Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Optimizing Energy Infrastructure in Big Cities: A Case Study of Iran's Electricity Transmission Network

Vahid khademi*[,1], Farzad Barzgar[2], Shirin Jolaee[3], Abozar Ghaffari[4]

[*1] Department of Electrical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.
[2] Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
[3] Department of Urban Planning, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[4] Department of Physics, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

Abstract:
This study examines the issue of transmission network expansion planning using the Golf optimization algorithm on a real and large-scale system. In this research, a stochastic planning model is presented for analyzing and optimizing the transmission network expansion in Iran. Due to the large scale and complexities associated with the power grid, the proposed model requires an efficient algorithm for convergence and problem-solving. In this regard, the Golf optimization algorithm has been selected. The Golf optimization algorithm is recognized as one of the most advanced optimization algorithms in solving complex and large-scale problems. This algorithm, due to its high processing power and effective management of optimization problems, can significantly aid in the precise and efficient optimization of complex power grids. The main advantages of this algorithm include high processing power, the capability to manage multi-objective problems, and the ability to provide optimal solutions in a short time. The model studied in this research, focusing on Iran's power grid, is of particular importance due to its specific features and unique needs. The selection of this network as a real study case due to its large scale, diversity, and complexities enhances the value and impact of the results obtained. This research, using the Golf algorithm, not only addresses large-scale optimization problems but also presents significant innovations in the use of stochastic models for optimizing power networks. The results of this study demonstrate the high capabilities of the Golf optimization algorithm in improving the performance of large energy systems and providing optimal solutions in complex transmission network development problems. This innovation in the use of the Golf algorithm along with stochastic modeling can help improve the performance and efficiency of large-scale energy systems and offer effective solutions to the challenges in this field.
Keywords: Optimization algorithm, generation expansion planning, realworld studies, clean energy so urces.

Received: 21 Oct. 2024
Revised: 3 Jan. 2025
Accepted: 8 Jan. 2025

*** Corresponding Author:** Vahid Khademi. (khademinet@gmail.com)

Citation: V. Khademi, F. Barzgar, Sh. Jolaee, A. Ghaffari, “Optimizing Energy Infrastructure in Big Cities: A Case Study of Iran's Electricity Transmission Network”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1-12, March 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی زیرساخت‌های انرژی در شهرهای بزرگ: مطالعه موردی شبکه انتقال برق ایران

وحید خادمی*[1]، فرزاد برزگر[2]، شیرین جولائی[3]، ابوذر غفاری[4]

*۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
۲- گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
۳-گروه شهرسازی، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴- گروه فیزیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده: این مطالعه به بررسی مسئله برنامه‌ریزی توسعه انتقال شبکه برق با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گلف بر روی یک سیستم واقعی و مقیاس بزرگ می‌پردازد. در این تحقیق، مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تحلیل و بهینه‌سازی توسعه شبکه انتقال برق در ایران ارائه شده است. مدل پیشنهادی به دلیل مقیاس وسیع و پیچیدگی‌های مرتبط با شبکه برق نیازمند الگوریتمی کارآمد برای همگرایی و حل مسئله است. در این راستا، الگوریتم بهینه‌ساز گلف انتخاب شده است. الگوریتم بهینه‌سازی گلف به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حل مسائل پیچیده و مقیاس بزرگ شناخته می‌شود. این الگوریتم به دلیل توانایی بالای پردازش و مدیریت مؤثر مسائل بهینه‌سازی، قادر است به بهینه‌سازی دقیق و کارآمد شبکه‌های برق پیچیده کمک کند. از برتری‌های اصلی این الگوریتم می‌توان به قدرت پردازش بالا، قابلیت مدیریت مسائل چندهدفه، و توانایی ارائه راه‌حل‌های بهینه در زمان کوتاه اشاره کرد. مدل مورد مطالعه در این تحقیق، با تمرکز بر شبکه برق ایران، به دلیل ویژگی‌های خاص و نیازهای منحصر به فرد این شبکه، اهمیت ویژه‌ای دارد. انتخاب این شبکه به عنوان مورد مطالعه واقعی به دلیل مقیاس بزرگ، تنوع و پیچیدگی‌های آن، ارزش و تأثیر نتایج به دست آمده را افزایش می‌دهد. این تحقیق با استفاده از الگوریتم گلف، نه تنها به حل مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ پرداخته است، بلکه نوآوری‌های قابل توجهی را در زمینه استفاده از مدل‌های تصادفی برای بهینه‌سازی شبکه‌های برق ارائه می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده توانمندی‌های بالای الگوریتم بهینه‌سازی گلف در بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی بزرگ و ارائه راه‌حل‌های بهینه در مسائل پیچیده توسعه انتقال شبکه برق است. این نوآوری در استفاده از الگوریتم گلف به همراه مدل‌سازی تصادفی، می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی سیستم‌های انرژی در مقیاس بزرگ کمک کرده و راهکارهای مؤثری برای چالش‌های موجود در این حوزه ارائه دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی توسعه تولید، مطالعات واقعی، منابع انرژی پاک.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

*** نام نویسنده مسئول: وحید خادمی**
نشانی نویسنده مسئول: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴ ساختمان مرکزی دانشگاه ملی مهارت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

۱- مقدمه

با پیشرفت سریع در زمینه فناوری‌های انرژی و افزایش تقاضا برای برق، شبکه‌های برق با چالش‌های جدیدی روبه‌رو شده‌اند که نیازمند توجه ویژه و استراتژی‌های بهینه‌سازی پیچیده است. یکی از مهم‌ترین مسائل در این حوزه، توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال برق است که به دلیل مقیاس بزرگ و پیچیدگی‌های ذاتی، نیازمند مدل‌ها و الگوریتم‌های پیشرفته برای بهبود عملکرد و کارایی این سیستم‌ها می‌باشد. در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، توسعه زیرساخت‌های برق به دلیل رشد سریع جمعیت و تقاضای بالا برای انرژی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به ویژه، در شبکه‌های برق بزرگ و پیچیده مانند شبکه برق ایران، چالش‌های مربوط به برنامه‌ریزی توسعه انتقال نیازمند روش‌های بهینه‌سازی قوی و دقیق است تا از بهره‌وری و پایداری این سیستم‌ها اطمینان حاصل شود. در شبکه‌های برق بزرگ و پیچیده، بهینه‌سازی فرآیندهای مربوط به توسعه و بهبود عملکرد شبکه انتقال به یکی از نیازهای اساسی و چالش‌برانگیز تبدیل شده است. این مساله به ویژه در کشورهایی با شبکه‌های برق وسیع و در حال رشد مانند ایران، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چالش‌های اصلی در این زمینه شامل پیچیدگی‌های ذاتی در مدل‌سازی و حل مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ است. به دلیل تعداد زیاد متغیرها و محدودیت‌ها، توسعه مدل‌های دقیق و کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال، نیازمند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته و قدرتمند است. علاوه بر این، دقت در پیش‌بینی و مدیریت ریسک‌های تصادفی نیز یکی از چالش‌های مهم در این زمینه به شمار می‌رود. ضرورت انجام این تحقیق به وضوح در نیاز به بهبود و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های انتقال برق در مقیاس بزرگ محسوس است. با توجه به رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضا برای انرژی، توسعه زیرساخت‌های برق و ارتقاء کارایی شبکه‌های انتقال به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شده است. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم گلف، که قادر به حل مسائل پیچیده و مقیاس بزرگ است، می‌تواند به بهبود کارایی و پایداری این سیستم‌ها کمک شایانی کند. این تحقیق با ارائه مدل برنامه‌ریزی تصادفی و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، به دنبال ارائه راه‌حل‌های کارآمد و نوآورانه برای چالش‌های موجود در توسعه شبکه‌های انتقال برق است.

شبکه‌های انتقال برق از اصول فیزیکی کلیدی مانند قوانین الکترومغناطیس، بقای انرژی و پایداری حرارتی پیروی می‌کنند. در تحلیل این شبکه‌ها، قانون اهم و قوانین ماکسول نقش اساسی در مدل‌سازی جریان‌ها و ولتاژها ایفا می‌کنند، زیرا این قوانین تعیین‌کننده نحوه توزیع و انتقال انرژی الکتریکی در سیم‌ها و تجهیزات شبکه هستند. در این مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی گلف برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی در شبکه‌های برق با تکیه بر این اصول فیزیکی طراحی و پیاده‌سازی شده است. این الگوریتم می‌تواند به دقت و سرعت با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی همچون حد مجاز جریان‌ها و افزایش دما در تجهیزات، بهینه‌سازی انجام دهد. با توجه به اینکه جریان الکتریکی از طریق مقاومت‌های فیزیکی سیستم به تلفات گرمایی منجر می‌شود، الگوریتم بهینه‌ساز باید راه‌حل‌هایی بیابد که همزمان با کاهش تلفات، پایداری فیزیکی شبکه نیز حفظ شود. این ترکیب از مدل‌سازی تصادفی و اصول فیزیک شبکه‌های الکتریکی باعث می‌شود که نتایج به دست آمده، ضمن بهینه‌سازی مصرف انرژی، شرایط واقعی و محدودیت‌های فیزیکی شبکه را نیز مدنظر قرار دهد و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد.

یکی از چالش‌های فیزیکی اصلی در شبکه‌های انتقال برق، مدیریت انرژی در حالت‌های گذرا و حفظ پایداری سیستم در مواجهه با تغییرات ناگهانی بار و نوسانات فرکانس است. این تغییرات، بر اساس قوانین ترمودینامیک و حفظ انرژی، می‌توانند موجب افزایش تلفات و ناپایداری شبکه شوند. الگوریتم بهینه‌سازی گلف در این مطالعه، با در نظر گرفتن شرایط ناپایدار و عوامل دینامیکی شبکه، قادر است وضعیت‌های گذرای سیستم را مدل‌سازی کرده و پاسخ‌های بهینه‌ای ارائه دهد که با فیزیک سیستم‌های دینامیکی سازگار باشد. از طریق این الگوریتم، می‌توان کنترل جریان و ولتاژ در سیستم‌های انتقال برق را به‌گونه‌ای بهینه کرد که در کنار حفظ پایداری سیستم، تلفات انرژی به حداقل برسد و شبکه از لحاظ ترمودینامیکی در وضعیت بهینه قرار گیرد. این توانایی در تنظیم پایداری و کاهش نوسانات، از اصول فیزیکی تعادل انرژی و توزیع بهینه توان الهام گرفته شده است، که به حفظ عملکرد و کارایی سیستم در شرایط بارگذاری مختلف کمک شایانی می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]

توسعه شبکه‌های انتقال و توزیع برق باید همگام با رشد و توسعه شهرها به نحوی برنامه‌ریزی شود که علاوه بر تامین نیازهای انرژی پایدار، بتواند به شکل مؤثری به ساختار شهرسازی و توسعه پایدار شهری کمک کند. در این زمینه، رویکردهای جدید شهرسازی نیازمند شبکه‌های انتقال برق هوشمند و منعطف هستند که با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای همچون الگوریتم بهینه‌سازی گلف، قابلیت مدیریت بارهای مختلف شهری و تطبیق با تغییرات تقاضا را دارا باشند. این هماهنگی بین توسعه شبکه‌های برق و اصول شهرسازی نه تنها به کاهش تراکم ترافیکی ناشی از حمل‌ونقل انرژی کمک می‌کند، بلکه امکان تامین انرژی در بخش‌های جدید شهری و مناطق توسعه‌یافته را نیز فراهم می‌سازد. همچنین، این ارتباط مستقیم می‌تواند به بهینه‌سازی فضاهای شهری و کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر شود. طراحی شبکه‌های انتقال برق با توجه به طرح‌های توسعه شهری از پراکندگی ناهماهنگ شبکه‌ها و افزایش هزینه‌های اضافی در توسعه شهری جلوگیری کرده و امکان دسترسی سریع‌تر و پایدارتر به منابع انرژی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند الگوریتم گلف، از طریق مدلسازی تصادفی و برنامه‌ریزی کارآمد، امکان پیش‌بینی نیازهای انرژی شهری را با دقت بالاتری فراهم می‌آورند و با هماهنگی در برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی‌های لازم را در بسترهای شهری ارائه می‌دهند. همچنین، با توجه به اینکه شهرهای بزرگ و مناطق پرتراکم شهری نیازمند دسترسی مستمر و پایدار به انرژی هستند، شبکه‌های انتقال برق با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم گلف، می‌توانند در کاهش خاموشی‌های ناخواسته و بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع محلی نیز نقش مؤثری داشته باشند. این نوع برنامه‌ریزی می‌تواند به شکل مستقیم به افزایش کیفیت زندگی شهروندان و رشد پایدار شهرها کمک کند و در عین حال، مدیریت منابع انرژی و بهره‌وری از شبکه‌های توزیع را با نیازهای بلندمدت شهرسازی منطبق سازد.

مطالعه [۱] به بررسی تأثیر افزایش سهم واحدهای گازسوز و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر روی شبکه‌های برق و گاز طبیعی پرداخته است. بر اساس گزارش [۱]، سهم واحدهای گازسوز از ۳۷ درصد در سال ۲۰۱۹ به ۳۹ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. این افزایش سهم و تقویت اتصال بین زیرساخت‌های گاز و برق، تأثیر قابل توجهی بر تعادل عرضه و تقاضا و چالش‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی این دو سیستم ایجاد کرده است. مرجع [۲] به اهمیت در نظر گرفتن حوادث طبیعی مانند طوفان و زلزله که می‌توانند منجر به خروج خطوط شبکه برق و گاز شوند، اشاره کرده و به ضرورت مدل‌سازی و برنامه‌ریزی جامع برای توسعه سیستم‌های برق و گاز در یک محیط تصادفی با در نظر گرفتن قیود امنیتی پرداخته است. در مطالعه [۳] مدلی برای بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی انرژی باتری، جبران‌کننده‌های سری کنترل‌شده با تریستور و خطوط انتقال ارائه شده است. همچنین، مرجع [۴] به مدل‌سازی تصادفی چند مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی مشترک توسعه انتقال و باتری با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش بار پرداخته است. مطالعه [۵] به بررسی برنامه‌ریزی یکپارچه برای افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت با استفاده از مدل‌سازی توسعه انتقال و تخصیص منابع بلک استارت مبتنی بر باتری در طول رویدادهای شدید پرداخته است. مرجع [۶] مدل چند مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی مشترک توسعه خطوط انتقال، باتری و مزارع بادی به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم ارائه داده است. در مطالعه [۷] یک رویکرد برای برنامه‌ریزی مشترک توسعه انتقال و باتری با هدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه با در نظر گرفتن قیود امنیتی ارائه شده است. همچنین، مرجع [۸] به معرفی تابع چندهدفه برای افزایش انعطاف‌پذیری و افزایش سود شبکه از طریق مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه خط و باتری پرداخته است. مطالعه [۹] مدلی چند دوره‌ای یکپارچه برای برنامه‌ریزی توسعه باتری، شبکه انتقال و نیروگاه‌ها با استفاده از روش تجزیه بندرز ارائه داده است. مرجع [۱۰] به مدل دو سطحی تصادفی مبتنی بر روش تجزیه بندرز برای حل مسئله توسعه یکپارچه شبکه انتقال و باتری در حضور نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر پرداخته است. مطالعه [۱۱] به ارائه مدل دو سطحی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه انتقال به همراه کنترل بر روی واحدهای شبکه و سیستم‌های ذخیره انرژی با استفاده از روش تجزیه بندرز و در نظر گرفتن قیود امنیتی شبکه پرداخته است. در مرجع [۱۲] به ارزیابی تأثیرات منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخ تقاضا بر مسئله همزمان برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال پرداخته شده است. مطالعه [۱۳] چارچوبی یکپارچه برای برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال با برنامه‌ریزی توسعه شبکه گاز طبیعی برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه داده است. مرجع [۱۴] مدلی دو سطحی استوار برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال و گاز به منظور افزایش انعطاف‌پذیری شبکه برق پیشنهاد کرده است. در مطالعه [۱۵] چارچوبی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای توسعه برنامه‌ریزی سیستم‌های انتقال گاز طبیعی و برق با در نظر گرفتن قیود امنیتی شبکه و هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در هر دو شبکه ارائه شده است. مرجع [۱۶] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب تصادفی برای برنامه‌ریزی توسعه انتقال و شبکه گاز با در نظر گرفتن پیشامد

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

خروج خطوط و منابع فتوولتائیک پیشنهاد کرده است. مطالعه [۱۷] به بررسی مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال و تولید یکپارچه شده با شبکه گاز به منظور افزایش رفاه اجتماعی پرداخته است. همچنین، مرجع [۱۸] چارچوبی برای آنالیز و حفظ فرکانس در شبکه برق با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی توسعه انتقال و شبکه گاز در شرایط رشد بار و در نظر گرفتن قیود امنیتی شبکه ارائه داده است. در مطالعه [۱۹] تأثیر مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی توسعه مشترک شبکه‌های برق و گاز یکپارچه توسط مدل غیرخطی و با استفاده از روش متناوب جهت ضرب بررسی شده است. مرجع [۲۰] چارچوبی مبتنی بر برنامه‌ریزی غیر خطی سه سطحی برای توسعه سرمایه‌گذاری در شبکه‌های یکپارچه برق و گاز طبیعی تحت رویدادهای شدید پیشنهاد داده است. مطالعه [۲۱] مدلی دو سطحی برای هماهنگی و یکپارچگی بهینه شبکه انتقال و توزیع با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه کرده است. در نهایت، مرجع [۲۲] مدلی برای ادغام شبکه‌های توزیع به همراه شبکه‌های گاز توسط منابع تبدیل توان به گاز با هدف بهبود تابع هزینه هر دو شبکه پیشنهاد کرده است.

نوآوری‌های اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

۱. **استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گلف**: این تحقیق به‌طور برجسته از الگوریتم بهینه‌سازی گلف بهره می‌برد، که به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و کارآمدترین الگوریتم‌ها برای حل مسائل پیچیده و مقیاس بزرگ شناخته می‌شود. الگوریتم گلف به دلیل توانایی‌های برجسته‌اش در پردازش و مدیریت مسائل چندهدفه، به‌ویژه در بهینه‌سازی شبکه‌های برق با مقیاس وسیع، انتخاب شده است. این الگوریتم به‌طور قابل توجهی توانسته است زمان حل و کیفیت نتایج را بهبود بخشد، که از مزایای کلیدی آن در این تحقیق محسوب می‌شود.

۲. **مدل برنامه‌ریزی تصادفی ویژه**: تحقیق حاضر به معرفی و توسعه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی جدید برای تحلیل و بهینه‌سازی توسعه شبکه انتقال برق پرداخته است. این مدل به‌طور خاص برای شبکه برق ایران طراحی شده و به دلیل ویژگی‌های خاص و پیچیدگی‌های مربوط به این شبکه، به بهینه‌سازی دقیق‌تر و کارآمدتر مشکلات مرتبط با توسعه شبکه انتقال برق کمک می‌کند.

۳. **تمرکز بر یک سیستم واقعی و مقیاس بزرگ**: انتخاب شبکه برق ایران به‌عنوان مورد مطالعه واقعی، به دلیل مقیاس بزرگ و پیچیدگی‌های خاص آن، ارزش و تأثیر نتایج تحقیق را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این تحقیق نشان می‌دهد که مدل و الگوریتم پیشنهادی می‌توانند به‌طور مؤثر در محیط‌های عملی و واقعی به کار روند و به حل مسائل پیچیده در مقیاس بزرگ کمک کنند.

در ادامه مقاله، ابتدا مدل‌سازی مسئله دو سطحی و الگوریتم تجزیه و بازفرمولنویسی معرفی می‌شود. سپس، به بررسی سیستم‌های یکپارچه و ارائه نتایج شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد. در انتها، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای بهبود و گسترش کار ارائه می‌شود.

۲- مدل سرمایه‌گذاری خطوط انتقال

در این بخش مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه شده است. مسئله سرمایه‌گذاری شامل تعریف تابع هدف مسئله و مجموعه قیود در نظر گرفته شده می‌باشد. رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد.

$$\min \sum_{l\in L} \hat{\alpha}_l x_l + T \sum_{s\in S} \sigma_s \left(\sum_{b\in B, t\in T} g_{b,t,s} c_b^g + u_{b,t,s} c_b^n + s_{b,t,s} c_b^{st} + v_{b,t,s} c_b^{sd} + r_{b,t,s} c_b^r \right) \quad (۱)$$

در رابطه (۱) به ترتیب L، B، S و T برابر مجموعه‌های خطوط شبکه برق، باس‌های شبکه برق، سناریوها و ساعت‌های روز نمونه در سال هدف می‌باشد، که به ترتیب با شاخص‌های l، b، sو t نشان داده شده است. در این تابع هدف به ترتیب کاهش هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال، کاهش هزینه بهره‌برداری، بی‌باری، راه اندازی و خاموش‌سازی واحدها به همراه هزینه قطعی بار در نظر گرفته شده است. در این رابطه $\hat{\alpha}_l$ برابر هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه برای خطوط جدید و x_l برابر متغیر باینری وضعیت خطوط جدید نصب شده در دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. σ_s برابر احتمال هر سناریو و $g_{b,t,s}$ و c_b^g به ترتیب نشان‌دهنده تولید واحدها و هزینه تولید هر واحد می‌باشد. $u_{b,t,s}$ و c_b^n به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت مشارکت هر واحد و هزینه بی باری می‌باشد، وضعیت روشن بودن واحدها و هزینه آن به ترتیب با $s_{b,t,s}$ و c_b^{st} نشان داده شده است. همچنین به ترتیب $v_{b,t,s}$ و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

c_b^{sd} نشان‌دهنده وضعیت خاموش بودن واحدها و هزینه خاموش شدن می‌باشد. قطع بار و هزینه آن به ترتیب با $r_{b,t,s}$ و c_b^r نشان داده است.

روابط (۲) الی (۱۰) محدودیت حاکم بر مسئله سرمایه‌گذاری پیشنهادی را نشان می‌دهد. در (۲) محدودیت بهره‌برداری واحدها نشان داده شده است. در این رابطه به ترتیب g_b^{min} و g_b^{max} نشان‌دهنده حد پایین و بالای تولید هر واحد در باس bام را نشان می‌دهد. رابطه (۳) تعادل توان در شبکه برق را نشان می‌دهد، $f_{ij,t,s}$ نشان‌دهنده شار خط از باس i به j می‌باشد، $d_{b,t,s}$ نشان‌دهنده بار شبکه برق در باس bام در زمان t و در سناریو s می‌باشد. رابطه (۴) محدودیت قطع بار را در هر سناریو و در هر باس و زمان نشان می‌دهد. معادله (۵) رابطه بین متغیرهای باینری واحدها را نشان می‌دهد. رابطه (۶) محدودیت بودجه را برای سرمایه‌گذاری نشان می‌دهد. ψ نشان‌دهنده حداکثر بودجه برای سرمایه‌گذاری می‌باشد. رابطه (۷) و (۸) به ترتیب تعریف شار خطوط و همچنین محدودیت شار خطوط را نشان می‌دهد. در این رابطه γ_l برابر سوسپتانس خط و $\theta_{i,t,s}$ برابر زاویه ولتاژ می‌باشد. $f_{l,t,s}^{max}$ و $\varrho_{l,t,s}$ به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر شار توان عبوری و متغیر باینری وضعیت خروج خط می‌باشد. روابط (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده محدودیت زاویه ولتاژ می‌باشد.

$$g_b^{min} u_{b,t,s} \le g_{b,t,s} \le g_b^{max} u_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۲)$$

$$g_{b,t,s} + r_{b,t,s} + \sum_{ij \in b} f_{ij,t,s} - \sum_{ji \in b} f_{ji,t,s} - d_{b,t,s} = 0 \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۳)$$

$$0 \le r_{b,t,s} \le d_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۴)$$

$$u_{b,t+1,s} - u_{b,t,s} = s_{b,t,s} - v_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۵)$$

$$\sum_{l \in L} \alpha_l x_l \le \psi \quad (۶)$$

$$f_{l,t,s} = x_l \gamma_l \left(\theta_{i,t,s} - \theta_{j,t,s}\right) \forall l \in L, i, j \in B, t \in T, s \in S \quad (۷)$$

$$-f_{l,t,s}^{max} \varrho_{l,t,s} \le f_{l,t,s} \le f_{l,t,s}^{max} \varrho_{l,t,s} \ \forall b \in B, t = 1, s \in S \quad (۸)$$

$$-\pi \le \theta_{b,t,s} \le \pi \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۹)$$

$$\theta_{b,t,s} = 0 \ \forall b = ref, t \in T, s \in S \quad (۱۰)$$

۳- الگوریتم بهینه‌سازی گلف

الگوریتم بهینه‌سازی گلف (GOA) یک رویکرد مبتنی بر جمعیت است که می‌تواند راه‌حل‌های مناسبی برای مسائل بهینه‌سازی از طریق جستجوی تصادفی اعضای خود در فضای حل مسئله فراهم کند. موقعیت اعضای GOA در فضای جستجوی مسئله، مقادیر متغیرهای مسئله را تعیین می‌کند. جمعیت اعضای GOA می‌تواند به صورت ریاضی با استفاده از یک ماتریس بر اساس معادله (۱۱) نشان داده شود. مانند سایر الگوریتم‌های متاهیوریستیک، اعضای جمعیت به صورت تصادفی و با استفاده از توزیع یکنواخت در فضای مسئله توزیع می‌شوند. موقعیت اعضای GOA در ابتدای اجرای الگوریتم به صورت تصادفی در فضای جستجو با استفاده از معادله (۱۲) مقداردهی اولیه می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,d} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,d} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,d} & \cdots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m} \quad (۱۱)$$

$$X_i : x_{i,d} = lb_d + r \times (ub_d - lb_d) \quad (۱۲)$$

در اینجا، X ماتریس جمعیت GOA است، X_i عضو iام GOA است، $x_{i,d}$ مقدار متغیر dام پیشنهادی توسط عضو iام GOA است، Nتعداد اعضای GOA است، mتعداد متغیرها است، rیک عدد تصادفی در بازه [۰-۱] است، و lb_d و ub_d، به ترتیب حد پایین و حد بالای متغیر dام هستند. با توجه به این که هر عضو GOA یک راه‌حل کاندید برای مسئله است و متغیرهای مسئله را تعیین می‌کند، برای هر عضو GOA، یک مقدار برای تابع هدف قابل ارزیابی است. مقادیر محاسبه‌شده برای تابع هدف می‌تواند با استفاده از یک بردار بر اساس معادله (۱۳) نشان داده شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N\times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N\times 1} \quad (۱۳)$$

در اینجا، F بردار مقادیر تابع هدف است و F_i مقدار به‌دست‌آمده برای تابع هدف بر اساس عضو iام GOA است. بر اساس مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده برای تابع هدف، عضوی که بهترین مقدار را برای تابع هدف فراهم کرده است به عنوان بهترین عضو شناسایی می‌شود. از آنجا که موقعیت اعضای GOA و در نتیجه مقادیر تابع هدف در هر تکرار به‌روزرسانی می‌شوند، بهترین عضو جمعیت نیز باید در هر تکرار به‌روزرسانی شود. پس از تکمیل مراحل مقداردهی اولیه الگوریتم، GOA وارد فرآیند به‌روزرسانی اعضای جمعیت می‌شود. در GOA، اعضای جمعیت در دو فاز کاوش و بهره‌برداری به‌روزرسانی می‌شوند.

الف) فاز ۱: اکتشاف

اولین ضربه در بازی گلف در منطقه‌ای از زمین بازی به نام "گرپ" زده می‌شود. در اولین ضربه، بازیکنان تلاش می‌کنند که قوی‌ترین ضربه را به سمت سوراخ بزنند. در GOA، موقعیت بهترین عضو به عنوان سوراخ در نظر گرفته می‌شود. این استراتژی نواحی مختلف فضای جستجو را اسکن می‌کند و نشان‌دهنده قابلیت کاوش الگوریتم GOA در جستجوی جهانی است. فرآیند به‌روزرسانی اعضای GOA بر اساس فاز کاوش به‌صورت ریاضی با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) مدل‌سازی می‌شود. در این فرآیند، ابتدا بر اساس شبیه‌سازی قوی‌ترین ضربه بازیکن به توپ، موقعیت جدیدی برای هر عضو GOA با استفاده از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود. سپس، اگر مقدار تابع هدف در این موقعیت جدید محاسبه‌شده بهبود یابد، این موقعیت جدید جایگزین موقعیت قبلی عضو مربوطه بر اساس معادله (۱۵) می‌شود. در بازی گلف، بازیکنان ممکن است ضرباتی بزنند که توپ از سوراخ عبور کند یا به سوراخ نزدیک شود. استفاده از پارامتر I در معادله (۱۴) برای شبیه‌سازی این وضعیت است. اگر پارامتر I برابر با ۱ باشد، توپ به سوراخ نزدیک می‌شود. در عین حال، به منظور افزایش قابلیت کاوش الگوریتم در جستجوی جهانی، اگر پارامتر I برابر با ۲ باشد، با افزایش امکان حرکت توپ، الگوریتم توانایی بیشتری برای اسکن نواحی مختلف فضای جستجو دارد.

$$X_i^{P1}: x_{i,d}^{P1} = x_{i,d} + r \times \left(B_d - I \times x_{i,d}\right) \quad (۱۴)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P1}, F_i^{P1} < F_i \\ X_i, \text{else} \end{cases} \quad (۱۵)$$

در اینجا، X_i^{P1} وضعیت جدید محاسبه‌شده عضو (i)ام GOA بر اساس فاز کاوش است، $x_{i,d}^{P1}$ بُعد (d)ام آن است، F_i^{P1} مقدار تابع هدف آن است، (B) بهترین عضو GOA است، B_d بُعد (d)ام آن است، (r) یک عدد تصادفی در بازه [۰-۱] است و (I) یک عدد تصادفی است که به‌صورت تصادفی از مجموعه $\{۱, ۲\}$ انتخاب می‌شود.

ب) فاز ۲: بهره‌برداری

در زمین بازی، منطقه‌ای که سوراخ در آن قرار دارد به نام "گرین" شناخته می‌شود. در این منطقه، بازیکنان تلاش می‌کنند توپ گلف را با ضرباتی که به نام "پات" معروف است، داخل سوراخ بزنند. این ضربات دقیق با نیروی کمتری انجام می‌شود تا توپ گلف از منطقه گرین و سوراخ دور نشود. این استراتژی اجازه می‌دهد که منطقه‌ای که هر عضو GOA در آن قرار دارد، با دقت بررسی شود، که نشان‌دهنده توانایی بهره‌برداری GOA در جستجوی محلی است. فرآیند به‌روزرسانی اعضای GOA بر اساس فاز بهره‌برداری به‌صورت ریاضی با استفاده از معادلات (۱۶) و (۱۴) مدل‌سازی می‌شود. در این مرحله از به‌روزرسانی GOA، یک موقعیت جدید برای هر عضو GOA با استفاده از معادله (۱۶) بر اساس مدل‌سازی ریاضی ضربات با نیروی کم بازیکن به توپ محاسبه می‌شود. این موقعیت جدید، اگر مقدار تابع هدف را بهبود بخشد، جایگزین موقعیت قبلی عضو مربوطه بر اساس معادله (۱۷) می‌شود.

$$X_i^{P2}: x_{i,d}^{P2} = x_{i,d} + (1-2r) \times \frac{lb_d + r \times (ub_d - lb_d)}{t} \quad (۱۶)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P2}, F_i^{P2} < F_i \\ X_i, else \end{cases} \quad (۱۷)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]

در اینجا، X_i^{P2} وضعیت جدید محاسبه‌شده عضو (i)ام GOA بر اساس فاز بهره‌برداری است، $x_{i,d}^{P2}$ بُعد (d)ام آن است، F_i^{P2} مقدار تابع هدف آن است و (t) شمارنده تکرار است. پس از هر مرحله از به‌روزرسانی موقعیت اعضای جمعیت، باید بررسی شود که آیا راه‌حل‌های جدید به مجموعه راه‌حل‌های قابل قبول تعلق دارند یا خیر. اولین گروه از قیود مربوط به محدوده قابل قبول برای متغیرهای تصمیم‌گیری است. اگر مقدار هر یک از متغیرهای تصمیم‌گیری از حد بالایی یا حد پایینی فراتر رود، مقدار آن بر روی مقادیر مرزی تنظیم می‌شود. این محدودیت حد بالا و پایین برای متغیرهای تصمیم‌گیری بررسی و در صورت لزوم با استفاده از معادلات (۱۸) و (۱۹) حل می‌شود.

$$x_{i,d}^{P1} = \begin{cases} x_{i,d}^{P1}, lb_d \le x_{i,d}^{P1} \le ub_d \\ ub_d, x_{i,d}^{P1} > ub_d \\ lb_d, x_{i,d}^{P1} < lb_d, \end{cases} \quad (۱۸)$$

$$x_{i,d}^{P2} = \begin{cases} x_{i,d}^{P2}, lb_d \le x_{i,d}^{P2} \le ub_d \\ ub_d, x_{i,d}^{P2} > ub_d \\ lb_d, x_{i,d}^{P2} < lb_d, \end{cases} \quad (۱۹)$$

گروه دوم قیود مربوط به قیود تساوی و نابرابری مسئله بهینه‌سازی است. برای برخورد با این محدودیت‌ها، از ضریب جریمه استفاده شده است. اگر هر یک از قیود تساوی یا نابرابری برآورده نشود، به این معنی است که راه‌حل جدید به مجموعه راه‌حل‌های قابل قبول تعلق ندارد. بنابراین، با افزودن ضریب جریمه به مقدار تابع هدف مسئله، راه‌حل جدید به عنوان یک راه‌حل نامناسب شناخته می‌شود و انتخاب آن به‌عنوان راه‌حل مسئله ممکن نخواهد بود. این گروه از قیود با استفاده از معادله (۲۰) بررسی شده است.

$$F_i = F_i + n_q \times PF_i \quad (۲۰)$$

در اینجا، n_q تعداد قیود مسئله است که برقرار نشده‌اند و PF_i ضریب جریمه است که در آن $PF_i = 10^5 \times |F_i|$ می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

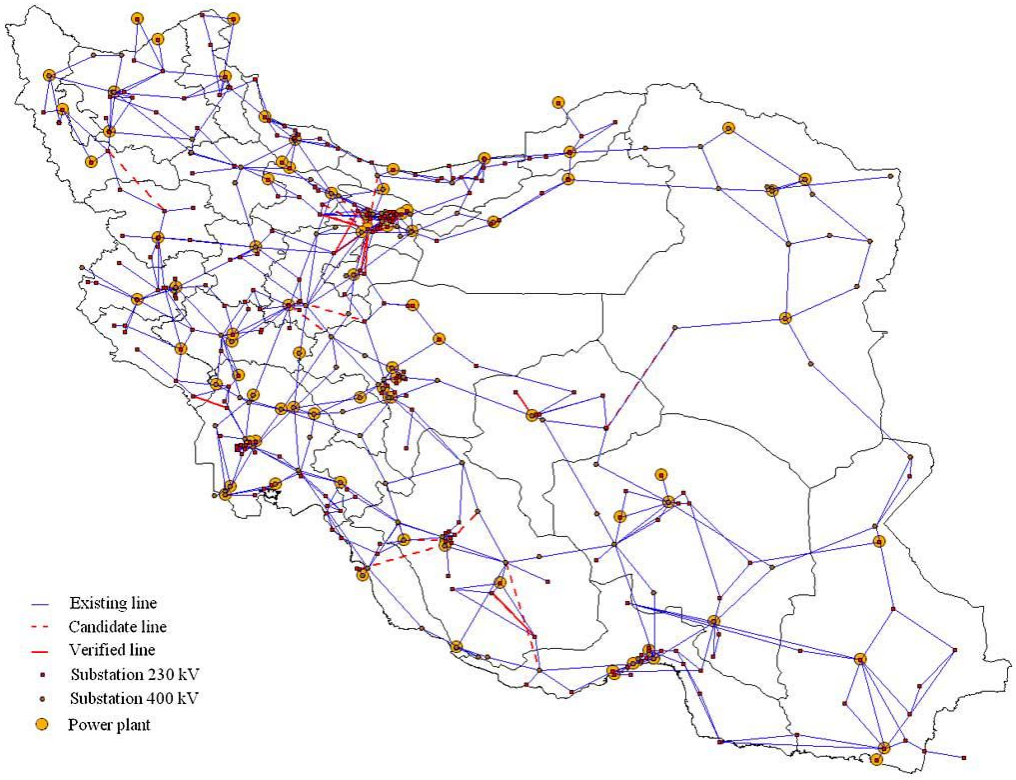
در بخش شبیه‌سازی این مطالعه، شبکه برق ایران به عنوان مورد مطالعه برای تحلیل و ارزیابی مدل پیشنهادی انتخاب شده است. انتخاب شبکه برق ایران به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و مقیاس بزرگ آن، به ویژه در زمینه پیچیدگی‌های مربوط به برنامه‌ریزی و توسعه انتقال، اهمیت ویژه‌ای دارد. این شبکه به دلیل گستردگی و تنوع در زیرساخت‌ها و نیازهای آن، به عنوان یک مطالعه موردی مناسب برای ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی مدل‌های پیشنهادی در شرایط واقعی محسوب می‌شود. برای اجرای شبیه‌سازی‌ها، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است که یکی از ابزارهای پیشرفته و رایج برای تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده است. کدنویسی مدل‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در MATLAB انجام شده است تا دقت و کارایی لازم در تحلیل داده‌ها و حل مسائل بهینه‌سازی فراهم گردد. عملیات شبیه‌سازی بر روی یک سیستم کامپیوتری با مشخصات سخت‌افزاری پیشرفته انجام شده است. این سیستم شامل حافظه RAM با ظرفیت ۶۴ گیگابایت و پردازنده نه هسته‌ای با سرعت ۳,۲ گیگاهرتز است. این مشخصات سخت‌افزاری به طور قابل توجهی قدرت پردازش و سرعت اجرای الگوریتم‌ها را افزایش داده و امکان انجام شبیه‌سازی‌های پیچیده و پردازش حجم بالای داده‌ها را فراهم کرده است. این تجهیزات پیشرفته به ما این امکان را داده‌اند که مدل‌های پیچیده و مقیاس بزرگ را با دقت بالا تحلیل کرده و نتایج قابل اعتمادی به دست آوریم. شکل (۱) شبکه ایران را به همراه خطوط انتقال موجود، خطوط انتقال کاندید و نیروگاه‌ها و پست‌ها نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به شبکه مورد نظر از مرجع [۲۵] استخراج شده است.

جدول (۱) نتایج سرمایه‌گذاری توسعه انتقال در شبکه برق ایران را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف برابر با ۲۱۲ میلیون دلار است که نشان‌دهنده هزینه کلی بهینه‌سازی شده برای توسعه شبکه انتقال است. این مقدار شامل هزینه‌های مختلفی از جمله نصب خطوط جدید، بهبود زیرساخت‌ها، و سایر هزینه‌های مرتبط با توسعه شبکه می‌باشد. تعداد خطوط جدید نصب شده در شبکه انتقال ایران ۸ خط است که نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی توانسته است نیاز به توسعه شبکه را با نصب حداقل تعداد خطوط برآورده کند، که بهینه‌سازی منابع و کاهش هزینه‌ها را به دنبال دارد. مجموع طول خطوط جدید نصب شده در شبکه ۳۲۶ کیلومتر است که بیانگر توسعه فیزیکی شبکه انتقال برق است و نشان می‌دهد که الگوریتم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

پیشنهادی توانسته است مسیرهای بهینه‌ای را برای توسعه شبکه پیشنهاد دهد که نیازهای انرژی را با حداقل توسعه فیزیکی برآورده می‌کند. مقدار قطع بار در این مطالعه صفر است که نشان می‌دهد با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، هیچ گونه قطعی باری در شبکه رخ نداده است و این نتیجه نشان‌دهنده کارایی و قابلیت اعتماد بالای الگوریتم در حفظ پایداری و تامین برق مستمر در شبکه انتقال است. مدت زمان لازم برای حل مسئله بهینه‌سازی ۲۹۷ ثانیه است که نسبتاً کوتاه بوده و نشان‌دهنده سرعت و کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در مقیاس بزرگ است. به طور کلی، نتایج جدول (۱) نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی توانسته است با موفقیت نیازهای توسعه شبکه انتقال برق ایران را با هزینه‌های بهینه، توسعه فیزیکی محدود و حفظ پایداری شبکه برآورده کند. این نتایج همچنین از کارایی بالا و توانمندی الگوریتم در حل مسائل پیچیده توسعه شبکه در مقیاس بزرگ حکایت دارند.

جدول (۲) نتایج الگوریتم پیشنهادی را با سایر روش‌های بهینه‌سازی مشابه مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی گلف عملکرد بهتری در تمام معیارهای اصلی دارد. مقدار تابع هدف برای الگوریتم پیشنهادی ۲۱۲ میلیون دلار است که کمتر از سایر الگوریتم‌ها است و نشان‌دهنده هزینه کمتر و بهینه‌تر برای توسعه شبکه انتقال است. تعداد خطوط نصب شده با الگوریتم پیشنهادی ۸ خط است که کمترین تعداد در بین همه الگوریتم‌هاست، این نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم در بهینه‌سازی استفاده از منابع است. مجموع طول خطوط نصب شده با الگوریتم پیشنهادی ۳۲۶ کیلومتر است که به طور قابل توجهی کمتر از سایر روش‌هاست. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نه تنها هزینه‌ها را کاهش داده، بلکه طول کلی شبکه انتقال جدید را نیز به حداقل رسانده است که به معنی توسعه کمتر فیزیکی و تأثیرات محیطی پایین‌تر است. در مورد مدت زمان حل مسئله، الگوریتم پیشنهادی تنها ۵۱ ثانیه زمان برده است که به طور قابل توجهی سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها مانند الگوریتم زنتیک (۱۵۸۹ ثانیه) و الگوریتم JAYA ثانیه (۱۱۷۹) است. این سرعت بالای حل مسئله نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم گلف در بهینه‌سازی مسائل پیچیده است. به طور کلی، جدول (۲) نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی گلف در مقایسه با سایر روش‌ها به طور قابل توجهی بهینه‌تر عمل کرده و نتایج برتری را از نظر هزینه، تعداد خطوط نصب شده، طول خطوط و زمان حل مسئله ارائه داده است.



شکل (۱): خطوط انتقال موجود، کاندید و تایید شده برای سیستم برق ایران

Figure (1): Existing, candidate and approved transmission lines for Iran's electricity system

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

Table (1): Investment results of transmission expansion in the Iranian network with the proposed algorithm

جدول (۱): نتایج سرمایه‌گذاری توسعه انتقال در شبکه ایران با الگوریتم پیشنهادی

تابع هدف (میلیون دلار)	۲۱۲
تعداد خطوط نصب شده	۸
طول خطوط نصب شده (کیلومتر)	۳۲۶
قطع بار	-
مدت زمان حل (ثانیه)	۵۱

Table (2): Comparison of the results of the proposed algorithm with other similar methods

جدول (۲): مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌های مشابه

	الگوریتم پیشنهادی (بهینه‌سازی گلف)	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم زنتیک	الگوریتم گرگ خاکستری	الگوریتم **JAYA**
تابع هدف (میلیون دلار)	۲۱۲	۲۲۱	۲۲۵	۲۱۷	۲۱۵
تعداد خطوط نصب شده	۸	۱۲	۱۱	۱۱	۹
طول خطوط نصب شده (کیلومتر)	۳۲۶	۴۲۰	۴۱۲	۴۲۵	۳۶۹
قطع بار	-	-	-	-	-
مدت زمان حل (ثانیه)	۵۱	۹۵۴	۱۵۸۹	۸۹۷	۱۱۷۹

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی گلف به طور مؤثری در بهینه‌سازی توسعه شبکه انتقال برق ایران عمل کرده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، این الگوریتم توانسته است با حداقل هزینه، تعداد خطوط جدید و طول شبکه مورد نیاز را بهینه کند. به طور خاص، مقدار تابع هدف با استفاده از این الگوریتم به ۲۱۲ میلیون دلار کاهش یافته که کمتر از سایر روش‌های مقایسه‌شده است. همچنین، تعداد خطوط نصب‌شده و طول خطوط شبکه به ترتیب به ۸ خط و ۳۲۶ کیلومتر کاهش یافته است که نشان‌دهنده بهره‌وری بالا و استفاده بهینه از منابع است. علاوه بر این، زمان حل مسئله با استفاده از الگوریتم گلف به طور قابل توجهی کوتاه‌تر از سایر الگوریتم‌ها بوده است که نشان‌دهنده سرعت و کارایی بالای این الگوریتم در پردازش و حل مسائل پیچیده است. این نتایج نه تنها نشان‌دهنده برتری الگوریتم گلف در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی است، بلکه کاربرد موفق آن در یک سیستم واقعی و مقیاس بزرگ مانند شبکه برق ایران را نیز اثبات می‌کند. در مجموع، این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته نظیر الگوریتم گلف می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های توسعه شبکه‌های انتقال برق ایفا کند. این مطالعه همچنین می‌تواند به عنوان یک مرجع برای توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های برق در سایر کشورها و سیستم‌های انرژی بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

References

مراجع

[1] U.S. Energy Information Administration, "Short-term energy outlook," 2020, http://https://www.eia.gov/outlooks/ steo/report/electricity.php.

[2] M. Waseem, S. D. Manshadi, "Electricity grid resilience amid various natural disasters: Challenges and solutions," *The Electricity Journal*, Volume 33, Issue 10, 106864, 2020.

[3] Z. Luburić, H. Pandžić and M. Carrión, "Transmission Expansion Planning Model Considering Battery Energy Storage, TCSC and Lines Using AC OPF," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 203429-203439, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036381.

[4] T. Qiu, B. Xu, Y. Wang, Y. Dvorkin and D. S. Kirschen, "Stochastic Multistage Coplanning of Transmission Expansion and Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 643-651, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2553678.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

[5] F. Yao, T. K. Chau, X. Zhang, H. H. -C. Iu and T. Fernando, "An Integrated Transmission Expansion and Sectionalizing-Based Black Start Allocation of BESS Planning Strategy for Enhanced Power Grid Resilience," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148968-148979, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014341.

[6] M. Moradi-Sepahvand, T. Amraee and S. S. Gougheri, "Deep Learning Based Hurricane Resilient Coplanning of Transmission Lines, Battery Energy Storages, and Wind Farms," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 2120-2131, March 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3074397.

[7] M. Kazemi, M. R. Ansari, "An integrated transmission expansion planning and battery storage systems placement - A security and reliability perspective," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 134, 107329, 2022.

[8] J.A. Aguado, S. de la Torre, A. Triviño, "Battery energy storage systems in transmission network expansion planning," *Electric Power Systems Research*, Volume 145, Pages 63-72, 2017.

[9] M. Moradi-Sepahvand, T. Amraee, "Integrated expansion planning of electric energy generation, transmission, and storage for handling high shares of wind and solar power generation," *Applied Energy*, Volume 298, 117137, 2021.

[10] A. H. Alobaidi, M. Khodayar, A. Vafamehr, H. Gangammanavar, M. E. Khodayar, "Stochastic expansion planning of battery energy storage for the interconnected distribution and data networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 133,107231, 2021.

[11] W. Gan, X. Ai, J. Fang, M. Yan, W. Yao, W. Zuo, J. Wen, "Security constrained co-planning of transmission expansion and energy storage," *Applied Energy*, Volume 239, Pages 383-394, 2019.

[12] Saheed Lekan Gbadamosi, Nnamdi I. Nwulu, "A multi-period composite generation and transmission expansion planning model incorporating renewable energy sources and demand response," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 39, 100726, 2020.

[13] F. Barati, H. Seifi, M. S. Sepasian, A. Nateghi, M. Shafie-khah and J. P. S. Catalão, "Multi-Period Integrated Framework of Generation, Transmission, and Natural Gas Grid Expansion Planning for Large-Scale Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2527-2537, Sept. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2365705.

[14] C. Shao, M. Shahidehpour, X. Wang, X. Wang and B. Wang, "Integrated Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Systems for Enhancing the Power Grid Resilience," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4418-4429, Nov. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2672728.

[15] Y. Zhang, Y. Hu, J. Ma and Z. Bie, "A Mixed-Integer Linear Programming Approach to Security-Constrained Co-Optimization Expansion Planning of Natural Gas and Electricity Transmission Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6368-6378, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2832192.

[16] H. Bakhshi Yamchi, A. Safari, J. M. Guerrero, "A multi-objective mixed integer linear programming model for integrated electricity-gas network expansion planning considering the impact of photovoltaic generation," *Energy*, Volume 222, 119933, 2021.

[17] V. Zahedi Rad, S. A. Torabi, H. Shakouri G., "Joint electricity generation and transmission expansion planning under integrated gas and power system," *Energy*, Volume 167, Pages 523-537, 2019.

[18] A. Safari, M. Farrokhifar, H. Shahsavari, V. Hosseinnezhad, "Stochastic planning of integrated power and natural gas networks with simplified system frequency constraints," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 132, 107144, 2021.

[19] V. Khaligh, A. Anvari-Moghaddam, "Stochastic expansion planning of gas and electricity networks: A decentralized-based approach," *Energy*, Volume 186, 115889, 2019.

[20] A. H.M. Aldarajee, S. H. Hosseinian, B. Vahidi, S. Dehghan, "A coordinated planner-disaster-risk-averse-planner investment model for enhancing the resilience of integrated electric power and natural gas networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 119, 105948, 2020.

[21] R. Tamizkar, M. Samiei-Moghaddam, A. Azarfar, M. Hoseini-Abardeh, M. Vahedi, "Bi-level optimization model for coordinated management of integrated transmission and distribution

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

systems", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 59, pp. 1-20, December 2024 (in Persian).

[22] M. Sattar, M. Samiei-Moghaddam, A. Azarfar, N. Salehi, M. Vahedi, "Joint optimization of integra-ted energy systems in the presence of renewable energy sources, power-to-gas systems and energy storage", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 57, pp. 15-30, June 2024 (in Persian).

[23] H. Jokar, B. Bahmani-Firouzi, H. H. Alhelou and P. Siano, "Transmission and Distribution Substation Energy Management Considering Large-Scale Energy Storage, Demand Side Management and Security-Constrained Unit Commitment," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 123723-123735, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3224458.

[24] Montazeri, Z.; Niknam, T.; Aghaei, J.; Malik, O.P.; Dehghani, M.; Dhiman, G. Golf Optimization Algorithm: A New Game-Based Metaheuristic Algorithm and Its Application to Energy Commitment Problem Considering Resilience. *Biomimetics* **2023**, *8*, 386. https://doi.org/10.3390/biomimetics8050386

[25] F. Barati, H. Seifi, M. S. Sepasian, A. Nateghi, M. Shafie-khah and J. P. S. Catalão, "Multi-Period Integrated Framework of Generation, Transmission, and Natural Gas Grid Expansion Planning for Large-Scale Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2527-2537, Sept. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2365705.

زیرنویس‌ها:

1. Styles
2. Layout
3. Particle swarm optimization
4. Paragraph
5. Page layout
6. Equation editor

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-05-24]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025