

Private Investor-based Transmission Expansion Planning in a Deregulated Environment Using Pareto Bat Inspired Algorithm

Farzan Rashidi

Electrical and Computer Engineering department, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran,
rashidi@hormozgan.ac.ir

Abstract:

Constructing new transmission lines requires various mechanical, protection and control facilities, therefore, it is expensive. Significant cost and shortage of government investment are two factors that prevented proper expansion of transmission lines. Due to recent increase in electricity consumption as well as power production in power plants, the need to invest for constructing new transmission lines has been increased. In this aspect, presence of private parties in transmission expansion planning is one of the main approaches to overcome difficulties associated with constructing new transmission lines. However, power system restructuring and deregulation has increased uncertainties in transmission expansion planning and made investment in electrical transmission lines more complicated and less appealing for private parties. In this paper, a comprehensive model for transmission expansion planning and congestion management is proposed such that despite various uncertainties, economical and technical issues make the transmission expansion planning more appealing for private parties. To do that, a multi objective programming problem which is based on Bat Inspired Algorithm is proposed.

Three objective functions including minimizing investment cost, minimizing lines congestion cost and maximizing the investment from private parties for constructing transmission lines are considered. The proposed optimization problem is a nonlinear and non-convex multi-objective optimization and accordingly, a bat inspired based algorithm is proposed for solving it. For accelerating the optimization process and preventing local optimum trapping, new heuristic approaches are included to the original algorithm. Solving the multi-objective optimization problem using the proposed algorithm, results in several optimal plans showing compromise between objective functions. The final plan, among the generated plans, is selected using a max-min fuzzy decision making. The proposed method is applied on the IEEE 24 bus test system and effectiveness of the proposed method is verified. Simulation results show that in the presence of various uncertainties, the proposed algorithm in addition to minimizing the investment and reducing the congestion costs identifies low risk and profitable transmission lines to be invested by private parties.

Keywords: Transmission expansion planning, Multiobjective optimization, Bat algorithm, Private Investor.

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در محیط تجدید ساختار یافته با هدف ایجاد سرمایه‌گذاری مطلوب به کمک الگوریتم بهینه‌سازی خفاش چندهدفه فرزان رشیدی^۱

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه هرمزگان - بندرعباس - ایران

rashidi@hormozgan.ac.ir

چکیده: در این مقاله، الگویی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با هدف جذب سرمایه‌گذاری خصوصی ارائه شده است. بدین منظور سه تابع هدف شامل کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری، کمینه‌کردن هزینه‌های تراکم خطوط و بیشینه‌کردن حجم سرمایه‌گذاری خصوصی برای احداث خطوط سودآور در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه درآمد خطوط از روش قیمت‌گذاری توان - فاصله (مگاوات - مایل) استفاده شده است. با توجه به اینکه مسئله مد نظر از نوع مسائل بهینه‌سازی غیرخطی، چندهدفه و نامحدوب است، برای حل آن نیز روش بهینه‌سازی چندهدفه جدید مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی خفاش پیشنهاد شده است. برای سرعت در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی نیز به الگوریتم اضافه شده‌اند. نتیجه اعمال این الگوریتم بر مسئله بهینه‌سازی، به مجموعه‌ای از طرح‌های بهینه‌ای منجر خواهد شد که نشان‌دهنده ناحیه مصالحه بین توابع هدف است. برای انتخاب طرح نهایی از بین چندین طرح بهینه موجود، از معیار تصمیم‌گیری فازی استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های متعددی با افق برنامه‌ریزی ده‌ساله روی شبکه ۲۴ شینه IEEE انجام گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی در حضور عدم قطعیت‌های مختلف، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کاهش پرشدگی، خطوط با سطح ریسک پذیرفته‌شده و سودآور را شناسایی و برای سرمایه‌گذاری به بخش خصوصی پیشنهاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، بهینه‌سازی چندهدفه، سرمایه‌گذاری خصوصی

۱- مقدمه

خطوط انتقال جدیدی است که می‌باید با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی احداث شوند تا نیاز مشترکان شبکه با کمترین هزینه و بالاترین قابلیت اطمینان فراهم شود [۱]. برنامه‌ریزی توسعه انتقال در ساختار سنتی، به صورت متمرکز و براساس الگوی حداقل هزینه انجام می‌شود؛ اما در محیط‌های تجدید ساختار شده، برنامه‌ریزی شبکه‌های انتقال به شکل فزاینده‌ای پیچیده است. تغییر ساختار و مقررات‌زدایی صنعت برق، سبب تغییر اهداف توسعه انتقال و ظهور خواسته‌های مختلف و گاهی متضاد بازیگران از عملکرد و توسعه سیستم شده است [۲]. در این ساختار، روش‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه با هدف رویارویی با

برنامه‌ریزی توسعه و مدیریت تراکم شبکه‌های انتقال یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است. هدف این برنامه‌ریزی، تعیین زمان، مکان و تعداد

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵

نام نویسنده مسئول: فرزان رشیدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - دانشگاه هرمزگان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق و کامپیوتر

خطوط انتقال و تولید در شبکه برای اضافه‌شدن منابع تولیدات پراکنده بررسی شده است. در مرجع [۱۹] مسئله توسعه منابع تولیدات پراکنده و توسعه شبکه انتقال تجزیه و تحلیل شده است. در مرجع [۲۰] به مسائل فنی و محدودیت‌های فیزیکی توسعه خطوط انتقال توجه شده است. در مرجع [۲۱] کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هدف اصلی در نظر گرفته شده است و در مرجع [۲۲] مسئله توسعه شبکه‌های انتقال در سیستم‌های تجدید ساختار یافته با هدف کاهش تلفات و جلوگیری از بروز اضافه‌بار تجزیه و تحلیل شده است.

در مرجع [۲۳] مسئله کلیدزنی خطوط انتقال در برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت مطالعه شده است. از آنجاکه مسئله کلیدزنی مسئله کوتاه مدت بهره‌برداری است، برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال نیز یک مسئله بلند است. در مرجع مذکور، مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه، تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و مسئله کلیدزنی نیز قیود به مسئله اضافه شده است.

در مرجع [۲۴]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در یک بازار برق مبتنی بر حوضچه مدل شده است. در این الگو برای تقاضای مصرف آینده نیز تعدادی سناریو معرفی شده است. در مرجع [۲۵] یک الگوی سه‌سطحی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه فرمول‌بندی شده است که در پایین‌ترین سطح تسویه بازار و در سطح میانی توسعه ظرفیت تولید و در بالاترین سطح توسعه ظرفیت انتقال انجام می‌شود. در مرجع [۲۶] مسئله توسعه شبکه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های برنامه‌ریزی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری که بیشتر جزو اهداف کوتاه‌مدت هستند، مطالعه شده است. در مرجع [۲۷] مسئله مد نظر در حضور یک بهره‌بردار ناوگان برق بررسی شده است. مطالعات انجام‌شده بر شبکه ۲۴ شینه IEEE نشان می‌دهند حضور خودروهای برقی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، کاهش هزینه ریسک و به تأخیر انداختن برخی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری را باعث می‌شوند. از نظر عدم قطعیت‌های مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، موضوعات مختلفی در مقالات بررسی شده‌اند. در مرجع [۲۸] مسئله مد نظر با لحاظ کردن برنامه‌های پاسخگویی بار

عدم قطعیت‌های فزاینده، حداقل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و حداکثر کردن سود انجام می‌شود [۲]. هزینه احداث خط انتقال جدید به علت نیاز به نصب تجهیزات گسترده حفاظتی، کنترلی و تأسیسات مکانیکی بسیار شایان توجه است. پرهزینه‌بودن احداث خطوط و کمبود سرمایه‌گذاری‌های دولتی دو عاملی است که به توسعه نیافتن مناسب شبکه‌های انتقال منجر خواهد شد [۳]. مهم‌ترین راه‌کار برای فائق‌آمدن بر این تهدید، جذب سرمایه‌های بخش خصوصی است. بدین منظور می‌باید شرایط به‌گونه‌ای فراهم شود که سرمایه‌گذاران خصوصی انگیزه‌های لازم برای سرمایه‌گذاری در این بخش از صنعت برق را داشته باشند. اطمینان‌نداشتن از بازگشت سرمایه و میزان بازگشت آن، همچنین وجود بازیگران مختلف در بازار، از جمله نگرانی‌هایی است که باعث می‌شود سرمایه‌گذاران خصوصی انگیزه‌ای به سرمایه‌گذاری در این بخش از صنعت برق نداشته باشند [۴].

برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال با هدف حداقل کردن هزینه‌های توسعه و در نظر گرفتن قیود تولید نیروگاه‌ها و ظرفیت خطوط، ابتدا در سال ۱۹۷۰ و با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی شروع شد [۵]. پس از آن، مطالعات متعددی در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه و مدیریت تراکم خطوط انجام شده است که به دو گروه تقسیم می‌شوند. دسته اول پژوهش‌هایی است که سعی کرده‌اند با استفاده از روش‌های جدید مانند الگوریتم‌های الگوریتم ژنتیک [۵]، الگوریتم تبرید فلزات [۶]، الگوریتم ازدحام ذرات [۷]، الگوریتم جستجوی تابو [۸]، روش نظریه گراف [۹] و روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی [۱۰-۱۱] مسئله مد نظر را حل کنند. دسته دیگری از پژوهش‌ها مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال را از دیدگاه عدم قطعیت در پیش‌بینی بار [۱۲]، قابلیت اطمینان [۱۳]، عوامل اقتصادی [۱۴]، کفایت شبکه [۱۵]، هماهنگی برنامه‌ریزی توسعه انتقال با توسعه تولید [۱۶] و برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه شبکه انتقال [۱۷] مطالعه و بررسی کرده‌اند. هرچند در این دسته از پژوهش‌ها برای حل مسئله برنامه‌ریزی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک یا هوشمند استفاده شده است، توجه این مطالعات، بیشتر بر نحوه الگوسازی بوده است؛ برای نمونه، در مرجع [۱۸]، توسعه

اقتصادی توان، می باید به مسئله جذب سرمایه گذاری خصوصی نیز توجه شود. با توجه به ذی نفع بودن نهادهای مختلف، تعدد توابع هدف فنی و اقتصادی، ناسازگار بودن اهداف با یکدیگر، همچنین شرایط متفاوت و متغیر بازار برق، می باید در سیستم های تجدید ساختار شده، از یک الگوی چندهدفه برای برنامه ریزی توسعه و مدیریت تراکم شبکه انتقال استفاده کرد.

در این مقاله الگویی برای برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال با هدف جذب سرمایه گذاری خصوصی ارائه شده است تا در حضور عدم قطعیت های مختلف، علاوه بر کمینه کردن هزینه های سرمایه گذاری، خطوط سودآور با سطح ریسک پذیرفته شده، شناسایی و حداکثر شود تا سرمایه گذاری در این بخش از دیدگاه سرمایه گذاران خصوصی جذاب شود. توابع هدف نهایی شامل کمینه کردن هزینه سرمایه گذاری، کمینه کردن هزینه های تراکم خطوط و بیشینه کردن حجم سرمایه گذاری خصوصی برای احداث خطوط سودآور هستند.

استفاده از الگوریتم بهینه سازی مناسب برای حل الگوی برنامه ریزی توسعه شبکه های انتقال، تأثیر به سزایی بر انتخاب طرح نهایی خواهد داشت. برای نیل به این هدف، در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی خفاش استفاده شده است. با توجه به اینکه الگوریتم مذکور برای حل مسائل بهینه سازی تک هدفه به کار می رود، برای اعمال قیود و اهداف مختلف مد نظر در مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه، ساختار الگوریتم مذکور به گونه ای تغییر داده شده است که امکان اعمال آن برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه نیز وجود داشته باشد. به منظور سرعت در فرآیند بهینه سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه های محلی، اصلاحاتی روی الگوریتم بهینه سازی انجام شده است. یکی از ویژگی های بارز الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی، حفظ کیفیت و تنوع در مجموعه جواب های است که کاندید نهایی هستند. برای تعیین یک طرح از بین چندین کاندیدای موجود، از سیستم تصمیم گیر فازی استفاده خواهد شد. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه سازی های متعددی روی شبکه ۲۴ شینه IEEE انجام شده اند. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهند

و عدم قطعیت منابع بادی حل شده است. مرجع [۲۹] به موضوع عدم قطعیت رشد بار و در دسترس بودن منابع تولید پرداخته است. مرجع، موضوع عدم قطعیت هزینه سرمایه گذاری و بار پیش بینی شده را با استفاده از نظریه شکاف اطلاعات بررسی کرده است.

در مرجع [۳۰] به الگوسازی عدم قطعیت توسعه تولید در برنامه ریزی توسعه شبکه های انتقال پرداخته شده است. این مرجع برای حفظ ارتباط دوسویه در فرآیند برنامه ریزی توسعه انتقال، روشی دو مرحله ای برای الگوسازی توسعه تولید پیشنهاد کرده است. در مرحله اول، سناریوهای اصلی توسعه تولید تعریف شده است که بیانگر زمان توسعه تولید خواهند بود. در مرحله دوم، سناریوهای فرعی برای عدم قطعیت توسعه تولید، الگوسازی شده اند که به مکان و نوع نیروگاه جدیدالورود اشاره دارند. در [۳۱] فرمول بندی ریاضی برای الگوسازی مسئله برنامه ریزی چند مرحله ای توسعه هم زمان شبکه انتقال و منابع راکتیو بر مبنای الگوی AC ارائه شده است. این الگوسازی علاوه بر مشخص کردن تعداد و محل نصب خطوط و منابع راکتیو، زمان مناسب برای سرمایه گذاری را نیز در نظر می گیرد. برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و نتایج روی شبکه ۲۴ باسه IEEE، تجزیه و تحلیل شده اند. مرجع [۳۲] الگویی برای توسعه شبکه انتقال با استفاده از مکانیزم بازار ارائه کرده است که در آن ضمن حفظ قیود امنیت شبکه، تولیدکنندگان و مصرف کنندگان با اعلام میزان مشارکت در تأمین هزینه نصب هر خط، برای تعیین مکان نصب خطوط انتقال در محل های همراه با سود بیشتر با یکدیگر رقابت می کنند.

در بیشتر مقالاتی که مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه های انتقال تجزیه و تحلیل شده اند، برای حل مسئله از روش های بهینه سازی هوشمند تک هدفه استفاده شده است؛ اما پس از تجدید ساختار در شبکه های قدرت، معیارهای برنامه ریزی توسعه شبکه، نسبت به سیستم سنتی تغییر کرده و متناسب با شرایط بازار، رقابتی شده است. علاوه بر این، شرایط عدم اطمینان ناشی از توسعه و آینده پخش بار نیز به قیود مسئله اضافه شده اند؛ از این رو در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال، علاوه بر بهبود قابلیت اطمینان شبکه و تأمین

۲-۱- فرمول‌بندی هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جدید نصب‌شده

در محیط‌های با ساختار سنتی، یکی از مهم‌ترین اهداف، معمولاً کمینه‌کردن هزینه‌های نصب خطوط است؛ زیرا دولت در این نوع محیط‌ها، هزینه‌های نصب را تأمین می‌کند. این وضعیت برای محیط‌های تجدید ساختار یافته‌ای صادق است که شبکه انتقال آنها همچنان به شکل سنتی اداره می‌شود؛ اما در سیستم‌های تجدید ساختار شده‌ای که وظیفه سرمایه‌گذاری برای احداث خطوط انتقال جدید به شرکت‌ها یا مالکان خصوصی واگذار شده است، دیگر کمینه‌کردن این هزینه‌ها از دیدگاه بخش خصوصی، تابع هدف اصلی به حساب نمی‌آیند و سرمایه‌گذاران خصوصی معیارهای مهم‌تری برای سرمایه‌گذاری دارند؛ برای نمونه، سرمایه‌گذاران خصوصی ترجیح می‌دهند در پروژه‌ای سرمایه‌گذاری کنند که درآمد یا میزان بازگشت سرمایه بیشتری داشته باشد، حتی اگر هزینه سرمایه‌گذاری آن پروژه زیاد باشد [۲۲-۲۱]. با وجود این، کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال جدید، از دید سایر عناصر استفاده‌کننده از خطوط انتقال همچنان هدف مهم است. دلیل این امر این‌گونه توجیه می‌شود که هرچه هزینه نصب خطوط انتقال جدید کمتر باشد، قطعاً تعرفه‌های استفاده از خطوط نیز کمتر خواهند شد؛ زیرا مهم‌ترین هدف تخصیص مناسب هزینه یک پروژه برای یک سرمایه‌گذاری، بازیابی هزینه‌های مربوطه است؛ بنابراین، هزینه‌های کلی شرکت‌کنندگان در بازار با در نظر گرفتن این تابع هدف پایین‌تر خواهند آمد. پس می‌توان نتیجه گرفت کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری همچنان یکی از اهداف مهم در محیط تجدید ساختار یافته است. فرمول‌بندی ریاضی این تابع هدف به صورت زیر است:

$$C = \sum_{l \in \Omega} c_l n_l \quad (1)$$

در رابطه فوق، Ω مجموعه خطوط نصب‌شده جدید، n_l تعداد خطوط کاندیدای نصب در حریم l و c_l هزینه نصب خط جدید است. پارامتر C نیز کل هزینه سرمایه‌گذاری است.

در صورتی که سود مناسبی برای شرکت‌های موجود در بازار وجود داشته باشد، متناسب با رشد بار، هم تراکم خطوط، مدیریت و هم در صورت نیاز، مشوق‌هایی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی فراهم می‌شوند. جنبه‌های نوآوری مقاله به شرح زیر هستند:

- تحلیل مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال از دیدگاه کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری، کمینه‌کردن هزینه‌های تراکم خطوط و پیشینه‌کردن حجم سرمایه‌گذاری خصوصی برای احداث خطوط سودآور؛
- الگوسازی مسئله در قالب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت و نامعینی؛
- حل مسئله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش چندهدفه با انجام اصلاحاتی در نسخه استاندارد الگوریتم برای جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی؛
- استفاده از معیار تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب بهترین جواب ممکن از بین چندین جواب پارتو.

۲- الگوسازی ریاضی مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال

هدف از برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری مکان و چگونگی احداث خطوط انتقال جدید است؛ به گونه‌ای که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، قیود شبکه نیز رعایت شوند. مهم‌ترین چالش در این زمینه، پرهزینه‌بودن این گونه پروژه‌ها و کمبود سرمایه‌گذاری‌های دولتی است. این امر باعث شده است توسعه شبکه‌های انتقال همگام با توسعه تولید و نیاز مصرف‌کنندگان نباشد. مهم‌ترین راه کار برای فائق آمدن بر این تهدید، جذب سرمایه‌گذاری خصوصی در پروژه‌های احداث خطوط است. با توجه به حجم بالای سرمایه لازم، می‌باید مشوق‌هایی در نظر گرفته شوند تا احداث خطوط جدید از دیدگاه سرمایه‌گذار بخش خصوصی نیز جذاب باشد. در ادامه، فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی گسترش شبکه انتقال ارائه خواهد شد.

مصرف‌کنندگان تولید می‌کند؛ اما به دلیل خالی ماندن بخشی از ظرفیت خطوطی که برای حفظ قابلیت اطمینان شبکه رزرو می‌شود، تمام هزینه‌های شبکه برگشت داده نمی‌شود. برای رفع این مشکل در مرجع [۱۶] پیشنهاد شده است کاربرانی که برای توان عبوری آنها خلاف جهت عبور توان در خط باشد، هیچ هزینه‌ای پرداخت نکنند و تنها مصرف‌کنندگانی هزینه کنند که جهت عبور توان آنها هم جهت با توان عبوری از خط باشد. در این صورت هزینه استفاده کردن و نکردن از سیستم به صورت زیر خواهد شد:

$$TC_{t,unused} = \sum_{k \in K} C_k \frac{F_{t,k}}{\sum_{t \in T} F_{t,k}}, \forall F_{t,k} > 0 \quad (9)$$

$$TC_{t,used} = \sum_{k \in K} C_k \frac{F_{t,k}}{F_{k,max}}, \forall F_{t,k} > 0$$

در رابطه فوق $TC_{t,unused}$ هزینه استفاده نکردن از سیستم، $TC_{t,used}$ هزینه استفاده از سیستم، C_k هزینه خط k ، $F_{t,k}$ فلوی توان خط k برای مصرف کننده t و $F_{k,max}$ ظرفیت خط k است.

با توجه به اینکه در این روش کل هزینه‌های انتقال پوشش داده شده و تا حدی بیانگر میزان واقعی از شبکه است [۳۳]، بنابراین در این مقاله از روش مذکور برای قیمت‌گذاری خطوط استفاده شده است.

معمولاً در بحث سرمایه‌گذاری، برای یک سرمایه‌گذار میزان بازگشت سرمایه مهم‌تر از خود هزینه سرمایه‌گذاری است. به عبارت دیگر، سرمایه‌گذار حاضر است سرمایه‌گذاری بیشتر کند تا سود بیشتر کسب کند؛ بنابراین، این معیار که معیار تسلسل نام دارد، معادل انتخاب یک سهام با بیشترین میانگین بازگشت سرمایه، زیر سطح مشخصی از مقدار ریسک است. در بخش سرمایه‌گذاری خطوط، پروژه‌های احداث خط انتقال می‌تواند معادل سهام باشد؛ بنابراین سود یا همان میزان بازگشت سرمایه و ریسک سرمایه‌گذاری از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب پروژه خط انتقال خواهد بود. برای یک سرمایه‌گذار در طول دوره مطالعه، میزان بازگشت سرمایه با حل رابطه (۹) نسبت به متغیر i به دست می‌آید.

$$\sum_{t=0}^T \frac{A_t}{(1+i)^t} = I - W \quad (10)$$

• منجر به افزایش بهره‌وری اقتصادی و مانع از سردرگمی عناصر بازار شود.

• برای گسترش و تقویت خطوط، سیگنال‌هایی برای تشویق و ایجاد انگیزه در سرمایه‌گذاران خصوصی فراهم کنند. همچنین اگر خطوط انتقال در جایی احداث شوند که هیچ مشکلی از شبکه را حل نمی‌کنند، لازم است سرمایه‌گذار به نوعی جریمه شود؛ برای مثال، شرایط به گونه‌ای فراهم شود که سود مناسبی برای سرمایه‌گذار به وجود نیاید.

روش‌های مختلفی برای قیمت‌گذاری خطوط انتقال پیشنهاد شده که یکی از ساده‌ترین آنها روش تمبر پستی است. در این روش، مکانیزم قیمت‌گذاری صرفاً براساس میزان توان جابه‌جا شده و مدت زمان مصرف انجام می‌شود و فاصله جغرافیایی در آن تأثیری ندارد. ضعف عمده این روش، توجه نکردن به میزان استفاده واقعی کاربران از شبکه و همچنین ایجاد نکردن سیگنال اقتصادی مناسب برای آنها است. در ضمن نمی‌تواند مشوق‌های لازم برای گسترش و تقویت شبکه را فراهم کند [۱۴].

روش دیگر، روش توان فاصله (مگاوات - مایل) است. در این روش هزینه‌های انتقال براساس میزان توان قرارداده شده و فاصله جغرافیایی بین نقطه تحویل و تزریق محاسبه می‌شود. اساس کار در این روش بر پایه بارگذاری جداگانه هر خط و با توجه به قراردادهای موجود است. این مقدار در طول خط ضرب شده اند و مقادیر حاصل از تمام خطوط با هم جمع می‌شوند تا سهم هر قرارداد مشخص شود. به این ترتیب هزینه اختصاص داده شده به هر قرارداد بر پایه میزان استفاده کاربر از شبکه تعیین می‌شود. فرمول‌بندی ریاضی این روش به صورت زیر است [۳۲]:

$$TC_t = TC \frac{\sum_{k=1}^K C_k L_k F_{t,k}}{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K C_k L_k F_{t,k}} \quad (8)$$

در رابطه فوق، $F_{t,k}$ جریان خط k ناشی از قرارداد t ، TC_t هزینه قرارداد t ، TC هزینه‌های کل همه خطوط، L_k طول خط k بر حسب مایل، C_k هزینه مگاوات در واحد طول خط k ، T تعداد قراردادها و K تعداد خطوط است.

این روش تمامی اشکالات روش تمبر پستی را پوشش می‌دهد. همچنین سیگنال‌های اقتصادی قوی برای

۳- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

در بخش‌های قبل مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در قالب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با سه معیار کاهش هزینه سرمایه‌گذاری احداث خطوط، کاهش هزینه پرشدگی خط انتقال و بیشینه‌کردن میزان جذب سرمایه خصوصی فرمول‌بندی شد. با توجه به اینکه مسئله مد نظر از نوع مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است، در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش چندهدفه برای حل آن استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور سرعت در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی به الگوریتم اضافه شده‌اند. همچنین چون نسخه اصلی الگوریتم خفاش برای حل مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه ارائه شده است، در این مقاله مسئله بهینه‌سازی از نوع چندهدفه است و با ارائه پیشنهادهایی، ساختار الگوریتم به گونه‌ای اصلاح شده است که به مسئله مد نظر اعمال می‌شود. در ادامه، ساختار این الگوریتم به اختصار توضیح داده شده است.

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش در فرم

استاندارد

الگوریتم بهینه‌سازی خفاش یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که اولین بار در سال ۲۰۱۰ ارائه شد [۳۴]. فرم استاندارد این الگوریتم الهام‌گرفته از خصوصیات ردیابی خفاش‌های کوچک در جستجوی شکار است و بر قواعد کلی زیر مبتنی است [۳۴].

۱- همه خفاش‌ها با استفاده از انعکاس صوت، فاصله بین خود و غذا یا مانع را تشخیص می‌دهند. همچنین این خفاش‌ها به تشخیص تفاوت بین انعکاس صوت ناشی از غذا و اجسام پیرامون خود نیز قادر هستند.

۲- خفاش‌ها به صورت تصادفی و با سرعت v در موقعیت x با فرکانس f و شدت صوت A به دنبال غذا می‌گردند. همچنین این خفاش‌ها به صورت خودکار طول موج و میزان پالس‌های ارسالی را ($A \in [0,1]$) با توجه به فاصله خود با غذا تنظیم می‌کنند.

در این رابطه A_t میزان درآمد ساعتی، t بیانگر ساعت، T بیانگر طول دوره مطالعه، I کل هزینه سرمایه‌گذاری، W هزینه اسقاطی سرمایه‌گذاری تبدیل شده به هزینه اولیه و i نرخ بازگشت میزان سرمایه‌گذاری یا همان RoR است. چنانچه در این رابطه به جای A_t میزان درآمد به دست آمده از خط انتقال l قرار گیرد، میزان بازگشت سرمایه ناشی از درآمد آن خط انتقال به دست خواهد آمد (RoR_l). به کمک این الگوسازی میزان درآمد و میزان بازگشتی سرمایه خط انتقال مورد نظر محاسبه می‌شود. در بحث سرمایه‌گذاری، کمترین میزان بازگشت سرمایه در کشورهای مختلف، متفاوت و به عوامل متعددی همچون میزان سود خالص بانکی آن کشور وابسته است. برای در نظر گرفتن این قیود، چنین فرض می‌شود که چنانچه میزان بازگشت سرمایه پروژه از حداقل میزان مطلوب یک بازار خاص بالاتر باشد، آن پروژه خط انتقال، برای بخش خصوصی جذاب است و انگیزه‌های اقتصادی ایجاد می‌کند.

پروژه خطوط انتقال جذاب برای سرمایه‌گذاری از دید بخش خصوصی، پروژه‌هایی هستند که شرط زیر درباره آنها صادق باشد [۱۷]:

$$RoR_l \geq MARR \quad (11)$$

در رابطه فوق، $MARR$ حداقل میزان بازگشت سرمایه جذاب و RoR_l میزان بازگشت سرمایه ناشی از درآمد احداث خط انتقال است. با توجه به موارد فوق، رابطه (۱۱) یکی از اهداف برنامه‌ریزی طرح توسعه خطوط انتقال در محیط‌های تجدید ساختاریافته در نظر گرفته شده است [۱۷]:

$$IC = \sum_{l=1}^L IC_l^{At} \quad (12)$$

در رابطه فوق IC_l^{At} هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جذاب از دیدگاه بخش خصوصی است و L کل خطوط انتقال در طرح بهینه است. از دیدگاه بهره‌بردار مستقل شبکه، رابطه (۱۲) بیانگر میزانی از سرمایه‌گذاری است که برای سرمایه‌گذارها جذاب است و بخش خصوصی را به سرمایه‌گذاری در این بخش تشویق می‌کند.

$$A_i(t+1) = \beta A_i(t) \quad (18)$$

در رابطه فوق، مقادیر پارامترهای β و γ به صورت تصادفی در محدوده $[0,1]$ انتخاب می‌شوند. مقادیر اولیه A_i و r_i نیز به صورت تصادفی در محدوده $[0,0.5]$ و $[0.5,1]$ در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که از رابطه (۱۸) مشاهده می‌شود بازه تغییرات r بین صفر و یک است. عدد صفر به منزله ارسال نشدن پالس و عدد یک به معنی ارسال پالس با دامنه حداکثر است [۳۵].

در عمل، چنانچه خفاش به هدف خود نزدیک شود، به منظور رصدکردن هرچه بهتر موقعیت غذا، پالس‌های بیشتری ارسال می‌کند. شبیه‌سازی این رفتار در الگوریتم بهینه‌سازی خفاش با تنظیم پارامتر r انجام می‌شود. هرچه مقدار این پارامتر به یک نزدیک تر باشد، جستجوی محلی در اطراف بهترین موقعیت با احتمال بیشتری انجام خواهد شد و برعکس هرچه مقدار این پارامتر از یک کمتر شود، احتمال انجام جستجو نیز کاهش خواهد یافت. در جدول (۱)، شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی خفاش آورده شده است.

۳-۲- نسخه اصلاح شده الگوریتم بهینه‌سازی

خفاش

در نسخه استاندارد الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، سرعت هر خفاش در گام بعد، متأثر از دو پارامتر است. یکی سرعت خفاش در مرحله فعلی $x_i(t)$ ، و دیگری تجربه بهترین عضو گروه $gbest$. طبق رابطه (۱۴)، میزان تأثیر تجربه گروهی بر سرعت هر خفاش با پارامتر f_i کنترل می‌شود. به عبارت دیگر، f_i تعیین‌کننده میزان وابستگی سرعت یک خفاش به تجربیات همسایگان خود است؛ برای مثال، با انتخاب $f_i = 0$ تمامی خفاش‌ها با سرعت قبلی خود به جستجوی جواب بهینه در فضای مسئله می‌پردازند و در نتیجه در مواجهه با غذا یا مانع، سرعت خود را تغییر نمی‌دهند. همچنین در صورتی که مقدار این پارامتر برابر f_{max} شود، تمامی جواب‌ها روی یک نقطه همگرا خواهند شد. در اولین مرحله برای اصلاح الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، برای هر خفاش فرکانس f_i به صورت زیر تعریف می‌شود.

۳- اگرچه میزان شدت صوت در بسیاری از حالات متفاوت است، باین حال فرض می‌شود محدوده تغییرات آن بین $[r_{min}, r_{max}]$ است.

با توجه به قوانین فوق، در الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، موقعیت i امین خفاش در فضای d بعدی، به صورت $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$ نمایش داده می‌شود. همچنین برای هر خفاش یک بردار سرعت به فرم $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$ تعریف می‌شود. بهترین موقعیتی که هر خفاش تا کنون داشته است نیز با $pbest_i = [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id}]$ نمایش داده می‌شود. با در نظر گرفتن تعاریف فوق، موقعیت و سرعت هر خفاش در هر تکرار، طبق رابطه زیر به روزآوری خواهد شد:

$$f_i = f_{min} + rand(\cdot)(f_{max} - f_{min}) \quad (13)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + f_i(gbest - x_i(t)) \quad (14)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (15)$$

در روابط فوق، f_{min} و f_{max} به ترتیب حد بالا و پایین فرکانس و $gbest$ نیز موقعیت بهترین خفاش در بین تمامی اعضای جمعیت است. $rand(\cdot)$ نیز یک عدد تصادفی در محدوده صفر و یک است. در الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در بهینه‌های محلی، در شرایطی، برای هریک از خفاش‌ها طبق رابطه زیر، جستجوی محلی در همسایگی بهترین جواب انجام می‌شود.

$$x_{i,new}(t+1) = x_i(t+1) + \alpha A_{mean}(t)(gbest - x_i(t)) \quad (16)$$

در رابطه فوق، α فاکتور تنظیم و A_{mean} نیز متوسط بلندی صوت تمامی خفاش‌ها در زمان t است. مقدار α برای هر خفاش به صورت تصادفی محدوده $[-1,1]$ انتخاب می‌شود. بلندی صوت $A_i(t)$ و میزان پالس‌رسانی r نیز در هر تکرار از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$r_i(t+1) = r_i(1)(1 - \exp(-\gamma t)) \quad (17)$$

جدول (۱): شبه کل الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

Objective function $F(x_i)$, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$

Step 1: Initialization.

Set the generation counter $t = 1$
 Initialize the bat population x_i and v_i randomly, $i = 1, 2, \dots, N$
 Initialize loudness A_i , pulse frequency f_i and pulse rate r_i randomly

Step 2: While the termination criteria is not satisfied **or** $t < \text{Max number of iterations}$ **do**

Generate new solutions by adjusting frequency, and updating velocities and positions using equations (13) to (15)

if ($rand > r_i$) **then**

Select a solution among the best solutions

Generate a local solution around the selected best solution using equation (16)

end

if ($rand < A_i(t) \& F(x_i) < F(gbest)$) **then**

Accept the new solution for the i th bat as the initial population for the next iteration.

Increase r_i and reduce A_i according to the equation (17) and (18) respectively.

end

Rank the bats and find the current best bat $gbest$

$t = t + 1$

Step 3: end while

Step 4: Post-processing the results and visualization.

$$f_i(t) = \left(f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \frac{t}{Maxgen} \right) \quad (19)$$

در رابطه فوق، $Maxgen$ حداکثر تعداد تکرار الگوریتم است. طبق رابطه فوق، با افزایش تعداد تکرارها، مقدار f_i از f_{min} شروع به افزایش می‌کند و در آخرین تکرار، مقدار آن به f_{max} می‌رسد. در ابتدا خفاش‌ها میل بیشتری به تجربه‌های تازه دارند و با گذشت زمان این میل، جای خود را به دنباله‌روی بیشتر از بهترین‌ها می‌دهد؛ از این‌رو، همان‌طور که از رابطه (۱۹) مشاهده می‌شود؛ از این‌رو، همان‌طور که از رابطه (۱۹) مشاهده می‌شود، در ابتدای فرایند جستجو، با انتخاب مقادیر کوچک برای f_i اهمیت بیشتری به جستجوی شخصی داده ایم. سپس با گذشت زمان و پس از تعدادی کافی تکرار، با افزایش f_i ، این تأثیر کاهش می‌یابد و به جستجوی مبتنی بر تجربیات گروهی اهمیت بیشتری داده می‌شود. درخور ذکر است

سرعت هر خفاش در این مرحله طبق همان رابطه (۱۴)، به‌روزرآوری خواهد شد. همچنین برای جستجوی محلی، در حالتی که $rand > r_i$ باشد، موقعیت جدید هر خفاش طبق رابطه (۱۶) محاسبه خواهد شد؛ اما برای حالتی که $rand < r_i$ باشد، به جای استفاده از رابطه (۱۶)، از رابطه زیر که الهام‌گرفته از الگوریتم تکامل تفاضلی است، برای تعیین موقعیت جدید خفاش‌ها استفاده شده است.

$$x_i(t+1) = gbest + f_i \times (x_{r1}(t) - x_{r2}(t))$$

$$r1 \neq r2$$

(۲۰)

در رابطه فوق، x_{r1} و x_{r2} دو عضو از مجموعه جواب‌ها هستند که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. تأثیر مقدار β بر کارایی الگوریتم، همانند تأثیر پارامتر β در الگوریتم آبکاری فلزات است؛ از این‌رو در این مقاله به جای انتخاب این پارامتر به‌صورت تصادفی، از رابطه زیر مقدار آن محاسبه شده است.

$$\beta(t) = (0.45/t)^{1/t} \beta(t-1) \quad (21)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود همانند الگوریتم تبرید فلزات، ابتدا دما از یک مقدار مشخص شروع و در هر مرحله مقدار آن نسبت به مرحله قبل کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، ابتدا با انرژی زیادی به هر عضو از جمعیت، اجازه فرار از یک بهینه محلی داده می‌شود و همچنان که جستجو ادامه دارد، انرژی نیز کاهش می‌یابد و در نهایت جستجو به سمت بهینه سراسری میل خواهد کرد. شبه کد الگوریتم اصلاح‌شده بهینه‌سازی خفاش در زیر نشان داده شده است. در جدول (۲) شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی خفاش اصلاح‌شده نشان داده شده است.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، دو پارامتر دیگر نیز وجود دارند که در سرعت همگرایی و دقت جواب تأثیر زیادی دارند. یکی تعداد اعضای جمعیت و دیگری حداکثر تعداد تکرار. هرچه تعداد اعضای جمعیت بیشتر باشد، الگوریتم در تعداد تکرارهای کمتر به جواب بهینه همگرا می‌شود. در عوض، با کاهش تعداد اعضا، تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به جواب بهینه افزایش خواهد یافت. در حالت کلی می‌باید مصالحه‌ای بین تعداد اعضای جمعیت و

۳۴ برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در محیط تجدید ساختار یافته با هدف ایجاد سرمایه‌گذاری مطلوب به کمک ...

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه است. قبل از معرفی الگوریتم بهینه‌سازی مد نظر، ابتدا مقدمه‌ای در خصوص مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ذکر خواهد شد.

در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، چون تنها یک تابع هدف وجود دارد، بنابراین بهترین جواب مسئله، جوابی است که آن تابع هدف را بسته به شرایط مسئله بیشینه یا کمینه کند. در این گونه مسائل نیز معمولاً تنها یک جواب بهینه وجود دارد؛ اما در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، پیدا کردن جواب منحصر به فرد که بتواند به‌طور هم‌زمان تمامی توابع هدف را بهینه کند، تقریباً غیرممکن است. با این حال مجموعه‌ای از جواب‌ها به دست می‌آیند که بهترین تعامل را بین اهداف برقرار می‌کنند. به این جواب‌ها، جواب‌های بهینه پارتو گفته می‌شود. جواب‌های پارتو در حقیقت همان جواب‌های بهینه‌ای است که با هیچ جواب دیگری از مجموعه جواب‌ها مغلوب نمی‌شوند. تعریف ریاضی مغلوب بودن یک جواب به صورت زیر است [۳۵]:

اگر هر دو شرط زیر به‌طور هم‌زمان برآورده شود، در مسئله بهینه‌سازی m هدفه $f_i, i=1,2,\dots,m$ ، جواب x_1 ، جواب x_2 را مغلوب می‌کند:

- ۱- به‌ازای تمامی f_i ها، $f_i(x_1)$ بدتر از $f_i(x_2)$ نباشد؛
- ۲- دست‌کم به‌ازای یکی از f_i ها، $f_i(x_1)$ بهتر از $f_i(x_2)$ باشد.

اگر یکی از دو شرط فوق برقرار نباشد، جواب x_1 جواب x_2 را مغلوب نمی‌کند. شایان ذکر است اگر جواب x_1 بر جواب x_2 غلبه نکند، لزوماً به معنی آن نیست که x_2 بر x_1 غلبه می‌کند.

با توجه به تعریف فوق، جواب $x^* \in X$ بهینه به مفهوم پارتو است اگر به‌ازای تمامی توابع هدف، هیچ‌یک از جواب‌های $x^* \in X$ را مغلوب نکنند؛ یعنی به‌ازای تمامی f_i ها، $f_i(x^*)$ بدتر از $f_i(x)$ نباشد و دست‌کم به‌ازای یکی از f_i ها، $f_i(x^*)$ بهتر از $f_i(x)$ باشد. با توضیحات ارائه‌شده در بالا، در ادامه الگوریتم بهینه‌سازی خفاش چندهدفه تشریح می‌شود.

در اولین قدم، برای تبدیل الگوریتم بهینه‌سازی خفاش تک‌هدفه به الگوریتم چندهدفه، لیستی به نام آرشیو در نظر گرفته می‌شود که اعضای آن منحصرراً جواب‌های

حداکثر تعداد تکرار الگوریتم صورت پذیرد. در بحث بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، پیشنهاد می‌شود تعداد اعضای جمعیت بین ۴ الی ۵ برابر تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شود [۳۴].

جدول (۲): نسخه بهبود یافته الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

Objective function $F(x_i)$, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$

Step 1: Initialization.
Set the generation counter $t = 1$
Initialize the bat population x_i and v_i randomly, $i = 1, 2, \dots, N$
Initialize loudness A_i , pulse frequency f_i and pulse rate r_i randomly

Step 2: While the termination criteria is not satisfied **or** $t < \text{Max number of iterations}$ **do**
Generate new solution by adjusting frequency and updating velocity and position, equations (14) to (15) and (19),
if ($\text{rand} > r_i$) **then**
Select a solution among the best solutions
Generate a local solution around the selected best solution using equation (16)
else
Generate a local solution around the randomly selected solution using eq. (20)
end if ($\text{rand} < A_i(t) \ \& \ F(x_i) < F(\text{gbest})$)
then
Accept the new solution for the i th bat as the initial population for the next iteration.
adjust β using equation (21)
Increase r_i and reduce A_i according to the equation (17) and (18) respectively.
end
Rank the bats and find the current best bat gbest
 $t = t + 1$

Step 3: end while
Step 4: Post-processing the results and visualization.

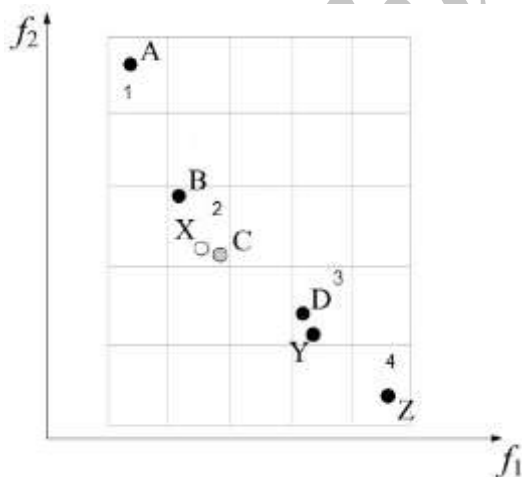
۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش چندهدفه

با توجه به اینکه مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال مطرح‌شده در این مقاله، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است، برای حل آن می‌باید از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شود؛ اما الگوریتم بهینه‌سازی خفاش بهبودیافته بیشتر برای حل مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه به کار می‌رود؛ از این رو، هدف این بخش تعمیم الگوریتم مذکور به

آرشیو اضافه می شوند، ممکن است بهترین عضو را در طی تکرار الگوریتم مغلوب کند و بنابراین از لیست حذف شود. حتی اگر این امر نیز اتفاق نیافتد، تمامی جواب‌های مسئله به سمت این جواب همگرا می شود و پراکندگی جواب‌ها از بین خواهد رفت.

در این مقاله برای حفظ تنوع و کیفیت جواب‌ها، همچنین جلوگیری از افزایش ماهیت تصادفی انتخاب شدن *gbest* از ترکیب روش چرخ رولت و مفهوم جدول‌بندی استفاده شده است. برای درک بهتر موضوع، با استفاده از شکل (۱)، فرایند مذکور برای یک مسئله بهینه سازی در فضای دو بعدی شرح داده می شود:

ابتدا فضای جواب را جدول‌بندی می شود. انتخاب تعداد خانه‌های افقی و عمودی اختیاری است؛ با این حال اگر تعداد این خانه‌ها زیاد باشند، تعداد اعضای قرارگرفته در هر خانه نیز کاهش می یابد و شانس انتخاب اعضای باکیفیت نیز کمتر خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد خانه‌های جدول، ماهیت انتخاب تصادفی اعضا افزایش خواهد یافت. در صورتی که تعداد خانه‌های جدول نیز کم باشد، تعداد اعضای موجود در هر خانه نیز زیاد می شوند و مشکل مطرح شده در فوق نیز دوباره وجود خواهد داشت.



شکل (۱): نحوه جدول‌بندی اعضای موجود در لیست آرشیو

همان‌طور که از شکل (۱) مشاهده می شود تعداد اعضای موجود در خانه‌های ۱ و ۴ برابر یک و در خانه‌های ۲ و ۳ نیز به ترتیب سه و دو هستند. طبق روابط (۱۴)، (۱۶) و (۲۰)، هر یک از اعضای جمعیت می باید یکی از بهترین

نامغلوب هستند؛ یعنی جواب‌هایی که نخست، جزو جواب‌های بهینه مسئله بوده‌اند و دوم، هیچ برتری نسبت به هم ندارند. در شروع الگوریتم، این لیست خالی است و هیچ جوابی در آن قرار ندارد. بعد از اجرای اولین تکرار، تمامی جواب‌ها با هم مقایسه می شوند و جواب‌هایی که هیچ‌یک از اعضای جمعیت مغلوب نکرده‌اند به این لیست منتقل می شوند. در خور ذکر است این احتمال وجود دارد در چندین تکرار، هیچ جواب بهینه‌ای به مفهوم پارتو به وجود نیاید؛ بنابراین لیست آرشیو همچنان خالی خواهد بود. در تکرارهای بعدی با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۶)، اعضای جدید تولید و تمامی آنها با هم مقایسه می شوند تا جواب‌های پارتو جدید مشخص شوند. سپس این جواب‌ها را به لیست آرشیو منتقل می شوند. با توجه به اینکه ممکن است یک یا چند عضو قبلی موجود در لیست، اعضای جدید منتقل شده به آرشیو را مغلوب کنند یا برعکس تعدادی از اعضای جدید بر تعدادی از اعضای قبلی غلبه کنند، در مرحله بعد، لیست آرشیو پالایش و اعضای مغلوب حذف می شوند. این فرایند تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم برآورده نشود، تکرار خواهد شد.

موضوع شایان توجه دیگر این است که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه، چون بهترین پاسخ (همان پاسخ بهینه) معمولاً منحصر به فرد است، بنابراین در روابط (۱۴)، (۱۶) و (۲۰) پارامتر *gbest* در هر تکرار، بهترین جواب الگوریتم تا آن تکرار خواهد بود؛ اما در مسائل بهینه سازی چندهدفه هیچ‌یک از جواب‌های پارتو (جواب‌های موجود در لیست آرشیو) بر همدیگر برتری ندارند. سوالی در خور طرح این است که برای چندهدفه کردن الگوریتم خفاش، کدام یک از اعضای موجود در لیست آرشیو می باید جایگزین *gbest* شوند. مکانیزم‌های مختلفی برای انتخاب *gbest* پیشنهاد می شود. یکی از مکانیزم‌ها این است که این پارامتر به صورت تصادفی از بین اعضای موجود در لیست آرشیو انتخاب شود. این امر ممکن است ماهیت تصادفی بودن الگوریتم را افزایش دهد و مانع همگرایی الگوریتم به سمت جواب‌های با کیفیت شود. مکانیزم پیشنهاد شده دیگر این است که در تمام طول تکرار الگوریتم یک عضو ثابت، بهترین عضو در نظر گرفته می شود. محدودیتی به وجود آمده در اینجا این است که یکی دیگر از اعضای که به لیست

پس از آنکه احتمال لیدر شدن هر عضو موجود در لیست آرشیو تعیین شد، یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود. سپس اعضای موجود در لیست آرشیو براساس احتمال انتخاب شدنشان (که به شکل صعودی مرتب شده‌اند) از اول بررسی می‌شوند و اولین عضو انتخاب خواهد شد که توزیع تجمعی آن بزرگ‌تر یا مساوی عدد تصادفی تولید شده باشد.

این امر باعث می‌شود اعضای جمعیت به بخش‌هایی از فضای جواب همگرا شوند که پراکندگی در آنها بیشتر است.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی، برای هر عضو جمعیت که همان کاندیداهای طرح نهایی هستند، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تراکم و میزان سرمایه‌گذاری جذب شده محاسبه می‌شوند.

برای تعیین خطوط جذاب برای سرمایه‌گذاری، لازم است میانگین میزان بازگشت سرمایه هر خط بررسی شود. با محاسبه توابع هدف برای تمام طرح‌های اولیه، طرح‌های نامغلوب به لیست آرشیو منتقل می‌شوند. سپس اعضای موجود در لیست، دوباره پالایش می‌شوند و اعضای مغلوب حذف خواهند شد؛ البته در تکرار اول، چون لیست آرشیو از قبل خالی است، در این مرحله هیچ طرحی از لیست حذف نخواهد شد. در ادامه شرط خاتمه الگوریتم بررسی می‌شود و در صورت برآورده نشدن آن، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفایش اصلاح‌شده، جمعیت قبلی طبق روابط (۱۳) تا (۱۶) اعضای جدید تولید می‌شوند. دوباره فرایند فوق برای این اعضای جدید تکرار خواهد شد تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم برآورده شود. در پایان نیز با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی از بین چندین طرح بهینه موجود (طرح‌های موجود در لیست آرشیو)، طرح نهایی انتخاب خواهد شد.

اعضای موجود در لیست آرشیو را به‌عنوان لیدر ($gbest$) انتخاب کنند. برای اینکه کیفیت و پراکندگی جواب‌ها حفظ شود، می‌باید شانس انتخاب اعضای موجود در خانه‌های ۱ و ۴ که تعداد کمتری عضو دارند، بیشتر از خانه‌های ۲ و ۳ باشد. به همین ترتیب شانس انتخاب اعضای موجود در خانه ۳ نیز باید بیشتر از اعضای موجود در خانه ۲ باشد. برای برآورده شدن این هدف، ابتدا فرض می‌شود احتمال انتخاب شدن هر خانه متناسب با عکس تعداد اعضای موجود در آن خانه باشد؛ یعنی:

$$P_i \propto \frac{1}{n_i} \quad (22)$$

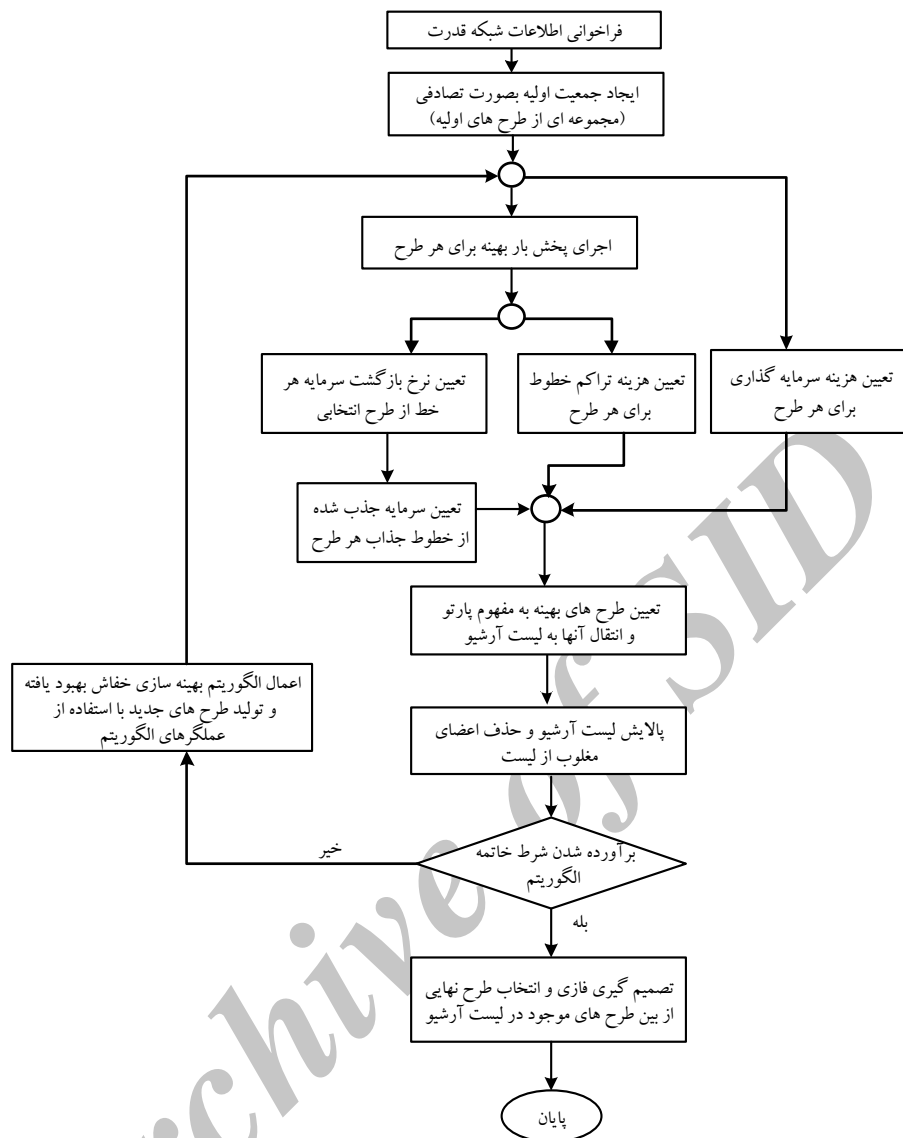
در رابطه فوق، P_i احتمال انتخاب شدن خانه i ام و n_i نیز تعداد اعضای موجود در آن خانه است. حال وقتی که یکی از خانه‌ها انتخاب شد، احتمال انتخاب هریک از اعضای موجود در آن خانه یکسان در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین اگر تعداد اعضای موجود در خانه i ام برابر n_i باشد، احتمال انتخاب شدن هریک از این اعضا مجدداً متناسب با $\frac{1}{n_i}$ خواهد بود. با توجه به توضیحات فوق، ملاحظه می‌شود در این روش احتمال انتخاب هر عضو موجود در خانه i ، متناسب با عکس مجذور تعداد اعضای موجود در آن خانه خواهد بود؛ یعنی:

$$P_{k_i} \propto \left(\frac{1}{n_i}\right)^2 \quad (23)$$

برای مثال، در شکل (۱) احتمال انتخاب هریک از اعضای A, B, C, X, D, Z به ترتیب متناسب با یک، یک سوم، یک سوم، یک سوم، یک سوم، نیم و یک خواهد بود. برای تبدیل رابطه (۲۳) به یک رابطه تساوی، از رابطه (۲۴) استفاده می‌شود.

$$P_{k_i} = \frac{\left(\frac{1}{n_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{n_i}\right)^2} \quad (24)$$

در رابطه فوق، P_{k_i} بیانگر احتمال انتخاب شدن عضو k ام موجود در خانه i ام، و n_i نیز تعداد اعضای موجود در آن خانه است. N نیز تعداد کل خانه‌هایی است که در آنها دست‌کم یک عضو بهینه پارتو وجود دارد.



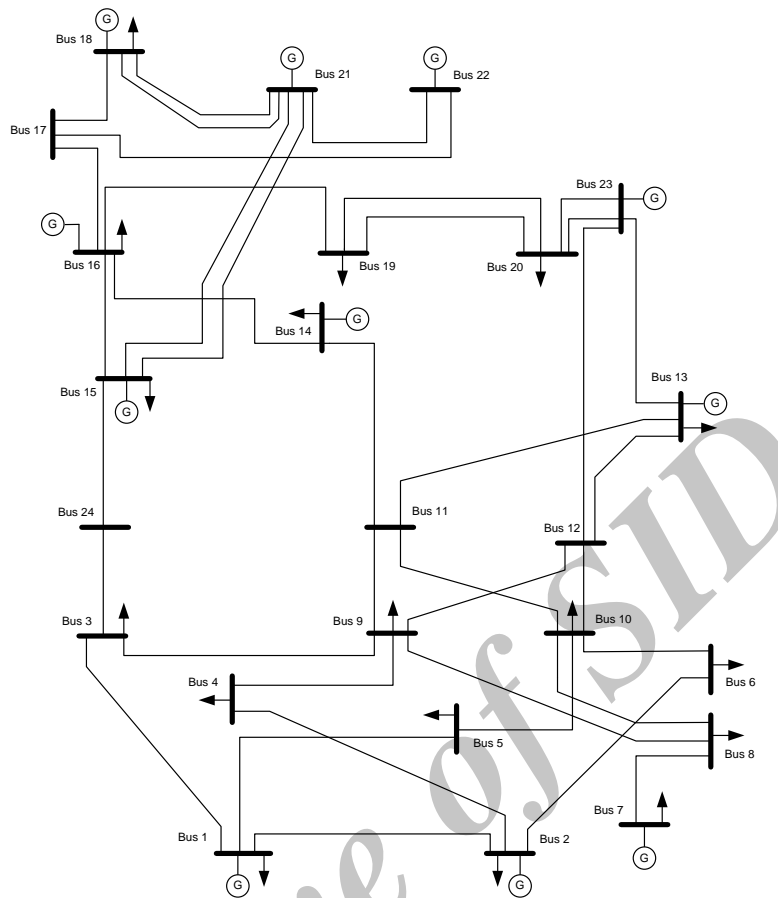
شکل (۲): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال.

۴-۱- معرفی شبکه مطالعه شده

در این بخش با اعمال روش‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی روی شبکه نمونه، نتایج تجزیه و تحلیل خواهند شد. شبکه مطالعه شده در این مقاله، شبکه قدرت ۲۴ شین IEEE است که اطلاعات آن در مرجع [۳۶] آورده شده است. این سیستم ۳۲ ژنراتور با ظرفیت‌های ۱۲ تا ۴۰۰ مگاوات دارد. شبکه انتقال این سیستم متشکل از ۳۸ خط انتقال و ۵ ترانسفورماتور است و شین‌های این سیستم از ۱۰ شین ژنراتوری، ۱۰ شین بار و ۴ شین اتصال تشکیل شده‌اند. ظرفیت نصب شده در این شبکه، ۳۴۰۵ مگاوات و پیک بار آن ۲۸۵۰ مگاوات است. دیاگرام تک خطی آن در

شکل (۳) آورده شده است. اطلاعات دیگر شبکه مانند مشخصات خطوط انتقال و واحدهای تولیدی در [۳۷] ارائه شده‌اند.

در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود سیستم برای ده سال آینده با افزایش میزان تولید و بار به اندازه ۲/۲ برابر مقدار اولیه آن گسترش خواهد یافت، در این صورت میزان بار شبکه به مقدار ۶۲۷۰ مگاوات و میزان تولید کل شبکه به ۷۴۹۰ مگاوات خواهد رسید. تعداد کاندیدای خطوط جدید برابر ۴۴ در نظر گرفته شده است؛ همچنین مطابق مراجع [۱۱، ۱۲، ۱۵] فرض شده است ۳۴ تای آنها در حریم کنونی و ۱۰ کاندید دیگر در حریم جدید باشند.



شکل (۳): نمودار تک خطی شبکه مطالعه‌شده.

پارامترهای پیشنهاد قیمت واحدهای تولیدی نیز مطابق جدول (۴) انتخاب شده‌اند.

اطلاعات مربوط به این خطوط در جدول (۳) ارائه شده‌اند. هزینه سرمایه‌گذاری برای نصب خطوط جدید ۱۰۰۰ دلار بر مگاوات - مایل در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): هزینه نصب خطوط در حریم‌های جدید شبکه ۲۴ باسه

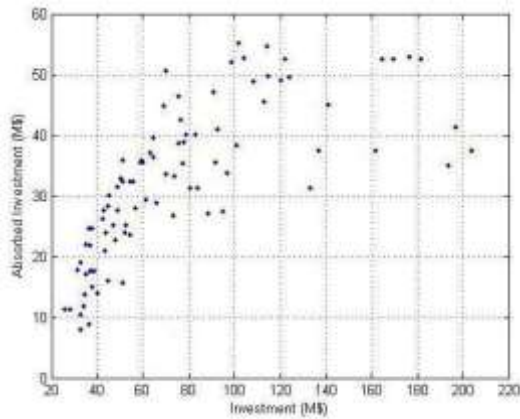
From	To	Investment Cost (M\$)	From	To	Investment Cost (M\$)
1	8	3.15	13	14	15.5
2	8	2.89	14	23	21.5
6	7	4.36	16	23	28.5
6	8	1.58	19	23	21
7	2	2.19	20	22	9

مثلاً یک سال چقدر خواهد بود. تعیین مناسب α در تعیین میزان بازگشت سرمایه واقعی بسیار مؤثر است. این پارامتر به عوامل مختلفی همچون مکانیزم بازیابی هزینه‌ها و میزان سود بانکی وابسته است. در ادامه روش پیشنهادی برای مکانیزم قیمت‌گذاری برای سه حالت با ضریب بازگشت سرمایه مختلف آزمایش شده است.

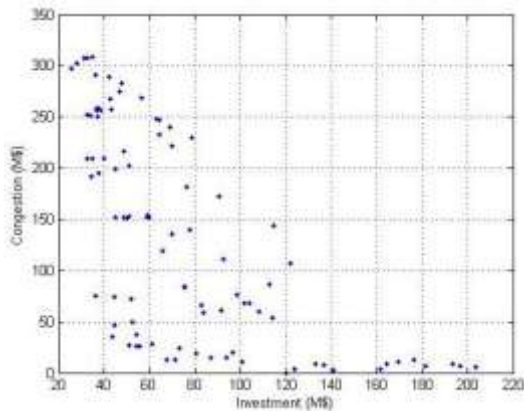
۴-۲- معرفی سناریوهای مختلف

معمولاً روش‌های موجود برای محاسبه هزینه استفاده از خطوط انتقال تنها بیانگر نحوه بازیابی هزینه‌ها هستند و اثری از زمان در این بازیابی هزینه‌ها وجود ندارد؛ بنابراین، نیازمند تعریف ضریب بازگشت سرمایه (α) است که مشخص کند میزان بازگشت سرمایه در محدوده زمانی معین

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه درصد جذب سرمایه برای این حالت برابر ۰/۷۲ و کمینه آن نیز ۰/۰۲ است.



شکل (۴): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده.



شکل (۵): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان هزینه تراکم.

شکل (۴) بیانگر ناحیه مصالحه بین میزان کل سرمایه‌گذاری و سرمایه‌گذاری خصوصی جذب‌شده است. این شکل نشان‌دهنده رابطه حمایتی بین دو تابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده است. علت این رابطه این‌گونه توجیه می‌شود که هرچه میزان سرمایه‌گذاری بیشتر شود و خطوط بیشتری اضافه شوند، ظرفیت حریم‌ها، افزایش می‌یابد و میزان هزینه‌گرفتگی کمتر می‌شود. هرچه میزان هزینه‌گرفتگی کمتر شود و یا ظرفیت حریم‌ها افزایش یابد، اندازه فلوی عبوری از کل شبکه انتقال نیز بیشتر خواهد شد. از آنجاکه میزان درآمد با فلوی خط انتقال رابطه مستقیم دارد، بنابراین طبق رابطه میزان درآمد از خطوط یا

جدول (۴): پارامترهای پیشنهاد واحدهای تولیدی شبکه IEEE

Generators	a_i	b_i
G1	0.01131	12.145
G2	0.01131	12.145
G3	0.0122	17.924
G4	0.003	20.023
G5	0.001	100
G6	0.00667	9.2706
G7	0.00667	9.2706
G8	0.00028	5.345
G9	0.00028	5.345
G10	0.001	0.5
G11	0.00392	8.919

۴-۳- نتایج اعمال الگوریتم پیشنهادی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌ها در قالب سه سناریو ارائه شده‌اند. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی خفشار چندهدفه به شرح زیر انتخاب شده‌اند:

$$N_p = 200, \beta = 0.9, MaxGen = 300, \\ f_{min} = 0, f_{max} = 100, \gamma = 0.9$$

که N_p تعداد اعضای جمعیت و $MaxGen$ حداکثر تعداد تکرار یا همان شرط خاتمه الگوریتم است. ظرفیت لیست آرشیو نیز برابر تعداد اعضای جمعیت در نظر گرفته شده است.

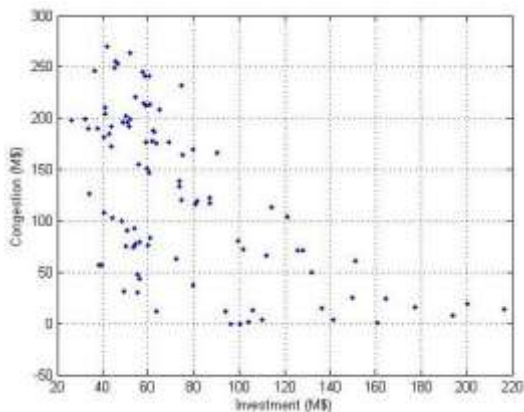
مکانیزم بازگشت هزینه‌های خطوط انتقال نیز، روش فلوی معکوس صفر (رابطه ۹) انتخاب شده است. در این روش، معیار پرداخت هزینه انتقال، هم‌جهت جریان پدیدآمده از یک تبادل خاص با جهت جریان خالص گذرنده از هر یک از مسیرهای انتقال است. به عبارت دیگر، به مشتریانی که مصرف آنها جریانی در خلاف جهت جریان خالص گذرنده از مسیر انتقال پدید می‌آورد، هزینه‌ای تعلق نمی‌گیرد. حداقل میزان بازگشت سرمایه مد نظر برای تمامی سناریوها برابر ۱۶ درصد انتخاب شده است [۱۶]. مقدار عدم قطعیت در پارامترهایی مانند بار و قیمت نیز ده درصد در نظر گرفته شده است.

نتایج برای سه میزان رشد سرمایه α برابر ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۲۵ در شکل‌های (۴) تا (۱۲) آورده شده‌اند. شکل‌های (۴) تا (۶) متناظر با میزان بازگشت سرمایه ۰/۳۵ است.

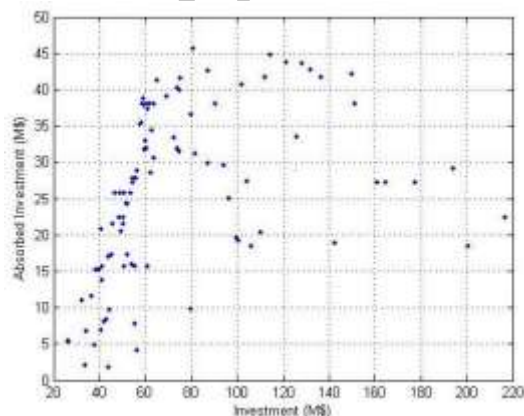
۴۰ برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در محیط تجدید ساختار یافته با هدف ایجاد سرمایه‌گذاری مطلوب به کمک ...

تراکم، درآمد و سرمایه جذب‌شده لزوماً افزایش می‌یابد. در بعضی از مراجع پیشنهاد شده است به مشتریانی که مصرف آنها جریانی بر خلاف جهت جریان خالص گذرنده از مسیر انتقال به وجود می‌آورد، مقداری از هزینه انتقال پرداخت شود؛ زیرا کاهش جریان خالص گذرنده از مسیر، برای کل سیستم سودمند است. در این صورت انتظار می‌رود همگام با کاهش هزینه تراکم و کاهش پرشدگی خطوط، فلوی عبوری از شبکه انتقال، افزایش و در نتیجه درآمد و به طبع آن، جذب سرمایه نیز بیشتر شود.

در شکل‌های (۷) تا (۹)، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای حالتی نشان داده شده است که میزان بازگشت سرمایه برابر $0/3$ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، میزان سرمایه جذب‌شده بین $0/65$ و $0/4$ برابر سرمایه‌گذاری‌های انجام شده است.

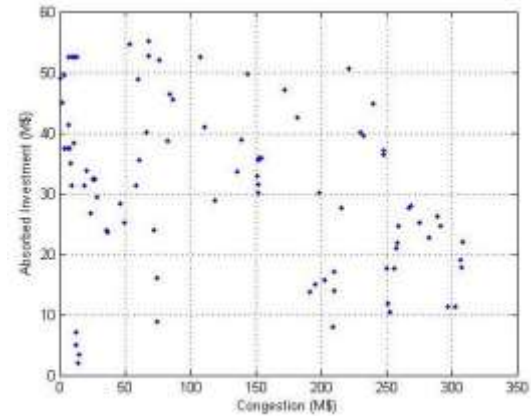


شکل (۷): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان هزینه تراکم.



شکل (۸): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده.

هزینه تخصیص یافته به خط انتقال (رابطه ظرفیت استفاده‌نشده در روش مگاوات مایل)، درآمد‌های شبکه به‌طور کلی افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود خطوط، جذاب‌تر و در نتیجه، سرمایه جذب‌شده نیز بیشتر شود.

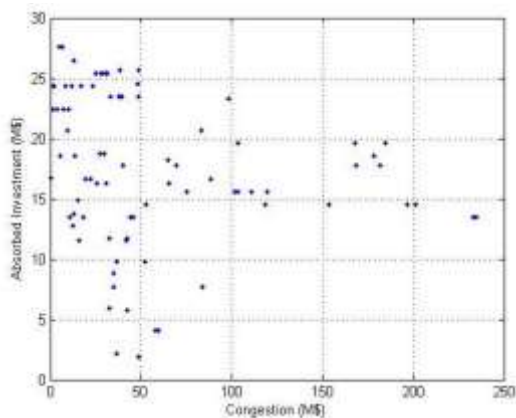


شکل (۶): نمودار مصالحه بین هزینه تراکم و سرمایه جذب‌شده.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود رابطه معکوس بین میزان هزینه گرفتگی در طول دوره برنامه‌ریزی با میزان سرمایه‌گذاری انجام‌شده وجود دارد. این شکل به‌طور ضمنی بیان می‌کند هرچه سرمایه‌گذاری بیشتر باشد، خطوط انتقال نصب‌شده در حریم‌ها بیشتر می‌شود؛ در نتیجه، ظرفیت حریم‌ها افزایش می‌یابد و میزان گرفتگی و هزینه آن نیز کمتر خواهد شد.

شکل (۶) نیز نشان‌دهنده رابطه معکوس بین کل هزینه گرفتگی و میزان سرمایه جذب‌شده است. همان‌طور که بیان شد همگام با کم‌شدن هزینه گرفتگی با افزایش سرمایه‌گذاری و خطوط انتقال، ظرفیت حریم‌ها به دلیل نصب خطوط جدید افزایش می‌یابد و در نتیجه، کل اندازه فلوی عبوری از شبکه انتقال افزایش می‌یابد. از آنجاکه درآمد به دست آمده از شبکه انتقال به فلوی عبوری از خطوط وابسته است، افزایش فلوی کلی شبکه به افزایش درآمد‌های شبکه انتقال منجر می‌شود. افزایش این درآمد‌ها نیز به نوبه خود به افزایش احتمال جذب سرمایه خصوصی منجر می‌شود.

همچنین با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود در قیمت‌گذاری به روش فلو معکوس صفر، با کاهش هزینه

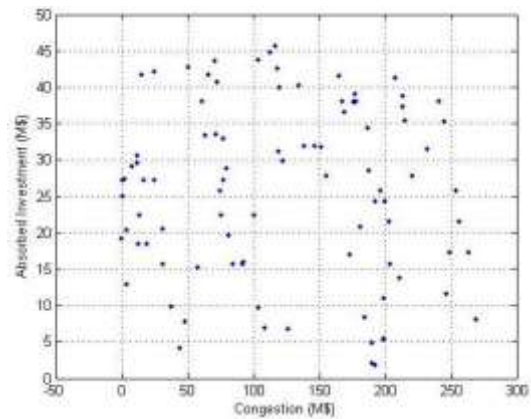


شکل (۱۲): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه گذاری و میزان سرمایه جذب شده.

همان طور که مشاهده می شود در این حالت سرمایه جذب شده بین ۰/۴۸ و ۰/۰۳ درصد است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهند انتخاب ضریب بازگشت سرمایه نامی کاملاً به مکانیزم قیمت گذاری و حداقل میزان بازگشت مطلوب (MARR) وابسته است؛ بنابراین در یک شبکه قدرت با تعیین مقدار مناسب این دو پارامتر و الگوسازی عدم قطعیت ها، همچنین توجه به توپولوژی شبکه و سیاست گذاری ها، به طراحی میزان بازگشت سرمایه مطلوب برای شبکه انتقال اقدام می شود. در این مقاله حداقل میزان بازگشت سرمایه (MARR) برای تمامی حالات، برابر ٪۱۶ در نظر گرفته شده است [۴]. عدم قطعیت در پارامترها نیز معادل ٪۱۰ فرض شده است.

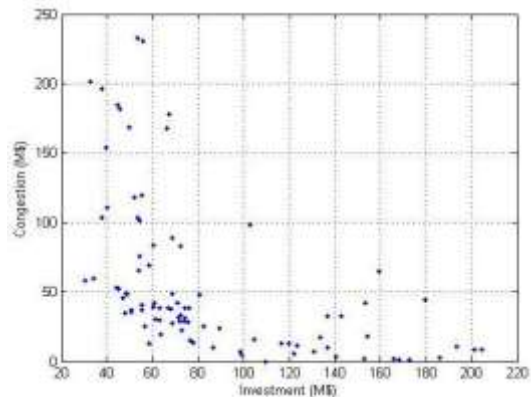
۴-۴- انتخاب طرح نهایی

همان طور که در شکل های (۴) تا (۱۲) نشان داده شده است مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال با سه تابع هدف مختلف، به تولید چندین طرح بهینه منجر می شود که هیچ یک از آنها برتری نسبت به هم ندارند؛ بنابراین برای انتخاب یک جواب از بین چندین جواب به دست آمده می باید از دانش یک فرد خبره استفاده کرد. یکی از روش های الگوسازی دانش افراد خبره، روش تصمیم گیری فازی است. در این روش ابتدا با توجه به نظر فرد خبره، سطوح ارضای مشخصی برای هر یک از توابع هدف تعیین می شود (μ_{di}). در ادامه توابع عضویت متناظر با جواب های پارتو به صورت نزولی مرتب

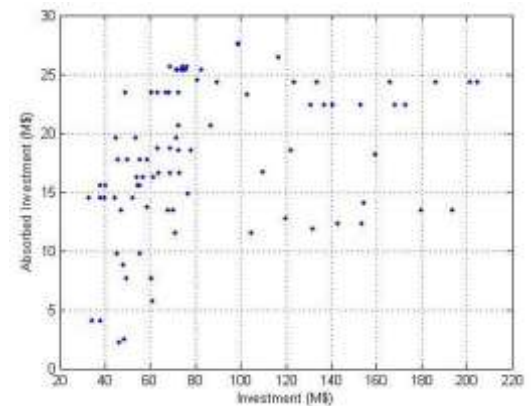


شکل (۹): نمودار مصالحه بین هزینه تراکم و میزان سرمایه جذب شده.

نتایج شبیه سازی ها برای حالتی که میزان بازگشت سرمایه برابر ۰/۲۵ باشد نیز در شکل های (۱۰) تا (۱۲) آورده شده اند.



شکل (۱۰): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه گذاری و میزان هزینه تراکم خطوط.



شکل (۱۱): نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه گذاری و میزان سرمایه جذب شده.

همان‌طور که از این جداول مشاهده می‌شود با کم‌شدن μ_{d1} از 0.8 به 0.7 و μ_{d2} از 1 به 0.8 ، هزینه سرمایه‌گذاری و کل هزینه پرشدگی افزایش یافته است. دلیل این امر حمایتی بودن رابطه بین این شاخص با هزینه پرشدگی خط است. همچنین با توجه به نتایج این جداول مشاهده می‌شود با افزایش سرمایه‌گذاری، میزان سرمایه جذب‌شده نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر وجود رابطه مستقیم بین میزان سرمایه‌گذاری‌ها با مقدار سرمایه‌های جذب‌شده است.

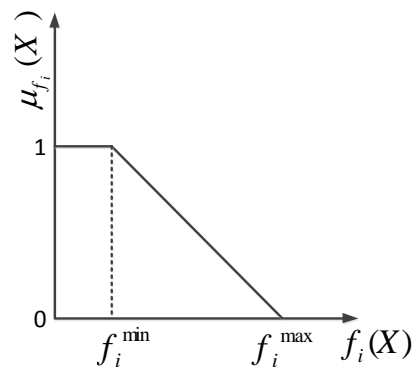
در جداول (۸) و (۹) خطوط اضافه‌شده به شبکه و میانگین میزان بازگشت سرمایه، به‌ازای سطوح ارضای مشخص و α های مختلف آورده شده‌اند. به کمک این جداول، خطوطی تشخیص داده می‌شوند که به‌عنوان نتیجه برنامه‌ریزی به‌منظور تأمین محدودیت‌های فیزیکی شبکه و یا صرفاً برای جذب سرمایه به شبکه انتقال اضافه شده‌اند؛ برای نمونه، همان‌طور که از جدول (۸) مشاهده می‌شود خط ۵-۱ به‌ازای α معادل 0.35 و 0.30 جذاب بوده و به شبکه اضافه شده است؛ اما به‌ازای α معادل 0.25 به شبکه اضافه نشده است. به عبارت دیگر، اضافه‌شدن این خط به شبکه در دو حالت اول صرفاً به دلیل جذاب‌بودن آن از نظر میزان بازگشت سرمایه است و تأثیر آن بر کاهش هزینه‌های تراکم چندان درخور ملاحظه نیست. همچنین مشاهده می‌شود خط ۱۶-۱۷ در هر سه حالت به طرح بهینه اضافه شده است؛ درحالی‌که این خط از نظر بازگشت سرمایه جذاب نیست و تنها دلیل اضافه‌شدن، تأثیر آن بر کاهش هزینه‌های تراکم شبکه است. به همین ترتیب می‌توان درباره سایر خطوط جداول (۸) و (۹) چنین استدلال‌هایی ارائه کرد.

می‌شوند؛ سپس سیستم تصمیم‌گیر فازی با استفاده از رابطه (۲۵)، طرح نهایی را انتخاب می‌کند.

$$\min\{\max|\mu_{id} - \mu_{fi}(X)|\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

در رابطه فوق m تعداد توابع هدف و $\mu_{fi}(X)$ مقدار تابع عضویت طرح X به‌ازای تابع هدف f_i است. در این مقاله تابع عضویت متناظر با هر طرح به‌صورت ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. نمودار متناظر با این تابع هدف در شکل (۱۳) آورده شده است.

درخور ذکر است مقدار سطوح ارضا برای هر تابع هدف به عوامل متعددی مانند سقف بودجه به‌منظور سرمایه‌گذاری، محدودیت‌ها و نیازهای فنی شبکه و بازار وابسته است. در جداول (۵) تا (۷) طرح بهینه نهایی برای سه سناریو، بررسی و به‌ازای سطوح ارضا مختلف آورده شده است. در این جداول، μ_{d1} ، μ_{d2} و μ_{d3} به ترتیب سطوح ارضا برای توابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری، کل هزینه پرشدگی و میزان سرمایه جذب‌شده هستند.



شکل (۱۳) تابع عضویت خطی برای هدف نام.

جدول (۵): طرح انتخابی نهایی به‌ازای α برابر 0.35

μ_{d1}	μ_{d2}	μ_{d3}	Investment Cost (M\$)	Total Congestion Cost (M\$)	Absorbed Investment (M\$)
0.8	1	0.9	68.63	13.25	28.35
0.7	0.8	0.9	74.68	23.34	29.88

جدول (۶): طرح انتخابی نهایی به‌ازای α برابر 0.3

μ_{d1}	μ_{d2}	μ_{d3}	Investment Cost (M\$)	Total Congestion Cost (M\$)	Absorbed Investment (M\$)
0.8	1	0.9	82.7	15.2	40.09
0.7	0.8	0.9	83.85	13.62	31.23

جدول (۷): طرح انتخابی نهایی به‌ازای α برابر 0.25

μ_{d1}	μ_{d2}	μ_{d3}	Investment Cost (M\$)	Total Congestion Cost (M\$)	Absorbed Investment (M\$)
0.8	1	0.9	59.93	26.67	32.97
0.7	0.8	0.9	62.48	28.59	34.46

جدول (۸): خطوط اضافه شده برای حالت‌های مختلف

$$(\mu_{d1}=0.8, \mu_{d2}=1, \mu_{d3}=0.9)$$

Location		$\alpha=0.35$		$\alpha=0.3$		$\alpha=0.25$	
From	To	I^a	RoR_l^b (%)	I^a	RoR_l^b (%)	I^a	RoR_l^b (%)
1	2	-	-	-	-	1	2.06
1	3	1	21.69	1	18.85	1	7.45
1	5	1	18.43	1	17.46	-	-
2	4	-	-	1	12.01	1	1.46
2	6	1	12.43	-	-	1	12.57
3	9	1	28.56	1	23.65	1	1.39
3	24	-	-	-	-	1	16.46
4	9	1	4.73	-	-	1	0.32
5	10	-	-	-	-	-	-
6	10	-	-	-	-	-	-
7	8	-	-	-	-	-	-
8	9	-	-	-	-	1	25.92
8	10	1	10.79	1	7.57	-	-
9	11	1	5.1	-	-	-	-
9	12	-	-	-	-	1	12.83
10	11	-	-	-	-	-	-
10	12	-	-	-	-	-	-
11	13	1	29.02	1	23.73	1	0.59
11	14	-	-	-	-	1	8.9
12	13	1	25.86	1	22.79	-	-
12	23	-	-	-	-	-	-
13	23	-	-	1	21.15	-	-
14	16	1	19.39	1	4.95	1	27.49
15	16	-	-	1	10.8	1	4.95
15	21	-	-	-	-	1	13.91
15	24	1	15.28	1	13.05	0	0
16	17	1	2.22	1	6.06	1	12.34
16	19	1	25.61	1	28.14	-	-
17	18	1	3.02	1	6.39	-	-
17	22	-	-	-	-	-	-
18	21	1	4.09	1	6.46	-	-
19	20	-	-	-	-	-	-
20	23	1	4.3	-	-	-	-
21	22	1	7.78	-	-	-	-
6	8	-	-	1	13.55	-	-
7	2	1	16.95	1	19.23	-	-
1	8	-	-	-	-	-	-
20	22	-	-	-	-	1	23.24
2	8	1	17.78	-	-	-	-
6	7	1	0.24	-	-	-	-
13	14	1	28.83	-	-	-	-
14	23	-	-	-	-	-	-
16	23	-	-	-	-	-	-
19	23	-	-	-	-	-	-

^a: وضعیت نصب خطوط انتقال.

^b: میزان بازگشت سرمایه ناشی از احداث خط انتقال در محل I.

در مقالات مختلف مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با اهداف مختلفی بررسی شده است؛ برای مثال در [۸]، اهداف برنامه‌ریزی شامل هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جدید، هزینه تراکم خطوط و میزان بار قطع شده بوده است. در این مقاله، افق زمانی مطالعه ده‌ساله بوده و فرض شده است مقدار بار و تولید در انتهای دوره به ۲/۲ برابر مقدار کنونی آن برسد. نتایج روی شبکه ۲۴ شینه IEEE پیاده‌سازی شده و برای حل مسئله بهینه‌سازی نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. خطوط اضافه‌شده به شبکه با در نظر گرفتن توابع هدف فوق، خطوط جدید در حریم‌های ۱-۲، ۳-۹، ۶-۱۰، ۷-۸، ۱۰-۱۲، ۱۶-۱۷، ۱۴-۸، ۶-۸ و ۲۰-۲۲ بوده‌اند. در [۱۵]، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال به صورت چندهدفه و چندمرحله‌ای بر مبنای آنالیز سناریو انجام شده است. در این مقاله دو تابع هدف هزینه سراسری جامعه (شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه پرشدگی ساعتی) و هزینه تنظیم در نظر گرفته شده‌اند. شبکه آزمایش‌شده نیز شبکه ۲۴ شینه IEEE است. در طرح نهایی، خطوط اضافه‌شده در حریم‌های ۲-۷، ۱۶-۱۷، ۲۲-۲۰ و ۸-۱ برای سناریو ۱، حریم‌های ۷-۸، ۲۲-۲۰ و ۱۰-۶ برای سناریو ۲ و حریم‌های ۳-۲۴، ۶-۸، ۷-۸، ۸-۹، ۱۶-۱۷، ۸-۶ و ۲۲-۲۰ برای سناریو ۳ هستند.

مرجع [۳۸] نیز به حل مسئله مد نظر با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات تک‌هدفه پرداخته و نتایج آن دو را با هم مقایسه کرده است. براساس نتایج ارائه‌شده در مرجع مذکور، با وجود اینکه هر دو الگوریتم توانسته‌اند خطوط جذاب از دیدگاه بخش خصوص را شناسایی کنند، با این حال دقت الگوریتم ژنتیک تا حدودی از الگوریتم ازدحام ذرات بهتر است؛ هرچند این افزایش دقت به کاهش سرعت همگرایی الگوریتم در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات منجر شده است. خطوط جذاب ارائه‌شده برای سرمایه‌گذاری در این مرجع عبارت‌اند از: خطوط ۲۴-۳، ۱۰-۱۱، ۱۱-۱۴، ۱۶-۱۷، ۱۴-۲۱، ۱۵-۲۴، ۱۵-۱۷، ۱۶-۲، ۷-۸، ۱-۸ و ۲۳-۱۴. هزینه سرمایه‌گذاری کل به دست آمده به‌ازای طرح فوق حدود ۶۶/۳۲ میلیون دلار ذکر شده است؛ این درحالی است که هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای روش بهینه‌سازی پیشنهادی در این مقاله و به‌ازای برابر ۰/۲۵ حداکثر برابر ۶۲/۴۸ میلیون دلار است.

جدول (۹): خطوط اضافه‌شده برای حالت‌های مختلف

($\mu_{d1}=0.7, \mu_{d2}=0.8, \mu_{d3}=0.9$)

Location		$\alpha=0.35$		$\alpha=0.3$		$\alpha=0.25$	
From	To	I ^a	RoR _I ^b (%)	I ^a	RoR _I ^b (%)	I ^a	RoR _I ^b (%)
1	2	1	20.26	1	23.7	1	2.09
1	3	-	-	1	12	1	7.23
1	5	-	-	-	-	-	-
2	4	1	13.65	-	-	-	-
2	6	1	9.41	1	13.34	1	2.06
3	9	1	17.39	1	23.3	1	6.66
3	24	0	0	1	0.51	-	-
4	9	1	7.13	-	-	1	4.23
5	10	-	-	1	6.16	-	-
6	10	-	-	-	-	1	16.06
7	8	1	2.92	-	-	-	-
8	9	0	0	1	1.59	1	16.48
8	10	1	4.4	-	-	-	-
9	11	1	0.87	-	-	-	-
9	12	-	-	-	-	1	16.94
10	11	-	-	-	-	1	19.13
10	12	-	-	-	-	-	-
11	13	-	-	-	-	1	1.47
11	14	-	-	-	-	1	15.8
12	13	1	20.87	-	-	-	-
12	23	-	-	-	-	1	19.37
13	23	1	18.16	1	19	-	-
14	16	1	7.14	1	16.11	1	20.25
15	16	-	-	1	13.84	1	2.48
15	21	-	-	-	-	1	12.03
15	24	-	-	1	16.96	-	-
16	17	-	-	-	-	1	10.49
16	19	1	8.56	-	-	-	-
17	18	1	7.37	1	2.63	-	-
17	22	-	-	-	-	-	-
18	21	1	7	1	8.18	-	-
19	20	-	-	-	-	-	-
20	23	1	12.74	-	-	-	-
21	22	1	2.25	-	-	-	-
6	8	1	10.36	-	-	-	-
7	2	1	3.25	1	1.05	-	-
1	8	-	-	-	-	1	23.22
20	22	1	14.9	-	-	1	32.56
2	8	1	16.32	1	14.79	-	-
6	7	1	4.52	-	-	-	-
13	14	1	24.87	1	20.29	-	-
14	23	-	-	-	-	1	18.72
16	23	-	-	-	-	-	-
19	23	-	-	-	-	-	-

^a: وضعیت نصب خطوط انتقال.

^b: میزان بازگشت سرمایه ناشی از احداث خط انتقال در محل I.

توابع هدف، هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جدید نصب‌شده، هزینه پرشدگی خطوط و هزینه قطعی بار در نظر گرفته شده‌اند. شبکه آزمایش شده، شبکه ۲۴ شینه IEEE است. نیروگاه بادی به شین جدید ۲۵ متصل شده است که این شین نیز به شین ۳ وصل شده است. رشد تولید و بار نیز معادل ۲/۲ برابر فرض شده است. برای حل مسئله نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. طرح نهایی نیز با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی طرح نهایی انتخاب شده است که این طرح نهایی شامل خطوط انتقال ۱-۵، ۳-۸، ۳-۱۱، ۱۰-۱۰، ۵-۷، ۶-۱۰، ۷-۸، ۱۰-۱۲، ۱۰-۱۶، ۱۴-۳، ۲۵-۳ و ۲۵-۳ است.

در الگوی ارائه‌شده در این مقاله خطوط اضافه در طرح نهایی جدول (۸) و به‌ازای $\alpha=0.35$ شامل خطوط حریم‌های ۱-۳، ۱-۵، ۲-۶، ۳-۹، ۴-۹، ۸-۱۰، ۹-۱۱، ۹-۱۳، ۱۱-۱۳، ۱۲-۳، ۱۴-۱۶، ۱۵-۲۴، ۱۶-۱۷، ۱۶-۱۹، ۱۷-۱۸، ۱۸-۲۱، ۲۰-۲۳، ۲۱-۲۲، ۲-۷، ۲-۸، ۶-۷ و ۱۳-۱۴ است. از این مجموعه خطوط، خطوط ۱-۳، ۱-۵، ۳-۹، ۱۱-۱۳، ۱۲-۱۳، ۱۴-۱۶، ۱۶-۱۹، ۱۷-۲، ۷-۲، ۸-۲ و ۱۳-۱۴ برای بخش خصوصی جذاب هستند و مابقی خطوط نیز برای تأمین شرایط فیزیکی شبکه به طرح نهایی اضافه شده‌اند. درباره دیگر α ها و همچنین سطوح ارضای مختلف دیگر نیز استدلال فوق به کار برده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال در محیط تجدید ساختار یافته ارائه شد. ملاحظات فنی و اقتصادی مختلفی مانند کم‌کردن تعرفه نصب خطوط جدید، رقابتی ماندن بازار و دسترسی آسان مصرف‌کنندگان به انرژی ارزان و جلوگیری از قدرت بازار، انتقال انرژی مطمئن به مصرف‌کننده و جذب سرمایه‌های بخش خصوصی بررسی شد. برای برآورده شدن این ملاحظات، به ترتیب توابع هدفی همچون کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری لازم برای احداث خطوط جدید، کمینه‌کردن هزینه پرشدگی خطوط انتقال و بیشینه‌کردن میزان جذب سرمایه از طرف بخش خصوصی تعریف شد. برای تعیین میزان جذب سرمایه خصوصی، خطوط انتقال جذاب از نظر

در [۱۶]، برنامه‌ریزی چندهدفه گسترش شبکه انتقال در حضور نیروگاه بادی انجام شده است. در این برنامه‌ریزی،

- planning problem,” IET Generat. Transm. Distribut., Vol. 6, pp. 1163–1142, 2013.
- [6] Lopez, S., Aguilera, A., and Blanco, G., “Transmission expansion planning under uncertainty: An approach based on real option and game theory against nature,” *Latina Amer. Trans.*, Vol. 11, pp. 566–571, 2013.
- [7] Molina, J. D., Contreras, J., and Rudnick, H., “A principal agent approach to transmission expansion—Part I: Regulatory framework,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 28, pp. 256–263, 2013.
- [8] Ming, Z., Junjie, F., Xiaoli, Z., and Song, X., “Strategic interaction study between generation and transmission expansion planning with game-theory,” *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 61, No. 12, pp. 1271–1281, 2012.
- [9] Shariati-Dehaghan, H., Askarian Abyaneh, H., and Javid Dasht-Bayz, M. H., “Transmission expansion planning and cost allocation under market environments,” *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 6, No. 2, pp. 156–165, 2011.
- [10] Singha, K., Padhy, N. P., and Sharma, J., “Transmission expansion planning including reactive power procurement in deregulated environment,” *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 39, No. 13, pp. 1403–1423, August 2011.
- [11] Arabali A, Ghofrani M, Etezadi-Amoli M, Fadali MS, Moeini-Aghtaie M. A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014 Nov; 29(6): 3003-11.
- [12] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong and J. H. Zhang “A Chance Constrained Transmission Network Expansion Planning Method With Consideration of Load and Wind Farm Uncertainties,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, No. 3, pp. 1568-1578, Aug. 2009.
- [13] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. Oloomi, and M. Shahidepour, “A scenario-based multi-objective model for multi-stage transmission expansion planning” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. -, issue 99, 2010.
- [14] G. B. Shrestha and P. A. J. Fonseka, “Congestion-driven transmission expansion in competitive power markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 19, No. 3, pp. 1658-1665, Aug. 2004.
- [15] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. Oloomi, and M. Shahidepour, “A Multi-Objective Framework for Transmission Expansion Planning in Deregulated Environments,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, No. 2, pp. 1051-1061, May 2009.
- [16] H. Salzar, C. C. Liu, R. F. Chu, “Market-base rate design for recovering merchant transmission investment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, no. 1, pp. 305 - 312, Feb. 2010.
- [17] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong and J. H. Zhang “A Chance Constrained Transmission Network Expansion Planning Method With Consideration of Load and Wind Farm Uncertainties,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, No. 3, pp. 1568-1578, Aug. 2009.
- [18] M. Oloomi Buygi, H. M. Shanечи, and M. Shahidepour, “Transmission planning in

سرمایه‌گذار خصوصی، معیاری برای داشتن حداقل میانگین میزان بازگشت سرمایه، مشخص شد. برای داشتن حداقل هزینه بهره‌برداری و قیود ایمنی شبکه، مسئله پخش بار بهینه به صورت زیر برنامه به کار گرفته شد. برای برآورده شدن تمامی توابع هدف مد نظر و ایجاد مصالحه بین آنها، روش بهینه‌سازی الگوریتم خفاش چندهدفه ارائه شد. اعمال روش بهینه‌سازی پیشنهادی به تولید چندین طرح بهینه منجر شد که در نهایت با توجه به معیار تصمیم‌گیری فازی max-min و تعیین سطح مطلوب، طرح نهایی انتخاب شد. نتایج این برنامه‌ریزی، مجموعه‌ای از طرح‌های مختلف برای احداث خطوط انتقال بود که هر یک تا حدی توابع هدف مد نظر را ارضا می‌کردند. تعدادی از این خطوط از دیدگاه بخش خصوصی جذاب بودند؛ زیرا ملاک تأمین سطح معینی از میزان بازگشت سرمایه را برآورده می‌ساختند که جالب توجه بخش خصوصی است؛ اما بخش دیگری از خطوط برای کم کردن هزینه پرشدگی شبکه و تأمین محدودیت‌های فیزیکی می‌باید احداث شود. با توجه به جذاب نبودن این خطوط از نقطه نظر بازگشت سرمایه، بخش دولتی می‌تواند احداث آنها را به عهده بگیرد؛ البته برای بازگشت هزینه‌های این خطوط باید مکانیزم قیمت‌گذاری مناسبی پیشنهاد شود تا این هزینه که به کاهش میزان پرشدگی خطوط منجر شده است، در یک محدوده زمانی مشخص بازگشت داده شود.

مراجع

- [1] Doukas, H., Karakosta, C., Flamos, A., and Psarras, J., “Electric power transmission: An overview of associated burdens,” *Int. J. Energy Res.*, Vol. 36, pp. 979–988, 2011.
- [2] Salazar, H., Liu, C., and Chu, R. F., “Decision analysis of merchant transmission investment by perpetual option theory,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, pp. 1194–1201, 2007.
- [3] Zhang, H., Vittal, V., Heydt, G. T., and Quintero, J., “A mixed integer linear programming approach for multi-stage security constrained transmission expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 27, No. 2, pp. 1125–1133, 2012.
- [4] Bent, R., Toole, G. L., and Berscheid, A., “Transmission network expansion planning with complex power flow models,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 27, No. 2, pp. 904–912, 2012.
- [5] Murugan, P., “Modified particle swarm optimization with a novel initialization for finding optimal solution to the transmission expansion

- Transactions on Power Systems. 2017 Jul; 32(4):2618-28.
- [29] Ziaee O, Mousavi OA, Choobineh F. Co-optimization of transmission expansion planning and TCSC placement considering the correlation between wind and demand scenarios. IEEE Transactions on Power Systems. 2017 Apr 5.
- [30] Mansouri SA, Javadi MS. A robust optimization framework in composite generation and transmission expansion planning considering inherent uncertainties. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence. 2017 Jul 4; 29(4):717-30.
- [31] Barati F, Seifi H, Sadegh Sepasian, Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems. IEEE Trans Power Syst, 2015, 30(5):2527-2537
- [32] Dedecca JG, Hakvoort RA, Herder PM. Transmission expansion simulation for the European Northern Seas offshore grid. Energy. 2017 Apr 15; 125:805-24.
- [33] G. B. Shrestha and P. A. J. Fonseca, "Congestion-driven transmission expansion in competitive power markets," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1658-1665, Aug. 2004.
- [34] X.-S. Yang, "A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm," Studies in Computational Intelligence, vol. 284, pp. 65-74, 2010.
- [35] Baziar, A., Kavosi-Fard, A., Zare, J., "A Novel Self Adaptive Modification Approach Based on Bat Algorithm for Optimal Management of Renewable MG", Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, Vol. 5, pp. 11-18, 2013.
- [36] Multi-objective particle swarm optimization with preference information and its application in electric arc furnace steelmaking process, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 52, Issue 5, pp.1013-1022, 2015.
- [37] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods subcommittee, "IEEE reliability test system," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, no. 6, pp. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [38] A Arabali, SH Hosseini, M Moeini-Aghtaie, Private Investor-based Transmission Expansion Planning in Deregulated Environments, Electric Power Components and Systems, Vol. 43, Issue 6, pp. 620-632, 2015
- deregulated environments," International Journal of Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 249-256, Oct. 2002.
- [19] J. Choi, T. Tran, A. A. El-keib, R. Thomas, H. Oh, R. Billinton, "A method for transmission system expansion planning considering reliability criteria," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, Issue 3, pp. 1606-1615, Aug. 2005.
- [20] Su, C. L., "Probabilistic load-flow computation using point estimate method," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, pp. 1843-1851, 2005.
- [21] Latorre, G., Cruz, R. D., and Areiza, J. M., "Classification of publications and models on transmission expansion planning," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 18, pp. 938-946, 2003.
- [22] Da Silva, E. L., Gil, H. A., and Areiza, J. M., "Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 15, pp. 1168-1174, 2000.
- [23] Dawei SU, Xiaorong XI, Jianfeng WA, Qiang LI, Che WE. Integrated generation-transmission expansion planning for offshore oilfield power systems based on genetic Tabu hybrid algorithm. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. Vol. 5, No. 1, pp. 117-25, Jan. 2017.
- [24] Sun Y, Kang C, Xia Q, Chen Q, Zhang N, Cheng Y. Analysis of transmission expansion planning considering consumption-based carbon emission accounting. Applied Energy. 2017 May 1; 193:232-42.
- [25] Khakpoor M, Jafari-Nokandi M, Abdoos AA. Dynamic generation and transmission expansion planning in the power market-based on a multiobjective framework. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2017 Jan 1.
- [26] Hemmati R, Hooshmand RA, Khodabakhshian A. Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms. Renewable Energy. 2016 Jan 31; 85:620-30.
- [27] Alaei S, Hooshmand RA, Hemmati R. Stochastic transmission expansion planning incorporating reliability solved using SFLA meta-heuristic optimization technique. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2016 Jun; 2(2):79-86.
- [28] García-Bertrand R, Mínguez R. Dynamic robust transmission expansion planning. IEEE