برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های بادی در بازارهای برق در حضور شرکت‌های تولید راهبردی و تقاضای کشش‌پذیر

مهسا زمانی[۱]، کارشناس ارشد؛ تقی بارفروشی[۲]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل - ایران - mahsa.zamani71@gmail.com
۲- گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل - ایران - barforoshi@nit.ac.ir

چکیده: در این مقاله چهارچوبی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های بادی در بازارهای برق رقابتی ناکامل و در حضور شرکت‌های راهبردی با درنظرگرفتن تقاضای کشش‌پذیر ارائه می‌شود. در چهارچوب پیشنهادی، هدف اصلی بررسی قابلیت سودآوری نیروگاه‌های بادی در بازارهایی با ویژگی انحصاری چندجانبه می‌باشد که در آن مصرف‌کنندگان نیز دارای کشش‌پذیری مناسبی در برابر قیمت می‌باشند. مسئله برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی در قالب یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود که در سطح بالا تصمیمات سرمایه‌گذاری با هدف بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذار اتخاذ شده و سطح پایین شامل مسئله تسویه بازار است که با توجه به ویژگی انحصار چندجانبه بازار برق به کمک مدل تعادل کورنات (Cournot) و با هدف بیشینه‌سازی سود هم‌زمان شرکت‌های راهبردی مقید به تعادل عرضه و تقاضا حل می‌شود. عدم‌قطعیت در تولید منابع بادی توسط مجموعه‌ای از سناریوها مدل می‌شود. مسئله بهینه‌سازی دوسطحی در سطح بالا به کمک الگوریتم ژنتیک و در سطح پایین و به‌ازای تحقق‌های مختلف سناریوهای توان بادی با استفاده از الگوریتم ریاضی حل می‌شود. کارایی چهارچوب پیشنهادی برروی یک شبکه قدرت ۳شینه نمونه و شبکه IEEE سی‌شینه با انجام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های لازم نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انرژی بادی، تقاضای کشش‌پذیر، تسویه بازار، مدل کورنات، نظریه بازی‌ها

Wind Power Investment in Electricity Markets Consisting of Strategic Producers and Elastic Demand

Mahsa Zamani [1], MSc; Taghi Barforoushi [2], Assistant Professor

1-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: mahsa.zamani71@gmail.com
2- High Voltage Substation Research Group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: barfroshi@nit.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel framework is proposed to solve wind power investment in incomplete electricity markets in the presence of strategic companies and considering elastic demand. In the proposed framework, the main objective is to investigate the profitability of wind units in oligopolistic power markets where consumers has good elasticity versus electricity price. The considered investment problem is represented as a bilevel model where investment decisions are taken at upper level with the aim of maximizing investment profit, and market clearing problem in the lower level. According to oligopolistic feature of market, Cournot game is applied for modeling strategic interactions among market players. Thus, market equilibrium is determined by maximizing generation companies' (GENCOs) profit considering balance of supply and demand. Uncertainty of wind power production is modeled with a set of scenarios. Upper problem are solved using genetic algorithm, while the lower level problem is solved by mathematical algorithm for various scenarios of wind power. The proposed model is examined on a three-bus network and on IEEE 30 bus network.

Keywords: Wind energy, elastic demand, market clearing, Cournot model, game theory.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۴
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴ و ۱۳۹۶/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰
نام نویسنده مسئول: تقی بارفروشی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل – خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز روزافزون به استفاده از انرژی از یک‌سو و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی و کاهش این منابع از سوی‌دیگر، باعث افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی شده‌است. امروزه انرژی باد یکی از منابع مهم تولید انرژی الکتریکی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در بسیاری از کشورها محسوب می‌گردد که جایگزین نیروگاه‌های مرسوم فسیلی شده و درنتیجه نفوذ انرژی بادی در بخش تولید انرژی الکتریکی به شدت افزایش یافته‌است. تکنولوژی‌های ساخت توربین‌های بادی در چند سال اخیر پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌است. به‌گونه‌ای که امروزه قابل قیاس با نیروگاه‌های بزرگ حرارتی می‌باشند و پیش‌بینی می‌گردد که این نیروگاه‌ها نقش قابل‌توجهی در نسل‌های بعدی تولید در سیستم قدرت داشته باشند. در بسیاری از کشورها انرژی باد سهم قابل‌توجهی از کل تولید انرژی را برعهده دارد و در کشورهایی که این انرژی هنوز نتوانسته‌است جایگاه خود را در صنعت برق پیدا کند، با ایجاد سیاست‌های تشویقی هم‌چون سند استاندارد انرژی‌های تجدیدپذیر مانند تعرفه‌های ثابت در آلمان، دانمارک و اسپانیا باعث پیشرفت سریع این انرژی در این کشورها گردیده‌است [۱]. از این‌رو مسئله برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

ازطرفی در چند دهه اخیر بازارهای برق در بسیاری از کشورها با تجدیدساختار همراه شده و از حالت سنتی یک‌پارچه عمودی به ساختارهایی رقابتی و عموماً دارای انحصار چندجانبه تبدیل شده‌اند. هدف از این تغییرات، ورود رقابت در بازار برق و فراهم‌کردن مشوق برای عملکرد بهتر صنعت برق و درنهایت کاهش قیمت برق بوده‌است [۲]. در بازارهای رقابتی هدف شرکت‌های تولید برق بیشینه‌سازی سود آن‌هاست و قیمت‌ها توسط عرضه‌کنندگان، مصرف‌کنندگان، با ملاحظه محدودیت‌های شبکه انتقال تعیین می‌شوند [۳]. حالت ایده‌آل برای بازار، بازاری با رقابت کامل است که در آن شرکت‌کنندگان هزینه حدی خود را به بازار پیشنهاد می‌دهند [۲]. به دلیل تعداد محدود مشارکت کنندگان بازار برق، دستیابی به بازار برق رقابت کامل دشوار است. بنابراین ماهیت صنعت برق و پیشینه آن نشان می‌دهد که مدل انحصاری چندجانبه نمایش بهتری از بازار برق را ارائه می‌دهد. ازاین رو، ضروری است تحلیل بازارهای برق براساس مدل‌های رقابت ناکامل انجام شود [۴-۳]. نظریه بازی‌ها برای مدل‌سازی بازارهای رقابت ناکامل مورد استفاده قرارگرفته‌اند. یکی از این مدل‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها، مدل کورنات است که در آن رفتار راهبردی بازیگران (تولیدکنندگان) برای دست‌کاری قیمت‌ها و افزایش سود تحلیل می‌شود. این مدل قادر به تحلیل موقعیت‌هایی است که در آن‌ها مولدها از طریق احتکار ظرفیت، به‌صورت یک جانبه تصمیم به خودداری از عرضه به بازار می‌گیرند و از این طریق موجب افزایش قیمت می‌شوند. علاوه‌براین، مدل کورنات منجر به یک بیان تحلیلی ساده برای قیمت بازار می‌شود [۵]. مراجع [۷-۶] به بررسی مثال‌های ساده‌ای از این مدل با درنظرگرفتن خط انتقال و قیود آن پرداخته‌اند.

مطالعات گسترده‌ای در حوزه برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی در سیستم‌های قدرت صورت گرفته‌است. در [۸] مدلی دوسطحی به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی در بازار برق از منظر یک سرمایه‌گذار ارائه شده‌است که در آن تقاضای پیش‌بینی‌شده بازار فاقد کشش‌پذیری در برابر قیمت می‌باشد و نیز شرکت‌های تولید نقش گیرنده قیمت را در بازار کوتاه‌مدت دارند. در [۹] از مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مقید به ریسک برای اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری بهینه در واحدهای تولید بادی در طول یک افق چندساله با ملاحظه عدم‌قطعیت در هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدها استفاده شده‌است. در [۱۰] برنامه‌ریزی توسعه هم‌زمان تولید و انتقال[۱] در بازار برق تجدید ساختاریافته و در حضور منابع بادی ارائه شده‌است. مسئله ارائه‌شده یک مسئله برنامه‌ریزی بهینه‌سازی غیرخطی صحیح آمیخته مقیدی است که با استفاده از روش اجتماع ذرات[۲] حل‌شده است. در [۱۱] یک چهارچوب تصادفی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با تولید باد ارائه‌شده که یک مدل چندهدفه چندمرحله‌ای را توصیف می‌کند. اهداف مطرح‌شده کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری انتقال، بیشینه‌سازی سرمایه‌گذاری خصوصی و قابلیت اطمینان می‌باشند. در این مرجع از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب[۳] مبتنی بر یک پخش بار بهینه تصادفی جهت نشان‌دادن مصالحه بین مقادیر قابلیت اطمینان، جذب سرمایه‌گذاری‌های خصوصی و هزینه‌های نصب برای راه‌حل‌های مختلف به‌کار گرفته شده‌است. در [۱۲] استراتژی‌های سرمایه‌گذاری برای تولید توان بادی با فرض انعطاف‌پذیربودن ظرفیت تولید و منابع سرمایه‌گذاری توسعه یافته‌است. مسئله سرمایه‌گذاری به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی صحیح آمیخته با قیودی مشخصی فرمول‌بندی شده‌است. در این مرجع از روش رتبه‌بندی و غربال‌گری برای نشان‌دادن تصمیمات سرمایه‌گذاری استفاده شده‌است. در [۱۳] شیوه استفاده از تعرفه به‌عنوان مشوق سرمایه‌گذاری جهت توسعه تولید انرژی بادی در یک محیط سنتی نشان داده شده‌است. این مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی آمیخته-صحیح و غیرخطی فرمول‌بندی‌شده و برای بهینه‌سازی ظرفیت برای هر یک از مدل‌های توربین بادی حل شده‌است. تابع هدف در این مسئله بهینه‌سازی ظرفیت‌های تولید کل مربوط به توان بادی در افق زمانی معین می‌باشد. در [۱۴] مسئله سرمایه‌گذاری در انرژی بادی و تقویت خطوط انتقال به‌طور هم‌زمان حل شده‌اند که در آن کمینه‌کردن پرداختی‌های مصرف‌کننده‌ها و هزینه‌های سرمایه‌گذاری از منظر بهره‌بردار مستقل سیستم موردتوجه قرارگرفته‌است. برای مدل‌سازی مسئله از یک مدل دوسطحی استفاده شده‌است که در آن هدف سطح بالا کمینه‌کردن کل هزینه‌ها شامل هزینه بهره‌برداری و هزینه سرمایه‌گذاری بوده و در سطح پایین تسویه بازار مدل شده‌است. ازآنجایی‌که سرمایه‌گذاری در تأسیسات توان بادی مستلزم درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در تولید توان بادی می‌باشد، جهت مدل‌سازی مناسب چنین عدم‌قطعیتی، در [۱۵] به‌صورت مجموعه‌ای از سناریوها در نظر گرفته شده‌است و مسئله سرمایه‌گذاری به‌صورت برنامه‌ریزی ریاضی با قیود

تعادل فرمول‌بندی شده‌است. در [۱۶] طرح‌های بازار از منظر سرمایه‌گذار تجاری و بهره‌بردار سیستم انتقال در بازارهای رقابتی با رقابت کامل و با انحصار چندجانبه مقایسه شده‌است. این طرح‌ها ازطریق یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی نشان داده‌شده‌اند که در آن‌ها سرمایه‌گذار و بهره‌بردار سیستم انتقال تصمیمات سرمایه‌گذاری انتقال را در سطح بالا اتخاذ نموده، و در سطح پایین تولیدکنندگان، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در تولید را در شرایط توان‌های بادی متغیر تعیین می‌کنند. در [۱۷] روشی برای مطالعه تأثیر ادغام توان بادی در برنامه‌ریزی توسعه انتقال ارائه شده‌است. برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه انتقال از الگوریتم تجزیه بندر و برای شبیه‌سازی تولید توان بادی، تقاضای بار و عدم‌قطعیت‌های مربوط به خروجی‌های اجزای سیستم روش مونت کارلو به‌کارگرفته شده‌اند. در مرجع [۱۸] مسئله برنامه‌ریزی تولید توام با انرژی تجدیدپذیر باد با رویکرد بهینه‌سازی استوار مدل می‌شود و در [۱۹] مسئله بهره‌برداری هماهنگ مزارع بادی و واحدهای تلمبه‌ای با برنامه‌ریزی تصادفی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

براساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده از تحقیقات پیشین ملاحظه شد که در برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید بادی از دیدگاه سرمایه‌گذاران، تأثیر مدل بازار کوتاه‌مدت به لحاظ انحصاری چندجانبه لحاظ نشده‌است. لذا در این تحقیق چهارچوبی ارائه می‌شود تا بتوان قابلیت سودآوری سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های بادی را در بازاری با حضور تولیدکنندگان راهبردی مالک واحدهای حرارتی موردارزیابی قرار داد. شایان ذکر است مرجع [۱۶] که از مراجع جدید در ارتباط با مطالعه تأثیر رفتار استراتژیک بازیگران در سرمایه‌گذاری بادی و شبکه انتقال می‌باشد، در مدل‌سازی بازار کوتاه‌مدت از متغیرهای حدسی قیمت استفاده نموده که این پارامترها از قبل مشخص بوده و به‌عنوان اطلاعات ورودی مسئله برنامه‌ریزی درنظر گرفته‌شده‌اند. همچنین باتوجه به گستردگی و پیچیدگی مدل ارائه‌شده در آن مرجع، قابلیت پیاده‌سازی آن در شبکه های بزرگ از مشکلات آن گزارش شده‌است. لیکن در مدل پیشنهادی در این مقاله، مسئله تسویه بازار که در سطح پایین حل می‌شود، یک مسئله بهینه‌سازی هم‌زمان سود همه تولیدکنندگان استراتژیک می‌باشد که با فرض خطی‌بودن منحنی تقاضا به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مدل می‌شود. کارایی چهارچوب پیشنهادی برروی یک شبکه قدرت سه‌شینه و شبکه IEEE سی‌شینه با انجام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های لازم مورد آزمون قرار می‌گیرد. در ادامه مقاله در بخش ۲ چهارچوب پیشنهادی و فرمول‌بندی ریاضی آن تشریح می‌شود. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی بیان‌شده و در بخش ۴ مدل ارائه‌شده روی شبکه قدرت نمونه سه‌شینه و شبکه IEEE سی‌شینه تحلیل می‌شود. در بخش انتهایی کار، نتیجه‌گیری ارائه شده‌است.

۲- معرفی چهارچوب پیشنهادی

شکل ۱ چهارچوب پیشنهادی را برای حل مسئله سرمایه‌گذاری نشان می‌دهد. بلوک ورودی شامل اطلاعات سیستم قدرت ازجمله مکان و مشخصات نیروگاه‌های موجود، مکان‌های کاندیدا جهت نصب واحد بادی و شدت باد در آن‌ها، مشخصات منحنی تقاضا و دوره برنامه‌ریزی است. بلوک اصلی چهارچوب پیشنهادی شامل یک مدل دوسطحی است که در آن مسائل مربوط به هریک از سطوح نشان داده شده‌است. مسئله سطح بالا شامل مسئله سرمایه‌گذاری با هدف بیشینه‌نمودن سود سرمایه‌گذار به همراه محدودیت‌های حاکم در دوره برنامه‌ریزی است. خروجی مسئله سطح بالا تصمیمات سرمایه‌گذاری واحدهای بادی می‌باشد. مسئله سطح پایین تسویه بازار با انحصار چندجانبه را نشان می‌دهد که در آن هدف شرکت‌های راهبردی بیشینه‌سازی سود آن‌ها می‌باشد و شامل محدودیت‌های واحدهای تولید، تعادل توان در هر شین، معادلات پخش بار مستقیم[۴] و توان عبوری از خطوط انتقال است. خروجی مسئله تسویه بازار قیمت‌های مکانی است که برای اتخاذ تصمیمات در اختیار مسئله سطح بالا قرار می‌گیرد. بلوک خروجی مبین نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید انجام‌شده ازجمله زمان، مکان و ظرفیت نصب واحدهای بادی و دیگر اطلاعات موردنیاز از قبیل رفاه اجتماعی، مازاد خالص مصرف‌کنندگان و ... می‌باشد.

۳- فرمول‌بندی ریاضی

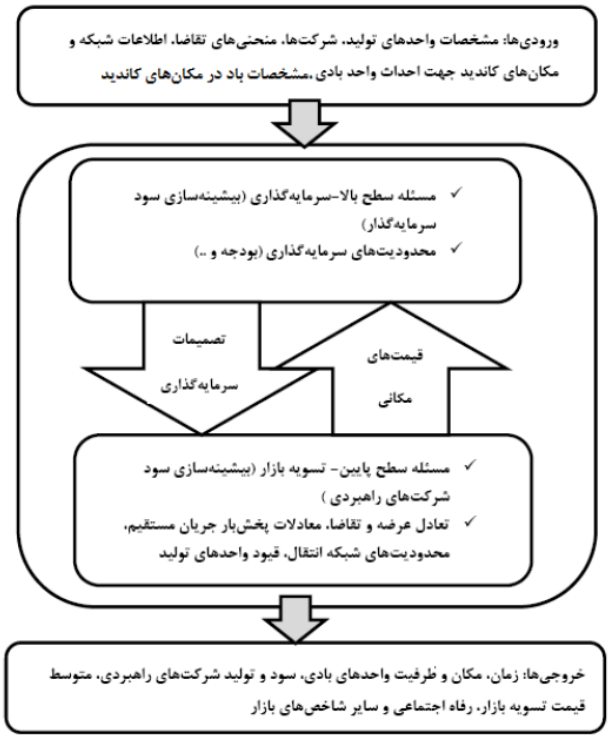
روابط (۱) تا (۲۴) مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی دوسطحی را از دید یک سرمایه‌گذار توان بادی در یک دوره زمانی معین نشان می‌دهد. در این بخش مدل ریاضی چهارچوب پیشنهادی تشریح می‌شود.

۳-۱- مسئله سطح بالا-مسئله سرمایه‌گذاری

مسئله بهینه‌سازی سطح بالا در روابط (۱) تا (۶) نشان داده شده‌است که در آن هدف حداکثرسازی سود می‌باشد. رابطه (۱) سود سرمایه‌گذار واحد بادی را در طول دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. بخش اول رابطه (۱) درآمد سرمایه‌گذار را در افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. عبارت $\sum_{n=1}^{N} \pi_{nwt} \cdot x_{nwt}$ درآمد حاصل از فروش توان بادی در هر سناریو و بلوک زمانی می‌باشد که از حاصل ضرب قیمت‌های مکانی به‌دست‌آمده از تسویه بازار در مسئله سطح پایین (π_{nwt}) در توان بادی مصرف‌شده در هر شین (x_{nwt}) به‌دست می‌آید. برای دست‌یابی به مقادیر موردانتظار، درآمدها در هر سناریو که برای بیان عدم‌قطعیت توان بادی به‌کار گرفته‌شده در احتمال آن (T_w) ضرب‌شده و عبارات حاصل با هم جمع می‌شوند. N_t تعداد ساعات را در هر بلوک زمانی نشان می‌دهد که با ضرب آن‌ها در درآمد به‌دست‌آمده در هر بلوک و جمع عبارات حاصل، درآمد سالیانه حاصل از فروش محصولات سرمایه‌گذار بادی در بازار حاصل می‌شود. Ψ_{wt} مجموعه سناریوهای واقع در بلوک زمانی t را نشان می‌دهد. در واقع این بلوک‌های زمانی به‌منظور تقسیم‌بندی یک‌سال به چند بازه زمانی خاص به‌کار گرفته‌شده‌اند.

بخش دوم تابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری ناشی از نصب واحد بادی در یک سال را نشان می‌دهد. X_n ظرفیت توان بادی نصب‌شده در شین n و $\tilde{C}_n$ هزینه معادل یکنواخت سالیانه سرمایه‌گذاری توان بادی در باس

nمی‌باشد که با دراختیارداشتن هزینه سرمایه‌گذاری واحد بادی در شین n و با به‌کارگیری نرخ بهره تعیین می‌شود. رابطه (۲) ضریب بازیابی سرمایه را نشان می‌دهد که در آن r نرخ بهره و el عمر تجهیزات برحسب سال است و ازطریق ضرب هزینه‌های سالیانه توان بادی در ظرفیت نصب‌شده در هر شین و مجموع آن‌ها هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه به‌دست می‌آید. حاصل‌ضرب این ضریب در هزینه سرمایه‌گذاری واحد بادی هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه را به‌دست می‌دهد. رابطه (۳) میزان ظرفیت توان بادی نصب‌شده در شین n را نشان می‌دهد. این رابطه بیان می‌کند که ظرفیت بادی نصب‌شده می‌تواند مقادیر مشخصی از پله‌های در نظرگرفته‌شده را بپذیرد. پارامتر ρ_n^l مقدار توان بادی که در بلوک l از شین n می‌تواند نصب شود را نشان می‌دهد. u_n^l یک متغیر باینری است که تنها در یک بلوک "۱" و در سایر بلوک‌ها "۰" می‌باشد که در رابطه (۴) آمده‌است.



شکل ۱: چهارچوب پیشنهادی

روابط (۳) و (۴) گسسته‌بودن متغیر X_n را نشان داده و اینکه تنها یکی از مقادیر ρ_n^l می‌تواند انتخاب شود. به‌عبارت‌دیگر استفاده از این دو رابطه به این دلیل است که از بین مقادیر درنظرگرفته‌شده از توان بادی جهت نصب فقط یک مورد جهت سرمایه‌گذاری انتخاب شود و در بین گزینه‌های موجود جهت سرمایه‌گذاری پله صفر مگاواتی نیز درنظر گرفته شده‌است. به‌عنوان‌مثال اگر گزینه‌های سرمایه‌گذاری در واحدهای بادی، به‌ترتیب صفر مگاوات، ۵۰ مگاوات و ۱۰۰ مگاوات باشد آنگاه رابطه (۳) بیان می‌دارد که از بین گزینه‌های اشاره‌شده تنها یکی از آنها (یعنی صفر، ۵۰ یا ۱۰۰ مگاوات) برای سرمایه‌گذاری انتخاب خواهدشد. رابطه (۵) ظرفیت توان بادی نصب‌شده در هر شین را محدود می‌کند و رابطه (۶) محدودیت بودجه سرمایه‌گذاری در افق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. X_n^{max} و C_n^{max} به‌ترتیب بیشینه ظرفیت و بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشند. قید (۶) منجر به تعریف محدودیت برای مجموع ظرفیت‌های نصب‌شده در تمام شین‌ها می‌شود.

$$Max \sum_{t=1}^{T} N_t \sum_{w\epsilon\psi_{wt}} T_w \cdot \left[\sum_{n=1}^{N} \pi_{nwt} \cdot x_{nwt}\right] - \sum_{n=1}^{N} \tilde{C}_n X_n \quad (۱)$$

$$k = \frac{r(1+r)^{el}}{(1+r)^{el}-1} \quad (۲)$$

$$X_n = \sum_l u_n^l \rho_n^l \quad \forall n \quad (۳)$$

$$\sum_l u_n^l = 1 \,, \forall \mathrm{n}, u_n^l = \{0,1\} \,\forall \mathrm{n}, \forall \mathrm{l} \quad (۴)$$

$$0 \le X_n \le X_n^{max} \quad (۵)$$

$$0 \le C_n . X_n \le C_n^{max} \quad (۶)$$

$$\pi_{nwt} = \alpha_n - \beta_n . q_{nwt} \qquad \forall n, \forall w, \forall t \quad (۷)$$

$$\sum_{g\in\psi_{fg}} \sum_{b\epsilon\psi_{gb}} \sum_n (C_{fgb} . x_{fgbnwt}) - \sum_n (\alpha_n - \beta_n . q_{nwt}) . P_{fnwt} \qquad \forall w, \forall t, \forall f \quad (۸)$$

$$0 \le \sum_{n=1}^{N} x_{fgbnwt} < \le k_{fgb} \quad \forall f, \forall g, \forall b, \forall w, \forall t \quad (۹)$$

$$\sum_f \sum_{g\in\psi_{fg}} \sum_{b\epsilon\psi_{gb}} \sum_n (C_{fgb} . x_{fgbnwt} + 0.5 \sum_n \sum_f \beta_n . (P_{fnwt})^2 - \sum_n (\alpha_n . q_{nwt} - 0.5\beta_n . (q_{nwt})^2) \quad \forall w, \forall t \quad (۱۰)$$

$$P_{fnwt} = \sum_{g\epsilon\psi_{fg}} \sum_{b\epsilon\psi_{gb}} x_{fgbnwt} \qquad \forall f, \forall n, \forall w, \forall t \quad (۱۱)$$

$$q_{nwt} = \sum_f \sum_g \sum_b x_{fgbnwt} \qquad \forall n, \forall w, \forall t \quad (۱۲)$$

$$P_{fgwt} = \sum_b \sum_n x_{fgbnwt} \qquad \forall f, \forall g, \forall w, \forall t \quad (۱۳)$$

$$P_{fg,min} \le P_{fgwt} \le P_{fg,max} \quad \forall f, \forall g, \forall w, \forall t \quad (۱۴)$$

$$f_{njwt} = S_{base} . \frac{(\theta_{nwt} - \theta_{jwt})}{x_{nj}} \quad (\mathrm{n,j}) \in \psi_k \quad \forall w, \forall t \quad (۱۵)$$

$$|\theta_{nwt}| \le \pi \qquad \forall n, n \ne ref, \forall w, \forall t \quad (۱۶)$$

$$\theta_{nwt} = 0 \qquad \forall n, \forall w, \forall t \quad (۱۷)$$

$$|f_{njwt}| \le f_{njwt}^{max} \quad (۱۸)$$

$$g_{nwt} = \sum_{f}\sum_{g}\sum_{b} x_{fgbnwt} \quad \forall n, \forall w, \forall t \tag{۱۹}$$

$$g_{nwt} + \sum_{j} f_{njwt} = q_{nwt} \quad (\mathrm{n,j}) \in \psi_k, \forall n, \forall w, \forall t \tag{۲۰}$$

$$k_{nw} = \frac{pw_{nwt}}{x_n} \qquad n \in \psi_{nw}, \forall w, \forall t \tag{۲۱}$$

$$\sum_{n=1}^{N} x_{nwt} = pw_{nwt} \quad \forall w, \forall t \tag{۲۲}$$

$$q_{nwt} = \sum_{f}\sum_{g}\sum_{b} x_{fgbnwt} + x_{nwt} \quad \forall n, \forall w, \forall t \tag{۲۳}$$

$$\begin{aligned} g_{nwt} &= \sum_{f}\sum_{g}\sum_{b} x_{fgbnwt} \quad n \notin \psi_{nw}, \forall w, \forall t \\ g_{nwt} &= \sum_{f}\sum_{g}\sum_{b} x_{fgbnwt} + pw_{nwt} \quad n \in \psi_{nw}, \forall w, \forall t \end{aligned} \tag{۲۴}$$

۳-۲- مسئله سطح پایین- تسویه بازار

در مسئله سطح پایین تسویه بازار انجام می‌شود و با توجه به وجود شرکتهای تولید راهبردی، از مدل کورنات[۵] برای مدل‌سازی رفتار راهبردی بازیگران استفاده می‌شود. در ادامه فرمول‌های ریاضی مربوط به مسئله سطح پایین تشریح می‌گردد.

۳-۲-۱-مدل بازی کورنات

در این مسئله فرض‌شده تعدادی شرکت موجود است که هر یک از آن‌ها صاحب تعدادی واحد تولید حرارتی می‌باشند. هر یک از واحدها قیمت‌های موردنظر خود را به‌صورت پله‌ای پیشنهاد می‌دهند که معادل هزینه نهایی آن‌ها می‌باشد و رفتار راهبردی شرکت‌ها ازطریق کاهش عرضه مدل‌سازی می‌شود. در این مقاله فرض‌شده که قیمت‌های پیشنهادی توسط واحدهای بادی صفر است و درآمد آنها براساس قیمت مکانی محاسبه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، مالک نیروگاه بادی گیرنده قیمت است و در تسویه بازار رفتار راهبردی ندارد. معکوس تابع تقاضا برای شین‌ها به‌صورت خطی با شیب ثابت با مقادیر ثابت α_n و β_n می‌باشد. مطابق با رابطه (۷) درنظرگرفته‌شده که در آن q_{nwt} میزان توان مصرفی، π_{nwt} قیمت مکانی در شین n، سناریوی w و دوره زمانی t می‌باشد. مدل رقابت درنظرگرفته‌شده میان واحدهای تولید حرارتی از نوع بازی کورنات است. این مدل در مراجع [۲۰] و [۲۱] نیز موردبررسی قرار گرفته‌است. هدف هریک از شرکت‌های راهبردی ، بیشینه‌سازی سود آن‌ها ازطریق تنظیم میزان تولیدشان می‌باشد. رابطه (۸) منفی سود برای هر شرکت را نشان می‌دهد، این مقدار برای هر شرکت f و در هر سناریو w باید کمینه شود. بخش اول این رابطه، هزینه‌ها را برای هرشرکت نشان می دهد که از حاصل‌ضرب هزینه حدی هر واحد (C_{fgb}) در توان تولیدی توسط واحدها در هر پله b و در هر سناریوی توان بادی (x_{fgbnwt}) به‌دست می‌آید. بخش دوم میزان درآمد را نشان می‌دهد که از حاصل‌ضرب قیمت در هرشین در میزان توان تولیدی توسط هر شرکت (p_{fnwt}) و در هر سناریو به‌دست آمده‌است. رابطه (۹) محدودیت میزان توان تولیدی توسط هر واحد را در هر پله تولید و در هر سناریو نشان می‌دهد که در این مدل بیشینه‌سازی سود برای تمامی شرکت‌ها به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. بنابراین باید مدلی ارائه شود که بتواند این هدف را برآورده سازد. با به‌کارگیری شرایط کان تاکر[۶] می‌توان این شرایط را برای هر شرکت‌کننده به‌دست آورد و با یکدیگر ترکیب نمود. از مسئله به‌دست آمده به‌عنوان یک مسئله مکمل آمیخته یاد می‌شود [۲۲]. شایان ذکر است حل مسئله مکمل آمیخته به‌دلیل غیرخطی‌بودن و وجود روابط نامساوی با مشکلاتی همراه است. اما چنانچه معکوس تابع تقاضا یک تابع خطی باشد می‌توان تعادل کورنات را با حل یک مسئله بهینه منفرد که تنها دارای یک تابع هدف می‌باشد تعیین کرد. رابطه (۱۰) تابع هدف موردنظر را نشان می‌دهد. بنابراین، با حداقل‌سازی این تابع هدف و اعمال محدودیت‌های واحدهای تولید و پخش بار شبکه جواب مسئله بهینه‌سازی هم‌زمان سود شرکت‌های تولید حاصل می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به عدم‌قطعیت در تولید بادی، تابع هدف (۱۰) برای سناریوهای تولید بادی که برای بیان عدم‌قطعیت آن تعریف شده‌است که در آن x_{fgnwt} میزان توان تولیدی در پله b توسط واحد g تحت مالکیت شرکت f، در شین n و در سناریو w را نشان می‌دهد. c_{fgb} نشان‌دهنده قیمت پیشنهادی واحد g تحت مالکیت شرکت f در پله b می‌باشد. مجموعه‌های Ψ_{fg} و Ψ_{bg} به‌ترتیب نشان‌دهنده واحدهای حرارتی متعلق به شرکت f و مجموعه پله‌های قیمت‌های پیشنهادی واحد حرارتی g می‌باشند. مقادیر P_{fnwt} و q_{nwt} به‌ترتیب نشان‌دهنده سهم شرکت f در میزان تقاضا در شین n و سناریو w و میزان تقاضا در شین n و سناریو w می‌باشد. روابط (۱۱) و (۱۲) متغیرهای فوق را نشان می دهند. رابطه (۱۳) محاسبه توان تولیدی واحدهای هر شرکت در هر سناریو، و (۱۴) محدودیت توان تولیدی واحدها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲- شبکه انتقال

برای مدل‌سازی شبکه انتقال از مدل پخش بار DC استفاده شده‌است. در مدل پیشنهادی، قیمت‌گذاری در هر شین با توجه به معکوس تابع تقاضای آن شین انجام می‌شود. در رابطه (۱۵) f_{njwt} توان جاری‌شده در خطوط را نشان می‌دهد. θ_{nwt} اندازه زاویه ولتاژ شین در شین n در هر سناریو و دوره زمانی و x_{ij} راکتانس بین دو شین i و j است. قیود (۱۶) و (۱۸) مربوط به محدودیت زوایا و توان عبوری از خطوط می‌باشند و قید (۱۷) زاویه ولتاژ را در شین مرجع تثبیت می‌کند. g_{nwt} توان تولیدی در شین n، سناریو w و دوره زمانی t است که با توجه به رابطه (۱۹) به‌دست می‌آید. قید (۲۰) تعادل توان را در هر شین نشان می‌دهد.

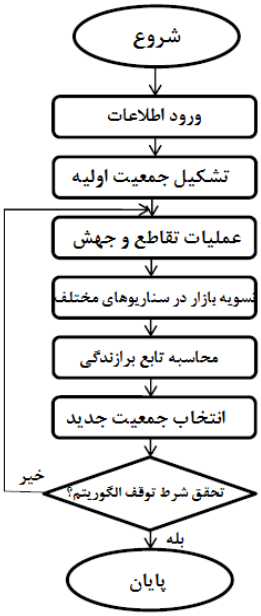
۳-۲-۳-مدل واحد تولید بادی

جهت مدل‌سازی عدم‌قطعیت واحد بادی تعدادی سناریو درنظرگرفته‌شده که برای هر یک از آن‌ها ضریب شدت باد با احتمالی خاص تعیین شده‌است. با توجه به ظرفیت توان بادی نصب‌شده x_n و با

درنظرگرفتن ضریب شدت باد در سناریو w و شین n، میزان توان بادی تولیدشده در شین موردنظر با توجه به (۲۱) به‌دست می‌آید که در این رابطه pw_{nwt} توان بادی تولیدشده در شین n، سناریو w و k_{nw} ضریب شدت باد می‌باشد. اگر سهم توان بادی در شین n و سناریو w به‌صورت x_{nwt} باشد، مجموعه این مقادیر در هر سناریو و برای تمام شین‌ها برابر با مقدار ثابت pw_{nwt} خواهدبود. اندیس n مربوط به شینی است که واحد بادی در آن واقع شده‌است، (رابطه (۲۲)). با درنظرگرفتن واحدهای بادی تغییراتی در میزان توان مصرفی در هر شین و قید تعادل در شین‌های شامل این واحدها ایجاد می‌شود. با فرض اینکه واحد بادی در شین n واقع شده‌است، این تغییرات را می‌توان با جایگزینی روابط (۲۳) و (۲۴) به جای روابط (۱۲) و (۲۰) بیان کرد.

۴- الگوریتم حل مسئله

برای حل مسئله سطح بالا و پایین ، به‌ترتیب از الگوریتم ژنتیک و ریاضی استفاده شده‌است. به‌طوری‌که متغیرهای تصمیم مسئله سطح بالا با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مسئله سطح پایین با استفاده از الگوریتم ناحیه مطمئن[۷] تحت نرم‌افزار متلب حل می‌شود. متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک ظرفیت‌های بادی نصب‌شده در شین‌ها می‌باشند. الگوریتم پیشنهادی برای انجام بهینه‌سازی در شکل ۲ آمده‌است. با توجه به این شکل مراحل انجام‌شده در اجرای الگوریتم ژنتیک به این شرح می‌باشد: ابتدا یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی با N کروموزوم تولید می‌شود. N، اندازه جمعیت یا تعداد اعضای نسل آغازین بوده و هر کروموزوم نماینده یک جواب ممکن برای مسئله است. با استفاده از تابع ارزیابی، ارزش تمام کروموزوم‌های این نسل محاسبه و ذخیره می‌شود. برای محاسبه تابع ارزیابی برای هر کروموزوم، ابتدا مسئله تسویه بازار برای سناریوهای موجود توسط الگوریتم ریاضی ناحیه مطمئن حل می شود، و سپس قیمت‌های مکانی و درنتیجه درآمد سرمایه‌گذار بادی برای افق برنامه‌ریزی به‌دست می‌آید. با توجه به مقادیر به‌دست آمده از تسویه بازار، تابع برازندگی که سود سرمایه‌گذار می‌باشد، به‌دست می‌آید. سپس جفت کروموزوم‌هایی به‌عنوان والدین انتخاب می‌گردند. هر جفت از والدین، با توجه به مقدار احتمال تقاطع، با یکدیگر ترکیب‌شده و دو کروموزوم فرزند تولید می‌کنند. برای انجام جهش با توجه به احتمال آن، تعدادی کروموزوم به‌عنوان والد انتخاب شده و جهش می‌یابند. کروموزوم‌های جدید حاصل از تقاطع و جهش در هر تکرار ارزیابی می‌شوند و با جمعیت قبلی مقایسه‌شده و کوروموزوم‌هایی که دارای ارزیابی بهتری هستند در جمعیت باقی می‌مانند. در پایان هر تکرار شرط توقف الگوریتم و همگرایی کروموزوم‌ها به پاسخ بهینه بررسی می‌گردد. درصورتی‌که شرط توقف برقرار نشده‌باشد، اجرای الگوریتم ادامه می‌یابد و درغیراین‌صورت بهترین کروموزوم نسل فعلی به‌عنوان پاسخ نهایی انتخاب‌شده و الگوریتم خاتمه می‌یابد. شرط خاتمه در این مقاله با تعداد جمعیت اولیه ۵۰، تعداد تکرار ۳۰ در نظر گرفته شده‌است. مطالعات انجام‌شده نشان‌داده که پارامترهای درنظرگرفته‌شده همگرایی قابل قبولی را برای تابع برازش موردنظر به‌دست می‌دهند.



شکل ۲: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی حل مسئلهGEP

۵- مطالعات عددی

جهت بررسی مدل ارائه‌شده در این مقاله، پیاده‌سازی این مدل بر موارد مطالعاتی سه شینه و IEEE سی‌شینه در نرم‌افزار متلب انجام شده‌است و در ادامه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها بیان و تحلیل شده‌اند.

۵-۱- مورد مطالعاتی اول: شبکه آزمون سه شینه

سیستم قدرت سه‌شینه در شکل ۳ نشان داده شده‌است. مشخصات خطوط انتقال آن در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این سیستم، از دو نوع واحد تولید با مشخصات مندرج در جدول ۳ استفاده شده‌است. قیمت‌های پیشنهادی واحدها هزینه‌های نهایی آن‌ها می‌باشند. در این شبکه فرض‌شده که ۷ واحد تولید تحت مالکیت ۳ شرکت می‌باشند، به‌طوری‌که واحدهای ۱ و ۲ تحت مالکیت شرکت ۱، واحدهای ۳، ۴ و ۵ تحت مالکیت شرکت ۲ و واحدهای ۶ و ۷ در اختیار شرکت ۳ می‌باشند. منحنی‌های معکوس تابع تقاضا برای هر سه شین یکسان و به‌صورت $\pi(q)=65-0.08q$ در نظر گرفته شده‌اند. فرض‌شده که امکان نصب واحد بادی در هر سه شین وجود دارد و ظرفیت بیشینه‌ای که در هر شین می‌تواند نصب شود ۳۶۰ مگاوات و در پله‌های ۳۰ مگاواتی در نظر گرفته شده‌است. محدودیتی برای میزان بودجه سرمایه‌گذاری درنظر گرفته نشده‌است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به شدت باد در سناریوهای مختلف و برای سه دوره زمانی آورده شده‌است. هزینه سرمایه‌گذاری یک میلیون دلار برمگاوات و نرخ بهره (r)، ۸٪ و عمر تجهیزات (el) ۱۵ سال درنظر گرفته‌شده است. لازم به ذکر است قبل از شبیه سازی این مورد مطالعاتی، ابتدا سیستم مورد نظر در مرجع [۲۱] شبیه‌سازی شده و پس

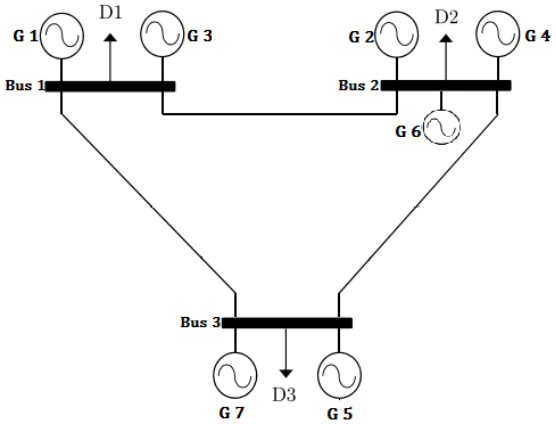
از دستیابی به جواب‌های آن مرجع، مدل موردنظر برای شبیه‌سازی سیستم‌های بزرگتر توسعه یافته‌است. به‌منظور برنامه‌ریزی توسعه در این شبکه سه حالت در نظر گرفته شده‌است. در ابتدا فرض‌شده که شدت باد در تمام شین‌ها یکسان است. با یکسان‌بودن شدت باد و صرف‌نظر نمودن از محدودیت خطوط، قیمت‌های مکانی در شین‌ها یکسان‌شده و مکان نصب واحدهای بادی اهمیتی ندارد. جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی را در این مورد مطالعاتی نشان می‌دهد. نتایج این حالت نشان می‌دهد که ظرفیت توان بادی که بیشینه سود سرمایه‌گذار را نتیجه می‌دهد، ۲۴۰ مگاوات و سود سرمایه‌گذار در این حالت ۱/۳۹ میلیون‌دلار می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات خطوط انتقال سیستم سه‌شینه

راکتانس خط (پریونیت)	به شین	از شین
۰/۱	۲	۱
۰/۱	۳	۱
۰/۱۲۵	۳	۲

جدول ۲: ضریب شدت باد در سناریوها و دوره‌های زمانی مختلف

احتمال	شدت باد	سناریو	ساعت	دوره
۰/۰۷، ۰/۴۹، ۰/۴۴	۰/۱۳، ۰/۲۶۴، ۰/۴۶۹	۳-۱	۱۰۰۰	اول
۰/۰۶، ۰/۳۸، ۰/۵۶	۰/۱۲۵، ۰/۲۵۹، ۰/۴۷۳	۶-۴	۶۰۰۰	دوم
۰/۵۴، ۰/۳، ۰/۱۶	۰/۱۴۴، ۰/۳۰۱، ۰/۵۱۴	۹-۷	۱۷۶۰	سوم



شکل ۳: شبکه آزمون سه‌شینه

جدول ۳: مشخصات واحدهای تولید شبکه آزمون سه‌شینه

نوع واحد	B	A
ظرفیت بلوک ۱ (مگاوات)	۵۰	۸۰
ظرفیت بلوک ۲ (مگاوات)	۱۰۰	۵۰
قیمت پیشنهادی بلوک ۱ (دلار برمگاوات ساعت)	۴۸	۴۰
قیمت پیشنهادی بلوک ۲ (دلار برمگاوات ساعت)	۶۸	۶۰
توان تولیدی کمینه(مگاوات)	۵۰	۲۰
توان تولیدی بیشینه (مگاوات)	۲۰۰	۱۵۰
شماره واحد (مکان نصب)	۴(۲)،۵(۳)،۷(۳)	۱(۱)،۲(۲)،۳(۱)،۶(۲)

از طرفی در سیستم‌های واقعی شرایط باد در موقعیت‌های مکانی مختلف یکسان نیست. برای درنظرگرفتن این موضوع در حاالت بعدی شدت باد را در شین ۱، ۱۰٪ افزایش و در شین ۲، ۱۰٪ کاهش داده و برنامه‌ریزی توسعه برای یک سال انجام شده‌است. در این حالت تمایل به سرمایه‌گذاری در شین ۱ افزایش و در شین ۲ کاهش می‌یابد. در واقع تغییر در شدت باد باعث تغییر در ظرفیت تولید توان بادی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت برای رسیدن به سود بیشینه در شین ۱ که شدت باد در آن بیشتر است، تمام ۳۶۰ مگاوات ظرفیت درنظرگرفته شده برای این شین، نصب‌شده و در شین ۲ که شدت باد در آن کمتر است واحد بادی نصب نشده‌است. در این حالت ظرفیت بهینه نصب‌شده برای واحدهای بادی ۳۶۰ مگاوات خواهدبود و سود سرمایه‌گذار توان بادی به ۵/۰۸ میلیون دلار افزایش یافته‌است. بنابراین مشاهده می‌شود که سرمایه‌گذار برای دستیابی به سود بیشینه در مناطق با وضعیت بادی بهتر، تمایل بیشتری برای احداث ظرفیت بادی دارد. بنابراین در شین‌های دارای شدت باد بالاتر، ظرفیت بیشتری نصب‌شده و درنتیجه میزان درآمد حاصل از فروش توان بادی نسبت به حالت اول افزایش چشم‌گیری دارد. علت عدم افزایش قابل‌توجه در انرژی مصرفی نیز به این دلیل است که میزان توان مصرفی توسط مصرف‌کنندگان که مجموع توان واحدهای حرارتی و بادی با هم می‌باشند، تفاوت چشم‌گیری ندارد، اما سهم توان بادی در توان مصرفی در حالت دوم نسبت به حالت اول تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌است. همچنین، میزان انرژی مصرفی در دو حالت اول و دوم تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. علت عدم افزایش قابل‌توجه در قیمت نیز وابسته بودن آن به توان مصرفی در شین‌ها است که این توان از مجموع توان بادی و توان واحدهای حرارتی تشکیل‌شده در حالت دوم قدری افزایش یافته و درنتیجه قیمت در حالت دوم تا اندازه‌ای کاهش یافته و درنتیجه موجب کاهش سود شرکت‌های راهبردی شده‌است. کاهش میانگین قیمت نسبت به حالت اول نشان می‌دهد در این حالت سرمایه‌گذار تأثیر بیشتری در تعیین قیمت بازار گذاشته‌است. افزایش نفوذ باد باعث‌شده تا میزان تولید واحدهای حرارتی و سود آن‌ها کاهش یابند. ضمناً مازاد مصرف‌کنندگان در این حالت نسبت به حالت اول بیشتر می‌باشد. در حالت سوم محدودیت ۳۰ مگاواتی بر خط واصل شین‌های یک و سه و با درنظرگرفتن شدت باد مختلف در شین‌ها اعمال شده‌است.

این محدودیت باعث شده تا میزان توان بادی نصب‌شده در شین ۱ که به خط محدود متصل است (با وجود شدت باد زیاد) کاهش یابد. سود بیشینه سرمایه‌گذار در این حالت ۳/۸۲ میلیون دلار بوده که کاهش ۲۵ درصدی را با وجود نصب ۶۰ مگاوات توان بادی بیشتر، نسبت به حالت دوم نشان می‌دهد. در این حالت میانگین قیمت به‌علت افزایش نفوذ باد کاهش یافته و درنتیجه انرژی مصرفی مصرف‌کنندگان و مازاد آن‌ها افزایش یافته‌است. همچنین سود شرکت‌های استراتژیک به علت کاهش میانگین قیمت بازار و محدودشدن تولید برخی از واحدها با محدودیت انتقال کاهش می‌یابد.

جدول ۴: نتایج برنامه‌ریزی توسعه در شبکه سه شینه (مورد مطالعاتی اول)

شاخص بازار	ظرفیت بادی نصب‌شده (شین۲، شین۳، شین۱)	میانگین قیمت (دلار بر مگاوات ساعت)	انرژی مصرف‌شده (میلیون مگاوات ساعت)	مازاد مصرف‌کننده (میلیون دلار)	سود سرمایه‌گذار (میلیون دلار)	سود شرکت‌های راهبردی (میلیون دلار)	رفاه اجتماعی (میلیون دلار)	میانگین بار در هر دوره زمانی (شین۱،شین۲،شین۳) (مگاوات)
حالت اول	(۶۰،۹۰،۹۰)	۴۹/۴۹	۱۵/۲۴	۳۹/۴۶	۱/۳۹	۱۰۹/۱۴	۱۴۸/۶۱	(۱۹۴/۲۷ ، ۱۹۴/۱۰، ۱۹۳/۰۷)
حالت دوم	(۰،۳۶۰،۰)	۴۸/۲۶	۱۶/۴۵	۴۶/۱۵	۵/۰۸	۱۰۳/۷۰	۱۴۹/۸۴	(۲۱۰،۲۱۰،۲۰۹، ۲۰۸/۵۷)
حالت سوم	(۰،۱۲۰،۳۰۰)	۴۸/۱۹	۱۶/۵۲	۴۶/۸۴	۳/۸۲	۱۰۲/۵۵	۱۴۹/۳۹	(۲۳۱/۵۴، ۲۱۲/۱۵، ۱۴۶/۹۸)

۵-۲- مورد مطالعاتی دوم: شبکه سی‌شینه IEEE

شبکه سی‌شینه دارای ۶ واحد تولید است که اطلاعات آن‌ها (مکان، ظرفیت و هزینه نهایی واحدها) در جدول ۵ آمده‌است. اطلاعات مربوط به خطوط انتقال و پارامترهای شیب منحنی تقاضا (β) از مرجع [۲۳] و [۲۴] اخذ شده‌اند. فرض‌شده که واحدهای تولید در مالکیت سه شرکت می‌باشند. به‌طوری‌که واحد ۱ تحت مالکیت شرکت ۱، واحدهای ۲ و ۳

جدول ۵: مشخصات واحدهای تولید در شبکه سی شینه IEEE

ژنراتور	هزینه نهایی (دلار بر مگاوات ساعت)	ظرفیت (مگاوات)	مکان
۱	۴۶/۶۷	۸۰	۱
۲	۴۰/۸۳	۶۰	۲
۳	۲۳/۳۳	۶۰	۱۳
۴	۷۵/۸۳	۶۰	۲۲
۵	۷۰	۸۰	۲۳
۶	۷۰	۶۰	۲۷

در مالکیت شرکت ۲ و واحدهای ۴، ۵ و ۶ در مالکیت شرکت ۳ می‌باشد. فرض شده‌است که امکان نصب نیروگاه‌های بادی در شین‌های ۲، ۵ و ۳۰ وجود دارد و مشخصات شدت باد در هر سناریو و دوره زمانی همانند جدول ۲ می‌باشد. معکوس تابع تقاضا برای شین‌های تقاضا به‌صورت $\pi(q)=70-\beta.q$ در نظر گرفته شده‌است. ظرفیت بادی بیشینه‌ای که در هر شین می‌تواند نصب شود ۶۰۰ مگاوات و در پله‌های ۵۰ مگاواتی در نظر گرفته شده‌است. ابتدا فرض‌شده که شدت باد در شین‌ها یکسان است. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه برای این سه حالت در جدول ۶ آمده‌است. نتایج نشان می‌دهد که نصب ۱۰۰ مگاوات در شین ۲، ۱۰۰ مگاوات در شین ۵ و ۴۵۰ مگاوات در شین ۳۰ باعث بیشینه‌شدن سود سرمایه‌گذار می‌شود و مقدار آن در این حالت ۱۶/۵۸ میلیون‌دلار می‌باشد. در حالت دوم ضریب شدت باد در شین ۲، ۱۰٪ افزایش و در شین ۳۰، ۱۰٪ کاهش داده شده‌است. مشاهده می‌شود که تمامی ظرفیت بادی درنظرگرفته‌شده برای شین ۲ نصب‌شده ولی ظرفیتی در شین ۳۰ که دارای شدت باد کمتر است نصب نشده‌است. در این حالت سود سرمایه‌گذار واحد بادی ۲۳/۷۰ میلیون‌دلار می‌باشد که افزایش ۴۲/۹۰ درصدی را نسبت به حالت اول نشان می‌دهد. میانگین قیمت نسبت به حالت اول کاهش‌یافته که افزایش نفوذ توان بادی در بازار را نشان می‌دهد. این افزایش نفوذ باعث کاهش سود شرکت‌های راهبردی می‌شود و تمایل مصرف‌کنندگان را به مصرف انرژی بیشتر افزایش می‌دهد. کاهش قیمت بازار و افزایش تمایل به مصرف باعث‌شده تا مازاد مصرف‌کنندگان افزایش یابد. در حالت سوم محدودیت‌های ۲۰، ۱۵ و ۱۰ مگاواتی بر خطوط ۱، ۷ و ۱۸ با درنظرگرفتن ضرایب شدت باد مختلف در شین‌ها اعمال شده‌است. اعمال این محدودیت‌ها باعث‌شده تا توان بادی نصب‌شده در شین ۲ با وجود داشتن شدت باد بیشتر کاهش و در شین‌های ۵ و ۳۰ با داشتن شدت باد کمتر، افزایش یابد. محدودیت‌های درنظرگرفته‌شده باعث افزایش نفوذ توان بادی در بازار و کاهش قیمت می‌شود. در این حالت مصرف‌کنندگان انرژی بیشتری مصرف کرده و مازاد آن‌ها افزایش می‌یابد. ازطرفی محدودیت انتقال باعث محدودیت در تولید واحدهای شرکت‌های راهبردی و در نتیجه سود آن‌ها می‌شود. در این حالت سود بیشینه سرمایه‌گذار ۸/۶۳ میلیون دلار است که کاهش ۶۳ درصدی را نسبت به حالت دوم نشان می‌دهد.

۵-۳- تحلیل حساسیت (بررسی تأثیر منحنی تقاضا)

در این بخش تأثیر پارامترهای منحنی معکوس تابع تقاضا بر رفتار سرمایه‌گذار در توسعه منابع بادی و سایر شاخصهای اقتصادی بازار بررسی می‌شود. دو پارامتر عرض از مبدأ و شیب این منحنی نشان‌دهنده کشش‌پذیری مصرف‌کنندگان بازار در برابر تغییرات قیمت می‌باشد. تحلیل حساسیت ظرفیت بادی درنظرگرفته‌شده در مورد مطالعاتی سه‌شینه در حالت اول و با فرض یکسان‌بودن شدت باد در تمام شین‌ها انجام شده‌است و بنابراین مکان نصب واحد بادی در تعیین شاخص‌های بازار تأثیری نمی‌گذارد.

۵-۳-۱- تأثیر عرض‌ازمبدأ منحنی معکوس تابع تقاضا (α)

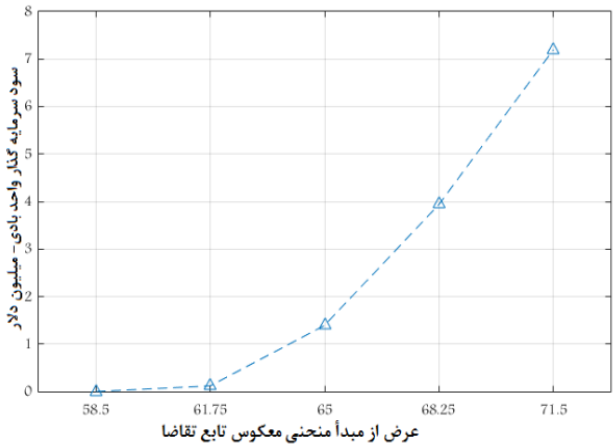
به‌منظور بررسی تأثیر این تغییرات بر برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی، شبیه‌سازی برای مقادیر متنوعی از پارامترα انجام شده‌است و نتیجه

حاصل در شکل ۴ نشان داده شده‌است. این شکل نمودار تغییرات سود بیشینه سرمایه‌گذار را برای αهای مختلف نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی بیشتر تأثیر تغییرات α بر سود سرمایه‌گذار و قیمت تسویه بازار، مقدار آن در حالت پایه را ۵٪ کاهش و افزایش داده و تغییر در این شاخص‌ها برای مقادیر مختلف توان بادی نصب‌شده به‌دست‌آمده که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. افزایش پارامتر α باعث افزایش قیمت در بازار شده، درنتیجه درآمد واحدبادی افزایش یافته و سود سرمایه‌گذار بیشتر می‌شود. با افزایش توان بادی نصب‌شده اختلاف میان سود سرمایه‌گذار به‌ازای α مختلف بیشتر می‌شود. افزایش این پارامتر باعث می‌شود تا سرمایه‌گذار به نصب توان بادی بیشتری جهت دست‌یابی به بیشینه سود خود مایل شود.

جدول ۶: نتایج برنامه‌ریزی توسعه در شبکه سی‌شینه IEEE

شاخص بازار	ظرفیت بادی جدید نصب‌شده (شین ۳۰، شین ۲، شین ۵)	میانگین قیمت (دلار بر مگاوات ساعت)	انرژی مصرف‌شده (میلیون مگاوات ساعت)	مازاد مصرف‌کننده (میلیون مگاوات)	سود سرمایه‌گذار (میلیون دلار)	سود شرکت‌های راهبردی (میلیون دلار)	رفاه اجتماعی (میلیون دلار)
حالت اول	(۴۵۰،۱۰۰،۱۰۰)	۵۵/۷۲	۱۰	۲۴/۸۲	۱۶/۵۸	۴۵/۸۲	۷۰/۶۴
حالت دوم	(۰ ،۶۰۰ ،۰)	۵۵/۶۳	۱۰/۰۸	۲۵/۱۹	۲۳/۷۰	۴۵/۷۴	۷۰/۹۳
حالت سوم	(۱۵۰،۵۰۰،۵۰)	۵۵/۲۸	۹۱/۸۱	۲۴/۰۲	۸/۶۳	۴۲/۰۲۸۱	۶۶/۸۳

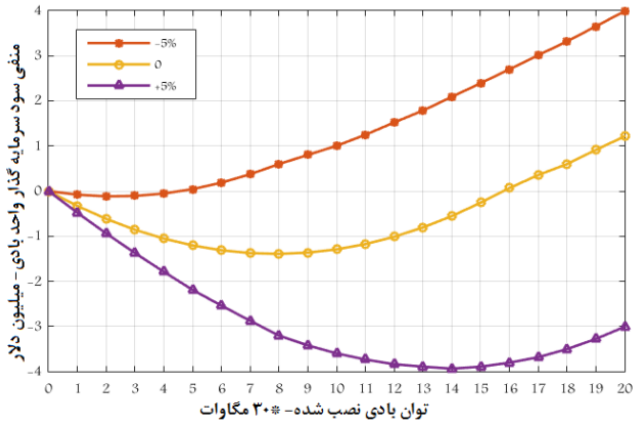
از طرفی این بررسی ثابت‌کرده که الگوریتم پیشنهادی توانسته جواب دقیق را در تعیین سود بیشینه سرمایه‌گذار واحد بادی به‌دست دهد.



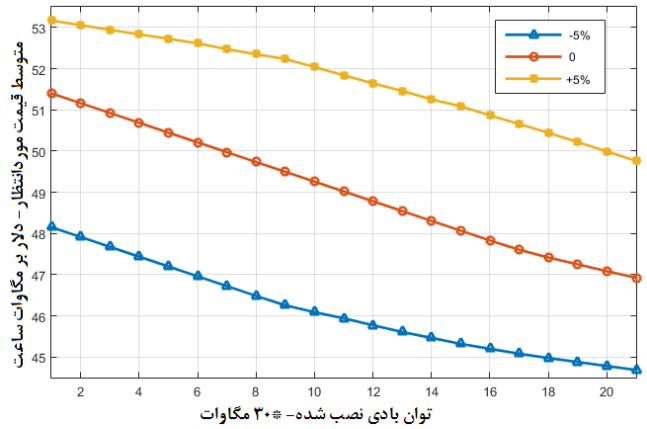
شکل۴: تأثیر تغییرات α بر سود بیشینه سرمایه‌گذار

۵-۳-۲-تأثیر شیب تابع معکوس تقاضا (β)

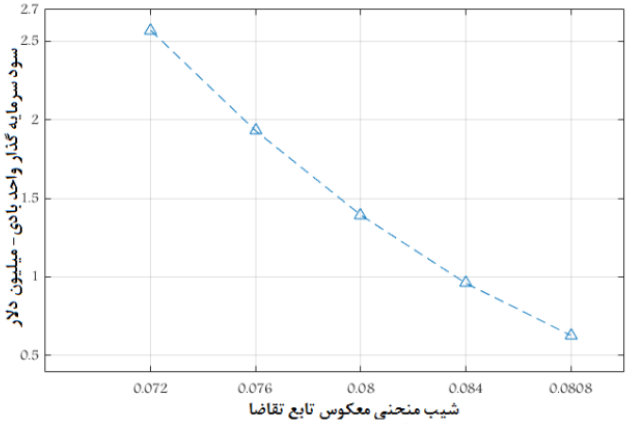
جهت بررسی تأثیر این پارامتر، شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف شیب معکوس تابع تقاضا اجراشده و تأثیر آن در سود بیشینه سرمایه‌گذار در شکل ۷ آمده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش این پارامتر موجب کاهش در سود سرمایه‌گذار می‌شود. تأثیر تغییر در پارامتر β بر سود سرمایه‌گذار و قیمت بازار به‌ازای ظرفیت‌های بادی مختلف نصب‌شده در شکل‌های ۸ و ۹ آمده‌است. جهت بررسی تأثیر این پارامتر مقدار آن ۵٪ افزایش و کاهش داده شده‌است. کاهش این پارامتر باعث افزایش قیمت در بازار شده و درنتیجه درآمد و سود سرمایه‌گذار بیشتر می‌شود. این کاهش باعث می‌شود تا سود بیشینه با نصب ظرفیت بیشتری از واحد بادی حاصل شود. با تغییر در این پارامتر میزان تغییر در سود و قیمت در نصب توان بادی بیشتر، افزایش می‌یابد.



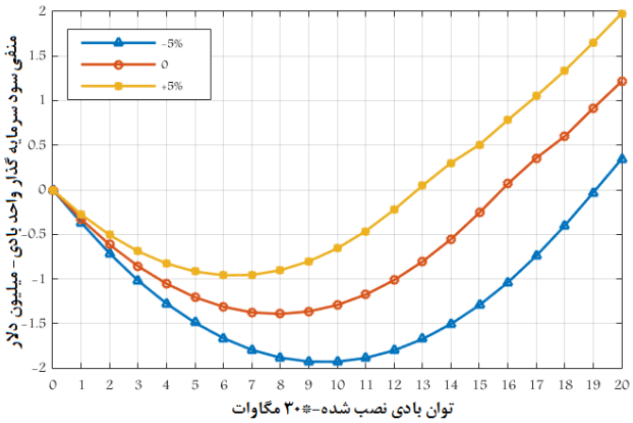
شکل ۵: تأثیر تغییرات α بر سود سرمایه‌گذار در ظرفیت‌های مختلف



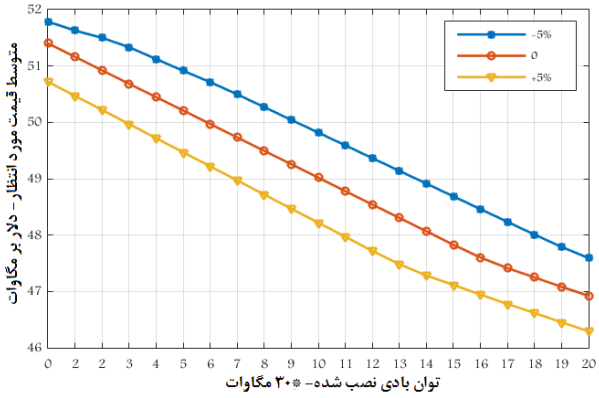
شکل ۶: تأثیر تغییرات α بر قیمت بازار در ظرفیت‌های مختلف



شکل ۷: تأثیر تغییرات شیب β بر سود بیشینه سرمایه‌گذار



شکل ۸: تأثیر تغییرات β بر سود سرمایه‌گذار واحد بادی در ظرفیت‌های مختلف



شکل ۹: تأثیر تغییرات β بر قیمت بازار در ظرفیت‌های مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله چهارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه منابع بادی در بازارهای رقابتی ناکامل ارائه شده‌است. مدل ارائه‌شده به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی بوده که هدف مسئله سطح بالا حداکثرنمودن سود سرمایه‌گذار منابع بادی به‌همراه محدودیت‌های مربوطه بوده‌است. در سطح پایین، مسئله تسویه بازار با وجود شرکتهای راهبردی و با فرض رقابت ناکامل و درنظرگرفتن تقاضای کشش‌پذیر، به کمک مدل بازی کورنات حل شده‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند:

- ✓ سرمایه‌گذار توان بادی در محیط رقابتی می‌تواند کسب سود نماید. میل به سرمایه‌گذاری در شین‌ها با شدت باد بالاتر، بیشتر از سایر شین‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که افزایش ده درصدی آن در شبکه آزمون سه‌شینه باعث افزایش ۱۲۰ مگاواتی در ظرفیت جدید در آن منطقه شده‌است.
- ✓ محدودیت خطوط انتقال، توسعه ظرفیت بادی، سود سرمایه‌گذاری و سهم تولید شرکت‌های راهبردی در بازار را تحت تأثیر قرار داده‌است.
- ✓ افزایش پارامتر α (عرض‌ازمبدا منحنی معکوس تابع تقاضا) سبب افزایش قیمت در بازار شده، درنتیجه درآمد حاصل از فروش توان بادی در بازار و افزایش سود سرمایه‌گذار بیشتر می‌شود و سرمایه‌گذار با نصب ظرفیت بادی بیشتری به سود بیشینه خود دست می‌یابد.
- ✓ افزایش شیب منحنی معکوس تابع تقاضا سبب کاهش قیمت بازار و کاهش سود سرمایه‌گذار شده و سرمایه‌گذار با نصب ظرفیت بادی کم‌تر به سود بیشینه خود دست می‌یابد. به‌طوری‌که در برنامه‌ریزی در شبکه سه‌باسه کاهش ۵ درصدی آن باعث افزایش ۲۸ درصدی سود سرمایه‌گذار و افزایش ۵ درصدی آن باعث کاهش ۴۴ درصدی سود سرمایه‌گذار در پایان دوره برنامه‌ریزی‌شده می‌شود.

مراجع

[1] T. Ackermann; Historical development and current status of wind power. Wind power in power systems, 1st eddition, John Wiley & Sons, 2005.

[2] Z. Yuan, D. Liu, C. Jiang, and Z. Hou, “Analysis of supplier equilibrium strategy considering transmission constraints”, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, pp. 17-22, 2005.

[3] H. A. e Oliveira, “Coalition formation feasibility and Nash–Cournot equilibrium problems in electricity markets: A Fuzzy ASA approach”, Applied Soft Computing, vol. 35, pp. 1-12, 2015.

[4] A. Maiorano, Y. H. Song, M. Trovato, “Dynamics of noncollusive oligopolistic electricity markets”, Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, pp. 838-844, 2000.

[5] P. Siriruk, “Cournot competition under uncertainty in power markets”, 2009.

[6] L. B. Cunningham, R. Baldick, and M. L. Baughman, “An empirical study of applied game theory: Transmission constrained Cournot behavior”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, pp. 166-172, 2002.

[7] B. Willems, Cournot competition in the electricity market with transmission constraints: Kath. Univ., Department Economie, Center for Economic Studies, 2000.

[8] L. Baringo, and A. Conejo, “Wind power investment within a market environment”, Applied Energy, vol. 88, no. 9, pp. 3239-3247, 2011.

[9] L. Baringo, and A. J. Conejo, "Risk-constrained multi-stage wind power investment", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 401-411, 2013.

[10] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms", Renewable Energy, vol. 85, pp. 620-630, 2016.

[11] A. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, M. S. Fadali, and M. Moeini-Aghtaie, "A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, pp. 3003-3011, 2014.

[12] C. Kongnam, S. Nuchprayoon, "Development of investment strategies for wind power generation", Proc. IEEE Canada Electrical Power Conf., pp. 308-313, 2007.

[13] J. Wang, M. Shahidehpour, Z. Li, A. Botterud, "Strategic generation capacity expansion planning with incomplete information", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 1002-1010, 2009.

[14] L. Baringo and A. J. Conejo, "Transmission and wind power investment", IEEE transactions on power systems, vol. 27, pp. 885-893, 2012.

[15] Baringo L and Conejo A.J, "Wind power investment: A Benders decomposition approach," IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 1, pp. 433–441, Feb. 2012.

[16] L. Maurovich-Horvat, T. K. Boomsma, and A. S. Siddiqui ،"Transmission and wind investment in a deregulated electricity industry", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, pp. 1633-1643, 2015.

[17] G. A. Orfanos, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziargyriou, "Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 1355-1362, 2013.

[۱۸] محمدرضا کریمی، جمشید آقایی و امین رحیمی رضایی، به کارگیری بهینه‌سازی استوار جهت مقابله با عدم‌قطعیت نیروگاه‌های بادی در برنامه-ریزی توسعه تولید" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲ ، تابستان ۱۳۹۶.

[۱۹] امیرحسین زارع نیستانک؛ رحمت‌الله هوشمند؛ معین پرستگاری. بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌های بادی با استفاده از نیروگاه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای به منظور کاهش عدم قطعیت در عملکرد آنان در بازار برق" جلد ۴۱، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۰.

[20] B. Hobbs, "Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets", IEEE Transactions on power systems, vol. 16, pp. 194-202, 2001.

[21] J. Contreras, M. Klusch, and J. B. Krawczyk, "Numerical solutions to Nash-Cournot equilibria in coupled constraint electricity markets", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, pp. 195-206, 2004.

[22] S. A. Gabriel, A. J. Conejo, J. D. Fuller, B. F. Hobbs, and C. Ruiz, "Complementarity modeling in energy markets", vol. 180: Springer Science & Business Media, 2012.

[23] B. F. Hobbs, C. B. Metzler, and J.-S. Pang, "Strategic gaming analysis for electric power systems: An MPEC approach", IEEE transactions on power systems, vol. 15, pp. 638-645, 2000.

[24] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security" , IEEE transactions on power apparatus and systems, pp. 745-751, 1974.

زیرنویس‌ها

1 GEP-TEP

2 Particle swarm optimization (PSO)

3 NSGA-II

4 DC load flow

5 Cournot

6 KKT

7 Trust Region