{\rho}^N_{(m+1)},\hat{\rho}^N_{(m+2)},\ldots,\hat{\rho}^N_{(m+p)}\end{Bmatrix} \quad (۱۵)$$

۳- قیمت‌های آینده ($\rho_F(m)$) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$\rho_F(m,m+j)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\hat{\rho}^i(m+j),\qquad \forall j\in[1,P] \quad (۱۶)$$

۴- مدل‌سازی کنترل تسهیلات سرمایه‌گذاری برای سرمایه‌گذاران تولید پراکنده توسط نهاد تنظیم مقررات شبکه

نهاد تنظیم مقررات ، سیاست‌گذاری خود را به نحوی انجام می‌دهد که به‌وسیله آن قابلیت اطمینان شبکه قدرت ازنقطه‌نظر درصد ذخیره در حد قابل‌قبول کنترل شود. رویکرد پیشنهادی در این مقاله جهت حفظ درصد ذخیره شبکه در محدوده مجاز در طول افق برنامه‌ریزی به این

صورت است که نهاد تنظیم مقررات با کنترل تسهیلات مالی قابل‌واگذاری به سرمایه‌گذاران تولید پراکنده، سبب تشویق آن‌ها به نصب ظرفیت در شبکه شود. این تسهیلات اثر خود را در متغیر $I^{dg}(m,m-t)$ نشان خواهد داد و به‌اندازه‌ای است که درصد ذخیره شبکه را در محدوده مجاز حفظ کند.

نهاد تنظیم مقررات باید متغیر کنترلی $I^{dg}(m,m-t)$ را برای یک دوره زمانی معین T (به‌عنوان‌مثال پنج‌ساله) به نحوی تعیین کند که همواره کم‌ترین تسهیلات در اختیار سرمایه‌گذاران قرار گرفته و همچنین درصد ذخیره در محدوده مجاز حفظ شود. بنابراین مسئله سیاست‌گذاری توسعه تولید پراکنده، به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود، که هدف، حداقل‌سازی مقدار $I^{dg}(m,m-t)$ در هر بازه زمانی سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات است و درصد ذخیره به‌صورت قید در فرآیند بهینه‌سازی وارد می‌شود. دادن تسهیلات به سرمایه‌گذاران در منابع تولید پراکنده عملاً باعث جذب سرمایه بیش‌تر به سرمایه‌گذاری در تولید پراکنده نیز خواهد شد که این موضوع در مدل معرفی‌شده به‌صورت افزایش $G^{dg}(m)$ خود را نشان می‌دهد. بدون از دست رفتن کلیت مسئله، و برای سادگی، $G^{dg}(m)$ طبق رابطه زیر به‌صورت تابعی خطی از $I^{dg}(m,m-t)$ مدل شده است:

$$G^{dg}(m)=\gamma \times I^{dg}(m,m-t) \qquad (۱۷)$$

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در رابطه زیر مدل شده است:

$$\min \; -\iota_n \qquad (۱۸)$$
$$\iota_n = I^{dg}(m,m-t) \;\; \forall m \in [t_n, t_{n+T}]$$

$$R_{\min} \le R(m) \;\; \forall m \in [t_n, t_{n+T}] \qquad (۱۹)$$

$$I^{dg}_{\min} \le I^{dg}(m,m-t) \le I^{dg}_{\max} \;\; \forall m \in [t_n, t_{n+T}] \qquad (۲۰)$$

در روابط فوق $R_{\min}$ ، $I^{dg}_{\max}$، $I^{dg}_{\min}$ و n به ترتیب حداقل مقدار درصد ذخیره، حداکثر مقدار $I^{dg}(m,m-t)$، حداقل مقدار $I^{dg}(m,m-t)$ و شماره بازه بهینه‌سازی است. ι_n متغیری کمکی است که برابر $I^{dg}(m,m-t)$ در ماه‌های مختلف بازه بهینه‌سازی n است.

در مسئله بهینه‌سازی فوق، قید (۱۹) معرف محدودیت قابلیت اطمینان قابل‌قبول است. قید (۲۰) حداقل و حداکثر مقدار $I^{dg}(m,m-t)$ را مشخص می‌کند. قید حداقل برای $I^{dg}(m,m-t)$ بدین معنی است که سیاست‌گذار انرژی سطحی حداقلی از توسعه تولید پراکنده را مستقل از رفتار بازار برق برای حمایت مدنظر دارد. قید حداکثر نیز تعیین‌کننده حداکثر تسهیلات قابل‌ارائه به سرمایه‌گذاران تولید پراکنده است.

در مسئله بهینه‌سازی فوق، همان‌گونه که ذکر شد، قید در رابطه (۱۹) برای اطمینان از وجود ذخیره کافی در طول دوره بهینه‌سازی سیاست نهاد تنظیم مقررات است. این قید، بیان می‌کند که سیاست نهاد تنظیم مقررات برای حمایت از منابع تولید پراکنده باید به‌گونه‌ای بهینه شود که در ماه m، مقدار درصد ذخیره ($R(m)$) از مقداری که استانداردهای بهره‌برداری تعیین می‌کنند (R_{min}) بیش‌تر باشد. در این مسئله بهینه‌سازی، متغیر $R(m)$ از رابطه (۹) محاسبه می‌شود که بر این اساس، مقدار آن به مقدار متغیر $C(m)$ بستگی دارد. مقدار متغیر $C(m)$ نیز از رابطه (۸) تعیین می‌شود. همان‌گونه که در این رابطه مشخص است، مقدار متغیر $C(m)$ علاوه بر پارامترهای مسئله به متغیر $NC(m)$ نیز وابسته است که این متغیر نیز به کمک روابط (۶) یا (۷) (بسته به نوع مدل سرمایه‌گذاری) قابل‌محاسبه است. بر اساس این روابط، با تغییر $I^{dg}(m,m-t)$ توسط نهاد تنظیم مقررات ، به ترتیب $NC(m)$ و $C(m)$ و درنتیجه $R(m)$ تغییر خواهند کرد. بنابراین، با در نظر گرفتن قید (۱۹) در مسئله بهینه‌سازی، محدوده قابل‌قبول برای تعیین $I^{dg}(m,m-t)$ به‌صورتی است که حتماً $R(m)$ بیش‌تر از R_{min} باشد. درنتیجه، عرضه (ظرفیت تولید) بیش از تقاضا (بار) بوده و تقاضا در تمامی حالات برآورده خواهد شد. اما نکته‌ای که وجود دارد این است که با فرض $I^{dg}(m,m-t)$ مشخص، مدل‌سازی دینامیک آینده سرمایه‌گذاری در تولید (بر اساس مدل نگاه سرمایه‌گذار به آینده) بر اساس شبیه‌سازی قیمت‌های آینده و محاسبه متوسط آن‌ها (رابطه (۱۴)) صورت می‌گیرد. به همین جهت، لزوماً دینامیک موردمطالعه آن چیزی نخواهد بود که در آینده اتفاق خواهد افتاد. لذا ممکن است که $R(m)$ به‌دست‌آمده در مدل با مقدار واقعی تفاوت داشته باشد. برای رفع این محدودیت، می‌توان مقدار R_{min} را به‌صورتی محافظه‌کارانه در نظر گرفت. این روش مشابه روشی است که در مطالعات توسعه سیستم قدرت به‌صورت سنتی در نظر گرفته می‌شود که طبیعتاً به معنی افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری (در اینجا افزایش تسهیلات اعطایی به منابع تولید پراکنده) خواهد بود [۲۲، ۲۳].

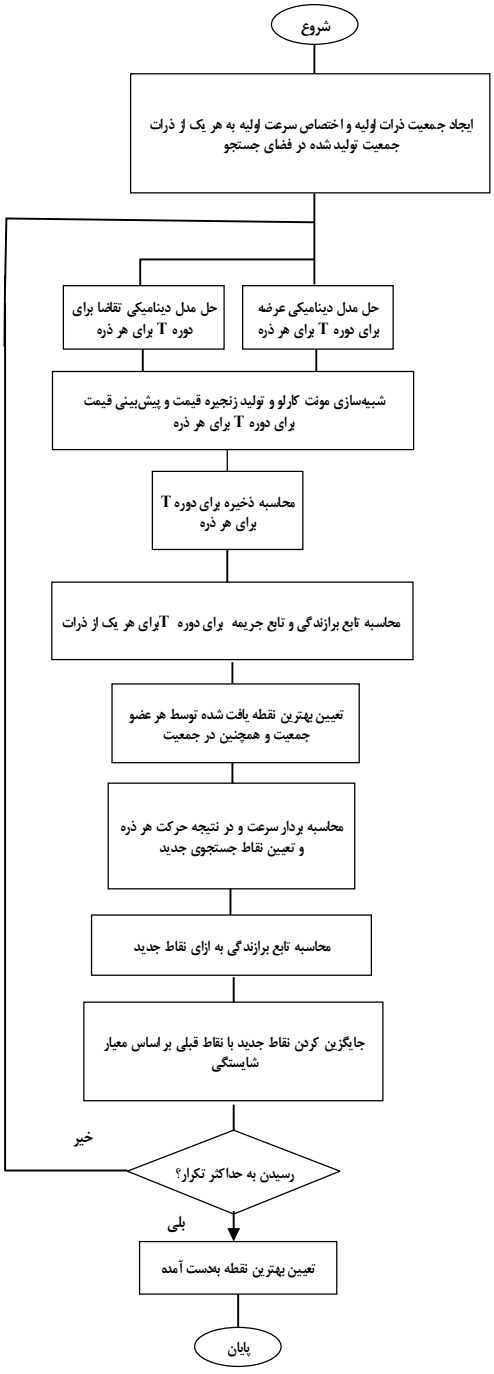
یکی از راهکارهای رفع این محدودیت، مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی مفروض به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی است. در این صورت، $R(m)$ به ازای هر روند قیمت در آینده (در این مقاله قیمت متوسط به‌عنوان نماینده قیمت‌های آینده در مدل در نظر گرفته شده است)، مقداری متفاوت با روندهای دیگر خواهد داشت. بدین ترتیب $R(m)$ خود متغیری تصادفی خواهد بود که می‌توان مقدار I^{dg} را به‌گونه‌ای بهینه کرد که گشتاوری از متغیر تصادفی $R(m)$ (برای مثال متوسط و واریانس) دارای مقداری قابل‌قبول باشد. این مدل‌سازی می‌تواند به‌عنوان توسعه‌ای بر مدل ارائه‌شده در مقاله حاضر، موضوع تحقیقات آتی باشد و از محدوده مقاله حاضر خارج است.

مسئله بهینه‌سازی مفروض دارای دو ویژگی زیر است:

- این مسئله، یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی است. همان‌گونه که توضیح داده شد، متغیر $R(m)$ تابعی از $NC(m)$ است. متغیر $NC(m)$ نیز بر اساس روابط (۶) و (۷) (بسته به نوع مدل سرمایه‌گذاری) به سبب وجود تابع ماکزیمم، تابعی غیرخطی از $I^{dg}(m,m-t)$ است.
- بیان صریح ریاضی وابستگی $R(m)$ به $I^{dg}(m,m-t)$ به‌خصوص در شرایطی که سرمایه‌گذاری با نگاه به آینده مدل می‌شود به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. زیرا با تغییر $I^{dg}(m,m-t)$ متغیرهای $C(m)$ و $NC(m)$ برای ماه‌های آینده تغییر خواهند کرد. درنتیجه، بر اساس روابط (۴) و (۵) مقدار $S(m)$ تغییر خواهد کرد. مقدار قیمت ($\rho(m)$) تابعی نمایی از $S(m)$ است که با تغییر $S(m)$ مقدار قیمت تغییر کرده و درنتیجه

مقدار متوسط قیمت‌های آینده (که خود با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو تولید می‌شوند) نیز بر اساس روابط (۱۳) تا (۱۵) تغییر خواهند کرد. تغییر در قیمت‌های آینده مقدار متغیر تصمیم سرمایه‌گذاری ($D^i(m,m-\tau)$) را بر اساس رابطه (۱۱) تعیین می‌کند که این متغیر نیز در تعیین $R(m)$ به‌صورت غیرمستقیم از طریق رابطه (۶) تأثیرگذار است.

به دلیل ویژگی‌های فوق در مسئله بهینه‌سازی مفروض، استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مبتنی بر حل ریاضی (نظیر GAMS) به‌سادگی امکان‌پذیر نیست.



شکل ۳: روندنمای استفاده از **PSO** برای حل مسئله بهینه‌سازی

ازآنجاکه هدف اصلی از تدوین این مقاله، پیشنهاد یک ساختار برای ارزیابی تأثیر حمایت از منابع تولید پراکنده بر دینامیک سرمایه‌گذاری بلندمدت تولید است، برای حل مسئله بهینه‌سازی مفروض از هر روش بهینه‌سازی که قادر به حل آن باشد می‌توان استفاده نمود. ازآنجاکه زمان شبیه‌سازی در این مقاله چالشی ایجاد نمی‌کند، از بین روش‌های موجود از الگوریتم PSO استفاده شده است [۲۴].

روند نمای استفاده از الگوریتم PSO برای تعیین مقدار بهینه متغیر کنترلی مسئله، در شکل ۳ آورده شده است. بر اساس این روندنما، هر ذره در جمعیت PSO یک I^{dg} برای دوره T ارائه می‌دهد. برای هر ذره، یک‌بار شبیه‌سازی مونت‌کارلو صورت می‌گیرد تا تأثیر I^{dg} پیشنهادی ذره بر قیمت‌های دوره T و رفتار سرمایه‌گذاری برآورد شود. به کمک این تأثیر، مقدار برازندگی هر ذره مشخص شده و سپس عملگرهای الگوریتم PSO برای تولید نقاط بعدی مورداستفاده قرار می‌گیرند. پیاده‌سازی این الگوریتم و تعیین پارامترهای آن بر اساس روش ارائه‌شده در [۲۴] صورت می‌پذیرد.

قید قابلیت اطمینان به فرم زیر به‌صورت یک تابع جریمه در تابع هدف PSO مدل شده است.

$$PF_n = W \times \sum_{m=t_n}^{t_n+T} \left| R_{\min} - R(m) \right| \qquad (۲۰)$$

که در این رابطه، W و PF_n به ترتیب ضریب وزنی و تابع جریمه می‌باشند.

نکته قابل‌ذکر در این بخش این است که با توجه به طول بازه‌ای که قانون‌گذار مقدار t_n (و درنتیجه $I^{dg}(m,m-t)$) را تعیین می‌کند و همچنین زمان اعلام d_n راهبردهای مختلفی می‌تواند برای نهاد تنظیم مقررات طراحی شود که هر یک از آن‌ها اثرات خاص خود را در بهبود درصد ذخیره خواهند داشت. برای توضیح بیش‌تر، پارامترهای T=۶۰، τ^{dg}=۱۴ ، P=۸ و t_n=۱ را در نظر می‌گیریم. در این حالت قرار است که نهاد تنظیم مقررات مقدار حمایت بهینه از سرمایه‌گذاری در تولید پراکنده را برای بازه‌های ۶۰ ماهه محاسبه نماید. اگر تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار تولید پراکنده برای وارد شدن به مدار در ماه m، بر مبنای نگاه به گذشته باشد، سیگنال $D^{dg}(m-14,m)$ طبق رابطه (۱۰) با میانگین‌گیری از قیمت‌ها در یک سال گذشته به دست می‌آید. به‌عنوان‌مثال اگر سرمایه‌گذار قصد تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری در ماه ۴۰ را داشته باشد، بایستی قیمت‌های ماه‌های ۲۸ تا ۴۰ را در نظر بگیرد، که در صورت نهایی شدن تصمیم، نیروگاه در ماه ۵۴ وارد مدار خواهد شد. اگر تصمیم‌گیری بر مبنای نگاه به آینده باشد، سیگنال $D^{dg}(m,m+14)$ به‌منظور تصمیم به سرمایه‌گذاری در ماه m از رابطه (۱۲) محاسبه خواهد شد. بر اساس این رابطه، به دلیل کوچک‌تر بودن دوره تصمیم‌گیری نسبت به تأخیر در سرمایه‌گذاری، ظرفیت جدید در تعیین این پارامتر در نظر گرفته نمی‌شود. نهاد تنظیم مقررات می‌تواند متغیر کنترلی I را در ابتدای هر بازه ۶۰ ماهه و یا قبل از آن اعلام نماید. اعلام نمودن قبل از شروع هر بازه، مشخص شدن بهتر آینده برای سرمایه‌گذار به‌منظور تصمیم‌گیری مناسب‌تر را در پی خواهد داشت.

به‌عنوان نمونه، در مثال عددی قبل، اگر متغیر کنترلی، ۲ سال زودتر اعلام شود، سرمایه‌گذار تولید پراکنده به‌منظور سرمایه‌گذاری در ماه ۵۵ به اطلاعات بعد از ماه ۶۰ یعنی بازه زمانی بعدی نیز دسترسی داشته و تصمیم بهتری خواهد گرفت. در غیر این صورت، در صورت اعلام شدن متغیر کنترلی در ابتدای هر بازه، به دلیل معلوم نبودن این متغیر در ماه‌های بعد از ماه ۶۰، تصمیم‌گیری در ماه ۵۵ با خطاهایی همراه خواهد بود که این نکات در بخش شبیه‌سازی‌ها به‌صورت مفصل‌تر موردبررسی قرار خواهد گرفت.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور بررسی اثر تولیدات پراکنده و سیاست‌گذاری‌های نهاد تنظیم مقررات شبکه بر بهبود دینامیک توسعه تولید در این بخش، شبیه‌سازی‌هایی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها برای افق زمانی برنامه‌ریزی ۳۰ ساله انجام شده‌اند. جدول ۱ اطلاعات شرایط اولیه برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

نکته‌ای که نیاز به توضیح دارد، چرایی در نظر گرفتن مقدار ۱۰ درصد برای R_{min} است. مقدار ذخیره استاندارد در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه تولید به‌صورت سنتی عموماً ۲۵ الی ۳۰ درصد است [۲۲]. دلیل در نظر گرفتن مقدار کم (۱۰ درصد) در این مطالعات، ارزیابی توانمندی مدل در محقق کردن ذخیره با حاشیه ذخیره استاندارد کم است. درصورتی‌که مدل پیشنهادی بتواند، در این شرایط به‌درستی عمل کند، به طریق اولی، با در نظر گرفتن R_{min} مطابق با شرایط واقعی نیز درست عمل خواهد کرد.

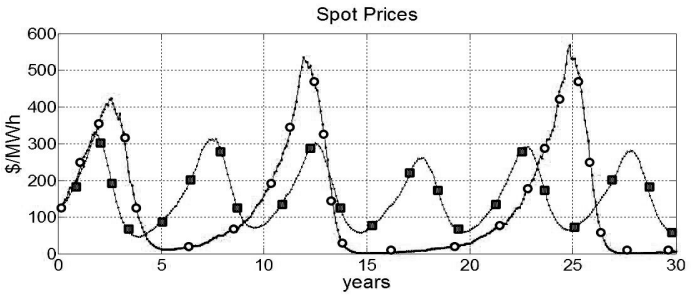
۵-۱- بررسی اثر مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار بر دینامیک توسعه تولید

به‌منظور بررسی اثر مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار بر دینامیک توسعه تولید، دو مدل تصمیم‌گیری با نگاه به گذشته و آینده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مطالعه در [۱۸] انجام شده است. در این قسمت تنها برای اعتبارسنجی مدل پیاده‌سازی‌شده و نیز استفاده از نتایج آن در بخش‌های بعدی، این مطالعه مجدداً انجام شده است. در این قسمت فرض شده که تنها نیروگاه‌های مرسوم با تأخیر زمانی ۲۴ ماه در شبکه حضور دارند. تغییرات قیمت لحظه‌ای، میزان تولید و درصد ذخیره در طول ۳۰ سال افق برنامه‌ریزی به ترتیب در شکل‌های ۶-۴ نمایش داده شده‌اند که کاملاً مشابه با نتایج [۱۸] است.

با توجه به نتایج تغییرات قیمت، در اثر سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده، می‌توان به این نتیجه رسید که دوره‌های رونق و رکود با افت‌وخیزهای قیمت عامل سرمایه‌گذاری‌های نوسانی خواهد بود که این نکته به‌خوبی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. درواقع افزایش ناگهانی قیمت، سرمایه‌گذاران را تشویق به بالا بردن ظرفیت تولید و یا ساخت نیروگاه نموده است. بنابراین با تأخیرهای حدود ۲۴ ماه، تولید افزایش یافته است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نوسانات سرمایه‌گذاری در اثر تصمیم‌گیری با نگاه به گذشته نسبت به آینده بیش‌تر است. این مسئله باعث می‌شود که ذخیره سیستم نیز که شاخصی از قابلیت اطمینان آن است دچار نوسانات شود که این نکته در شکل ۶ مشاهده می‌شود. بنابراین با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها در این قسمت می‌توان اولاً چگونگی نوسانات قیمت‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها را در واکنش نسبت به آن مشاهده نمود. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که، نگاه به قیمت‌های آینده، نتایج بهتری را از دید دینامیک سرمایه‌گذاری و نوسان کم‌تر آن خواهد داد، که این مسئله، نتایج بهتری را ازنظر قابلیت اطمینان سیستم در پی خواهد داشت. به همین دلیل در تمام مطالعات بعدی، از مدل تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به آینده استفاده شده است.

جدول ۱ : اطلاعات شرایط برنامه‌ریزی

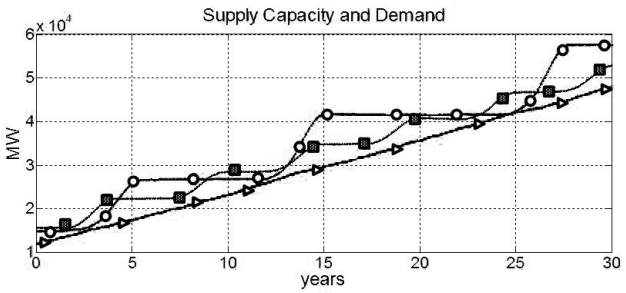
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تأخیر زمانی نیروگاه‌های مرسوم (τ^{pp})	۲۴	α	۵×۱۰^{-۴}
تأخیر زمانی منابع تولید پراکنده (τ^{dg})	۹	$A^L(0)$	۱۲۰۰۰
$P^{pp}(m,m)$	۱۰۰	$P^S(0)$	۱/۲
$G^{pp}(m)$	۰/۰۰۱	R_{min}	۰/۱
P	۲۴	γ	۱×۱۰^{-۵}



شکل ۴: قیمت لحظه‌ای

: تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به آینده

: تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به گذشته

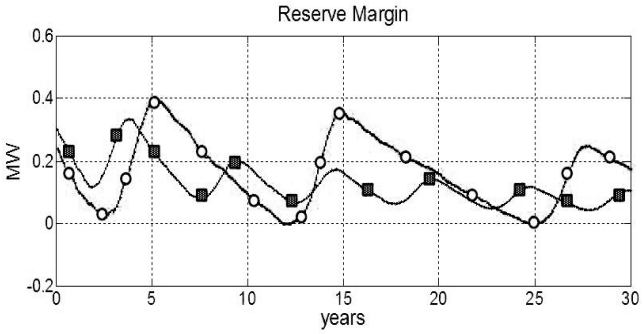


شکل ۵: عرضه و تقاضا

: تقاضا

: عرضه- تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به آینده

: عرضه- تصمیم‌گیری سرمایه‌گذار با نگاه به گذشته



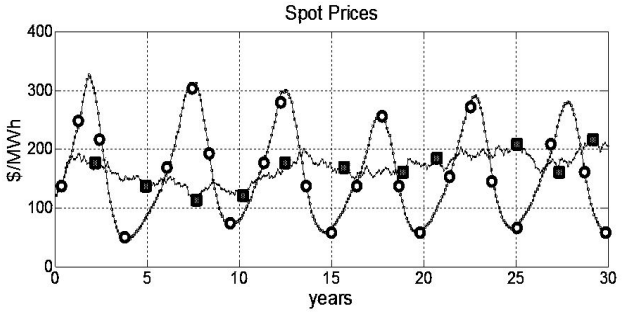
شکل ۶: درصد ذخیره
: تصمیم‌گیری با نگاه به آینده
: تصمیم‌گیری با نگاه به گذشته

۵-۲- بررسی اثر حضور منابع تولید پراکنده بر دینامیک توسعه تولید

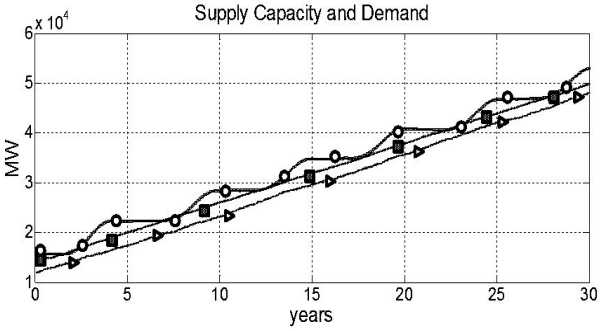
در این قسمت، اثر حضور منابع تولید پراکنده بر دینامیک سرمایه‌گذاری تولید موردبررسی قرار گرفته است. به این منظور، تغییرات قیمت، سرمایه‌گذاری و درصد ذخیره با سرمایه‌گذاری بر روی نیروگاه‌های مرسوم بدون حضور تولید پراکنده و باوجودآن مقایسه شده‌اند، که نتایج به ترتیب در شکل‌های ۹-۷ آورده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد حضور منابع تولید پراکنده به سبب تأخیر زمانی کوتاه بین تصمیم به سرمایه‌گذاری و ورود ظرفیت جدید، مانع از کمبود ظرفیت، جهش‌های شدید قیمتی و درنتیجه رونق و رکود شدید در سرمایه‌گذاری شده است. مسطح شدن افت‌وخیزهای قیمت، با فرض ثابت بودن مقدار I سبب می‌شود که در طول افق برنامه‌ریزی همواره ظرفیت جدید ثابتی وارد شبکه شود. این موضوع سبب کاهش درصد ذخیره شبکه در طول افق برنامه‌ریزی خواهد شد. کاهش درصد ذخیره در شکل ۹ به‌خوبی نشان داده شده است. در این مقاله، سیاست‌گذاری مناسب نهاد تنظیم مقررات شبکه به‌منظور حل این مشکل پیشنهاد شده است که در قسمت‌های بعد به آن پرداخته می‌شود.

۵-۳- بررسی اثر سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات بر بهبود قابلیت اطمینان دینامیک توسعه تولید

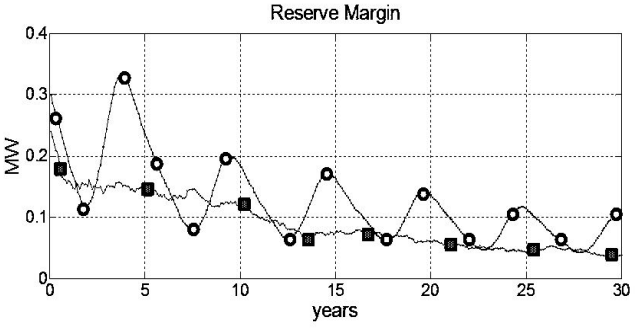
در این بخش از مطالعات، به‌منظور بررسی اثر سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات با حضور منابع تولید پراکنده، شبیه‌سازی‌ها در حالتی که نهاد تنظیم مقررات، مقدار متغیر کنترلی I^{dg} را با فرض ثابت بودن مقدار نرخ سرمایه‌گذاری G^{dg}، تعیین می‌نماید، انجام شده است. قیمت لحظه‌ای، میزان سرمایه‌گذاری و درصد ذخیره با دخالت در تعیین مقدار I^{dg} و بدون دخالت نهاد تنظیم مقررات به ترتیب در شکل‌های ۱۲-۱۰ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌ها این‌چنین فرض می‌شود که مقدار I^{dg} در ابتدای هر دوره برای بازه‌های زمانی ۵ ساله تعیین می‌شود. این مقادیر در شکل ۱۳ نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که در نتایج نیز مشخص است، با دخالت نهاد تنظیم مقررات، جهش‌های قیمت کاهش و درصد ذخیره افزایش یافته است، که این اتفاق به دلیل افزایش سرمایه‌گذاری توسط سرمایه‌گذاران افتاده است که در شکل ۱۱ به‌خوبی مشاهده می‌شود. ثابت بودن مقدار I^{dg} در هر بازه زمانی و مسطح شدن قیمت بازار برق به سبب حضور منابع تولید پراکنده (رابطه (۷)) باعث شده در هر بازه زمانی ظرفیتی ثابت وارد شبکه شود، بنابراین مقدار درصد ذخیره روند کاهشی دارد.



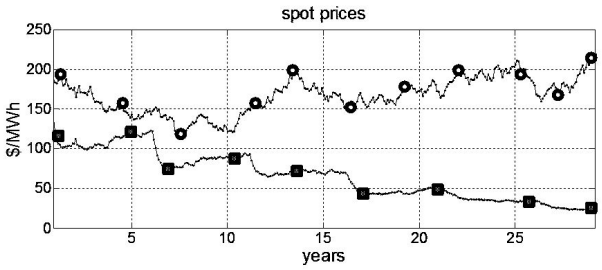
شکل ۷: قیمت لحظه‌ای
: با حضور تولیدات پراکنده
: بدون حضور تولیدات پراکنده



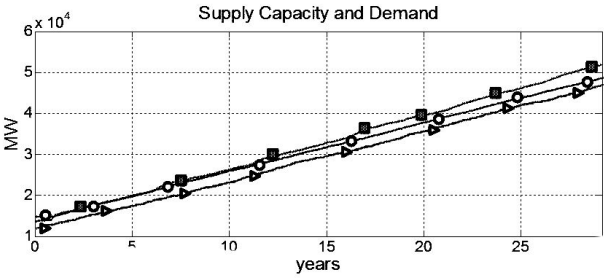
شکل ۸: عرضه و تقاضا
: تقاضا
: عرضه با حضور تولیدات پراکنده
: عرضه بدون حضور تولیدات پراکنده



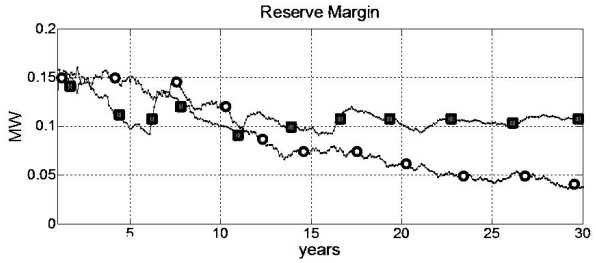
شکل ۹: درصد ذخیره
: با حضور تولیدات پراکنده
: بدون حضور تولیدات پراکنده



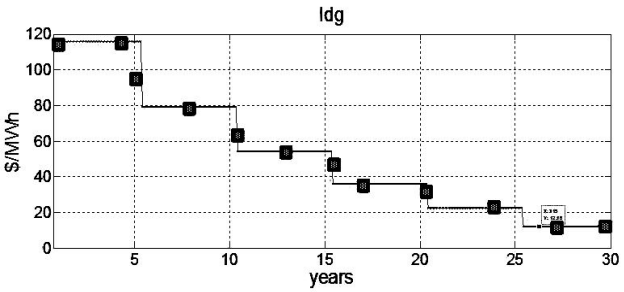
شکل ۱۰: قیمت لحظه‌ای
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} توسط نهاد تنظیم مقررات
: بدون دخالت نهاد تنظیم مقررات شبکه



شکل ۱۱: عرضه و تقاضا
: تقاضا
: عرضه با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} توسط نهاد تنظیم مقررات
: عرضه بدون دخالت نهاد تنظیم مقررات شبکه



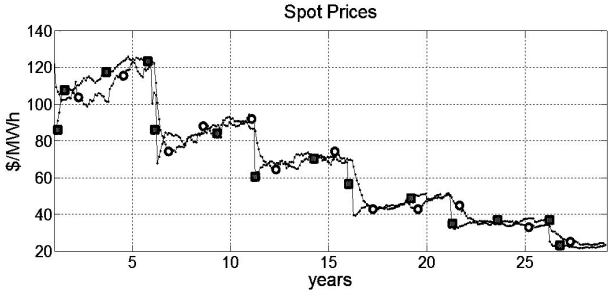
شکل ۱۲: درصد ذخیره
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} توسط نهاد تنظیم مقررات
: بدون دخالت نهاد تنظیم مقررات شبکه



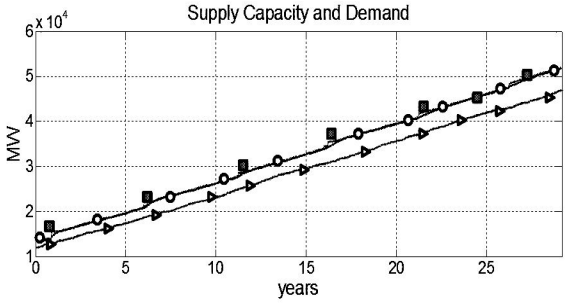
شکل ۱۳: مقدار I^{dg}

با توجه به اینکه هدف مسئله بهینه‌سازی پیش‌رو، حداقل‌سازی مقدار $-\iota_n+PF_n$ بوده و میزان سرمایه‌گذاری جدید در منابع تولید پراکنده برابر با $G^{dg}(m).(D^{dg}(m,m+\tau)-I^{dg}(m,m-t))$ است، درنتیجه میزان سرمایه‌گذاری جدید در حداقل مقدار خود قرار می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر، منحنی درصد ذخیره به سمت حد پایین خود میل می‌کند. همان‌طور که بیان شد، در انتهای هر بازه زمانی، درصد ذخیره کاهش می‌یابد، بنابراین نهاد تنظیم مقررات به‌منظور ایجاد مشوق‌های لازم برای سرمایه‌گذاری باید مقدار I^{dg} را در بازه زمانی بعد کاهش دهد که این موضوع به‌خوبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

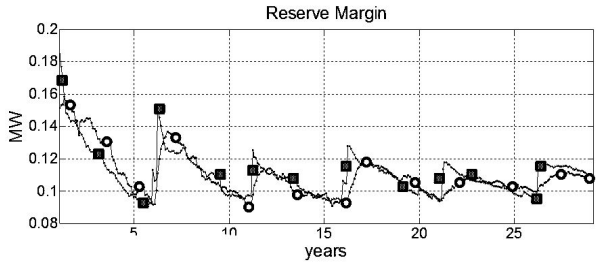
تا اینجا، نهاد تنظیم مقررات تنها با تعیین بهینه متغیر کنترلی I^{dg} در بازار دخالت داشت. برای بررسی چگونگی تغییر دینامیک توسعه، با در نظر گرفتن دخالت نهاد تنظیم مقررات بر روی G^{dg}، شبیه‌سازی برای حالتی که نهاد تنظیم مقررات مقدار I^{dg} و G^{dg} را برای بازه زمانی ۵ ساله تعیین می‌کند، نیز انجام شده است (G^{dg} تابع خطی از I^{dg} در نظر گرفته شده است) و نتایج آن با حالتی که G^{dg} ثابت فرض شده مقایسه شده است. نتایج این بررسی در شکل‌های ۱۷-۱۴ نمایش داده شده است. با بررسی نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که، قیمت‌های لحظه‌ای و سرمایه‌گذاری تغییر چندانی نکرده است. اما در نظر گرفتن I^{dg} و G^{dg} به‌عنوان متغیر کنترلی مسئله سبب افزایش I^{dg} یا به‌عبارت‌دیگر کاهش تسهیلات نهاد تنظیم مقررات شبکه شده است. علت افزایش درصد ذخیره در ابتدای بازه‌هایی که مقدار G^{dg} نیز کنترل می‌شود افزایش نرخ سرمایه‌گذاری به سبب کنترل شدن مقدار G^{dg} است.



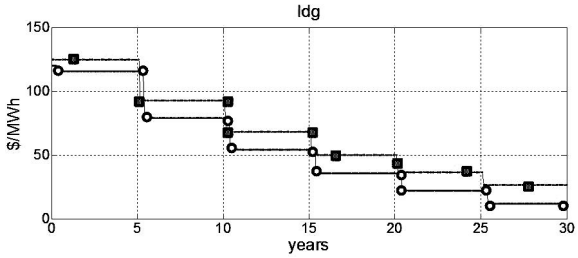
شکل ۱۴: قیمت لحظه‌ای
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} و G^{dg}
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg}



شکل ۱۵: عرضه و تقاضا
: تقاضا
: عرضه با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} و G^{dg}
: عرضه با رویکرد تعیین مقدار I^{dg}



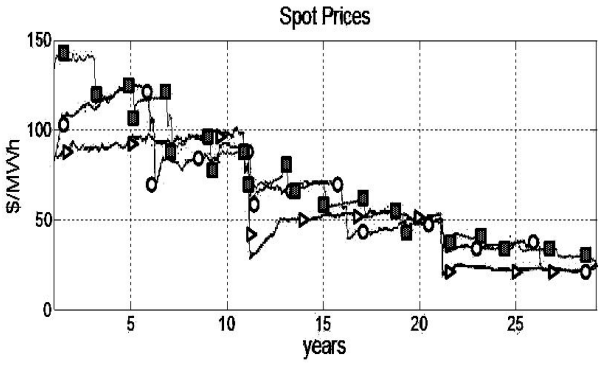
شکل ۱۶: درصد ذخیره
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} و G^{dg}
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg}



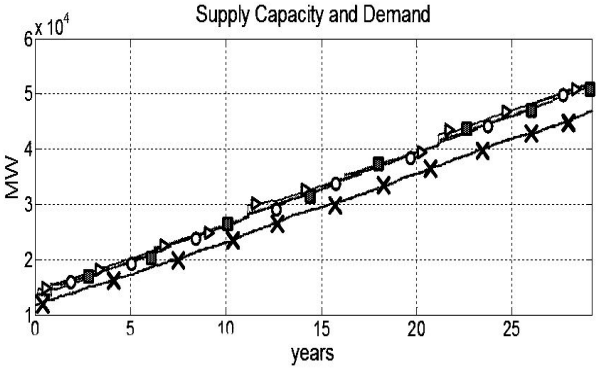
شکل ۱۷: I^{dg}
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg} و G^{dg}
: با رویکرد تعیین مقدار I^{dg}

۵-۴- بررسی اثر بازه‌های زمانی مختلف سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات در بهبود دینامیک توسعه تولید

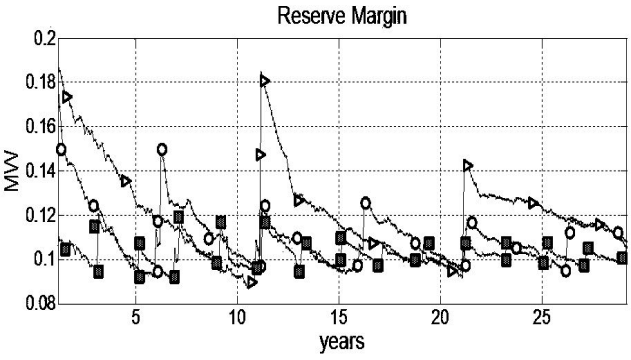
به‌منظور بررسی اثر بازه‌های زمانی متفاوت سیاست‌گذاری نهاد تنظیم مقررات بر مسئله توسعه تولید، مطالعات در سه بازه زمانی ۲ ساله، ۵ ساله و ۱۰ ساله انجام گرفته است. رویکرد نهاد تنظیم مقررات برای بالا بردن قابلیت اطمینان، تعیین مقدار I^{dg} و G^{dg} و اعلام در ابتدای هر بازه است. نتیجه مقایسه برای این سه‌حالت در شکل‌های ۲۱-۱۸ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هر چه بازه زمانی سیاست‌گذاری بزرگ‌تر باشد، میزان I^{dg} در هر بازه به نسبت بازه قبل بیش‌تر افت می‌کند. علت آن است که ثابت بودن I^{dg} و مسطح شدن قیمت در هر بازه زمانی به سبب حضور منابع تولید پراکنده، سبب نزولی شدن درصد ذخیره در آن بازه خواهد شد. بنابراین هر چه بازه زمانی بزرگ‌تر باشد تفاوت درصد ذخیره در ابتدا و انتهای آن بیش‌تر شده، درنتیجه برای اینکه درصد ذخیره در بازه زمانی مذکور در محدوده مجاز قرار گیرد باید مقدار I^{dg} به‌قدری کاهش یابد تا در ابتدای هر بازه سرمایه‌گذاری زیادی انجام شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به‌خوبی نشان می‌دهد که میزان سرمایه‌گذاری و درصد ذخیره در ابتدای بازه‌های زمانی بزرگ‌تر، بیش‌تر بوده است.



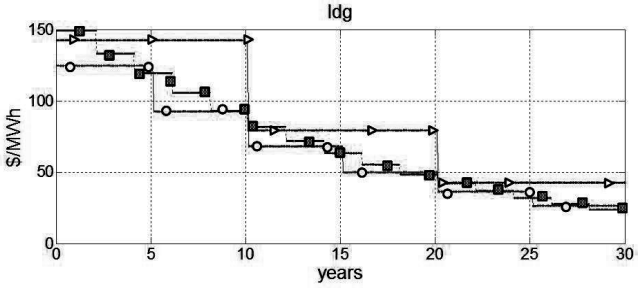
شکل ۱۸: قیمت لحظه‌ای
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۲ ساله
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۵ ساله
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۱۰ ساله



شکل ۱۹: : تقاضا
: عرضه- تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۲ ساله
: عرضه - تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۵ ساله
: عرضه- تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۱۰ ساله



ش‌کل ۲۰: درصد ذخیره
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۲ ساله
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۵ ساله
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۱۰ ساله



شکل ۲۱: I^{dg}

: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۲ ساله

: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۵ ساله

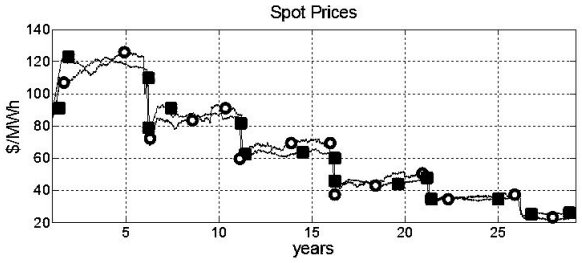
: تعیین I^{dg} و G^{dg} برای بازه‌های زمانی ۱۰ ساله

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که میانگین I^{dg} در بازه‌های زمانی بزرگ‌تر بیش‌تر بوده است. بنابراین نتایج این بخش حاکی از آن است که ثبات در تصمیم‌گیری نهاد تنظیم مقررات که به معنی انتخاب بازه زمانی بزرگ‌تر است نتایج بهتری بر بهبود دینامیک توسعه تولید خواهد گذاشت.

۵-۵- بررسی اثر زودتر اعلام شدن مقدار متغیر کنترلی بر بهبود دینامیک توسعه تولید

شبیه‌سازی‌های بخش‌های قبل، با فرض اعلام متغیرهای کنترلی در ابتدای هر بازه زمانی انجام گرفته‌اند. به‌منظور بررسی اثر زمان اعلام این متغیرها بر دینامیک توسعه تولید، در این قسمت شبیه‌سازی، برای حالتی که نهاد تنظیم مقررات مقادیر I^{dg} و G^{dg} را ۲ سال زودتر از پایان هر بازه زمانی ۵ ساله اعلام می‌کند، با حالتی که این مقادیر در ابتدای هر بازه زمانی اعلام می‌شود مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۲۵-۲۲ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که اعلام I^{dg} در ابتدای هر بازه زمانی سیاست‌گذاری، سبب کاهش میزان سرمایه‌گذاری در پایان آن بازه می‌شود. شکل ۲۴ نشان می‌دهد که در ماه‌های پایانی هر بازه سیاست‌گذاری، مقداری تخطی از قیود ذخیره وجود دارد. علت تخطی از قیود در این ماه‌ها معلوم نبودن مقدار I^{dg} برای تعیین D^{dg} است. بنابراین عدم قطعیت‌های موجود در مقدار D^{dg} سبب کاهش سرمایه‌گذاری در ماه‌های انتهای هر بازه شده است. به‌منظور کاهش این مسئله، نهاد تنظیم مقررات شبکه باید مقدار I^{dg} را چند ماه زودتر از پایان هر بازه اعلام کند.

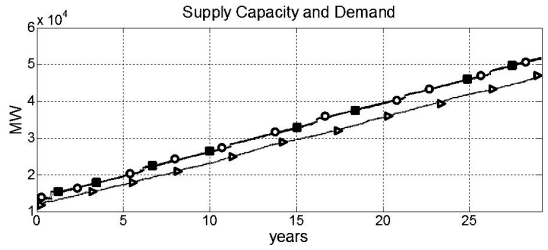
با توجه به شکل‌های ۵، ۸، ۱۱، ۱۵، ۱۹ و ۲۳ می‌توان مشاهده نمود که در تمام موارد موردمطالعه، میزان عرضه از تقاضا بیش‌تر است که به معنی برآورده شدن تقاضا در تمامی موارد است. در ضمن از این نتایج مشخص است که در تمامی مواردی که بهینه‌سازی سیاست نهاد تنظیم مقررات به کار گرفته شده است، مقدار درصد ذخیره حداقل در طول دوره بهینه‌سازی در حدود ۱۰ درصد (برابر با $R_{\min}$ مفروض) است. برای رسیدن به درصد ذخیره بیش‌تر لازم است مقدار $R_{\min}$ بزرگ‌تر انتخاب شود که در این صورت نیز مدل توانمندی محقق کردن آن را خواهد داشت.



شکل ۲۲: قیمت لحظه‌ای

: تعیین I^{dg} و G^{dg} دو سال قبل از پایان هر بازه زمانی

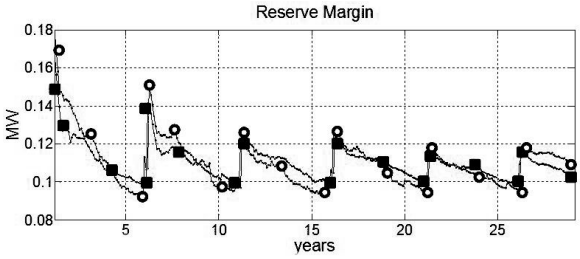
: تعیین I^{dg} و G^{dg} در ابتدای هر بازه زمانی



شکل ۲۳: : منحنی تقاضا

: عرضه - تعیین I^{dg} و G^{dg} دو سال قبل از پایان هر بازه زمانی

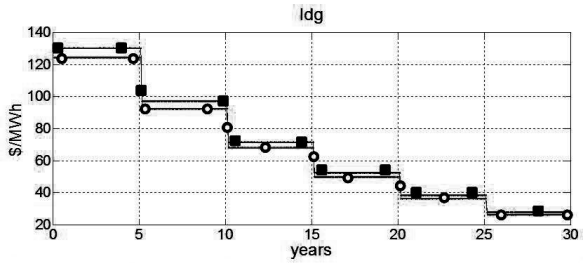
: عرضه - تعیین I^{dg} و G^{dg} در ابتدای هر بازه زمانی



شکل ۲۴: درصد ذخیره

: تعیین I^{dg} و G^{dg} دو سال قبل از پایان هر بازه زمانی

: تعیین I^{dg} و G^{dg} در ابتدای هر بازه زمانی



شکل ۲۵: مقدار I_m^{dg}

: تعیین I^{dg} و G^{dg} دو سال قبل از پایان هر بازه زمانی

: تعیین I^{dg} و G^{dg} در ابتدای هر بازه زمانی

۵-۶- بررسی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی **PSO**

همان‌گونه که پیش‌ازاین نیز بیان شد، به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی در این مقاله، از الگوریتم PSO استفاده شده است. مکان و سرعت حرکت ذرات در الگوریتم PSO به‌صورت زیر است [۲۴]:

$$V_i^k = W_k \times V_i^{k-1} + C_1 \times rand_1 \times (P_{besti} - S_i^{k-1}) + C_2 \times rand_2 \times (G_{bestk} - S_i^{k-1}) \quad (۲۱)$$

$$S_i^k = S_i^{k-1} + V_i^k \quad (۲۲)$$

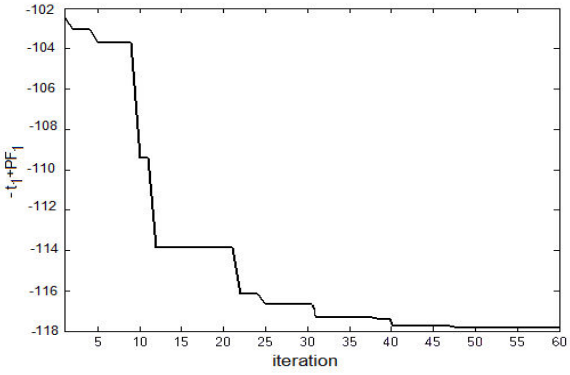
$$W_k = W_{\max} - (\frac{W_{\max} - W_{\min}}{iter_{\max}}) \times k \quad (۲۳)$$

که در این رابطه، V_i^k سرعت ذره i در تکرار k، W_k ثابت اینرسی در تکرار k، C_1 و C_2، ضرایب وزن‌دهی به بهترین پاسخ‌های مشاهده‌شده توسط ذره و جمعیت، S_i^k مکان ذره i در تکرار k، $iter_{max}$ حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم، P_{besti} بهترین مکان مشاهده‌شده توسط ذره i، G_{bestk} بهترین مکان مشاهده‌شده توسط جمعیت تا تکرار k، W_{max} مقدار حداکثر (اولیه) ثابت اینرسی و W_{max}، مقدار حداقل (نهایی) ثابت اینرسی می‌باشند.

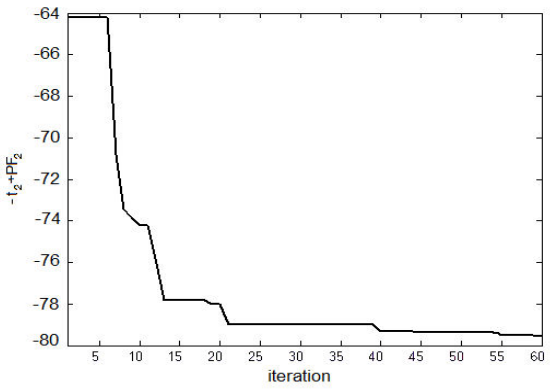
هر ذره در این برنامه بهینه‌سازی این مقاله به معنی یک I^{dg} تفسیر می‌شود. اطلاعات پارامترهای الگوریتم PSO که در این مقاله مورداستفاده قرار گرفته است به شرح جدول ۲ است. برای نمونه، در شکل‌های ۳۱-۲۶ منحنی همگرایی الگوریتم PSO مورداستفاده در زیر بخش (۵-۵) به ترتیب برای ۶ بازه بهینه‌سازی آورده شده است. همان‌گونه که از این منحنی‌ها مشخص است، این الگوریتم برای حداقل کردن مقدار $-t_n + PF_n$ پس از ۶۰ تکرار همگرا شده است.

جدول ۲ : اطلاعات شرایط برنامه‌ریزی

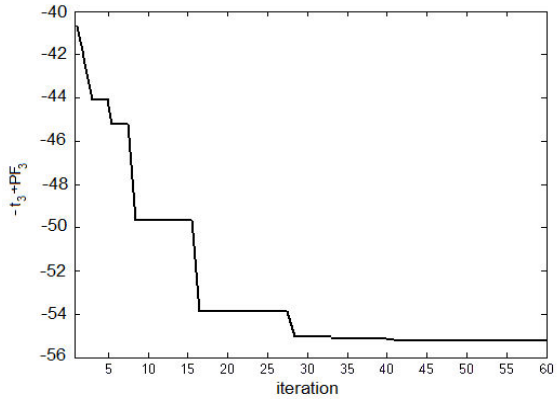
تعداد ذرات	۱۰
$Iter_{max}$	۶۰
W_{max}	۰/۹
W_{min}	۰/۲
C_1	۰/۲
C_2	۰/۲



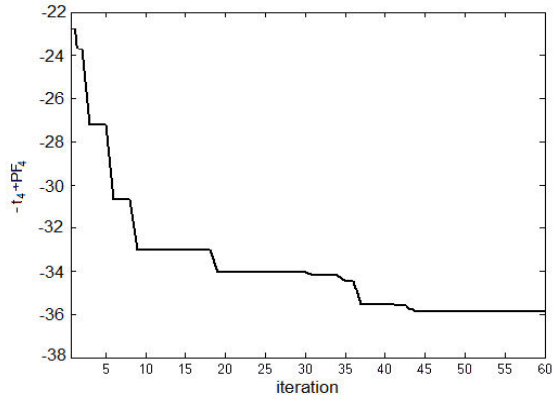
شکل ۲۶: منحنی همگرایی الگوریتم PSO برای بازه ۱



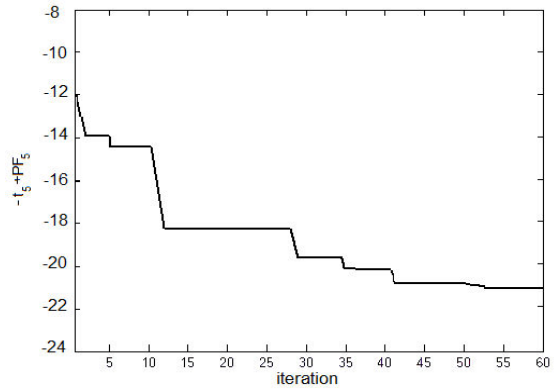
شکل ۲۷: منحنی همگرایی الگوریتم **PSO** برای بازه ۲



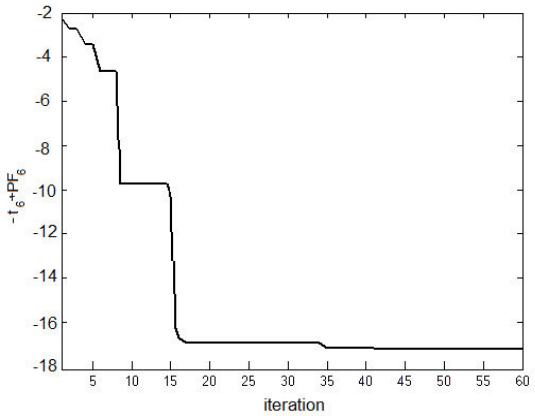
شکل ۲۸: منحنی همگرایی الگوریتم **PSO** برای بازه ۳



شکل ۲۹: منحنی همگرایی الگوریتم **PSO** برای بازه ۴



شکل ۳۰: منحنی همگرایی الگوریتم **PSO** برای بازه ۵



شکل ۳۱: منحنی همگرایی الگوریتم **PSO** برای بازه ۶

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از منابع تولید پراکنده به دلیل تأخیر زمانی کم بین تصمیم به ساخت و به مدار آمدن، می‌تواند نوسانات قیمت بازار و به دنبال آن رونق و رکود در سرمایه‌گذاری را کاهش دهد. نتایج عددی نشان داد، زمانی که هیچ‌گونه نظارت و کنترلی بر سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده وجود نداشته باشد، ورود این منابع باعث کاهش جهش‌های قیمت و درنتیجه کاهش محرک‌های لازم برای سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های دیگر می‌شود. درنتیجه، این موضوع می‌تواند منجر به کاهش درصد ذخیره و قابلیت اطمینان شود. در این مقاله، به‌منظور رفع این مشکل، کنترل سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده از طریق بهینه‌سازی دوره‌ای اعطای تسهیلات به سرمایه‌گذاران پیشنهاد شده است. بهینه‌سازی این سیاست، باعث بهبود قابلیت اطمینان و کاهش دوره‌های رونق و رکود در سرمایه‌گذاری تولید می‌شود. نحوه پیاده‌سازی این سیاست نیز می‌تواند باعث تغییراتی در دینامیک سرمایه‌گذاری در تولید شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که بازه‌های زمانی طولانی‌تر برای تثبیت سیاست اعطای تسهیلات، موجب سرمایه‌گذاری بیش‌تر شده و درصد ذخیره را در این شرایط افزایش می‌دهد. به‌علاوه نشان داده شد که اعلام شدن سیاست‌های اعطای تسهیلات زودتر از زمان اعمال آن‌ها، باعث تصمیم‌گیری زودتر به سرمایه‌گذاری شده و تأثیری بهتر بر روی قابلیت اطمینان سیستم خواهد داشت.

مراجع

[1] M. Hasani, and S.H. Hosseini, "Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 277-293, 2011.

[2] M. Hasani-Marzooni, and S.H. Hosseini, "Dynamic model for market-based capacity investment decision considering stochastic characteristic of wind power," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2205-2219, 2011.

[3] T. Barforoushi, M.P. Moghaddam, M.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 Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1978-1986, 2010.

[4] A. Ford, "Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California," *Energy Policy*, vol. 29, no. 11, pp. 847-869, 2001.

[5] P. Visudhiphan, P. Skantze, and M. Ilic, "Dynamic investment in electricity markets and its impact on system reliability," *Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, 2001.

[6] A. Ford, "Cycles in competitive electricity markets: a simulation study of the western united states," *Energy Policy*, vol. 27, no. 11, pp. 637-658, 1999.

[7] L.J. De Vries, "Generation adequacy: helping the market do its job," *Energy Policy*, vol. 15, no. 1, pp. 20-35, 2007.

[8] S. Stoft, *Power System Economics*, IEEE Press & Wiley Interscience, 2002.

[9] K. Neuhoff, and L.J. De Vries, "Insufficient incentives for investment in electricity generation," *Utilities Policy*, vol. 12, no. 4, pp. 253-267, 2004.

[10] S. Arango, and E. Larsen, "Cycles in deregulated electricity markets: empirical evidence from two decades," *Energy Policy*, vol. 39, no. 5, pp. 2457-2466, 2011.

[11] M. Assili, M.H. Javidi, and R. Ghazi, "An improved mechanism for capacity payment based on system dynamics modeling for investment planning in competitive electricity environment," *Energy Policy*, vol. 36, no. 10, pp. 3703-3713, 2008.

[12] L.J. Vries, and R.A. Hakvoort, "The question of generation adequacy in liberalized electricity markets," *Proceedings of the 26th IAEE Annual Conference*, 2003.

[13] F. Olsina, R. Pringles, C. Larisson, and F. Garcés, "Reliability payments to generation capacity in electricity markets," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 211-224, 2014.

[14] M. Hasani, and S.H. Hosseini, "Dynamic analyses of various investment and regional capacity assignment in Iranian electricity market in electricity market," *Energy Policy*, vol. 56, pp. 271-284, 2013.

[15] R. Billinton, and R. Karki, "Capacity expansion of small isolated power systems using PV and wind energy using PV and wind energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 892- 897, 2001.

[16] P. Skantze, A. Gubina, and M. Ilic, *Bid-based Stochastic Model for Electricity Prices: The Impact of Fundamental Drivers on Market Dynamics*, Technical Report MIT EL 00-004, Energy Laboratory Publications, Massachusetts Institute of Technology, Nov 2000.

[17] M. Llic, and P. Skantze, "Investment dynamics and long term price trends in competitive electricity markets," *Proceedings of the IFAC Modeling and Control of Economic Systems*, 2001.

[18] A. Gubina, P. Skantze, and M. Ilic, *Dynamic Investment in Electricity Markets and its Impact on System Reliability*, Technical Report MIT 01-012 WP, Energy Laboratory Publications, Massachusetts Institute of Technology, July 1, 2001.

[19] J. Lopez, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities," *Electric Power System Research*, vol. 77, no. 9, pp. 1189- 1203, 2007.

[20] PJM, *PJM Daily Energy Market Bid Data*, [Online] Available online at: http://www.pjm.com/ markets-and

operations/energy/real time /historical-bid-data/unit bid.aspx, 2011.
[21] R. Weron, *Modeling and Forecasting Electricity Loads and Prices*, John Wiley and Sons, 2006.
[22] X. Wang, and J.R. McDonald, *Modern Power System Planning*, McGraw-Hill Publishing Co., 1994.
[23] H. Seifi, and M.S. Sepasian, *Electric Power System Planning, Issues, Algorithms and Solutions*, Springer, 2011.
[24] J. Kennedy, and R.C. Eberhart, "Particle swarm optimization," *proceeding of the 1997 International Conference on Evolutionary Computation, IEEE service*.

زیرنویس‌ها

1 Energy only market
2 Boom-bust cycle
3 Capacity mechanisms
4 Particle swarm optimization (PSO)
5 Seasonal behavior
6 Drift