Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 2 – Summer 2024
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Generation, Transmission and Battery Expansion Planning According to the Natural Gas Network: A Two-Level Approach

Danial Abazari[1], *Ph.D.*, Reza Ebrahimi[*,2], *Assistant Professor*, Mahmoud Samiei Moghddam[3], *Assistant Professor*, Nasrin Salehi[4], *Associated Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, abazari@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, reza.ebrahimi@iau.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran, samiei352@yahoo.com
[4] Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran, salehi9002@gmail.com

Abstract:
This paper presents a novel two-level stochastic development planning model that addresses the challenges of development, transmission, and battery storage alongside the natural gas network. In this model, high-level decisions for generation, transmission, and storage are integrated with the lower-level modeling of the natural gas network. A key feature of this model is the incorporation of high wind penetration and solar energy integration. Given the increasing uncertainty of these factors, our model offers a comprehensive solution. To solve the optimization problem, the lower-level is transformed into KKT equations, which improves efficiency. The effectiveness of the model is examined using two test networks: one with 6 buses for electricity and a gas network with 5 nodes, and the other with 24 buses and a gas network with 10 nodes. Analyzing the results under various conditions demonstrates the model's efficiency and robustness, providing valuable insights into the interconnection between electricity, gas networks, and renewable energies. The findings of this study contribute to development planning and offer useful insights for policymakers, operators, and stakeholders in the integration of storage energy. The proposed formulation suggests comprehensive strategies that account for the complexities of the evolving energy landscape. The innovative model and approach proposed will provide a strong foundation for future research, offering practical solutions for sustainable and integrated energy system development.

Keywords: Power Network Expansion Planning, Stochastic Optimization, Renewable Energy Sources, Bi-Level Optimization, Natural Gas.

Received: 21 Jun. 2024
Revised: 3 July 2024
Accepted: 8 Aug. 2024

*** Corresponding Author:** Dr. Reza Ebrahimi

Citation: D. Abazari, R. Ebrahimi, M. Samiei Moghddam, N. Salehi, "Generation, Transmission and Battery Expansion Planning According To the Natural Gas Network: A Two-Level Approach", Journal of Novel Reseraches on Smart Power Systems, vol. 12, no. 2, pp. 17-32, September 2024 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی توسعه تولید، انتقال و باتری با توجه به شبکه گاز طبیعی: یک رویکرد دو سطحی

دانیال اباذری[1]، دانشجوی دکتری، رضا ابراهیمی، استادیار[2,*]، محمود سمیعی مقدم[3]، استادیار، نسرین صالحی[4]، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان ، ایران
۲- گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان ، ایران
۳- گروه مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان ، ایران
۴- گروه علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود ، ایران

چکیده: این مقاله مدلی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه تصادفی دو سطحی معرفی می‌کند که به چالش‌های توسعه تولید، انتقال و ذخیره‌سازی باتری در کنار شبکه گاز طبیعی می‌پردازد. در این مدل، تصمیمات سطح بالا برای توسعه تولید، انتقال و ذخیره‌سازی باتری با مدل‌سازی سطح پایین شبکه گاز طبیعی ترکیب می‌شوند. یکی از نوآوری‌های کلیدی این مدل، ادغام اثرات باد شدید و نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی است. با توجه به اهمیت و عدم قطعیت فزاینده این عوامل، مدل ما یک رویکرد جامع ارائه می‌دهد. برای حل مسئله بهینه‌سازی، از تبدیل سطح پایین به معادلات KKT استفاده می‌کنیم که کارایی بالایی دارد. اثربخشی مدل با استفاده از دو شبکه آزمایشی بررسی می‌شود: یکی با ۶ شین برای برق و شبکه گاز با ۵ گره، و دیگری با ۲۴ شین و شبکه گاز با ۱۰ گره. تحلیل نتایج در شرایط مختلف، با استفاده از حل‌کننده قدرتمند Gurobi کارایی مدل را تأیید می‌کند و شواهد محکمی از توانایی آن در ثبت تعاملات بین برق، شبکه‌های گاز و انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. یافته‌های این مطالعه به برنامه‌ریزی توسعه کمک کرده و بینش‌های مفیدی را برای سیاست‌گذاران، اپراتورها و ذینفعان در ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم می‌آورد. فرمول جدید ارائه شده، مبنایی برای تدوین استراتژی‌های جامع و دقیق در نظر گرفتن پیچیدگی‌های چشم‌انداز انرژی فراهم می‌کند. مدل و روش نوآورانه پیشنهادی، پایه‌ای قوی برای تحقیقات آینده، ارائه راه‌حل‌های عملی برای توسعه پایدار و یکپارچه سیستم انرژی خواهد بود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق، بهینه‌سازی تصادفی، منابع تجدیدپذیر، بهینه‌سازی دو سطحی، گاز طبیعی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر رضا ابراهیمی
نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان ، ایران

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

۱- مقدمه

نصب سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و هزینه‌های عملیاتی پایین، همراه با منابع انرژی تجدیدپذیر رو به افزایش است. علاوه بر انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های قدرت همچنان از فناوری‌های مرسوم مانند واحدهای گازسوز بهره می‌برند که سهم این واحدها از ۳۷ درصد در سال ۲۰۱۹ به ۳۹ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. با افزایش وابستگی به واحدهای گازسوز، ارتباط بین زیرساخت‌های گاز طبیعی و برق تقویت شده و این موضوع بر تعادل عرضه و تقاضا در هر دو سیستم تأثیر گذاشته و چالش‌های مهمی را در زمینه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی ایجاد می‌کند. روند رو به رشد استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، افزایش سهم واحدهای گازسوز در شبکه‌های برق و توسعه چشمگیر منابع انرژی تجدیدپذیر، نیاز به برنامه‌ریزی یکپارچه توسعه برای شرکت‌های برق و گاز را ضروری می‌سازد. در این مقاله، به چالش‌های اساسی در برنامه‌ریزی توسعه تولید، انتقال و ذخیره‌سازی باتری در سیستم‌های قدرت به منظور پاسخگویی به رشد بار و افزایش انعطاف‌پذیری با توجه به افزایش نیروگاه‌های تجدیدپذیر پرداخته می‌شود.

یک مدل تصادفی دو سطحی در [۱] ارائه شده است که با استفاده از روش تجزیه بندرز، به مسئله گسترش یکپارچه شبکه انتقال و ذخیره‌سازی باتری در حضور ضریب نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر می‌پردازد. در [۲] یک چارچوب مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی سه سطحی را برای گسترش سرمایه‌گذاری در شبکه‌های یکپارچه برق و گاز طبیعی تحت رویدادهای شدید پیشنهاد کرده‌اند. در [۳] مدلی چند مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی توسعه مشترک خطوط انتقال، باتری‌ها و مزارع بادی ارائه کرده‌اند که هدف آن افزایش انعطاف‌پذیری سیستم است. در [۴] مدلی بهینه برای سرمایه‌گذاری در گسترش ذخیره‌سازی انرژی باتری، جبران‌کننده‌های سری کنترل شده با تریستور، و خطوط انتقال با استفاده از تجزیه بندرز پیشنهاد کرده‌اند. در [۵] چارچوبی برای تحلیل و حفظ فرکانس در شبکه قدرت ارائه داده‌اند که از برنامه‌ریزی تصادفی برای شبکه‌های انتقال و گاز با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی شبکه استفاده می‌کند، در [۶] یک تابع چندهدفه برای افزایش انعطاف‌پذیری و سود شبکه از طریق مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه خط انتقال و باتری پیشنهاد کرده‌اند. در [۷] مدلی غیرخطی برای بررسی تأثیر مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی توسعه مشترک شبکه‌های یکپارچه برق و گاز ارائه کرده و این مدل را با روش ضرب متناوب حل کرده‌اند. در [۸] رویکردی برای برنامه‌ریزی یکپارچه به منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت با استفاده از مدل‌سازی گسترش انتقال و تخصیص منابع برای راه‌اندازی سیستم‌ها در شرایط بحرانی، پیشنهاد کرده‌اند. در [۹] به بررسی تأثیرات منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا بر مسئله گسترش همزمان تولید و انتقال پرداخته‌اند. در [۱۰] رویکردی برای برنامه‌ریزی مشترک انتقال و گسترش باتری به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی ارائه کرده‌اند. در [۱۱] مدلی برای برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه انتقال و تولید همراه با شبکه گاز برای افزایش رفاه اجتماعی پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۲] چارچوبی برای برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های انتقال گاز طبیعی و برق با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی شبکه، برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در هر دو شبکه ارائه کرده‌اند. در [۱۳] یک مدل چند دوره‌ای یکپارچه برای برنامه‌ریزی توسعه باتری‌ها و شبکه‌های انتقال با در نظر گرفتن تولید برق بادی و خورشیدی با استفاده از روش تجزیه بندرز ارائه کرده‌اند، در [۱۴] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی برای توسعه شبکه‌های انتقال و گاز طبیعی با در نظر گرفتن خروجی‌های منابع فتوولتائیک و خطوط انتقال پیشنهاد کرده‌اند، در [۱۵] مدلی تصادفی چند مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی مشترک انتقال و گسترش باتری با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش بار پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۶] مدلی دو سطحی را برای حل مسئله برنامه‌ریزی گسترش انتقال به همراه کنترل واحدهای شبکه و سیستم‌های ذخیره انرژی با استفاده از تجزیه بندرز و با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی شبکه انتقال پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۷] مدلی دو سطحی قوی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه گاز و انتقال با هدف افزایش انعطاف‌پذیری شبکه برق پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۸] چارچوبی یکپارچه برای برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال همراه با برنامه‌ریزی توسعه شبکه گاز طبیعی برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد کرده‌اند. در [۱۹] یک چارچوب بهینه‌سازی اکتشافی مبتنی بر جغرافیای زیستی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و با در نظر گرفتن اتصال منطقه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۰]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

الگوریتم کسینوس سینوسی تکاملی را برای حل برنامه‌ریزی توسعه تولید کم‌هزینه با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد داده‌اند، در [۲۱] یک الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری اصلاح‌شده برای برنامه‌ریزی گسترش انتقال با هدف کاهش هزینه‌های سیستم در شبکه‌های آزمایشی مختلف پیشنهاد کرده‌اند، در [۲۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی برای توسعه سیستم ذخیره انرژی و خطوط انتقال با در نظر گرفتن انرژی باد پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۳] مدلی دو سطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط تصادفی را برای توسعه زیرساخت‌های انرژی باتری و گاز-الکتریک با استفاده از یک الگوریتم اصلی-زیرمسئله تجزیه‌شده پیشنهاد کرده‌اند، در [۲۴] الگوریتم k-mean را برای برنامه‌ریزی گسترش انتقال با در نظر گرفتن تأثیر تولید برق بادی پیشنهاد داده‌اند. در [۲۵] یک الگوریتم جستجوی کلاغ چندهدفه را برای برنامه‌ریزی گسترش انتقال با محدودیت‌های امنیتی تصادفی و بر اساس مسائل بهینه‌سازی ترکیبی اعداد صحیح مختلط و غیرخطی پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۶] یک برنامه‌ریزی توسعه چند مرحله‌ای تولید و انتقال چند ساله را برای سیستم قدرت برزیل با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب پیشنهاد کرده‌اند، در [۲۷] تکنیکی برای برنامه‌ریزی گسترش شبکه انتقال با هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۸] برنامه‌ریزی گسترش انتقال تصادفی برای به حداقل رساندن هزینه کل با استفاده از یک الگوریتم تکاملی و در نظر گرفتن شرایط بار نامشخص و انرژی باد پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۹] مدلی اقتصادی تصادفی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای توسعه باتری در مقیاس بزرگ پیشنهاد کرده‌اند. در [۳۰] نویسندگان برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی بار اضطراری و بارهای قابل قطع و کاهش به منظور کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف‌کنندگان را پیشنهاد نموده‌اند. در [۳۱] نویسندگان مشارکت واحدها در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی را پیشنهاد کرده‌اند.

۱-۱- انگیزه تحقیق

هدف از مطالعه پیشنهادی، بررسی جامع مجموعه‌ای از ملاحظات برنامه‌ریزی در بخش انرژی است. این مطالعه از یک مدل برنامه‌ریزی دو سطحی بهره می‌برد که عوامل مختلفی نظیر تحلیل شبکه گاز، برنامه‌ریزی توسعه باتری (BEP[۱])، برنامه‌ریزی توسعه انتقال (TEP[۲])، برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP[۳])، یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، تحلیل چندسطحی، و تحلیل تصادفی را در نظر می‌گیرد. با توجه به این عوامل، تحقیق قصد دارد رویکردی جامع به برنامه‌ریزی انرژی ارائه دهد که تمامی جنبه‌های متنوع سیستم انرژی را در بر بگیرد. این رویکرد به تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان امکان می‌دهد تا در مورد توسعه و بهینه‌سازی زیرساخت‌های انرژی، با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و تضمین تامین انرژی پایدار و قابل اعتماد، تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کنند. گنجاندن تحلیل شبکه گاز، اهمیت ادغام گاز طبیعی در سیستم انرژی را نشان می‌دهد. همچنین، تمرکز بر برنامه‌ریزی توسعه باتری، توسعه انتقال، و تولید، نیاز به ایجاد زیرساخت‌های کارآمد و موثر برای پاسخگویی به تقاضای روزافزون انرژی و تسهیل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر را برجسته می‌کند. افزون بر این، این پژوهش شامل تحلیل چندسطحی است که به بررسی مقیاس‌ها و سلسله‌مراتب‌های مختلف در فرآیند برنامه‌ریزی انرژی می‌پردازد و درک جامع‌تری از پویایی سیستم ارائه می‌دهد. همچنین، گنجاندن تحلیل تصادفی، به شناسایی و مدیریت عدم‌قطعیت‌ها و تغییرات ذاتی سیستم‌های انرژی کمک کرده و بینش‌هایی درباره استحکام و انعطاف‌پذیری طرح‌های پیشنهادی ارائه می‌دهد. در مجموع، هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب جامع و بهینه برای برنامه‌ریزی انرژی است که ضمن در نظر گرفتن عوامل مختلف و عدم‌قطعیت‌ها، به تسهیل انتقال به سوی آینده‌ای پایدار و قابل اعتماد در بخش انرژی کمک کند.

۲-۱- شکاف مطالعاتی

بر اساس جدول ارائه‌شده، می‌توان شکاف‌های موجود در ادبیات تحقیقاتی را به‌صورت زیر توصیف کرد:

با وجود اینکه مقالات متعددی به جنبه‌های مختلف برنامه‌ریزی انرژی پرداخته‌اند، هنوز شکاف‌های قابل‌توجهی در بدنه پژوهش‌های فعلی مشاهده می‌شود. هدف از مطالعه پیشنهادی، پر کردن این شکاف‌ها از طریق ترکیب مجموعه‌ای جامع از ملاحظات برنامه‌ریزی است که شامل تحلیل شبکه گاز، برنامه‌ریزی توسعه باتری (BEP)، برنامه‌ریزی توسعه انتقال (TEP)، برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP)، یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، تحلیل چندسطحی و تحلیل تصادفی می‌شود. یکی از شکاف‌های برجسته در ادبیات موجود، توجه محدود به تحلیل شبکه گاز است. در حالی که برخی مقالات به این موضوع

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

پرداخته‌اند، تعداد زیادی از مطالعات اهمیت این عامل را نادیده گرفته‌اند. تحلیل شبکه گاز در درک نقش گاز طبیعی در سیستم انرژی و چگونگی ادغام آن با سایر منابع انرژی بسیار حائز اهمیت است. مطالعه پیشنهادی با افزودن این تحلیل، قصد دارد دیدگاهی جامع‌تر در مورد برنامه‌ریزی انرژی ارائه دهد. علاوه بر این، شکافی در ادغام جنبه‌های مختلف برنامه‌ریزی وجود دارد. بسیاری از مطالعات بر روی جنبه‌های فردی مانند BEP، TEP یا GEP تمرکز کرده‌اند، بدون آنکه به ماهیت به هم پیوسته و تأثیرات متقابل این جنبه‌ها توجه داشته باشند. مطالعه پیشنهادی به دنبال پر کردن این شکاف است و قصد دارد با ادغام این جنبه‌ها در یک چارچوب یکپارچه، رویکرد جامع‌تری به برنامه‌ریزی انرژی ارائه دهد. این رویکرد با در نظر گرفتن بهینه‌سازی همزمان توسعه باتری، انتقال و تولید، به دنبال ارائه یک دیدگاه یکپارچه و فراگیر در برنامه‌ریزی انرژی است. علاوه بر این، در حالی که برخی مقالات به یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند، هنوز نیاز به بهبود در ترکیب و بهینه‌سازی استفاده از این منابع وجود دارد. مطالعه پیشنهادی با تأکید ویژه بر ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند برنامه‌ریزی، به دنبال ایجاد سیستمی پایدارتر و سازگار با محیط‌زیست است. در نهایت، این مطالعه قصد دارد با ترکیب تحلیل چندسطحی و تحلیل تصادفی، به ادبیات علمی کمک کند. این رویکردها پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های ذاتی در سیستم‌های انرژی را در نظر می‌گیرند. مطالعه پیشنهادی با ادغام تحلیل چندسطحی، اهمیت توجه به مقیاس‌ها و سلسله‌مراتب مختلف در برنامه‌ریزی انرژی را تشخیص می‌دهد. همچنین، با در نظر گرفتن تحلیل تصادفی، به هدف محاسبه تغییرات ذاتی و عدم قطعیت‌های مرتبط با تولید و تقاضای انرژی تجدیدپذیر دست می‌یابد. به طور کلی، شکاف‌های شناسایی‌شده در ادبیات موجود نشان‌دهنده نیاز به یک رویکرد جامع و یکپارچه است که تحلیل شبکه گاز، جنبه‌های چندگانه برنامه‌ریزی، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، تحلیل چندسطحی و تحلیل تصادفی را در بر می‌گیرد. مطالعه پیشنهادی با ارائه چارچوبی جامع‌تر برای برنامه‌ریزی انرژی، به دنبال پر کردن این شکاف‌ها و پرداختن به این جنبه‌های حیاتی است.

۳-۱- نوآوری تحقیق

جدول (۱) مقایسه‌ای از تفاوت‌های این مطالعه با سایر مقالات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مقاله یک مدل جامع برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه برق با در نظر گرفتن شبکه گاز طبیعی ارائه شده است.

نوآوری‌های اصلی این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱) مدل‌سازی: این مقاله با ارائه یک مدل تصادفی دو سطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، رویکردی نوین را معرفی می‌کند. این مدل شبکه گاز طبیعی را به‌عنوان یک عامل اساسی در مواجهه با چالش‌های مربوط به تولید، انتقال و برنامه‌ریزی توسعه باتری در نظر می‌گیرد. همچنین، تأثیرات مهم نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند باد و خورشید، را در فرایند برنامه‌ریزی توسعه به حساب می‌آورد.

۲) روش حل: این مطالعه یک روش حل ابتکاری با معادلات KKT[۴] را معرفی می‌کند. این روش قادر است مسائل تصادفی را با دقت بالا حل کند. روش پیشنهادی به‌طور خاص برای رسیدگی به چالش‌ها و پیچیدگی‌های منحصر به فرد مرتبط با بهینه‌سازی‌های دو سطحی تصادفی طراحی شده است. معرفی این روش حل نشان‌دهنده یک پیشرفت چشمگیر در این حوزه است، زیرا یک چارچوب محاسباتی کارآمد برای حل بهینه‌سازی‌های دو سطحی تصادفی پیچیده فراهم می‌آورد.

در ادامه مقاله، مدل‌سازی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق و روش حل آن ارائه می‌شود. در بخش سوم، سیستم‌های یکپارچه معرفی و نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه خواهد شد و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات مطرح می‌شوند.

جدول (۱): مقایسه مطالعه پیشنهادی با مقالات مشابه

Table (1): Comparison of the proposed study with similar articles

مرجع	شبکه گاز	BEP	TEP	GEP	تجدید پذیر	چند سطحی	تصادفی
این مطالعه	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[۱]	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
[۲]	✓	-	✓	-	✓	✓	✓
[۳]	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[۴]	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[۵]	✓	-	✓	-	✓	-	✓

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[۶]	-	✓	✓	-	✓	-	-
[۷]	✓	-	✓	-	✓	-	✓
[۸]	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[۹]	-	-	✓	✓	✓	-	-
[۱۰]	-	✓	✓	-	✓	-	-
[۱۱]	✓	-	✓	✓	-	-	-
[۱۲]	✓	-	✓	-	-	-	-
[۱۳]	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[۱۴]	✓	-	✓	-	✓	-	✓
[۱۵]	-	✓	✓	-	✓	-	✓
[۱۶]	-	✓	✓	-	✓	✓	-
[۱۷]	✓	-	✓	-	-	✓	✓
[۱۸]	✓	-	✓	✓	✓	-	-
[۱۹]	-	-	-	✓	✓	-	-
[۲۰]	-	-	-	✓	✓	-	-
[۲۱]	-	-	✓	-	-	-	-
[۲۲]	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
[۲۳]	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
[۲۴]	-	-	✓	-	✓	-	✓
[۲۵]	-	-	✓	-	✓	-	✓
[۲۶]	-	-	✓	✓	✓	✓	
[۲۷]	-	-	✓	-	✓	-	-
[۲۸]	-	-	✓	-	✓	-	✓
[۲۹]	-	✓	-	-	✓	-	✓

۲- مدل توسعه شبکه برق پیشنهادی

در این تحقیق، به دلیل تفاوت‌های موجود در اهداف اپراتورها و برنامه‌ریزان شبکه‌های برق و گاز، مدلی دو سطحی برای مدل‌سازی اهداف هر شبکه پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است: یک مدل سطح بالا و یک مدل سطح پایین. در مدل سطح بالا، برنامه‌ریزی تولید، انتقال و توسعه باتری مد نظر قرار می‌گیرد، در حالی که مدل سطح پایین به تحلیل و برنامه‌ریزی شبکه گاز اختصاص دارد. در ادامه، هر یک از این بخش‌ها به تفصیل معرفی و بررسی خواهند شد.

۲-۱- مسئله سطح بالایی

همانطور که گفته شد، در مسئله برنامه ریزی سطح بالا، تولید، انتقال و گسترش باتری مدل شده است. در (۱) تابع هدف مسئله سطح بالا نشان داده شده است. در رابطه (۱) L ، T B، و S به ترتیب برابر با مجموعه خطوط شبکه برق، شین های شبکه برق، سناریوها و ساعات روز نمونه در سال مورد نظر هستند که به ترتیب با شاخص lهای، sو bنشان داده می شوند t. تابع هدف مسئله سطح بالا کاهش هزینه سرمایه گذاری خطوط، باتری ها و نیروگاه ها و کاهش هزینه بهره برداری، بی باری، راه اندازی و خاموشی واحدها به همراه هزینه کاهش بار است. و همچنین هزینه شارژ و دشارژ باتری به همراه هزینه قطع برق منابع انرژی تجدیدپذیر. در این رابطه $\widetilde{\alpha}_l$معادل هزینه سرمایه گذاری سالانه برای خطوط کاندید و x_lبرابر با متغیر باینری وضعیت خطوط کاندید نصب شده در دوره برنامه ریزی می باشد.$\widetilde{\beta}_b$ برابر است با هزینه سرمایه گذاری سالانه برای باتری و x_bبرابر با متغیر ظرفیت باتری نصب شده در شبکه است.$\widetilde{\gamma}_b$ معادل هزینه سرمایه گذاری سالانه برای نیروگاه و g_b^{cap}برابر با ظرفیت متغیر نیروگاه نصب شده در شبکه است.σ_s برابر با احتمال هر سناریو $g_{b,t,s}$ است و به c_b^gترتیب تولید واحدها و هزینه تولید هر واحد موجود را نشان می دهد و $g_{b,t,s}^c$ به c_b^cترتیب توان واحدهای کاندید و هزینه تولید هر واحد کاندید نصب شده را نشان می دهد.$u_{b,t,s}$ و c_b^nوضعیت مشارکت هر واحد و هزینه بی باری، وضعیت راه اندازی واحدها و هزینه آن را به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

ترتیب با $s_{b,t,s}$ و c_b^{st} نشان می دهد. $v_{b,t,s}$ و c_b^{sd} وضعیت خاموشی واحدها و هزینه خاموشی را به ترتیب نشان می دهد. کاهش بار و هزینه آن با نشان داده شده است $r_{b,t,s}$ و c_b^{r} به ترتیب. شارژ و دشارژ باتری با نشان داده می شود $p_{b,t,s}^{c}$ و $p_{b,t,s}^{d}$ به ترتیب، و هزینه مربوطه با نشان داده می شود c_b^{bt}. در نهایت، مقدار واقعی تولید منابع انرژی تجدیدپذیر با نشان داده می شود $\tilde{p}_{b,t,s}^{re}$ و مقدار عملیاتی آن با نشان داده می شود $p_{b,t,s}^{re}$. هزینه قطع برق انرژی تجدیدپذیر با نشان داده می شود c_b^{re}. روابط (۲) تا (۲۲) محدودیت های مسئله سطح بالایی هستند. در (۲) محدودیت عملیات واحدهای موجود نشان داده شده است. در این راستا g_b^{min} و g_b^{axm} به ترتیب حد پایین و بالای تولید هر واحد را مشخص کنید. معادله (۳) شرط تعادل قدرت است که $\tilde{g}_{b,t,s}$ برابر با توان واحدهای گازسوز است. $d_{b,t,s}$ برابر بار شبکه برق و $f_{ij,t,s}$ جریان برق واقعی خطوط است. در (۴) حد بهره برداری از واحدهای تجدیدپذیر را در هر سناریو نشان می دهد. محدودیت (۵) وضعیت عملکرد واحدهای کاندید نصب شده را نشان می دهد. معادله (۶) محدودیت ظرفیت نیروگاه های کاندید را نشان می دهد. معادله (۷) حد ریزش بار را نشان می دهد. محدودیت های (۸) و (۹) به ترتیب محدودیت های شارژ و دشارژ باتری را نشان می دهند. محدودیت های (۱۰) و (۱۱) تضمین می کنند که ظرفیت باتری در هر شین از بازه در نظر گرفته شده انتخاب شده است. در این روابط O برابر با مجموعه در نظر گرفته شده برای ظرفیت باتری است و شاخص آن با نشان داده می شود o. y_{b_j} نشان دهنده متغیر باینری کمکی و A_o برابر با مجموعه در نظر گرفته شده برای ظرفیت باتری است که در صورت نصب x_b برابر با یکی از اعضای مجموعه A_o خواهد بود. روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب انرژی موجود در باتری و محدودیت آن را نشان می دهد. در این روابط، $e_{b,t,s}$ وضعیت انرژی در باتری را نشان می دهد. معادلات (۱۴) و (۱۵) وضعیت انرژی اولیه در باتری را نشان می دهد. معادله (۱۶) رابطه بین متغیرهای باینری واحدها را نشان می دهد. معادله (۱۷) حد بودجه برای سرمایه گذاری را نشان می دهد. Ψ نشان دهنده حداکثر بودجه برای سرمایه گذاری است. معادلات (۱۸) و (۱۹) به ترتیب تعریف جریان خط و حد جریان خط را نشان می دهند. در این رابطه، δ_l برابر با سوسپتانس خط و $\theta_{i,t,s}$ برابر با زاویه ولتاژ است. $f_{l,t,s}^{max}$ حداکثر جریان برق خط را نشان می دهد . روابط (۲۰) و (۲۱) محدودیت زاویه ولتاژ را نشان می دهد. در نهایت معادله (۲۲) تبدیل گاز به توان الکتریکی را از طریق واحدهای گازسوز نشان می دهد و ρ برابر ضریب تبدیل گاز به توان الکتریکی و $w_{n,t,s}$ برابر با نیاز گاز واحد گازسوز است. در اینجا مجموعه گره های گاز با N و شاخص آن با نشان داده می شود n.

$$\min \sum_{l\in L} \hat{\alpha}_l x_l + \sum_{b\in B} \hat{\beta}_b x_b + \sum_{b\in B} \hat{\gamma}_b g_b^{cap} + ۳۶۵ \times ۲۴ \sum_{s\in S} \sigma_s \left(\sum_{b\in B, t\in T} g_{b,t,s} c_b^{g} + g_{b,t,s}^{c} c_b^{c} + u_{b,t,s} c_b^{n} + s_{b,t,s} c_b^{st} + v_{b,t,s} c_b^{sd} + r_{b,t,s} c_b^{r} + \left(p_{b,t,s}^{c} + p_{b,t,s}^{d} \right) c_b^{bt} + \left(\tilde{p}_{b,t,s}^{re} - p_{b,t,s}^{re} \right) c_b^{re} \right) \quad (۱)$$

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

$$g_{b,t,s} + \tilde{g}_{b,t,s} + g_{b,t,s}^{c} + r_{b,t,s} + p_{b,t,s}^{d} + p_{b,t,s}^{re} + \sum_{ij\in b} f_{ij,t,s} - \sum_{ji\in b} f_{ji,t,s} - p_{b,t,s}^{c} - d_{b,t,s} = ۰ \quad \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۳)$$

$$۰ \le p_{bt,s}^{re} \le \tilde{p}_{b,t,s}^{re} \quad \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۴)$$

$$۰ \le g_{b,t,s}^{c} \le g_b^{cap} \quad \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۵)$$

$$۰ \le g_b^{cap} \le g_b^{-cap} \quad (۶)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

$$0 \le r_{b,t,s} \le d_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۷)$$

$$0 \le p^{c}_{bt,s} \le x_b \left(1 - z_{b,t,s}\right) \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۸)$$

$$0 \le p^{d}_{bt,s} \le x_b z_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۹)$$

$$\sum_{o \in O} y_{b,o} \le 1 \ \forall b \in B \quad (۱۰)$$

$$x_b = \sum_{o \in O} y_{b,o} A_o \ \forall b \in B \quad (۱۱)$$

$$e_{b,t+1,s} = e_{b,t,s} + p^{c}_{b,t+1,s} - p^{d}_{b,t+1,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۱۲)$$

$$0 \le e_{b,t,s} \le x_b \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۱۳)$$

$$e_{b,t,s} = p^{c}_{b,t,s} - p^{d}_{b,t,s} \ \forall b \in B, t = 1, s \in S \quad (۱۴)$$

$$p^{d}_{b,t,s} = 0 \ \forall b \in B, t = 1, s \in S \quad (۱۵)$$

$$u_{b,t+1,s} - u_{b,t,s} = s_{b,t,s} - v_{b,t,s} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۱۶)$$

$$\sum_{l \in L} \alpha_l x_l + \sum_{b \in B} \beta_b x_b + \sum_{b \in B} \hat{\gamma}_b g_b^{cap} \le \psi \quad (۱۷)$$

$$f_{l,t,s} = x_l \delta_l \left(\theta_{i,t,s} - \theta_{j,t,s}\right) \ \forall l \in L, i,j \in B, t \in T, s \in S \quad (۱۸)$$

$$-f^{max}_{l,t,s} x_l \le f_{l,t,s} \le f^{max}_{l,t,s} x_l \ \forall b \in B, t = 1, s \in S \quad (۱۹)$$

$$-\pi \le \theta_{b,t,s} \le \pi \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \quad (۲۰)$$

$$\theta_{b,t,s} = 0 \ \forall b = ref, t \in T, s \in S \quad (۲۱)$$

$$\tilde{g}_{b,t,s} = \rho w_{n,t,s} \ \forall b \in B, n \in N, t \in T, s \in S \quad (۲۲)$$

۲-۲- مسئله سطح پایینی

مسئله سطح پایینی که یک مدل خطی عدد صحیح مختلط در نظر گرفته می شود، عملکرد شبکه گاز طبیعی است. معادله (۲۳) تابع هدف مسئله سطح پایین را نشان می دهد. در اینجا افزایش رفاه اجتماعی به عنوان تابع عینی مسئله در نظر گرفته می شود. در این رابطه، $w_{n,t,s}$ برابر با تقاضای گاز در واحدهای تولید گاز و c^{w}_{n} قیمت مزایده واحدهای گازسوز، همچنین $\omega_{n,t,s}$ برابر با گاز عرضه شده در گره شبکه گاز و c^{ω}_{n} برابر است با هزینه نهایی گازرسانی در گره شبکه گاز. روابط (۲۴) تا (۲۷) محدودیت های مربوط به مسئله سطح پایین را نشان می دهد. معادله (۲۴) تعادل گاز در شبکه گاز طبیعی را نشان می دهد. در این راستا، $\zeta_{nm,t,s}$ نشان دهنده جریان گاز در هر خط لوله و $d^{g}_{n,t,s}$ برابر با تقاضای گاز ثابت است. معادله (۲۵) محدودیت جریان گاز در هر خط لوله را نشان می دهد. در این رابطه، ζ^{max}_{k} برابر است با حداکثر جریان گاز در هر خط لوله، مجموعه خطوط لوله شبکه گاز با K و شاخص آن با نشان داده می شود k. معادله (۲۶) محدودیت عملکرد تامین کننده گاز (چاه گاز) را نشان می دهد. در این راستا، ω^{min}_{n} و ω^{max}_{n} به ترتیب نشان دهنده حداقل و حداکثر گاز بهره برداری شده از چاه گاز می باشد. در (۲۷) حد سطح مصرف گاز در واحدهای گازسوز را نشان می دهد که باید بین حداقل w^{min}_{n} و حداکثر در نظر گرفته شود w^{max}_{n}. متغیر باینری $e_{n,t,s}$ برابر با وضعیت واحدهای گازسوز است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

$$\max \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} w_{n,t,s}\overset{w}{c_n} - \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} \omega_{n,t,s}\overset{\omega}{c_n} \quad (۲۳)$$

$$\omega_{n,t,s} - w_{n,t,s} + \sum_{nm\in N} \zeta_{nm,t,s} - \sum_{mn\in N} \zeta_{mn,t,s} - \overset{g}{d}_{n,t,s} = 0 \quad \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۲۴)$$

$$-\overset{max}{\zeta_k}\, o_{n,t,s} \le \zeta_{k,t,s} \le o_{n,t,s}\overset{max}{\zeta_k} \quad \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۲۵)$$

$$\overset{min}{\omega_n} \le \omega_{n,t,s} \le \overset{max}{\omega_n} \quad \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۲۶)$$

$$\overset{min}{w_n} \le w_{n,t,s} \le \overset{max}{w_n} \quad \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۲۷)$$

۳-۲- روش حل

مسئله بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی به فرم کلی روابط (۲۸-۳۱) می‌باشد. که رابطه (۲۸) تابع هدف مسئله سطح بالایی و (۲۹) قیود آن و رابطه (۳۰) تابع هدف سطح پایینی و (۳۱) قیود مرتبط با آن می‌باشد.

$$\min \sum_{l\in L} \hat{\alpha}_l x_l + \sum_{b\in B} \hat{\beta}_b x_b + \sum_{b\in B} \hat{\gamma}_b \overset{cap}{g_b} + ۳۶۵ \times ۲۴ \sum_{s\in S} \sigma_s \left(\sum_{b\in B,t\in T} \begin{matrix} g_{b,t,s}\overset{g}{c_b} + \overset{c}{g}_{b,t,s}\overset{c}{c_b} + u_{b,t,s}\overset{n}{c_b} + s_{b,t,s}\overset{st}{c_b} + v_{b,t,s}\overset{sd}{c_b} \\ + r_{b,t,s}\overset{r}{c_b} + \left(\overset{c}{p}_{b,t,s} + \overset{d}{p}_{b,t,s}\right)\overset{bt}{c_b} + \left(\overset{\sim re}{p}_{b,t,s} - \overset{re}{p}_{b,t,s}\right)\overset{re}{c_b} \end{matrix} \right) \quad (۲۸)$$

$$s.t.\ (2) - (22) \quad (۲۹)$$

$$\mathbf{w_{n,t,s}} \in \operatorname{argmax} \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} w_{n,t,s}c_n^w - \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} \omega_{n,t,s}c_n^\omega \quad (۳۰)$$

$$s.t.\ (24) - (27) \quad (۳۱)$$

همانطور که مشاهده شد مدل دو سطحی بالا یک ساختار ترکیبی باینری در هر دو سطح دارد که برای حل آن به صورت عادی نمی‌توان مسئله را به یک سطح تبدیل نمود و از فرم شرایط KKT استفاده کرد. بدین منظور برای اینکه مسئله سطح پایین را به شرایط KKT تبدیل کنیم و مدل KKT را به مسئله سطح بالایی اضافه نموده و مسئله را به یک مدل تک سطحی تبدیل کرده به صورت زیر عمل می‌کنیم.

همانطور که می‌دانیم مدل‌هایی که دارای متغیرهای باینری می‌باشد قابلیت تبدیل به فرم شرایط KKT را ندارند. مدل سطح پایینی در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی با متغیر باینری می‌باشد. در اینجا متغیر $o_{n,t,s}$ که نشان‌دهنده وضعیت خط لوله‌های شبکه گاز می‌باشد، متغیر باینری مسئله ما می‌باشد. برای تبدیل شدن مدل سطح پایینی به فرم شرایط KKT ابتدا این متغیر را به صورت یک متغیر پیوسته تبدیل می‌کنیم. سپس دو شرط (۳۲) و (۳۳) را به مسئله سطح پایینی اضافه نموده تا متغیر $o_{n,t,s}$ همان خاصیت یک متغیر باینری را داشته باشد.

$$o_{n,t,s} - o_{n,t,s}^{\,2} = 0 \quad \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۳۲)$$

$$0 \le o_{n,t,s} \le 1 \quad \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۳۳)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

همانطور که مشاهده می‌شود با اضافه نمودن قیود (۳۲) و (۳۳) به مسئله سطح پایینی مدل تبدیل یه یک مدل غیرمحدب درجه دوم شده و هیچگونه متغیر باینری در آن نمی‌باشد. پس به طور خلاصه مسئله سطح پایین پیشنهادی به صورت روابط (۳۴-۴۱) می‌باشد.

$$\max \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} w_{n,t,s}c_n^w - \sum_{n\in N,t\in T,s\in S} \omega_{n,t,s}c_n^\omega \quad (۳۴)$$

$$\text{s.t.}\ \ \omega_{n,t,s} - w_{n,t,s} + \sum_{nm\in N} \zeta_{nm,t,s} - \sum_{mn\in N} \zeta_{mn,t,s} - d_{n,t,s}^g = 0\ \ \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۳۵)$$

$$-\zeta_k^{max} o_{n,t,s} \le \zeta_{k,t,s} \le \zeta_k^{max} o_{n,t,s}\ \ \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۳۶)$$

$$\omega_n^{min} \le \omega_{n,t,s} \le \omega_n^{max}\ \ \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۳۷)$$

$$w_n^{min} \le w_{n,t,s} \le w_n^{max}\ \ \forall n\in N, t\in T, s\in S \quad (۳۸)$$

$$\sum_{k\in K} o_{n,t,s} = K-1\ \ \forall t\in T, s\in S \quad (۳۹)$$

$$o_{n,t,s} - o_{n,t,s}^{\ 2} = 0\ \ \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۴۰)$$

$$0 \le o_{n,t,s} \le 1\ \ \forall k\in K, t\in T, s\in S \quad (۴۱)$$

همانطور که مشاهده می‌شود مدل سطح پایین (۳۴-۴۱) یک مدل غیرمحدب درجه دوم به علت قید (۴۰) می‌باشد. اخیرا حل-کننده قدرتمند Gurobi ادعا نموده است که می‌تواند جواب‌های بهینه مطلق یا سراسری را برای مسائل غیرمحدب درجه دوم بدست آورد. در همین راستا با تبدیل مسئله (۵) به فرم شرایط KKT و اضافه نمودن آن به مسئله سطح بالایی مدل پیشنهادی به یک مدل تک سطحی تبدیل شده و جواب‌های بهینه مطلق آن توسط حل‌کننده Gurobi تضمین شده می‌باشد. برای تبدیل مسئله (۳۴-۴۱) به شرایط KKT به صورت معادلات (۴۲-۴۸) عمل می‌کنیم.

$$L(x,\lambda,\mu) = f(x) - \sum_{j=1}^{k} \lambda_j(0-h_j(x)) - \sum_{i=1}^{m} \mu_j(0-g_j(x)) \quad (۴۲)$$

$$\nabla f(x) - \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_{i=1}^{m} \mu_i \nabla g_i(x) = 0 \quad (۴۳)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (۴۴)$$

$$g_i(x) \ge 0 \quad (۴۵)$$

$$\mu_i(x) \ge 0 \quad (۴۶)$$

$$\mu_i \le M(1-\alpha_i)\ \ \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{عدد بزرگ} \quad (۴۷)$$

$$g_i \le M(\alpha_i)\ \ \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{عدد بزرگ} \quad (۴۸)$$

با تبدیل مسئله (۳۴-۴۱) به فرم (۴۲-۴۸) و اضافه نمودن آن به مسئله سطح بالایی می‌توان به راحتی مدل تک سطحی جدید تولید شده را با کمک Gurobi حل نمود و جواب‌های بهینه سراسری را تضمین کرد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

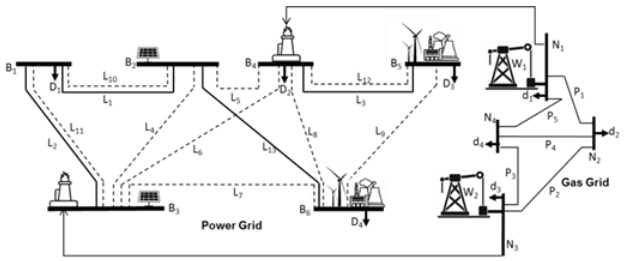
برای تأیید و نمایش عملکرد دقیق روش و مدل پیشنهادی، دو شبکه برق شامل ۶ باس و ۲۴ باس به همراه دو شبکه گاز با ۴ و ۱۰ گره برای تحلیل انتخاب شده‌اند. برنامه‌نویسی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جولیا انجام شده است. همچنین، تعداد سال‌های برنامه‌ریزی معادل ۱۰ سال در نظر گرفته شده و نرخ سود برای تحلیل برابر با ۷ درصد است.

۳-۱- اولین سیستم یکپارچه

سیستم اول شامل یک شبکه برق با ۶ شین و یک شبکه گاز با ۴ گره است که شماتیک آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این شبکه، خطوط نامزد برای نصب در شبکه برق با خطوط نقطه‌چین مشخص شده‌اند. تمامی شین‌های شبکه برق که به عنوان کاندیدای نصب باتری در نظر گرفته شده‌اند، و همچنین شین‌های اول و دوم که به عنوان کاندیدای نصب

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

نیروگاه‌های جدید انتخاب شده‌اند، مشخص شده‌اند. در این سیستم، یک نیروگاه خورشیدی در شین‌های ۲ و ۳ و یک نیروگاه بادی در شین‌های ۵ و ۶ مستقر شده است. همچنین، نیروگاه‌های گازی واقع در شین‌های ۳ و ۴ شبکه برق به گره‌های ۱ و ۳ شبکه گاز متصل هستند.



شکل (۱): اولین سیستم یکپارچه

Figure (1): The first integrated system

برای نشان دادن تأثیر مدل و روش پیشنهادی، چندین مورد مختلف برای تحلیل در نظر گرفته شده است که به شرح زیر است:

مورد اول : با در نظر گرفتن بودجه ۴۰۰ میلیون دلاری .

مورد *دوم* : با در نظر گرفتن بودجه ۲۰۰ میلیون تومانی .

مورد *سوم* : بدون در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر.

برای تحلیل نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول ۲، به بررسی جزئیات و مقایسه نتایج سه حالت مختلف پرداخته‌ایم که هر کدام شرایط متفاوتی از نظر بودجه و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را مدنظر قرار داده‌اند. این تحلیل شامل بررسی موارد زیر است:

تابع هدف، سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال، ذخیره‌سازی انرژی، واحدهای تولیدی، بودجه مصرف شده، قطع بار، زمان حل مسئله. این موارد به ما کمک می‌کنند تا تفاوت‌ها و تأثیرات هر حالت را به‌طور جامع بررسی کنیم.

در مورد اول، بودجه کل معادل ۴۰۰ میلیون دلار تعیین شده است. تابع هدف به مقدار ۳۱۰ میلیون دلار رسید که نشان‌دهنده عملکرد بهینه سیستم با توجه به هزینه‌ها و محدودیت‌های تعریف‌شده است. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط شماره ۶ و ۸ می‌شود که بر تقویت این مسیرها و بهبود عملکرد شبکه متمرکز است. سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی انرژی (ESS) به تفکیک شین‌ها به شرح زیر است: ۴۰ مگاوات ساعت در شین ۲، ۴۰ مگاوات ساعت در شین ۴، ۵۰ مگاوات ساعت در شین ۳ و ۴۰ مگاوات ساعت در شین ۶. این توزیع نشان‌دهنده تلاش برای ایجاد توازن در ذخیره‌سازی انرژی در شبکه است تا عملکرد بهینه حاصل شود. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۵۰۰ مگاوات در شین ۱ می‌شود. بودجه مصرف‌شده در این حالت ۲۴۰ میلیون دلار بوده و هیچ‌گونه قطع بار گزارش نشده است که به معنای پایداری و قابلیت اطمینان بالای سیستم است. زمان حل مسئله نیز ۵۰ ثانیه بوده که معقول به نظر می‌رسد. در مورد دوم، بودجه کل ۲۰۰ میلیون تومان تعیین شده است که به دلیل تفاوت ارزی با مورد اول، تأثیر قابل توجهی بر تابع هدف و سایر شاخص‌ها داشته است. تابع هدف در این مورد به ۳۶۷ میلیون دلار رسیده است که نسبت به مورد اول بالاتر است و این افزایش ممکن است به دلیل محدودیت‌های بودجه‌ای و نیاز به بهره‌وری کمتر باشد. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط ۶ و ۱۴ است و سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی انرژی (ESS^{5}) به میزان ۵۰ مگاوات ساعت در شین ۵ صورت گرفته که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر یک نقطه خاص برای ذخیره‌سازی انرژی است. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۵۵۰ مگاوات در شین ۳ می‌باشد. بودجه مصرف‌شده در این مورد ۱۹۰ میلیون دلار بوده و هیچ‌گونه قطع بار گزارش نشده است. زمان حل مسئله ۵۲ ثانیه بوده که کمی بیشتر از مورد اول است، اما همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد. در مورد سوم، سیستم بدون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شبیه‌سازی شده است. تابع هدف به ۴۱۹ میلیون دلار رسیده که بالاترین مقدار در بین سه مورد است و نشان‌دهنده هزینه‌های بالاتر ناشی از عدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط ۶، ۷، ۸ و ۱۴ می‌شود که نیاز به تقویت گسترده‌تر شبکه برای جبران عدم استفاده از انرژی‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. سرمایه‌گذاری در ESS به میزان ۵۰ مگاوات ساعت در شین ۲ صورت گرفته که تمرکز بر یک نقطه خاص را نسبت به مورد اول نشان می‌دهد و استراتژی متفاوتی در مدیریت انرژی را بیان می‌کند. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۶۰۰ مگاوات در شین ۱ است. بودجه مصرف‌شده در این مورد ۳۹۰ میلیون دلار بوده و هیچ‌گونه قطع بار گزارش نشده است. زمان حل مسئله نیز ۵۵ ثانیه بوده که بیشترین زمان بین سه مورد است، اما همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد. مقایسه این سه مورد نشان می‌دهد که استفاده از بودجه بیشتر و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌ها کمک کند. مورد اول با بودجه بالاتر و توزیع متوازن سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال و ESS، به عملکرد بهتری دست یافته است. مورد دوم با بودجه کمتر و تابع هدف بالاتر، محدودیت‌های بیشتری را نشان می‌دهد. مورد سوم نیز با حذف منابع تجدیدپذیر، منجر به هزینه‌های بالاتری شده است. بنابراین، استفاده بهینه از منابع و مدیریت مناسب بودجه می‌تواند تأثیر بسزایی در عملکرد سیستم یکپارچه داشته باشد.

Table (2): Simulation results in the first integrated system

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی در اولین سیستم یکپارچه

	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳
تابع هدف (میلیون دلار)	۳۱۰	۳۶۷	۴۱۹
سرمایه گذاری خط	۸ ،۶	۱۴ ،۶	۱۴ ،۸ ،۷ ،۶
سرمایه گذاری ESS در مگاوات ساعت (شین)	(۲) ۴۰	(۵) ۵۰	(۲) ۵۰ (۴) ۴۰ (۳) ۵۰ (۶) ۴۰
سرمایه گذاری واحد تولید در مگاوات (شین)	(۱) ۵۰۰	(۳) ۵۵۰	(۱) ۶۰۰
بودجه در حال استفاده (میلیون دلار)	۲۴۰	۱۹۰	۳۹۰
قطع بار (مگاوات)	۰	۰	۰
زمان حل (ثانیه)	۵۰	۵۲	۵۵

۲-۳- دومین سیستم یکپارچه

دومین سیستم یکپارچه در نظر گرفته شده شامل شبکه برق ۲۴ شین و شبکه گاز ۱۰ گره است. موارد اولین سیستم یکپارچه نیز برای تحلیل این سیستم در نظر گرفته شده است. سه واحد گازسوز نصب شده در شین های ۳، ۱۰ و ۲۴ شبکه برق به ترتیب به گره های ۲، ۴ و ۸ شبکه گاز متصل می شوند. منابع PV در شین های ۲، ۳، ۸، ۹، ۱۴، ۱۵، ۲۰ و ۲۱ و نیروگاه های بادی به ترتیب در شین های ۵، ۶، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۸، ۲۳ و ۲۴ نصب شده اند. شین های ۱، ۶، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۸، ۱۹ و ۲۴ کاندیدای نصب سرمایه گذاری باتری هستند. شین های ۴، ۵، ۸، ۹، ۲۰ و ۲۱ از شین های کاندید نصب نیروگاه محسوب می شوند. برای نشان دادن تأثیر مدل و الگوریتم پیشنهادی، چندین مورد مختلف برای تحلیل در نظر گرفته شده است که به شرح زیر است:

مورد اول : با در نظر گرفتن بودجه ۸۰۰ میلیون دلاری .

مورد دوم : با در نظر گرفتن بودجه ۴۰۰ میلیون دلاری .

مورد سوم : بدون در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر.

برای تحلیل نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول ۳، به بررسی جزئیات و مقایسه نتایج برای سه مورد مختلف پرداخته‌ایم که هر کدام شرایط مختلفی از لحاظ بودجه و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظر گرفته‌اند. این تحلیل شامل بررسی تابع هدف، سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال، ذخیره‌سازی انرژی(ESS) ، واحدهای تولیدی، بودجه مصرف شده، قطع بار و زمان حل مسئله می‌باشد.

در مورد اول، بودجه کل ۸۰۰ میلیون دلار در نظر گرفته شده است. تابع هدف به میزان ۱۱۱۳ میلیون دلار رسیده که نشان‌دهنده عملکرد بهینه سیستم با توجه به هزینه‌ها و محدودیت‌های تعریف شده است. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط شماره ۴۰، ۴۲، ۴۳ و ۵۴ می‌شود که نشان‌دهنده تمرکز بر تقویت این مسیرها برای بهبود عملکرد شبکه است. سرمایه‌گذاری در ESS به تفکیک شین‌ها (ایستگاه‌های توزیع) به این صورت است: ۱۰۰ مگاوات ساعت در شین ۱۵. این مقدار

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

بالاتر از سایر موارد است که نشان‌دهنده تلاش برای ذخیره‌سازی انرژی بیشتر و بهبود پایداری شبکه است. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۱۵۰ مگاوات در شین ۵، ۲۰۰ مگاوات در شین ۷، ۳۰۰ مگاوات در شین ۸ و ۵۰۰ مگاوات در شین ۹ است. بودجه مصرف شده در این مورد ۶۰۰ میلیون دلار بوده و هیچگونه قطع بار گزارش نشده است که نشان‌دهنده پایداری و قابلیت اطمینان بالای سیستم است. زمان حل مسئله نیز ۵۹۸ ثانیه بوده که نسبت به سایر موارد کوتاه‌تر است و نشان‌دهنده کارایی بالاتر الگوریتم در این شرایط می‌باشد.

در مورد دوم، بودجه کل ۴۰۰ میلیون دلار در نظر گرفته شده است. تابع هدف در این مورد به ۱۱۲۹ میلیون دلار رسیده که کمی بالاتر از مورد اول است و ممکن است ناشی از محدودیت‌های بودجه‌ای و نیاز به بهره‌وری کمتر باشد. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط ۴۷، ۴۹، ۵۶ و ۵۴ می‌شود که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر تقویت مسیرهای مشخصی در شبکه است. سرمایه‌گذاری در ESS به شرح زیر است: ۵۰ مگاوات ساعت در شین ۶، که نسبت به مورد اول کمتر است و نشان‌دهنده محدودیت‌های بودجه‌ای در ذخیره‌سازی انرژی است. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۲۰۰ مگاوات در شین ۵، ۲۰۰ مگاوات در شین ۷، ۳۰۰ مگاوات در شین ۸ و ۵۰۰ مگاوات در شین ۹ می‌باشد. بودجه مصرف شده در این مورد ۳۵۰ میلیون دلار بوده و هیچگونه قطع بار گزارش نشده است. زمان حل مسئله ۶۱۵ ثانیه بوده که کمی بیشتر از مورد اول است، اما همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد.

در مورد سوم، سیستم بدون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شبیه‌سازی شده است. تابع هدف به ۱۲۵۱ میلیون دلار رسیده که بالاترین مقدار در بین سه مورد است و نشان‌دهنده هزینه‌های بالاتر ناشی از عدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال شامل خطوط ۴۰، ۴۲، ۴۳ و ۵۴ می‌شود که مشابه مورد اول است و نشان‌دهنده نیاز به تقویت گسترده‌تر شبکه برای جبران عدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. سرمایه‌گذاری در ESS به شرح زیر است: ۱۵۰ مگاوات ساعت در شین ۹ که بالاترین مقدار در بین سه مورد است و نشان‌دهنده تلاش بیشتر برای ذخیره‌سازی انرژی جهت بهبود پایداری سیستم است. همچنین، سرمایه‌گذاری در واحدهای تولیدی شامل ۲۵۰ مگاوات در شین ۵، ۲۰۰ مگاوات در شین ۷، ۳۰۰ مگاوات در شین ۸، ۵۰۰ مگاوات در شین ۹ و ۲۰۰ مگاوات در شین ۱۹ می‌باشد که نشان‌دهنده تنوع بیشتر در توزیع ظرفیت تولید است. بودجه مصرف شده در این مورد ۸۰۰ میلیون دلار بوده و هیچگونه قطع بار گزارش نشده است. زمان حل مسئله ۶۰۷ ثانیه بوده که بین سه مورد متوسط است و نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم در این شرایط می‌باشد.

مقایسه این سه مورد نشان می‌دهد که استفاده از بودجه بیشتر و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌ها کمک کند. مورد اول با بودجه بالاتر و توزیع متوازن سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال و ESS، به عملکرد بهتری دست یافته است. مورد دوم با بودجه کمتر، تابع هدف بالاتری داشته و محدودیت‌های بیشتری را نشان می‌دهد. مورد سوم نیز با حذف منابع تجدیدپذیر، به هزینه‌های بالاتری منجر شده است. بنابراین، استفاده بهینه از منابع و مدیریت مناسب بودجه می‌تواند تاثیر بسزایی در عملکرد سیستم یکپارچه داشته باشد.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی در اولین سیستم دوم

Table (3): Simulation results in the first and second systems

	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳
تابع هدف (میلیون دلار)	۱۱۱۳	۱۱۲۹	۱۲۵۱
سرمایه گذاری خط	,۴۰،۴۲،۴۳ ۵۴	,۴۷،۴۹،۵۶ ۵۴	,۴۰،۴۲،۴۳ ۵۴
سرمایه گذاری ESS در مگاوات ساعت (شین)	۱۰۰ (۱۵)	۵۰ (۶)	۱۵۰ (۹)
سرمایه گذاری واحد تولید در مگاوات (شین)	۱۵۰ (۵) ۲۰۰ (۷) ۳۰۰ (۸) ۵۰۰ (۹)	۲۰۰ (۵) ۲۰۰ (۷) ۳۰۰ (۸) ۵۰۰ (۹)	۲۵۰ (۵) ۲۰۰ (۷) ۳۰۰ (۸) ۵۰۰ (۹) ۲۰۰ (۱۹)
بودجه در حال استفاده (میلیون دلار)	۶۰۰	۳۵۰	۸۰۰

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

قطع بار (مگاوات)	۰	۰	۰
زمان حل (ثانیه)	۵۹۸	۶۱۵	۶۰۷

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل جدیدی از برنامه‌ریزی توسعه تصادفی دو سطحی معرفی شده است که به‌طور مؤثر چالش‌های مرتبط با تولید، انتقال و ذخیره‌سازی باتری را در کنار بررسی شبکه گاز طبیعی مورد توجه قرار می‌دهد. این مدل با ترکیب تأثیرات باد شدید و نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی، به درک بهتری از اهمیت و عدم قطعیت‌های فزاینده در این حوزه می‌پردازد. با استفاده از یک الگوریتم فرااابتکاری، مسئله بهینه‌سازی به‌طور مؤثری حل شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها، اثربخشی مدل را در دو شبکه آزمایشی مختلف نشان داده است. یافته‌های این مطالعه بیانگر این است که مدل پیشنهادی توانایی ثبت تعاملات پیچیده بین شبکه‌های برق، گاز و انرژی‌های تجدیدپذیر را داراست. نتایج قوی و شواهد تجربی ارائه شده، اثبات می‌کند که این مدل در بهبود برنامه‌ریزی توسعه و ارائه بینش‌های ارزشمند برای سیاست‌گذاران، اپراتورها و ذینفعان در زمینه ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر مؤثر است. مدل و روش نوآورانه ارائه شده، پایه‌ای قوی برای تحقیقات آینده فراهم می‌آورد و راه‌حل‌های عملی برای توسعه پایدار و یکپارچه سیستم‌های انرژی ارائه می‌دهد. تحلیل‌های مختلف انجام شده در شرایط مختلف، نشان‌دهنده کارایی مدل در شرایط گوناگون و اهمیت استفاده بهینه از بودجه و منابع تجدیدپذیر در بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی است. به‌طور خاص، نتایج حاکی از آن است که استفاده از بودجه بیشتر و منابع تجدیدپذیر می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌ها کمک کند. بنابراین، این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه پایدار و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های انرژی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به پیچیدگی‌های فزاینده چشم‌انداز انرژی و نیاز به راه‌حل‌های جامع، مدل ارائه شده در این مقاله می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای قوی برای توسعه استراتژی‌های جامع و دقیق در نظر گرفته شود که به بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های انرژی کمک شایانی خواهد کرد.

References

مراجع

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

[2] A. H.M. Aldaraiee, S. H. Hosseinian, B. Vahidi, S. Dehghan, (2020) "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.

[3] M. Moradi-Sepahvand, T. Amraee and S. S. Gougheri, (2022) "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, doi: 10.1109/TII.2021.3074397.

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

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

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

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

[8] F. Yao, T. K. Chau, X. Zhang, H. H. -C. Iu and T. Fernando, (2020) "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, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014341.

[9] Saheed Lekan Gbadamosi, Nnamdi I. Nwulu, (2020) "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.

[10] M. Kazemi, M. R. Ansari, (2022) "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.

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

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[12] Y. Zhang, Y. Hu, J. Ma and Z. Bie, (2018) "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, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2832192.

[13] M. Moradi-Sepahvand, T. Amraee, (2021) "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.

[14] H. Bakhshi Yamchi, A. Safari, J. M. Guerrero, (2021) "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.

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

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

[17] C. Shao, M. Shahidehpour, X. Wang, X. Wang and B. Wang, (2017) "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, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2672728.

[18] F. Barati, H. Seifi, M. S. Sepasian, A. Nateghi, M. Shafie-khah and J. P. S. Catalão, (2015) "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, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2365705.

[19] Ashraf, M.M., Malik, T.N. (2020) "A Novel Optimization Framework for the Least Cost Generation Expansion Planning in the Presence of Renewable Energy Sources considering Regional Connectivity". Arab J Sci Eng 45, 6423–6451. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04489-4.

[20] Abbas, T., Ashraf, M.M. & Malik, T.N. (2022) "Least Cost Generation Expansion Planning considering Renewable Energy Resources Using Sine Cosine Algorithm". Arab J Sci Eng. https://doi.org/10.1007/s13369-022-07303-5.

[21] Khandelwal, A., Bhargava, A., Sharma, A. et al. (2018) "Modified Grey Wolf Optimization Algorithm for Transmission Network Expansion Planning Problem." Arab J Sci Eng 43, 2899–2908. https://doi.org/10.1007/s13369-017-2967-3.

[22] Alismail, F.S. (2021) "Chance Constraints Optimal Planning Strategy of Energy Storage Systems and Tie-Lines under Wind Power Uncertainties to Improve the Reliability." Arab J Sci Eng 46, 9935–9944. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05549-z.

[23] H. Karimianfard, H. Haghighat and B. Zeng, (2022) "Co-Optimization of Battery Storage Investment and Grid Expansion in Integrated Energy Systems," IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 4, pp. 5928-5938, doi: 10.1109/JSYST.2021.3130057.

[24] Moraes, C.A., de Oliveira, L.W., de Oliveira, E.J. et al. (2022) "A probabilistic approach to assess the impact of wind power generation in transmission network expansion planning." Electr Eng 104, 1029–1040. https://doi.org/10.1007/s00202-021-01361-y.

[25] Rashedi, B., Askarzadeh, A. (2022) "A multi-objective approach for solving transmission expansion planning problem considering wind power uncertainty." Evol. Intel. 15, 497–511. https://doi.org/10.1007/s12065-020-00525-2

[26] Melo, R., Torres, C., Borba, B. et al. (2022) "Multi- year two-stage generation and transmission expansion planning: intermittent renewable energy sources integration for Brazilian interconnected power system." Electr Eng 104, 2689–2701. https://doi.org/10.1007/s00202-021-01456-6

[27] Khandelwal, A., Bhargava, A. & Sharma, A. (2021) "Voltage stability constrained transmission network expansion planning using fast convergent grey wolf optimization algorithm." Evol. Intel. 14, 1261–1270. https://doi.org/10.1007/s12065-019-00200-1

[28] Ghadimi, A.A., Amani, M., Bayat, M. et al. (2022) "Stochastic transmission expansion planning in the presence of wind farms considering reliability and N-1 contingency using grey wolf optimization technique." Electr Eng 104, 727–740. https://doi.org/10.1007/s00202-021-01339-w

[29] H. Karimianfard, M. R. Salehizadeh and P. Siano, (2022) "Economic Profit Enhancement of a Demand Response Aggregator Through Investment of Large-scale Energy Storage Systems," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 8, no. 5, pp. 1468-1476, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02650.

[30] A. Ahmadi, J.Nikookar, "Unit Commitment Considering Emergency Demand Response Programming (EDRP) and Interruptible/Curtailable Loads (I/CL) for Reducing Customer Payments", Journal of Novel Reseraches on Smart Power Systems, vol.3, no.1, pp. 48-58, (2014) (in Persian).

[31] H. Jokar, B.Bahmani-Firouzi, M.Simab, "Unit Commitment in Smart Grids Considering Demand Side Management and Energy Storage Systems", Journal of Novel Reseraches on Smart Power Systems, vol.10, no.3, pp. 11-18, (2014) (in Persian).

زیرنویس‌ها:

[1] Battrey Expansion Planning

[2] Transmission Expansion Planning

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[3] Generation Expansion Planning
[4] Karush-Kuhn-Tucker
[5] Energy storage system

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]