Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 4 – Winter 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Direct Ranking of Candidate Buses for Distributed Generation Placement Using a Composite Index Based on AC Optimal Power Flow

Asma Barani[1], *Ph.D. Student*, Javad Olamaei[* 2], *Professor*, Ali Akhavein[3], *Associate Professor*, Seyed Mahmoud Modaresi[4], *Assistant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, asma.barani@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, javad.olamaei@iau.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, a_akhavein@iau.ac.ir
[4] Department of Electrical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, modaresi@iau.ac.ir

Abstract:
Distributed generation (DG) placement in distribution networks is commonly formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem, whose direct solution is computationally burdensome. This paper presents an alternating-current optimal power flow (AC OPF)-based framework for the direct ranking of candidate buses, such that the suitability of each bus is evaluated using techno-economic indicators, thereby reducing the need to solve the placement model directly. Within this framework, three indicators, namely the loss sensitivity factor (LSF), voltage deviation index (VDI), and locational marginal price (LMP), are derived from three AC OPF formulations with an identical network model and operating constraints but different objective functions. These indicators are then normalized using min–max normalization and integrated into a unified composite index (CI) through the inverse accumulated weighting (IAW) method. The resulting CI enables the direct ranking of buses and goes beyond serving merely as a preliminary screening tool. The proposed framework is evaluated on the IEEE 69-bus test system and benchmarked against a reference MINLP model. The results show that the top 14 buses identified by the CI, corresponding to the top 20% of candidate buses, include all 10 buses selected by the reference model, yielding a 100% overlap rate. In addition, a sensitivity analysis of weight confirms the stability of the proposed ranking under reasonable variations in the indicator weights. Therefore, the proposed framework can serve as an effective decision-support tool for the direct ranking of candidate buses in DG placement studies.

Keywords: Mixed-integer nonlinear programming, AC optimal power flow, Distributed generation placement, Bus ranking, Composite index.

Received: 12 Dec. 2025
Revised: 10 Feb. 2026
Accepted:18 Feb. 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Javad Olamaei

Citation: A. Barani, J. Olamaei, A. Akhavein, S.M. Modaresi, "Direct Ranking of Candidate Buses for Distributed Generation Placement Using a Composite Index Based on AC Optimal Power Flow", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 87-107, March 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]

مقاله پژوهشی

رتبه‌بندی مستقیم شین‌های نامزد برای جایابی تولید پراکنده با استفاده از شاخص ترکیبی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب

اسما بارانی [۱]، دانشجوی دکتری، جواد علمایی [۲]، استاد، علی اخوین [۳]، دانشیار، سید محمود مدرسی [۴]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، asma.barani@iau.ac.ir
۲- گروه مهندسی برق، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، javad.olamaei@iau.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a_akhavein@iau.ac.ir
۴- گروه مهندسی برق، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، modaresi@iau.ac.ir

چکیده: جایابی تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع معمولاً به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته فرمول‌بندی می‌شود که حل آن با بار محاسباتی قابل‌توجهی همراه است. در این مقاله، چارچوبی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب برای رتبه‌بندی مستقیم شین‌های نامزد ارائه می‌شود؛ مطلوبیت هر شین بر پایه شاخص‌های فنی - اقتصادی ارزیابی شده و نیاز به حل مدل جایابی کاهش می‌یابد. در این چارچوب، سه شاخص شامل ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی، از سه صورت‌بندی پخش بار بهینه جریان متناوب با مدل شبکه و قیود بهره‌برداری یکسان اما با توابع هدف متفاوت استخراج می‌شوند. سپس این شاخص‌ها با استفاده از نرمال‌سازی کمینه - بیشینه نرمال‌سازی شده و از طریق روش وزن‌دهی معکوس تجمعی در یک شاخص ترکیبی یکپارچه ادغام می‌شوند. شاخص ترکیبی حاصل، امکان رتبه‌بندی مستقیم شین‌ها را فراهم می‌سازد و فراتر از یک ابزار غربالگری اولیه عمل می‌کند. چارچوب پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۶۹ شینه **IEEE**، ارزیابی و با یک مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۱۴ شین برتر شناسایی‌شده توسط شاخص ترکیبی که متناظر با ۲۰ درصد برتر شین‌های نامزد هستند، تمامی ۱۰ شین انتخاب‌شده توسط مدل مرجع را در بر می‌گیرند و نرخ هم‌پوشانی ۱۰۰ درصدی حاصل می‌شود. افزون بر این، تحلیل حساسیت وزن‌ها پایداری رتبه‌بندی پیشنهادی را در برابر تغییرات معقول در وزن شاخص‌ها تأیید می‌کند؛ بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پشتیبانی تصمیم‌گیری در رتبه‌بندی مستقیم شین‌های نامزد در مطالعات جایابی تولید پراکنده به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، پخش بار بهینه جریان متناوب، جایابی تولید پراکنده، رتبه‌بندی شین‌ها، شاخص ترکیبی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر جواد علمایی
نشانی نویسنده مسئول: تهران، خیابان پیروزی - بلوار نبرد جنوبی - خیابان ده حقی (آهنگ) - نبش بلوار کوثر، مجتمع فنی و مهندسی واحد تهران‌جنوب، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع شعاعی [۱] به دلیل ویژگی‌های بهره‌برداری و نسبت پایین راکتانس به مقاومت [۲] (X/R)، در برابر انحراف ولتاژ و تلفات توان آسیب‌پذیری بیشتری دارند. در این شرایط، تولید پراکنده [۳] به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد فنی، افزایش انعطاف‌پذیری بهره‌برداری، و پشتیبانی از برنامه‌ریزی نوین شبکه‌های توزیع مطرح شده است [۱،۲]. ازآنجاکه میزان بهره‌مندی از مزایای تولید پراکنده به‌شدت به محل نصب آن وابسته است، شناسایی شین‌های مناسب به یکی از مسائل اصلی در مطالعات شبکه‌های توزیع تبدیل شده است. استقرار نامناسب واحدهای تولید پراکنده می‌تواند منافع موردانتظار در کاهش تلفات، پشتیبانی ولتاژ، و عملکرد اقتصادی را تضعیف کند، در حالی که انتخاب صحیح محل نصب می‌تواند عملکرد کلی شبکه را به طور معنی‌داری بهبود دهد [۲،۳].

مرور ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات جایابی تولید پراکنده عمدتاً بر مدل‌های بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری [۴]، و روش‌های ترکیبی [۵] استوار هستند. در پژوهش‌های جدید نیز همچنان از چارچوب‌های چندهدفه و روش‌های ترکیبی برای حل هم‌زمان مسئله جایابی و تعیین ظرفیت تحت قیود فنی و بهره‌برداری استفاده می‌شود [۳،۴]. در کنار این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر شاخص نیز برای ساده‌سازی فرایند جستجو به کار رفته‌اند؛ به‌گونه‌ای که شین‌های مناسب با استفاده از شاخص‌های فنی مانند شاخص‌های پایداری ولتاژ یا حساسیت شناسایی می‌شوند [۵،۶]. همچنین برخی مطالعات با واردکردن شاخص‌های اقتصادی نظیر قیمت نهایی مکانی [۶] در سطح توزیع، تلاش کرده‌اند ارزش وابسته به مکانِ نصب تولید پراکنده را در ارزیابی لحاظ کنند [۷, ۸].

باوجود این پیشرفت‌ها، یک محدودیت مهم همچنان باقی است. در برخی از مطالعات موجود، شاخص‌های فنی و متغیرهای استخراج‌شده از پخش بار بهینه جریان متناوب [۷] عمدتاً درون چارچوب‌های بهینه‌سازی تکراری یا به‌عنوان ابزار غربال‌گری اولیه پیش از اجرای الگوریتم جستجو استفاده می‌شوند [۹،۱۰]. در نتیجه، فرایند تصمیم‌گیری نهایی اغلب از نظر محاسباتی سنگین، نسبت به تنظیم پارامترها حساس، و از منظر تحلیلی کمتر شفاف باقی می‌ماند؛ به‌ویژه زمانی که لازم باشد چندین سناریو یا سطوح مختلف نفوذ تولید پراکنده بررسی شوند [۱۱،۱۲]. افزون بر این، اگرچه روش‌های جدیدتر همچنان در پی بهبود عملکرد بهینه‌سازی هستند، اما اغلب آن‌ها هنوز به جستجوی تکراری متکی‌اند و کمتر به سمت ارائه یک رتبه‌بندی مستقیم از شین‌های نامزد [۸] حرکت کرده‌اند [۱۲،۱۳].

براین‌اساس، همچنان نیاز به یک چارچوب ساده، شفاف و از نظر محاسباتی کارآمد وجود دارد که بتواند اطلاعات فنی و اقتصادی حاصل از پخش بار بهینه جریان متناوب را برای رتبه‌بندی مستقیم شین‌های نامزد به کار گیرد. باانگیزه پاسخ به این خلأ، این مقاله یک روش رتبه‌بندی مستقیم برای جایابی تولید پراکنده ارائه می‌دهد که بر یک شاخص ترکیبی [۹] مبتنی بر نتایج پخش بار بهینه جریان متناوب استوار است. در روش پیشنهادی، سه شاخص فنی - اقتصادی شامل ضریب حساسیت تلفات [۱۰]، شاخص انحراف ولتاژ [۱۱] و قیمت نهایی مکانی، از سه صورت‌بندی پخش بار بهینه جریان متناوب با مدل شبکه و قیود بهره‌برداری یکسان اما با توابع هدف متفاوت استخراج می‌شوند. سپس این شاخص‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی [۱۲] در یک شاخص ترکیبی ادغام می‌شوند تا شین‌های نامزد بدون اتکا به جستجوهای فراابتکاری تکراری رتبه‌بندی شوند.

نوآوری‌های اصلی این مقاله را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- ارائه یک چارچوب رتبه‌بندی مستقیم برای شین‌های نامزد جایابی تولید پراکنده بدون نیاز به الگوریتم‌های فراابتکاری تکراری؛

۲- استخراج شاخص‌های فنی و اقتصادی از صورت‌بندی‌های پخش بار بهینه جریان متناوب با مدل شبکه و قیود بهره‌برداری یکسان؛

۳- ادغام ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی در قالب یک شاخص ترکیبی قابل‌تفسیر؛

۴- رتبه‌بندی جامع شین‌های نامزد به‌جای محدودشدن به غربالگری اولیه یا انتخاب چند شین بحرانی؛

۵- اعتبارسنجی [۱۳] رتبه‌بندی پیشنهادی از طریق مقایسه با یک مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته [۱۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

به‌این‌ترتیب، روش ارائه‌شده یک چارچوب تصمیم یار قابل‌تفسیر و از نظر محاسباتی کارآمد برای رتبه‌بندی شین‌های نامزد در مطالعات جایابی تولید پراکنده فراهم می‌کند.

ادامه مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲، چارچوب پیشنهادی مقاله شامل استخراج شاخص‌ها از پخش بار بهینه جریان متناوب، تشکیل شاخص ترکیبی، و مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای اعتبارسنجی تشریح می‌شود. بخش ۳ به معرفی سیستم آزمون [۱۵]، داده‌ها، مفروضات و تنظیمات شبیه‌سازی اختصاص دارد. در بخش ۴، ابتدا نتایج رتبه‌بندی شین‌های نامزد ارائه می‌شود؛ سپس تحلیل حساسیت [۱۶] وزن شاخص‌ها به‌منظور بررسی پایداری رتبه‌بندی انجام می‌گیرد، و در ادامه نتایج با مدل مرجع مقایسه و از منظر اقتصادی و فنی نیز ارزیابی می‌شود. در نهایت، بخش ۵ به نتیجه‌گیری پیشنهادها برای کارهای آینده مقاله اختصاص دارد.

۲- چارچوب پیشنهادی و مدل مرجع

۲-۱- نمای کلی چارچوب پیشنهادی

در این مقاله، یک چارچوب رتبه‌بندی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب ارائه می‌شود که هدف آن شناسایی شین‌های اولویت‌دار برای جایابی تولید پراکنده بدون نیاز به حل مستقیم مدل‌های پیچیده بهینه‌سازی آمیخته است. ایده اصلی روش پیشنهادی بر این مبنا استوار است که مطلوبیت هر شین برای نصب تولید پراکنده را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های فنی - اقتصادی استخراج‌شده از پخش بار بهینه جریان متناوب ارزیابی و سپس در قالب یک شاخص ترکیبی تجمیع کرد. بدین ترتیب، به‌جای حل مستقیم مسئله جایابی در یک فضای تصمیم‌گیری گسسته - پیوسته، ابتدا شین‌های نامزد بر اساس اطلاعات بهره‌برداری شبکه رتبه‌بندی شده و سپس شین‌های با اولویت بالاتر به‌عنوان گزینه‌های مناسب معرفی می‌شوند.

چارچوب پیشنهادی شامل چند گام اصلی است. در گام نخست، شاخص‌های فنی - اقتصادی با حل مسائل پخش بار بهینه جریان متناوب و با درنظرگرفتن قیود بهره‌برداری شبکه استخراج می‌شوند. سپس مقادیر شاخص‌ها برای شین‌های نامزد نرمال‌سازی شده و وزن هر شاخص با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی تعیین می‌شود. در ادامه، شاخص ترکیبی بر مبنای مقادیر نرمال‌شده و وزن‌های متناظر محاسبه شده و شین‌های نامزد بر اساس آن رتبه‌بندی می‌شوند. به‌منظور بررسی اثر تغییرات وزن شاخص‌ها بر خروجی نهایی، تحلیل حساسیت نیز انجام می‌گیرد. در نهایت، برای تشکیل مجموعه شین‌های اولویت‌دار و انجام مقایسه با مدل مرجع، ۲۰ درصد نخست شین‌های دارای بیشترین امتیاز انتخاب می‌شوند.

به‌منظور اعتبارسنجی رتبه‌بندی حاصل از چارچوب پیشنهادی، یک مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته نیز تدوین می‌شود. این مدل مرجع، مسئله جایابی و ظرفیت تولید پراکنده را تحت قیود بهره‌برداری، ظرفیت و سطح نفوذ حل می‌کند. سپس شین‌های منتخب این مدل با شین‌های دارای اولویت بالا در چارچوب پیشنهادی مقایسه می‌شوند تا میزان انطباق میان دو روش مشخص گردد.

به‌منظور شفاف‌سازی توالی اجرایی چارچوب پیشنهادی، مراحل اصلی اجرای آن به‌صورت زیر خلاصه می‌شود. ساختار کلی این روند نیز در شکل (۱) ارائه شده است:

۱- دریافت داده‌های شبکه شامل توپولوژی، پارامترهای خطوط، بارها و حدود بهره‌برداری؛

۲- تعیین مجموعه اولیه شین‌های قابل‌بررسی برای نصب تولید پراکنده؛

۳- حل سه مسئله پخش بار بهینه جریان متناوب با توابع هدف متناظر با کمینه‌سازی تلفات اکتیو کل، کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل، و کمینه‌سازی هزینه سوخت ژنراتور متعارف (شین مرجع)؛

۴- استخراج شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی برای شین‌های نامزد؛

۵- نرمال‌سازی مقادیر شاخص‌ها با استفاده از روش کمینه - بیشینه؛

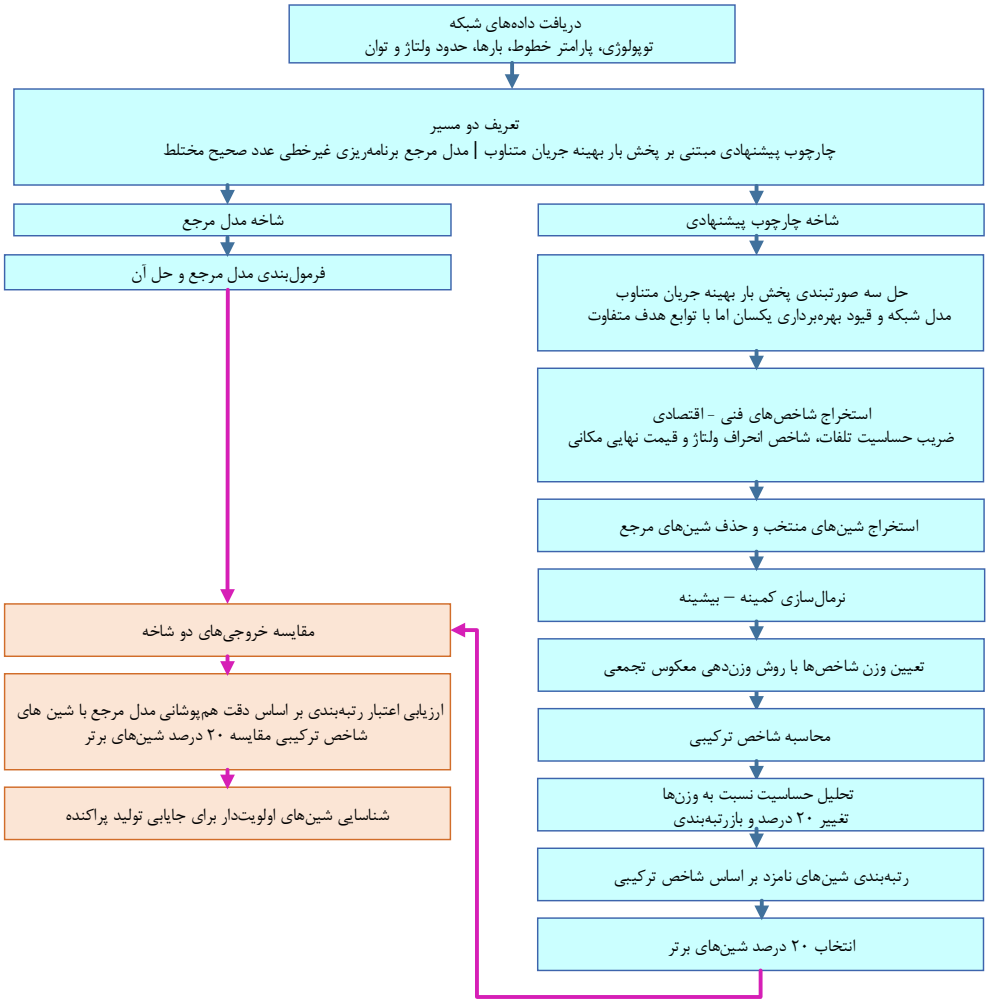
۶- تعیین وزن شاخص‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی؛

۷- تشکیل شاخص ترکیبی و محاسبه مقدار شاخص ترکیبی برای هر شین؛

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۸- انجام تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات وزن شاخص‌ها؛
۹- رتبه‌بندی شین‌ها بر اساس مقدار شاخص ترکیبی؛
۱۰- انتخاب ۲۰ درصد نخست شین‌های دارای بیشترین اولویت؛
۱۱- حل مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای تعیین شین‌های منتخب؛
۱۲- مقایسه خروجی دو روش با استفاده از معیار دقت هم‌پوشانی.
در ادامه، جزئیات ریاضی مربوط به استخراج شاخص‌ها، ساخت شاخص ترکیبی، و مدل مرجع اعتبارسنجی به ترتیب در بخش‌های بعد ارائه می‌شود.



شکل (۱): ساختار دوشاخه‌ای چارچوب پیشنهادی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب و مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای رتبه‌بندی مستقیم و اعتبارسنجی شین‌های نامزد در جایابی تولید پراکنده

Figure (1): Bifurcated structure of the proposed AC optimal power flow-based framework and the reference mixed-integer nonlinear programming model for direct ranking and validation of candidate buses in distributed generation placement

۲-۲- استخراج شاخص‌های فنی - اقتصادی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب

برای استخراج شاخص‌های فنی - اقتصادی، سه مسئله پخش بار بهینه جریان متناوب با استفاده از مدل یکسان شبکه و قیود بهره‌برداری مشابه، اما با توابع هدف متفاوت، حل می‌شوند. قیود مشترک این مسائل شامل معادلات موازنه توان اکتیو و راکتیو، حدود اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها، حدود توان اکتیو و راکتیو ژنراتورهای متعارف، و حدود ظرفیت حرارتی خطوط با روابط ۲۲- ۲۷ است. این قیود با قیود پیوسته شبکه‌ای به‌کاررفته در مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته یکسان‌اند،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

درحالی‌که متغیرهای صحیح مربوط به جایابی تولید پراکنده و نیز قیود مرتبط با تعیین ظرفیت و سطح نفوذ تولید پراکنده در مسائل پخش بار بهینه جریان متناوب مربوط به استخراج شاخص‌ها لحاظ نمی‌شوند؛ بنابراین، این سه صورت‌بندی تنها در تابع هدف با یکدیگر تفاوت دارند؛ به‌گونه‌ای که به ترتیب برای کمینه‌سازی تلفات اکتیو کل، کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل، و کمینه‌سازی هزینه سوخت تعریف شده‌اند.

لازم به ذکر است که در هر یک از سه صورت‌بندی پخش بار بهینه جریان متناوب، شاخص‌های مبتنی بر متغیر دوگان از ضرایب دوگان متناظر با قیود موازنه توان اکتیو در نقطه بهینه استخراج می‌شوند. به طور مشخص، در صورت‌بندی کمینه‌سازی تلفات، ضریب دوگان قید موازنه توان اکتیو در شین i به‌عنوان مبنای استخراج ضریب حساسیت تلفات در همان شین در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی‌که در صورت‌بندی کمینه‌سازی هزینه سوخت، ضریب دوگان همان قید به‌عنوان قیمت نهایی مکانی تفسیر می‌شود؛ بنابراین، تفاوت این دو شاخص نه در نوع قید، بلکه در تابع هدف پخش بار بهینه جریان متناوب متناظر و در نتیجه در تفسیر فنی یا اقتصادی ضریب دوگان حاصل است.

الف) ضریب حساسیت تلفات: با کمینه‌سازی تلفات توان اکتیو کل (F_{TAPL}) [۱۴]:

$$\min F_{TAPL} = \sum_{(i,j)\in\Omega_{Line}} g_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (۱)$$

که در آن، V_i و V_j به ترتیب اندازه ولتاژ در شین‌های i و j را نشان می‌دهند؛ δ_i و δ_j بیانگر زوایای متناظر ولتاژ هستند؛ g_{ij} رسانایی خط (i,j) است؛ و Ω_{Line} مجموعه خطوط شبکه را نشان می‌دهد. ضریب حساسیت تلفات از ضریب لاگرانژ قید موازنه توان اکتیو در شین i استخراج می‌شود. مقدار بزرگ‌تر ضریب حساسیت تلفات نشان‌دهنده حساسیت بیشتر تلفات کل سیستم نسبت به تزریق توان اکتیو در آن شین است؛ بنابراین، از دیدگاه کمینه‌سازی تلفات، شین‌هایی با مقادیر بزرگ‌تر ضریب حساسیت تلفات به‌عنوان گزینه‌های مناسب‌تری برای جایابی تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.

ب) شاخص انحراف ولتاژ: با کمینه‌سازی انحراف مربعات ولتاژ (F_{TVD}) [۱۰،۱۵]:

$$\min F_{TVD} = \sum_{i\in\Omega_B} (V_i - V_{nom})^2 \quad (۲)$$

$$VDI_i = |V_i - V_{nom}| \quad (۳)$$

که در آن V_{nom} =۱ پریونیت است. برخلاف ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ یک شاخص حاشیه‌ای مبتنی بر متغیر دوگان نیست، بلکه از وضعیت مستقیم پروفیل ولتاژ در هر شین استخراج می‌شود. براین‌اساس، از دیدگاه بهبود پروفیل ولتاژ، شین‌هایی که مقادیر شاخص انحراف ولتاژ بزرگ‌تری دارند، به‌عنوان نامزدهای مناسب‌تری برای جایابی تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا این شین‌ها انحراف بیشتری از ولتاژ نامی نشان می‌دهند.

ج) قیمت نهایی مکانی: با کمینه‌سازی هزینه سوخت (F_{TFC}) [۱۶]:

$$\min F_{TFC} = \sum_{i\in\Omega_G} a_iP_{Gi}^2 + b_iP_{Gi} + c_i \quad (۴)$$

که در آن، P_{Gi} بیانگر توان اکتیو تولیدی ژنراتور متعارف مستقر در شین i است. ضرایب a_i (دلار بر مگاوات به توان دو ساعت)، b_i (دلار بر مگاوات ساعت) و c_i (دلار بر ساعت) نیز به ترتیب ضرایب درجه دوم، خطی و ثابت تابع هزینه سوخت ژنراتور متعارف در شین i را نشان می‌دهند. همچنین، $\Omega_G \subseteq \Omega_B$ مجموعه شین‌های دارای ژنراتور متعارف را مشخص می‌کند. پس از حل این مدل، قیمت نهایی مکانی در شین i از متغیر دوگان λ_i متناظر با قید موازنه توان اکتیو در همان شین استخراج می‌شود. براین‌اساس، شین‌هایی که مقادیر قیمت نهایی مکانی بالاتری دارند، از دیدگاه اقتصادی برای جایابی تولید پراکنده مناسب‌تر در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا این شین‌ها متناظر با مکان‌هایی هستند که هزینه نهایی تأمین توان در آن‌ها بالاتر است؛ بنابراین، نصب تولید پراکنده در چنین شین‌هایی می‌تواند به کاهش هزینه کل سوخت ژنراتورهای متعارف کمک کند. لازم به ذکر است که در این مقاله، قیمت نهایی مکانی به‌عنوان یک شاخص هزینه گره‌ای استخراج‌شده از پخش بار بهینه جریان متناوب تفسیر می‌شود و لزوماً به معنای مدل‌سازی صریح بازار برق در سطح توزیع نیست.

۲-۳- تشکیل شاخص ترکیبی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

به‌منظور ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های فنی و اقتصادی مسئله جایابی تولید پراکنده، در این مقاله یک شاخص ترکیبی مبتنی بر نتایج پخش بار بهینه جریان متناوب ارائه می‌شود. این شاخص سه شاخص فنی - اقتصادی شامل ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی را در یک شاخص تصمیم‌گیری واحد ادغام می‌کند. ضریب حساسیت تلفات بیانگر میزان اثرگذاری تزریق توان اکتیو در هر شین بر کاهش تلفات شبکه است؛ شاخص انحراف ولتاژ وضعیت پروفیل ولتاژ شین‌ها را از دیدگاه نزدیکی به مقدار نامی منعکس می‌کند؛ و قیمت نهایی مکانی بیانگر ارزش اقتصادی تزریق توان در هر مکان از شبکه است. ازآنجاکه این شاخص‌ها دارای مقیاس، واحد و تفسیر فیزیکی متفاوت هستند، ابتدا با استفاده از روش نرمال‌سازی کمینه - بیشینه به مقیاسی بدون بعد و قابل‌مقایسه تبدیل می‌شوند. سپس وزن هر شاخص با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی تعیین شده و در نهایت، شاخص ترکیبی هر شین از طریق تجمیع وزن‌دار شاخص‌های نرمال‌شده محاسبه می‌شود. مقدار بالاتر شاخص ترکیبی نشان‌دهنده اولویت بیشتر آن شین برای نصب تولید پراکنده است.

نرمال‌سازی کمینه - بیشینه شاخص‌ها

برای ایجاد مقیاس مشترک میان شاخص‌های مورداستفاده و فراهم‌کردن امکان تجمیع آن‌ها در قالب شاخص ترکیبی، مقادیر شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی برای همه شین‌های نامزد نرمال‌سازی می‌شوند. این مرحله مانع از آن می‌شود که یک شاخص صرفاً به دلیل بزرگ‌تر بودن مقیاس عددی یا تفاوت در واحد فیزیکی، اثر غالب بر مقدار شاخص ترکیبی داشته باشد. در این مقاله، شاخص‌ها به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که مقدار بزرگ‌تر آن‌ها بیانگر اولویت بیشتر شین برای جایابی تولید پراکنده است؛ بنابراین، از روش نرمال‌سازی کمینه - بیشینه استفاده می‌شود. مقدار نرمال‌شده شاخص k برای شین نامزد i به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$X_{i,k}^{norm} = \frac{X_{i,k} - X_k^{\min}}{X_k^{\max} - X_k^{\min}} \quad (۵)$$

که در آن، $X_{i,k}$ مقدار اولیه شاخص k برای شین نامزد i است. همچنین، $X_k^{\min}$ و $X_k^{\max}$ به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار شاخص k در میان همه شین‌های نامزد هستند. با استفاده از رابطه (۵)، مقدار هر شاخص در بازه [۰،۱] قرار می‌گیرد و در نتیجه، امکان مقایسه و تجمیع شاخص‌های مختلف فراهم می‌شود. لازم به ذکر است که در محاسبه مقادیر کمینه و بیشینه، تنها شین‌های موجود در مجموعه نامزد لحاظ می‌شوند و شین مرجع در محاسبات نرمال‌سازی وارد نمی‌شود.

تعیین وزن شاخص‌ها با روش وزن‌دهی معکوس تجمعی

پس از نرمال‌سازی، وزن شاخص‌ها باید به‌گونه‌ای تعیین شود که اهمیت نسبی هر یک در تشکیل شاخص ترکیبی منعکس گردد. در این مقاله، برای تعیین وزن‌ها از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی استفاده می‌شود. این روش باتکیه‌بر اطلاعات موجود در ماتریس شاخص‌های نرمال‌شده، وزن هر شاخص را بدون اتکا به قضاوت ذهنی استخراج می‌کند [۱۸].

$$w_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^{Nc} X_{i,k}^{norm}} \quad (۶)$$

که در آن، w_k وزن خام شاخص k، $X_{i,k}^{norm}$ مقدار نرمال‌شده شاخص k برای شین i، N_c تعداد شین‌های نامزد است. سپس وزن‌های خام به‌صورت رابطه (۷) نرمال می‌شوند تا مجموع آن‌ها برابر یک شود:

$$w_k = \frac{w_k}{\sum_{k=1}^{m} w_k}, k = 1, 2, ..., m \quad (۷)$$

که در آن، m تعداد شاخص‌ها و w_k وزن نهایی شاخص k است.

محاسبه شاخص ترکیبی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

پس از نرمال‌سازی شاخص‌ها و تعیین وزن‌های نهایی، شاخص ترکیبی برای هر شین نامزد از طریق تجمیع وزن‌دار شاخص‌ها محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\sum_{k=1}^{m} w_k = 1, 0 \langle w_k \langle 1, k = 1, 2, ..., m \quad (۸)$$

$$CI_i = \sum_{k=1}^{m} w_k X_{i,k}^{norm} \quad (۹)$$

که در آن، CI_i شاخص ترکیبی شین i، w_k وزن شاخص k، و $X_{i,k}^{norm}$ مقدار نرمال شده شاخص k برای شین i است. هرچه مقدار CI_i بزرگ‌تر باشد، آن شین از اولویت بالاتری برای نصب تولید پراکنده برخوردار خواهد بود.

تحلیل حساسیت نسبت به وزن شاخص‌ها

ازآنجاکه وزن شاخص‌ها می‌تواند بر مقدار شاخص ترکیبی و در نتیجه بر رتبه‌بندی نهایی شین‌ها اثرگذار باشد، در این مقاله تحلیل حساسیت نسبت به وزن شاخص‌ها انجام می‌شود. هدف از این تحلیل، ارزیابی پایداری نسبی رتبه‌بندی پیشنهادی در برابر تغییرات محدود در اهمیت شاخص‌ها است. برای این منظور، وزن هر شاخص به‌صورت جداگانه در دو جهت افزایش و کاهش ۲۰ درصدی تغییر داده می‌شود، در حالی که وزن سایر شاخص‌ها به‌گونه‌ای متناسب بازتوزیع می‌گردد که مجموع وزن‌ها همچنان برابر یک باقی بماند؛ بنابراین، برای شاخص k، وزن اصلاح‌شده به‌صورت (۱۰) تعریف می‌شود:

$$w_k^{(\delta)} = (1+\delta) w_k, \delta \in (+0.2, -0.2) \quad (۱۰)$$

برای سایر شاخص‌ها، وزن‌ها به‌صورت متناسب تعدیل می‌شوند:

$$w_j^{(\delta)} = w_j \frac{1 - w_k^{\delta}}{1 - w_k}, j \neq k \quad (۱۱)$$

به‌طوری که شرط نرمال بودن مجموعه وزن‌های جدید برقرار باشد:

$$\sum_{j=1}^{m} w_j^{(\delta)} = 1 \quad (۱۲)$$

همچنین، برای معتبر بودن تحلیل حساسیت، مثبت‌بودن وزن‌ها باید حفظ شود:

$$w_k^{(\delta)} > 0 \quad (۱۳)$$

$$w_j^{(\delta)} > 0 \quad (۱۴)$$

در عمل، شرط امکان‌پذیری رابطه (۱۵) برای جلوگیری از ایجاد وزن‌های نامعتبر باید برقرار باشد:

$$0 < w_k^{(\delta)} < 1 \quad (۱۵)$$

پس از اعمال وزن‌های جدید، شاخص ترکیبی برای تمام شین‌های نامزد مجدداً محاسبه شده و رتبه‌بندی شین‌ها بازنگری می‌شود. این فرایند امکان بررسی میزان تغییرپذیری خروجی نهایی نسبت به نوسانات محدود در اهمیت شاخص‌ها را فراهم می‌سازد.

رتبه‌بندی شین‌های نامزد

پس از محاسبه شاخص ترکیبی برای همه شین‌های نامزد، شین‌ها بر حسب مقدار CI به‌صورت نزولی مرتب می‌شوند. خروجی این مرحله یک رتبه‌بندی کامل از شین‌های قابل‌بررسی است که در آن، شین‌های دارای مقادیر بزرگ‌تر CI در جایگاه‌های بالاتری قرار می‌گیرند. در این مقاله، برای تمرکز بر گزینه‌های دارای بیشترین اولویت، ۲۰ درصد نخست شین‌های رتبه‌بندی‌شدن به‌عنوان مجموعه شین‌های برتر برای مقایسه با خروجی مدل مرجع انتخاب می‌شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۲-۴- مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای اعتبارسنجی

به‌منظور ارزیابی اعتبار رتبه‌بندی حاصل از شاخص ترکیبی، یک مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای حل مستقیم مسئله جایابی و ظرفیت‌یابی تولید پراکنده تدوین می‌شود. در این مدل، تصمیم‌های مربوط به انتخاب شین‌های نصب و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده به‌صورت هم‌زمان اتخاذ شده و قیود اصلی فیزیکی و بهره‌برداری شبکه لحاظ می‌گردند. لازم به تأکید است که مدل مرجع در این مقاله صرفاً به‌عنوان مبنایی برای مقایسه و اعتبارسنجی خروجی چارچوب پیشنهادی به کار می‌رود و جایگزین فرایند رتبه‌بندی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب نیست.

تابع هدف

تابع هدف مدل مرجع بر کمینه‌سازی هزینه کل سالانه سیستم استوار است. این هزینه از سه مؤلفه اصلی شامل هزینه تلفات توان اکتیو کل، هزینه انحراف ولتاژ کل و هزینه سوخت واحدهای متعارف و تولیدات پراکنده تشکیل می‌شود [۴]:

$$\min TC = \mathrm{Cost}_{TAPL} + \mathrm{Cost}_{TVD} + \mathrm{Cost}_{(G+DG)} \quad (۱۶)$$

که در آن، Cost_{TAPL} هزینه سالانه ناشی از تلفات توان اکتیو کل شبکه (دلار بر سال)، Cost_{TVD} هزینه سالانه متناظر با انحراف ولتاژ کل (دلار بر سال) و $\mathrm{Cost}_{(G+DG)}$ هزینه سوخت کل سالانه توسط واحدهای متعارف و تولیدات پراکنده (دلار بر سال) است.

هزینه تلفات اکتیو به‌صورت رابطه (۱۷) بیان می‌شود:

$$\mathrm{Cost}_{TAPL} = 8760 C_{Loss} \sum_{(i,j)\in\Omega_{Line}} g_{ij}(V_I^2 + V_J^2 - 2V_i V_{\ j}\cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (۱۷)$$

که در آن، C_{Loss} ضریب هزینه تلفات (دلار بر مگاوات ساعت) است.

هزینه انحراف ولتاژ نیز به‌صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Cost}_{TVD} = 8760 C_{vd} \sum_{i\in\Omega_B} (V_i - V_{nom})^2 \quad (۱۸)$$

که در آن، C_{vd} ضریب هزینه انحراف ولتاژ (دلار بر پریونیت به توان دو ساعت) است.

$$\mathrm{Cost}_{(G+DG)} = 8760\left[\sum_{i\in\Omega_G} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + \sum_{i\in\Omega_{DG}^C} C_{OPR} P_{DGi}\right] + \sum_{i\in\Omega_{DG}^C} C_{INV}^{ann} S_{DGi}^{cap} \quad (۱۹)$$

که در آن، $\Omega_G \subseteq \Omega_B$ مجموعه شین‌های مجهز به ژنراتورهای متعارف را نشان می‌دهد؛ C_{opr} ضریب هزینه بهره‌برداری واحدهای تولید پراکنده (دلار بر مگاوات ساعت) است؛ S_{DGi}^{cap} ظرفیت نامی توان ظاهری (مگاولت آمپر) نصب‌شده واحد تولید پراکنده در شین i است؛ و Ω_{DG}^C مجموعه شین‌های نامزد برای جایابی تولید پراکنده را نشان می‌دهد. ظرفیت توان ظاهری S_{DGi}^{cap} از ظرفیت توان اکتیو متناظر تولید پراکنده و ضریب توان مشخص‌شده آن به دست می‌آید.

ضریب هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه شده به‌صورت رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$C_{INV}^{ann} = CRF \times C_{INV} \quad (۲۰)$$

که در آن، C_{INV} ضریب هزینه اولیه سرمایه‌گذاری واحدهای تولید پراکنده (دلار بر مگاولت آمپر) است و CRF عامل بازیافت سرمایه (یک بر سال) است که به‌صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شود:

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (۲۱)$$

که در آن، r نرخ تنزیل و n عمر پروژه بر حسب سال است.

رابطه (۱۶)، تابع هدف اقتصادیِ استفاده‌شده در مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته را به‌منظور اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

قیود پخش بار و بهره‌برداری

در مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، وضعیت بهره‌برداری شبکه توسط معادلات پخش بار جریان متناوب به همراه قیود متناظر بهره‌برداری توصیف می‌شود. Ω_B مجموعه شین‌ها باشد. برای هر شین $i \in \Omega_B$، معادلات موازنه توان جریان متناوب به‌صورت روابط (۲۲) و (۲۳) فرموله می‌شوند [۱۴،۲۰].

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} + P_{DGi} = \sum_{j \in \Omega_B} V_i V_j \left[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right], \forall i \in \Omega_B \quad (۲۲)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{DGi} = \sum_{j \in \Omega_B} V_i V_j \left[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right], \forall i \in \Omega_B \quad (۲۳)$$

که در آن، P_i و Q_i به ترتیب بیانگر تزریق خالص توان اکتیو و راکتیو در شین i هستند. همچنین، P_{Gi} و Q_{Gi} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور متعارف در شین i را نشان می‌دهند، در حالی که P_{Di} و Q_{Di} بیانگر تقاضای بار متناظر هستند. P_{DGi} و Q_{DGi} نیز به ترتیب تزریق توان اکتیو و راکتیو واحد تولید پراکنده در شین i هستند. علاوه بر این، V_i و δ_i به ترتیب دامنه ولتاژ و زاویه ولتاژ در شینه i بوده و G_{ij} و B_{ij} عناصر رسانایی و سوسپتانس ماتریس ادمیتانس شین هستند.

دامنه ولتاژ در هر شین نیز به‌صورت رابطه (۲۴) محدود می‌شود [۱۴،۲۰]:

$$V^{\min} \le Vi \le V^{\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (۲۴)$$

به طور مشابه، زاویه ولتاژ نیز دارای کران‌های رابطه (۲۵) است [۱۴،۲۰]:

$$\delta^{\min} \le \delta_i \le \delta^{\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (۲۵)$$

به‌منظور تعریف یک مرجع زاویه‌ای یکتا، زاویه ولتاژ در شین مرجع به‌صورت رابطه (۲۶) ثابت در نظر گرفته می‌شود:

$$\delta_{ref} = 0 \quad (۲۶)$$

که در آن، ref بیانگر شین مرجع است.

برای بهره‌برداری ایمن از شبکه توزیع، توان ظاهری عبوری از هر خط توسط حد ظرفیت حرارتی متناظر آن محدود می‌شود [۱۰،۲۰]:

$$S_{ij} \le S_{ij}^{\max}, S_{ji} \le S_{ij}^{\max}, \forall (i,j) \in \Omega_{Line} \quad (۲۷)$$

قیود جایابی و ظرفیت تولید پراکنده

برای هر شین نامزد $i \in \Omega_{DG}^{C}$، متغیر دودویی u_{DGi} وضعیت نصب تولید پراکنده را مشخص می‌کند. رابطه بین تصمیم نصب و توان اکتیو تزریقی تولید پراکنده به‌صورت رابطه (۲۸) است [۲۱،۲۲]:

$$0 \le P_{DGi} \le u_{DGi} P_{DG}^{\max}, u_{DGi} \in \{0,1\}, \forall i \in \Omega_{DG}^{C} \quad (۲۸)$$

برای تولید پراکنده با ضریب توان ثابت، توان راکتیو تزریقی از رابطه (۲۹) تعیین می‌شود [۲۱،۲۲]:

$$Q_{DGi} = P_{DGi} \tan(\cos^{-1}(pf_{DG})), \forall i \in \Omega_{DG}^{C} \quad (۲۹)$$

برای کنترل سهم کل تولید پراکنده نسبت به بار سیستم و جلوگیری از نفوذ بیش از حد تولید پراکنده، قید سطح نفوذ به مدل مرجع افزوده می‌شود. اگر PL_{DGmax} حداکثر سطح نفوذ مجاز باشد، این قید را می‌توان به‌صورت رابطه (۳۰) نوشت [۲۳]:

$$\sum_{i \in \Omega_B} S_{DGi} \le (PL_{DG\max} \times S_{Load}) \quad (۳۰)$$

که در آن، $\sum_{i \in \Omega_B} S_{DGi}$ مجموع بار ظاهری تولید پراکنده است؛ S_{Load} بار ظاهری سیستم (مگاولت آمپر) است.

۲-۵- ارزیابی دقت هم‌پوشانی میان چارچوب پیشنهادی و مدل مرجع

ازآنجاکه خروجی نهایی چارچوب پیشنهادی یک رتبه‌بندی از شین‌های نامزد است، لازم است میزان انطباق این رتبه‌بندی با نتایج حاصل از یک مدل مرجع دقیق ارزیابی شود. در این مقاله، اعتبار رتبه‌بندی به‌دست‌آمده از شاخص ترکیبی از طریق مقایسه شین‌های دارای اولویت بالا با شین‌های بهینه مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته بررسی می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

هدف از این مقایسه آن است که مشخص شود چارچوب پیشنهادی تا چه اندازه قادر است مکان‌هایی را شناسایی کند که در حل مستقیم مسئله جایابی و ظرفیت نیز به‌عنوان گزینه‌های مطلوب ظاهر می‌شوند.

برای این منظور، از معیار دقت هم‌پوشانی استفاده می‌شود. این معیار میزان اشتراک میان مجموعه شین‌های برتر حاصل از شاخص ترکیبی و مجموعه شین‌های بهینه مدل مرجع را اندازه‌گیری می‌کند. در این مقاله، مقایسه بر اساس ۲۰ درصد نخست شین‌های رتبه‌بندی شده انجام می‌شود. دقت هم‌پوشانی به‌صورت رابطه (۳۱) تعریف می‌شود [۲۴]:

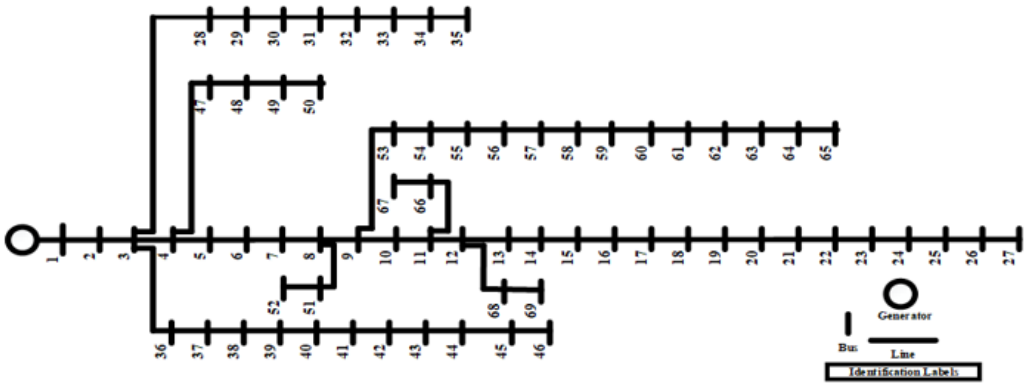
$$OverlapAccuracy(\%) = \frac{\left|S_{CI}^{(Top-20\%)} \cap S_{MINLP}\right|}{\min\left(\left|S_{CI}^{(Top-20\%)}\right|, \left|S_{MINLP}\right|\right)} \times 100 \qquad (۳۱)$$

که در آن، $S_{CI}^{(Top-20\%)}$ مجموعه ۲۰ درصد نخست شین‌های رتبه‌بندی شده بر اساس شاخص ترکیبی، و S_{MINLP} مجموعه شین‌های منتخب مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته است. همچنین، $\left|S_{CI}^{(Top-20\%)} \cap S_{MINLP}\right|$ تعداد شین‌های مشترک بین دو مجموعه را نشان می‌دهد.

مقدار این معیار در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد قرار می‌گیرد. هرچه مقدار دقت هم‌پوشانی بیشتر باشد، انطباق بین رتبه‌بندی پیشنهادی و خروجی مدل مرجع بیشتر بوده و در نتیجه اعتبار چارچوب پیشنهادی در شناسایی شین‌های مناسب‌تر برای جایابی تولید پراکنده افزایش می‌یابد.

۳- سیستم آزمون و تنظیمات شبیه‌سازی

مطالعات عددی این مقاله بر روی سیستم آزمون ۶۹ شینه IEEE انجام شده است که ساختار تک‌خطی آن در شکل (۲) نشان‌داده‌شده است. این شبکه به‌عنوان بستر مشترک برای اجرای چارچوب پیشنهادی و حل مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته به کار گرفته شده است تا مقایسه نتایج تحت شرایط یکسان از نظر ساختار شبکه، بارگذاری و قیود بهره‌برداری انجام شود. سیستم موردمطالعه شامل ۶۹ شین و ۶۸ خط توزیع بوده و مجموع بار اکتیو و راکتیو پایه آن به ترتیب برابر با ۳/۷۹۲ مگاوات و ۲/۶۹۴ مگاوار است [۲۵]. ولتاژ نامی شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت، بیشینه توان ظاهری هر خط ۵ مگاولت آمپر و شین شماره ۱ به‌عنوان شین مرجع در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، حدود مجاز ولتاژ برای تمامی شین‌ها در بازه ۰/۹ تا ۱/۰۴ اعمال شده است [۱۲،۲۳،۲۶].



شکل (۲): ساختار تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه *IEEE* مورداستفاده در مطالعات عددی

Figure (2): Single-line diagram of the IEEE 69-bus radial distribution network used in the numerical studies

در چارچوب پیشنهادی، اطلاعات موردنیاز برای ارزیابی شین‌ها از حل سه صورت‌بندی پخش بار بهینه جریان متناوب استخراج می‌شود. این صورت‌بندی‌ها از مدل شبکه و قیود بهره‌برداری یکسان استفاده می‌کنند، اما از نظر تابع هدف با یکدیگر متفاوت‌اند؛ به‌گونه‌ای که شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی بر مبنای نتایج آن‌ها

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

محاسبه می‌شوند. ازآنجاکه هدف این بخش معرفی بستر عددی و پارامترهای شبیه‌سازی است، جزئیات ریاضی استخراج و ترکیب شاخص‌ها در بخش پیشین ارائه شده است.

تابع هزینه سوخت ژنراتور متعارف در شین i به‌صورت یک تابع درجه دوم مدل‌سازی شده است؛ به‌طوری که ضرایب a_i، b_i و c_i به ترتیب بیانگر ضرایب درجه دوم، خطی و ثابت تابع هزینه هستند و مقادیر عددی آن‌ها از [۲۷] استخراج شده‌اند. همچنین، در توابع هدف بررسی‌شده، ضریب هزینه تلفات برابر با ۲۰ دلار بر مگاوات ساعت و ضریب هزینه انحراف ولتاژ برابر با ۱۰۰۰ دلار بر پریونیت به توان دو ساعت لحاظ شده است.

برای ارزیابی اقتصادی واحدهای تولید پراکنده، هزینه بهره‌برداری این واحدها برابر با ۵۵ دلار بر مگاوات ساعت و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آن‌ها برابر با ۶۵۰۰۰۰ دلار بر مگاولت آمپر فرض شده است [۲۸]. افزون بر این، نرخ تنزیل ۹/۱۵ درصد و عمر مفید پروژه ۳۰ سال در محاسبات اقتصادی لحاظ شده‌اند [۲۹].

در مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، واحدهای تولید پراکنده از نوع توربین گازی در نظر گرفته شده‌اند. ظرفیت توان اکتیو این واحدها به‌صورت متغیر پیوسته در بازه ۰ تا ۱/۵ مگاوات تعریف شده و عملکرد آن‌ها با ضریب قدرت ۰/۹ پس فاز مدل‌سازی شده است [۲۱،۲۳]. همچنین، سطح نفوذ تولید پراکنده برابر با ۴۰ درصد کل بار توان ظاهری شبکه تنظیم شده است. این سطح نفوذ به‌منظور ارزیابی عملکرد چارچوب پیشنهادی در شرایط بهره‌برداری تنش‌زا انتخاب شده است؛ زیرا در شبکه‌های توزیع فعال، افزایش نفوذ تولید پراکنده، بسته به ویژگی‌های شبکه و محل استقرار واحدها، می‌تواند احتمال وقوع پدیده‌هایی مانند شارش توان معکوس و نقض حدود ولتاژ را افزایش دهد. براین‌اساس، ۴۰ درصد به‌عنوان یک سطح نفوذ مناسب برای آزمون کارایی روش پیشنهادی در رتبه‌بندی شین‌های نامزد در نظر گرفته شده است.

مسائل بهینه‌سازی مورداستفاده در چارچوب پیشنهادی و مدل مرجع در محیط GAMS اجرا شده و با استفاده از حل‌کننده LINDOGLOBAL حل شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک رایانه مجهز به پردازنده Intel Core i7 با فرکانس ۲/۵۹ گیگاهرتز، حافظه ۱۵/۸ گیگابایت و سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ نسخه ۶۴ بیتی اجرا شده‌اند. برای جلوگیری از اثرگذاری تفاوت‌های اجرا بر نتایج مقایسه، چارچوب پیشنهادی و مدل مرجع بر روی بستر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری یکسان اجرا شده‌اند.

۴- نتایج عددی و تحلیل یافته‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای چارچوب پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۶۹ شینه IEEE ارائه و تحلیل می‌شود. ابتدا خروجی شاخص‌های فنی - اقتصادی و فرایند رتبه‌بندی بررسی شده و سپس پایداری نتایج از طریق تحلیل حساسیت ارزیابی می‌گردد. در نهایت، با مقایسه نتایج حاصل از شاخص ترکیبی و مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، دقت و کارایی روش پیشنهادی در شناسایی مکان‌های بهینه تولید پراکنده تأیید می‌شود.

۴-۱- تحلیل شاخص‌های فنی - اقتصادی و رتبه‌بندی شین‌ها

پس از حل سه صورت‌بندی پخش بار بهینه جریان متناوب معرفی‌شده در بخش ۲-۲، مقادیر شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی برای شین‌های نامزد استخراج شدند. ازآنجاکه این شاخص‌ها دارای واحد، مقیاس عددی و تفسیر فیزیکی متفاوت هستند، ابتدا مقادیر آن‌ها با استفاده از روش کمینه - بیشینه نرمال‌سازی شدند. سپس وزن شاخص‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس تجمعی محاسبه شد. وزن‌های نهایی متناظر با شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی به ترتیب برابر با ۰/۳۴، ۰/۳۲ و ۰/۳۴ به دست آمدند. براین‌اساس، شاخص ترکیبی هر شین از تجمیع وزن‌دار شاخص‌های نرمال‌شده محاسبه و شین‌های نامزد برحسب مقدار شاخص ترکیبی به‌صورت نزولی رتبه‌بندی شدند. باتوجه‌به اینکه در این مقاله مقایسه با مدل مرجع بر اساس ۲۰ درصد نخست شین‌های رتبه‌بندی شده انجام می‌شود، جدول (۱) مقادیر شاخص‌های نرمال‌شده و شاخص ترکیبی را برای ۱۴ شین برتر نشان می‌دهد. این تعداد متناظر با ۲۰ درصد نخست از ۶۸ شین نامزد، با حذف شین مرجع، است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

Table (1): Normalized indicator values and composite index for the top 20% ranked buses

جدول (۱): مقادیر شاخص‌های نرمال‌شده و شاخص ترکیبی برای ۲۰ درصد نخست شین‌های رتبه‌بندی شده

شماره شین	ضریب حساسیت تلفات نرمال‌شده	شاخص انحراف ولتاژ نرمال‌شده	قیمت نهایی مکانی نرمال‌شده	شاخص ترکیبی	رتبه
۶۵	۰/۳۴۰۰	۰/۳۲۰۰	۰/۳۴۰۰	۱/۰۰۰۰	۱
۶۴	۰/۳۳۸۰	۰/۳۱۶۵	۰/۳۳۷۷	۰/۹۹۲۲	۲
۶۳	۰/۳۳۰۰	۰/۳۰۹۵	۰/۳۳۰۲	۰/۹۶۹۷	۳
۶۲	۰/۳۲۸۰	۰/۳۰۹۵	۰/۳۲۸۷	/۹۶۶۲	۴
۶۱	۰/۳۲۸۰	۰/۳۰۹۵	۰/۳۲۷۶	۰/۹۶۵۱	۵
۶۰	۰/۲۹۸۰	۰/۲۸۱۳	۰/۲۹۸۷	۰/۸۷۸۰	۶
۵۹	۰/۲۷۸۰	۰/۲۶۳۷	۰/۲۷۷۴	۰/۸۱۹۱	۷
۵۸	۰/۲۶۰۰	۰/۲۴۹۷	۰/۲۵۹۷	/۷۶۹۴	۸
۵۷	۰/۲۱۴۰	۰/۲۱۱۰	۰/۲۱۴۶	۰/۶۳۹۶	۹
۲۷	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۴۷	۰/۱۵۰۴	/۴۵۵۱	۱۰
۲۶	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۴۷	۰/۱۵۰۳	۰/۴۵۵۰	۱۱
۲۵	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۴۷	۰/۱۵۰۱	۰/۴۵۴۸	۱۲
۲۴	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۱۲	۰/۱۴۹۵	۰/۴۵۰۷	۱۳
۲۳	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۱۲	۰/۱۴۸۹	/۴۵۰۱	۱۴

مطابق جدول (۱)، شین ۶۵ با بیشترین مقدار شاخص ترکیبی در رتبه نخست قرار دارد و پس از آن شین‌های ۶۴، ۶۳، ۶۲، ۶۱ و ۶۰ رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند. تمرکز رتبه‌های برتر در بازه ۵۷ تا ۶۵ نشان می‌دهد که بخش انتهایی فیدر ۵۳-۶۵ از بالاترین اولویت برای استقرار تولید پراکنده برخوردار است.

این الگو با ساختار توپولوژی شبکه کاملاً سازگار است. در سیستم ۶۹ شینه IEEE، شین‌های ۵۷ تا ۶۵ در بخش پایین‌دست یک فیدر جانبی شعاعی قرار دارند که از شین ۵۳ امتدادیافته و در شین ۶۵ خاتمه می‌یابد. در چنین ناحیه‌ای، به دلیل فاصله امپدانسی بیشتر از پست و عبور توان تجمعی از شاخه‌های بالادست، افت ولتاژ و حساسیت تلفات افزایش می‌یابد. در نتیجه، تزریق توان توسط تولید پراکنده در این بخش معمولاً اثر بیشتری بر کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بر جای می‌گذارد. هم‌زمان، مقادیر بالای قیمت نهایی مکانی در این شین‌ها نیز نشان می‌دهد که تزریق توان در این ناحیه از منظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیرتر است. ازاین‌رو، قرارگرفتن شین ۶۵ در رتبه نخست و استقرار شین‌های ۵۷ تا ۶۴ در رتبه‌های بعدی، از نظر فنی و اقتصادی قابل‌انتظار است.

علاوه بر این، حضور شین‌های ۲۲ تا ۲۷ در میان گزینه‌های برتر حائز اهمیت است. این شین‌ها در بخش پایین‌دست فیدر اصلی قرار دارند و شین ۲۷ انتهای مسیر اصلی ۱-۲۷ محسوب می‌شود. حضور این ناحیه در میان ۲۰ درصد نخست رتبه‌بندی شده نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی پیشنهادی صرفاً به یک شاخه انتهایی محدود نشده، بلکه سایر نواحی مؤثر شبکه را نیز که از منظر هم‌زمانِ تلفات، ولتاژ و هزینه دارای مزیت هستند، شناسایی کرده است؛ بنابراین، رتبه‌بندی حاصل تنها بازتاب موقعیت مکانی شین‌ها نیست، بلکه بر پایه برآیند کمی سه شاخص با ماهیت‌های متفاوت شکل‌گرفته است.

در مجموع، نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی پیشنهادی از توان مناسبی برای اولویت‌بندی شین‌های نامزد نصب تولید پراکنده برخوردار است. الگوی رتبه‌بندی به‌دست‌آمده نه‌تنها با مقادیر عددی سه شاخص پایه سازگار است، بلکه از منظر توپولوژی و رفتار فیزیکی شبکه‌های توزیع شعاعی نیز تفسیرپذیر است. این هم‌خوانی میان تحلیل عددی و ساختار فنی شبکه، اعتبار روش پیشنهادی را برای شناسایی نواحی اولویت‌دار نصب تولید پراکنده تقویت می‌کند و مبنایی مناسب برای مقایسه با مدل مرجع در بخش‌های بعدی فراهم می‌سازد.

۴-۲- ارزیابی پایداری رتبه‌بندی: تحلیل حساسیت نسبت به وزن شاخص‌ها

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

پس از استخراج رتبه‌بندی اولیه شین‌های نامزد بر اساس شاخص ترکیبی پیشنهادی، در این بخش پایداری نتایج نسبت به تغییر وزن شاخص‌های تصمیم‌گیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ازآنجاکه شاخص ترکیبی از سه شاخص ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی تشکیل شده است، تغییر در وزن هر یک از این شاخص‌ها می‌تواند مقدار نهایی شین‌ها و در نتیجه ترتیب رتبه‌بندی آن‌ها را تحت‌تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، تحلیل حساسیت نسبت به وزن شاخص‌ها باهدف بررسی استحکام چارچوب رتبه‌بندی و اطمینان از عدم وابستگی شدید نتایج به یک ترکیب خاص از وزن‌ها انجام شده است. در این مطالعه، رتبه‌بندی اولیه شین‌ها با استفاده از وزن‌های پایه انجام شد و بر اساس آن، ۱۴ شین برتر به‌عنوان حدود ۲۰ درصد نخست شین‌های نامزد شبکه انتخاب شدند. انتخاب این مجموعه ازآن‌جهت اهمیت دارد که در ادامه مقاله، میزان هم‌پوشانی شین‌های اولویت‌دار حاصل از شاخص ترکیبی با مکان‌های بهینه به‌دست‌آمده از مدل مرجع مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ازاین‌رو، پیش از مقایسه نهایی با مدل مرجع، لازم است نشان داده شود که این مجموعه اولویت‌دار نسبت به تغییرات متعارف در وزن شاخص‌ها پایدار بوده و با تغییر جزئی ضرایب اهمیت شاخص‌ها دچار تغییر اساسی نمی‌شود.

برای این منظور، شش سناریوی حساسیت تعریف شده است. در هر سناریو، وزن یکی از سه شاخص به‌صورت جداگانه به میزان ۲۰ درصد افزایش یا کاهش‌یافته و سپس رتبه‌بندی شین‌ها مجدداً محاسبه شده است. این سناریوها شامل اعمال تغییرات افزایشی و کاهشی بر وزن «ضریب حساسیت تلفات»، «شاخص انحراف ولتاژ» و «قیمت نهایی مکانی» هستند. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۲) ارائه شده است؛ به‌گونه‌ای که در این جدول، مقدار شاخص ترکیبی و رتبه متناظر هر یک از ۱۴ شین برتر در حالت پایه و سناریوهای مختلف گزارش شده است. در این جدول، نمادهای $w_{LSF}^{(+0.2)}$ و $w_{LSF}^{(-0.2)}$ به ترتیب بیانگر افزایش و کاهش ۲۰ درصدی وزن ضریب حساسیت تلفات هستند. به همین ترتیب، $w_{VDI}^{(+0.2)}$ و $w_{VDI}^{(-0.2)}$ به ترتیب افزایش و کاهش ۲۰ درصدی وزن شاخص انحراف ولتاژ، و $w_{LMP}^{(+0.2)}$ و $w_{LMP}^{(-0.2)}$ به ترتیب افزایش و کاهش ۲۰ درصدی وزن قیمت نهایی مکانی را نشان می‌دهند. همچنین، ستون تعداد حضور در مجموعه ۱۴ شین نخست در جدول (۲) نشان می‌دهد که هر شین در چند حالت از مجموع هفت حالت بررسی‌شده، شامل حالت پایه و شش سناریوی حساسیت، همچنان در میان ۱۴ گزینه برتر باقی‌مانده است. مقادیر نهایی وزن‌ها در سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت در پیوست الف ارائه شده است.

Table (2): Stability assessment of the ranking of the top 14 buses under a 20% variation in indicator weights

جدول (۲): ارزیابی پایداری رتبه‌بندی ۱۴ شین برتر نسبت به تغییر ۲۰ درصدی وزن شاخص‌ها

شماره شین	حالت پایه: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{LSF}^{(+0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{LSF}^{(-0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{VDI}^{(+0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{VDI}^{(-0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{LMP}^{(+0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	$w_{LMP}^{(-0.2)}$: شاخص ترکیبی (رتبه)	تعداد حضور در مجموعه ۱۴ شین نخست
۶۵	(۱) ۱/۰۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰۰	(۱) ۱/۰۰۰۰	۷
۶۴	(۲) ۰/۹۹۲۲	(۲) ۰/۹۹۲۴	(۲) ۰/۹۹۲۰	(۲) ۰/۹۹۱۹	(۲) ۰/۹۹۲۵	(۲) ۰/۹۹۲۳	(۲) ۰/۹۹۲۱	۷
۶۳	(۳) ۰/۹۶۹۷	(۳) ۰/۹۶۹۷	(۳) ۰/۹۶۹۶	(۳) ۰/۹۶۹۳	(۳) ۰/۹۷۰۰	(۳) ۰/۹۶۹۸	(۳) ۰/۹۶۹۶	۷
۶۲	(۴) ۰/۹۶۶۲	(۴) ۰/۹۶۶۰	(۴) ۰/۹۶۶۳	(۴) ۰/۹۶۶۲	(۴) ۰/۹۶۶۱	(۴) ۰/۹۶۶۱	(۴) ۰/۹۶۶۲	۷
۶۱	(۵) ۰/۹۶۵۱	(۵) ۰/۹۶۴۹	(۵) ۰/۹۶۵۱	(۵) ۰/۹۶۵۱	(۵) ۰/۹۶۴۹	(۵) ۰/۹۶۴۸	(۵) ۰/۹۶۵۲	۷
۶۰	(۶) ۰/۸۷۸۰	(۶) ۰/۸۷۷۹	(۶) ۰/۸۷۸۲	(۶) ۰/۸۷۸۱	(۶) ۰/۸۷۷۹	(۶) ۰/۸۷۸۱	(۶) ۰/۸۷۸۰	۷
۵۹	(۷) ۰/۸۱۹۱	(۷) ۰/۸۱۸۹	(۷) ۰/۸۱۹۲	(۷) ۰/۸۱۹۶	(۷) ۰/۸۱۸۷	(۷) ۰/۸۱۸۸	(۷) ۰/۸۱۹۴	۷
۵۸	(۸) ۰/۷۶۹۴	(۸) ۰/۷۶۸۸	(۸) ۰/۷۶۹۸	(۸) ۰/۷۷۰۳	(۸) ۰/۷۶۸۳	(۸) ۰/۷۶۸۷	(۸) ۰/۷۶۹۹	۷
۵۷	(۹) ۰/۶۳۹۶	(۹) ۰/۶۳۸۵	(۹) ۰/۶۴۰۶	(۹) ۰/۶۴۱۴	(۹) ۰/۶۳۷۷	(۹) ۰/۶۳۸۷	(۹) ۰/۶۴۰۴	۷
۲۷	(۱۰) ۰/۴۵۵۱	(۱۰) ۰/۴۵۳۷	(۱۰) ۰/۴۵۶۶	(۱۰) ۰/۴۵۷۹	(۱۰) ۰/۴۵۲۵	(۱۰) ۰/۴۵۳۸	(۱۰) ۰/۴۵۶۴	۷
۲۶	(۱۱) ۰/۴۵۵۰	(۱۱) ۰/۴۵۳۷	(۱۱) ۰/۴۵۶۵	(۱۱) ۰/۴۵۷۸	(۱۱) ۰/۴۵۲۴	(۱۱) ۰/۴۵۳۷	(۱۱) ۰/۴۵۶۴	۷
۲۵	(۱۲) ۰/۴۵۴۸	(۱۲) ۰/۴۵۳۴	(۱۲) ۰/۴۵۶۲	(۱۲) ۰/۴۵۷۶	(۱۲) ۰/۵۴۲۱	(۱۲) ۰/۴۵۳۴	(۱۲) ۰/۴۵۶۲	۷
۲۴	(۱۳) ۰/۴۵۰۷	(۱۳) ۰/۴۴۹۷	(۱۳) ۰/۴۵۱۷	(۱۳) ۰/۴۵۲۸	(۱۳) ۰/۴۴۸۶	(۱۳) ۰/۴۴۹۵	(۱۳) ۰/۴۵۱۸	۷
۲۳	(۱۴) ۰/۴۵۰۱	(۱۴) ۰/۴۴۹۲	(۱۴) ۰/۴۵۱	(۱۴) ۰/۴۵۲۳	(۱۴) ۰/۴۴۸۰	(۱۴) ۰/۴۴۸۸	(۱۴) ۰/۴۵۱۳	۷

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

مطابق جدول (۲)، اعمال تغییرات ۲۰ درصدی در وزن هر یک از شاخص‌های ضریب حساسیت تلفات، شاخص انحراف ولتاژ و قیمت نهایی مکانی، هیچ تغییری در ترکیب مجموعه ۱۴ شین نخست ایجاد نکرده است. به‌طوری که مقدار شاخص پایداری برای تمامی شین‌های منتخب برابر با ۷ از ۷ است. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه مقدار عددی شاخص ترکیبی در سناریوهای مختلف دچار تغییرات جزئی شده، اما ترتیب رتبه‌بندی شین‌ها نسبت به حالت پایه ثابت باقی‌مانده است. این پایداری هم‌زمان در مقدار مجموعه منتخب و ترتیب نسبی شین‌ها بیانگر آن است که رتبه‌بندی پیشنهادی وابستگی شدیدی به یک ترکیب خاص از وزن‌ها ندارد و انتخاب شین‌های اولویت‌دار حاصل غلبه یک شاخص منفرد نیست. ازاین‌رو، چارچوب شاخص ترکیبی پیشنهادی از استحکام مناسبی در برابر تغییر ضرایب اهمیت شاخص‌های فنی و اقتصادی برخوردار بوده و می‌تواند مبنای قابل‌اعتمادی برای مقایسه با مکان‌های بهینه حاصل از مدل مرجع باشد.

۴-۳- اعتبارسنجی شاخص ترکیبی با مدل مرجع و تحلیل هم‌پوشانی

برای اعتبارسنجی مکان‌های پیشنهادی، شین‌های منتخب مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته با رتبه‌بندی حاصل از شاخص ترکیبی مقایسه شدند. مدل مرجع ۱۰ شین را به‌عنوان مکان‌های بهینه نصب تولید پراکنده تعیین می‌کند؛ ازاین‌رو، در گام نخست، حضور این شین‌ها در میان ۱۰ شین برتر شاخص ترکیبی بررسی شد. در گام بعد، به‌منظور ارزیابی توان شاخص ترکیبی به‌عنوان یک ابزار تصمیم یار در شناسایی مکان‌های مناسب نصب تولید پراکنده، میزان حضور مکان‌های بهینه مدل مرجع در مجموعه ۱۴ شین برتر شاخص ترکیبی، معادل ۲۰ درصد برتر شبکه، محاسبه گردید. نتایج این مقایسه در جدول (۳) ارائه شده است.

Table (3): Overlap analysis between the optimal locations obtained from the reference mixed-integer nonlinear programming model and the composite-index-based ranking

جدول (۳): تحلیل هم‌پوشانی مکان‌های بهینه مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته با رتبه‌بندی شاخص ترکیبی

ردیف	مکان‌های بهینه مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته	رتبه شین در شاخص ترکیبی	حضور در ۱۰ شین برتر شاخص ترکیبی	حضور در ۱۴ شین برتر شاخص ترکیبی
۱	۲۳	۱۴	خیر	بله
۲	۲۴	۱۳	خیر	بله
۳	۲۵	۱۲	خیر	بله
۴	۲۶	۱۱	خیر	بله
۵	۲۷	۱۰	بله	بله
۶	۶۱	۵	بله	بله
۷	۶۲	۴	بله	بله
۸	۶۳	۳	بله	بله
۹	۶۴	۲	بله	بله
۱۰	۶۵	۱	بله	بله
-	دقت هم‌پوشانی (٪)	-	۶۰	۱۰۰

مطابق جدول (۳)، تمامی مکان‌های بهینه مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته در مجموعه ۱۴ شین برتر شاخص ترکیبی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، دقت هم‌پوشانی مکان‌های بهینه مدل مرجع توسط مجموعه شین‌های اولویت‌دار شاخص ترکیبی برابر با ۱۰۰ درصد است. افزون بر این، ۶ شین از ۱۰ شین منتخب مدل مرجع در میان ۱۰ شین نخست شاخص ترکیبی حضور دارند که نشان‌دهنده هم‌پوشانی ۶۰ درصدی در سطح اولویت‌های بالای رتبه‌بندی است. این میزان انطباق نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی پیشنهادی، با ترکیب هم‌زمان شاخص‌های فنی و اقتصادی، قادر است مکان‌های مؤثر برای نصب تولید پراکنده را به طور مناسبی شناسایی و اولویت‌بندی کند؛ بنابراین، شاخص ترکیبی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم یار معتبر برای پشتیبانی از فرایند انتخاب مکان نصب تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع مورداستفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۴-۴- تحلیل فنی - اقتصادی و مقایسه عملکرد با مدل مرجع

پس از ارزیابی پایداری رتبه‌بندی شین‌ها و اعتبارسنجی اولیه مکان‌های منتخب، در این بخش عملکرد فنی و اقتصادی روش پیشنهادی به‌منظور سنجش دقیق کارایی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این تحلیل، تعیین میزان نزدیکی نتایج حاصل از شاخص ترکیبی به پاسخ بهینه حاصل از مدل ریاضی مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته است.

برای ایجاد شرایط یکسان و امکان مقایسه دقیق «کیفیت جایابی»، در تمامی سناریوها فرایند تعیین ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده با استفاده از حل‌کننده برنامه‌ریزی غیرخطی [۱۷] و باهدف کمینه‌سازی هزینه کل سیستم انجام شده است. در واقع، با ثابت درنظرگرفتن مکان‌ها در هر سناریو و بهینه‌سازی ظرفیت‌ها، هرگونه تفاوت در مقادیر اقتصادی و فنی به‌دست‌آمده، صرفاً ناشی از کیفیت مکان‌های پیشنهاد شده خواهد بود. براین‌اساس، سه سناریوی زیر تعریف و شبیه‌سازی شده‌اند:

۱- سناریوی اول (حالت پایه): بهره‌برداری از شبکه در شرایط عادی و بدون نصب واحدهای تولید پراکنده.

۲- سناریوی دوم (روش پیشنهادی شاخص ترکیبی): ۱۰ شین برتر رتبه‌بندی شده توسط شاخص ترکیبی به‌عنوان مکان‌های منتخب ثابت فرض شده و ظرفیت آن‌ها به‌صورت بهینه تعیین می‌گردد.

۳- سناریوی سوم (مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته): ۱۰ مکان بهینه که توسط مدل مرجع شناسایی شده‌اند، ملاک قرار گرفته و ظرفیت آن‌ها مشابه سناریوی قبل به‌صورت بهینه تعیین می‌شود.

نتایج حاصل از این مقایسه در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول، مقادیر مربوط به هزینه تلفات توان اکتیو کل، هزینه انحراف ولتاژ کل، هزینه بهره‌برداری تولید پراکنده، هزینه سوخت ژنراتور متعارف (شین مرجع)، هزینه کل، تلفات اکتیو کل، حداقل ولتاژ شین و در نهایت شکاف هزینه گزارش شده است. شکاف هزینه نشان‌دهنده درصد اختلاف هزینه کل روش پیشنهادی نسبت به مدل مرجع است و معیار اصلی برای سنجش میزان نزدیکی به جواب بهینه محسوب می‌شود. این کمیت از رابطه (۳۲)، محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Cost}Gap(\%) = \frac{\mathrm{Cost}_{CI} - \mathrm{Cost}_{MINLP}}{\mathrm{Cost}_{MINLP}} \times 100 \qquad (۳۲)$$

که در آن، Cost_{CI} هزینه کل سیستم در سناریوی مبتنی بر شاخص ترکیبی است، Cost_{MINLP} هزینه کل سیستم در سناریوی مدل مرجع است.

Table (4): Comparison of techno-economic performance metrics for the composite index, the reference model, and the base case

جدول (۴): مقایسه مقادیر فنی - اقتصادی عملکرد شاخص ترکیبی در مقابل مدل مرجع و حالت پایه

سناریو	مکان‌های منتخب	هزینه تلفات توان اکتیو کل (دلار بر سال)	هزینه انحراف ولتاژ کل (دلار بر سال)	هزینه بهره‌برداری تولید پراکنده (دلار بر سال)	هزینه سوخت ژنراتور متعارف (دلار بر سال)	هزینه کل (دلار بر سال)	تلفات اکتیو کل (کیلووات)	حداقل ولتاژ (شین‌ها) (پریونیت)
حالت پایه	-	۱۳۷۹۳۸/۵۳۱	۸۶۹۹۰۹/۵۸۷	-	۲۱۴۷۰۴۳/۶۱۲	۳۱۵۴۸۹۱/۷۳۰	۲۲۴/۹	۰/۹۰۹ (۶۵)
روش پیشنهادی مبتنی شاخص ترکیبی	۱۰ شین برتر شاخص ترکیبی	۶۴۳۳/۹۷۸	۱۰۲۵۶۹/۶۷۶	۷۵۷۸۵۵/۰۲۰	۱۱۷۰۸۷۲/۹۲۵	۲۰۳۷۷۳۱/۵۹۹	۳۷	۰/۹۷۲ (۶۱)
مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته	۱۰ مکان بهینه مدل مرجع	۶۳۷۲/۲۰۸	۱۰۲۶۸۴/۱۷۲	۷۵۷۸۵۵/۰۲۰	۱۱۷۰۶۸۲/۹۵۰	۲۰۳۷۵۹۴/۳۵	۳۶	۰/۹۷۲ (۶۱،۶۲)

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

تحلیل مقادیر مندرج در جدول (۴) نشان می‌دهد که استفاده از مکان‌های پیشنهادی شاخص ترکیبی، موجب بهبود قابل‌توجه عملکرد سیستم نسبت به حالت پایه شده است. نکته حائز اهمیت، انطباق بالای نتایج سناریوی دوم، یعنی روش پیشنهادی مبتنی بر شاخص ترکیبی، با سناریوی سوم، یعنی مدل مرجع، است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکاف هزینه بین روش پیشنهادی و مدل مرجع بسیار ناچیز و برابر با ۰/۰۰۶۷ درصد است. این اختلاف اندک در مقادیر هزینه‌ای نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی توانسته است مکان‌هایی را شناسایی کند که از نظر اقتصادی و فنی، عملکردی بسیار نزدیک به مکان‌های بهینه حاصل از مدل مرجع دارند. باتوجه‌به اینکه در هر دو سناریو، مکان‌ها ثابت در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی صرفاً در سطح تعیین ظرفیت واحدهای تولید پراکنده انجام شده است، نزدیکی نتایج حاصل‌شده را می‌توان مستقیماً به کیفیت مکان‌های انتخاب‌شده نسبت داد. ازاین‌رو، انطباق بالای خروجی‌ها نشان می‌دهد که مکان‌های معرفی‌شده توسط شاخص ترکیبی، از نظر عملکرد اقتصادی و فنی، به مکان‌های بهینه مدل مرجع نزدیک هستند.

علاوه بر جنبه اقتصادی، از نظر فنی نیز روش پیشنهادی توانسته است به مقادیری در کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ دست یابد که با نتایج مدل مرجع انطباق قابل‌توجهی دارد. این نتایج تأیید می‌کند که شاخص ترکیبی پیشنهادی، باوجود سادگی محاسباتی و بدون نیاز به حل مستقیم مسائل پیچیده برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته در مرحله جایابی، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم یار قابل‌اعتماد برای شناسایی شین‌های دارای اولویت بالا جهت نصب واحدهای تولید پراکنده مورداستفاده قرار گیرد؛ بنابراین، روش پیشنهادی علاوه بر برخورداری از ساختار محاسباتی ساده‌تر، از نظر کیفیت خروجی نیز عملکردی نزدیک به مدل مرجع ارائه می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آینده

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب شاخص‌محور برای اولویت‌بندی شین‌های نامزد نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع ارائه شد. نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۶۹ شینه IEEE نشان داد که شین‌های دارای اولویت بالا عمدتاً در نواحی پایین‌دست و انتهایی فیدرها قرار می‌گیرند؛ نواحی‌ای که از منظر افت ولتاژ، حساسیت تلفات و ارزش اقتصادی تزریق توان، بیشترین آمادگی را برای استقرار واحدهای تولید پراکنده دارند. این موضوع بیانگر آن است که رتبه‌بندی حاصل از شاخص ترکیبی، افزون بر کارایی عددی، با منطق فنی و ساختار فیزیکی شبکه نیز سازگار است.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ۱۴ شین نخست، معادل ۲۰ درصد برتر شین‌های نامزد، در برابر تغییرات ۲۰ درصدی وزن شاخص‌ها پایدار باقی می‌مانند. این پایداری بیانگر آن است که عملکرد روش پیشنهادی به یک تنظیم خاص از وزن‌ها وابسته نیست و اولویت‌بندی نهایی، حاصل تلفیق متوازن ملاحظات فنی و اقتصادی است، نه غلبه یک شاخص منفرد. ازاین‌رو، می‌توان روش پیشنهادی را از منظر قابلیت اعتماد، مناسبِ استفاده در مطالعات برنامه‌ریزی شبکه دانست.

اعتبارسنجی نتایج با مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته نشان داد که تمامی ۱۰ مکان بهینه شناسایی‌شده توسط مدل مرجع، در میان ۱۴ شین برتر شاخص ترکیبی قرار دارند. به‌عبارت‌دیگر، روش پیشنهادی در سطح ۲۰ درصد نخست شین‌های نامزد به هم‌پوشانی ۱۰۰ درصدی با مدل مرجع دست‌یافته است. همچنین، ۶۰ درصد از مکان‌های منتخب مدل مرجع در میان ۱۰ شین نخست رتبه‌بندی پیشنهادی قرار گرفته‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی پیشنهادی از توان مناسبی برای شناسایی شین‌های مؤثر جهت نصب واحدهای تولید پراکنده برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم یار معتبر به کار گرفته شود.

مقایسه فنی - اقتصادی نیز مؤید نزدیکی عملکرد روش پیشنهادی به مدل مرجع بود. در شرایطی که ظرفیت واحدهای تولید پراکنده برای مکان‌های منتخب هر دو روش به‌صورت بهینه تعیین شد، شکاف هزینه میان دو روش تنها ۰/۰۰۶۷درصد به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

دست آمد. این اختلاف ناچیز نشان می‌دهد که مکان‌های معرفی‌شده توسط شاخص ترکیبی، از نظر اثرگذاری بر هزینه کل سیستم، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ، عملکردی بسیار نزدیک به جواب مرجع دارند.

در مجموع، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی توانسته است میان دقت روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و سادگی روش‌های شاخص‌محور توازن مناسبی برقرار سازد. مزیت اصلی این چارچوب، فراهم‌کردن یک مبنای سریع، شفاف و قابل‌تفسیر برای اولویت‌بندی شین‌های نامزد است؛ قابلیتی که می‌تواند در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه و برنامه‌ریزی فنی - اقتصادی شبکه‌های توزیع، به‌ویژه برای برنامه‌ریزان شبکه و شرکت‌های توزیع، مفید و کاربردی باشد. باوجوداین، تعمیم کمی نتایج به شبکه‌های بزرگ‌تر و شرایط بهره‌برداری متنوع‌تر، مستلزم ارزیابی‌های تکمیلی است.

۵-۲- پیشنهادها برای کارهای آینده

باوجود نتایج مطلوب این مقاله، توسعه چارچوب پیشنهادی در چند مسیر می‌تواند موضوع مطالعات آینده قرار گیرد. نخست، بررسی عملکرد روش در سناریوهای مختلف بارگذاری، سطوح نفوذ متفاوت تولید پراکنده و شرایط بهره‌برداری متغیر می‌تواند به ارزیابی بهتر قابلیت تعمیم آن کمک کند. همچنین، ازآنجاکه ارزیابی عددی این مقاله بر یک شبکه آزمون مرجع ۶۹ شینه متمرکز بوده است، بررسی عملکرد روش در شبکه‌های بزرگ‌تر، ساختارهای چند فیدری، شرایط بارگذاری سنگین و داده‌های واقعی، برای قضاوت دقیق‌تر درباره تعمیم‌پذیری آن ضروری است.

دوم، درنظرگرفتن انواع مختلف واحدهای تولید پراکنده، به‌ویژه واحدهای تجدیدپذیر مانند واحدهای خورشیدی و بادی، همراه با مدل‌سازی عدم قطعیت توان خروجی آن‌ها، می‌تواند چارچوب پیشنهادی را برای کاربرد در شبکه‌های توزیع فعال و هوشمند توسعه دهد. از دیگر محدودیت‌های مطالعه حاضر، فرض قطعی بودن شرایط بهره‌برداری و عدم مدل‌سازی صریح عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر است. توسعه چارچوب پیشنهادی در قالب روش‌های سناریو محور، تصادفی یا مقاوم می‌تواند برای ارزیابی پایداری رتبه‌بندی در برابر نوسانات بار و تولید، در مطالعات آینده مدنظر قرار گیرد.

سوم، در این مقاله سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری مدل‌سازی نشده‌اند؛ زیرا لحاظ‌کردن آن‌ها مستلزم تعریف متغیرهای زمانی، قیود شارژ و دشارژ، و مدل‌سازی بین دوره‌ای است که فراتر از دامنه رتبه‌بندی ایستای موردنظر این مقاله قرار می‌گیرد. توسعه چارچوب پیشنهادی برای جایابی هم‌زمان تولید پراکنده و ذخیره‌ساز می‌تواند در پژوهش‌های آینده دنبال شود.

چهارم، در نسخه حاضر شاخص‌های زیست‌محیطی به‌صورت صریح در شاخص ترکیبی لحاظ نشده‌اند؛ زیرا تمرکز مطالعه بر استخراج و تجمیع شاخص‌های فنی - اقتصادی مبتنی بر پخش بار بهینه جریان متناوب با حفظ سادگی تفسیری و بار محاسباتی پایین بوده است. بااین‌حال، افزودن معیارهایی مانند انتشار آلاینده‌ها یا هزینه‌های زیست‌محیطی می‌تواند در توسعه‌های بعدی، به‌ویژه در ارزیابی انواع مختلف منابع تولید پراکنده، مورد بررسی قرار گیرد.

پنجم، در این مقاله اثر برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا به‌صورت صریح لحاظ نشده و بار شبکه ثابت فرض شده است. ازآنجاکه پاسخ‌گویی بار می‌تواند شاخص‌هایی مانند تلفات، انحراف ولتاژ و ارزش مکانی تزریق توان را تغییر دهد، بررسی اثر هم‌زمان مدیریت سمت تقاضا و جایابی تولید پراکنده بر رتبه‌بندی شین‌ها، یکی دیگر از مسیرهای مهم برای توسعه این چارچوب در مطالعات آینده است.

ششم، در نسخه حاضر، اعتبارسنجی روش عمدتاً بر مقایسه با مدل مرجع برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته متمرکز بوده است. مقایسه تطبیقی دقت رتبه‌بندی و زمان محاسباتی این چارچوب با سایر شاخص‌ها و روش‌های غربال‌گری متداول، مانند شاخص‌های ولتاژی و حساسیتی رایج، می‌تواند در پژوهش‌های آینده برای ارزیابی جامع‌تر مزایا و محدودیت‌های روش انجام شود.

پیوست الف - وزن نهایی شاخص‌ها در سناریوهای تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی پایداری رتبه‌بندی شین‌های نامزد نسبت به تغییرات وزن شاخص‌ها، تحلیل حساسیت با افزایش و کاهش ۲۰ درصدی وزن هر یک از شاخص‌های اصلی انجام شد. در هر سناریو، وزن شاخص موردنظر به میزان ۲۰ درصد افزایش یا کاهش

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

داده شد و سپس وزن‌های سه شاخص نرمال‌سازی شدند تا مجموع آن‌ها برابر با یک باقی بماند. جدول (الف-۱) وزن نهایی شاخص‌ها را در حالت پایه و در سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت نشان می‌دهد.

در این جدول، w_{LSF}، w_{VDI} و w_{LMP} به ترتیب بیانگر وزن شاخص ضریب حساسیت تلفات، وزن شاخص انحراف ولتاژ و وزن قیمت نهایی مکانی هستند.

Table (A-1): Final indicator weights under the sensitivity analysis scenarios

جدول (الف-۱): وزن نهایی شاخص‌ها در سناریوهای تحلیل حساسیت

توضیح سناریو	w_{LSF}	w_{VDI}	w_{LMP}
حالت پایه	۰/۳۴۰	۰/۳۲۰	۰/۳۴۰
افزایش ۲۰ درصدی وزن شاخص ضریب حساسیت تلفات	۰/۴۰۸	۰/۲۸۷	۰/۳۰۵
کاهش ۲۰ درصدی وزن شاخص ضریب حساسیت تلفات	۰/۲۷۲	۰/۳۵۳	۰/۳۷۵
افزایش ۲۰ درصدی وزن شاخص انحراف ولتاژ	۰/۳۰۸	۰/۳۸۴	۰/۳۰۸
کاهش ۲۰ درصدی وزن شاخص انحراف ولتاژ	۰/۳۷۲	۰/۲۵۶	۰/۳۷۲
افزایش ۲۰ درصدی وزن قیمت نهایی مکانی	۰/۳۰۵	۰/۲۸۷	۰/۴۰۸
کاهش ۲۰ درصدی وزن قیمت نهایی مکانی	۰/۳۷۵	۰/۳۵۳	۰/۲۷۲

References

[1] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, "Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research, vol. 57, pp. 195-204, Apr. 2001 (doi: 10.1016/s0378-7796(01)00101-8).

[2] P. Prakash, D. K. Khatod, "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 111-130, May 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2015.12.099).

[3] A. Ali, M. U. Keerio, J. A. Laghari, "Optimal site and size of distributed generation allocation in radial distribution network using multi-objective optimization", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, pp. 404-415, 2021 (doi: 10.35833/mpce.2019.000055).

[4] H. Gao, R. Diao, Y. Zhong, R. Zeng, Q. Wu, S. Jin, "Optimal allocation of distributed generation in active distribution power network considering HELM-based stability index", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 155, p. 109508, Jan. 2024 (doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109508).

[5] G. Memarzadeh, F. Keynia, "A new index-based method for optimal DG placement in distribution networks", Engineering Reports, vol. 2, Jul. 2020 (doi: 10.1002/eng2.12243).

[6] S. S. Parihar, N. Malik, "Optimal allocation of renewable DGs in a radial distribution system based on new voltage stability index", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, Feb. 2020 (doi: 10.1002/2050-7038.12295).

[7] S. Nematshahi, H. Rajabi Mashhadi, "Application of distribution locational marginal price in optimal simultaneous distributed generation placement and sizing in electricity distribution networks", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 29, p. e2837, Jan. 2019 (doi: 10.1002/2050-7038.2837).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

[8] T. E. Gümüş, S. Emiroglu, M. A. Yalcin, "Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin-based impedance stability index", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 144, p. 108555, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108555).
[9] A. Eid, "Allocation of distributed generations in radial distribution systems using adaptive PSO and modified GSA multi-objective optimizations", Alexandria Engineering Journal, vol. 59, pp. 4771-4786, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.aej.2020.08.042).
[10] H. M. H. Farh, A. M. Al-Shaalan, A. M. Eltamaly, A. A. Al-Shamma'a, "A novel severity performance index for optimal allocation and sizing of photovoltaic distributed generations", Energy Reports, vol. 6, pp. 2180-2190, Nov. 2020 (doi: 10.1016/j.egyr.2020.07.016).
[11] M. I. Akbar, S. A. B. Kazmi, O. Alrumayh, Z. A. Khan, A. Altamimi, M. M. Malik, "A novel hybrid optimization-based algorithm for the single and multi-objective achievement with optimal DG allocations in distribution networks", IEEE Access, vol. 10, pp. 25669-25687, 2022 (doi: 10.1109/access.2022.3155484).
[12] I. Khenissi, T. Guesmi, B. M. Alshammari, K. Alqunun, A. Almalaq, M. Alturki, R. Neji, "A hybrid chaotic bat algorithm for optimal placement and sizing of DG units in radial distribution networks", Energy Reports, vol. 12, pp. 1723-1741, Dec. 2024 (doi: 10.1016/j.egyr.2024.07.042).
[13] A. M. Alazab, H. Kanaan, M. I. Elsayed, "Enhancing voltage stability index and reducing power loss through optimal sizing and placing of distribution generation types using puma optimization algorithm", Scientific African, vol. 29, p. e02920, Sep. 2025 (doi: 10.1016/j.sciaf.2025.e02920).
[14] S. Kaur, G. Kumbhar, J. Sharma, "A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 63, pp. 609-617, Dec. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.023).
[15] M. Z. Iftikhar, K. Imran, "Network reconfiguration and integration of distributed energy resources in distribution network by novel optimization techniques", Energy Reports, vol. 12, pp. 3155-3179, Dec. 2024 (doi: 10.1016/j.egyr.2024.08.067).
[16] A. Kumar, W. Gao, "Optimal distributed generation location using mixed integer non-linear programming in hybrid electricity markets", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 4, pp. 281-298, Feb. 2010 (doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0026).
[17] J. Han, M. Kamber, J. Pei, Data Mining: Concepts and Techniques. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2012.
[18] M. Pesaran, A. A. M. Zin, A. Khairuddin, O. Shariati, "Optimal sizing and siting of distributed generators by a weighted exhaustive search", Electric Power Components and Systems, vol. 42, no. 11, pp. 1131-1142, Jul. 2014 (doi: 10.1080/15325008.2014.921947).
[19] N. Rehman, M. Mufti, N. Gupta, "Analytical index-based allocation and sizing of Lambert-W modeled PV in an active distribution network", Energy Conversion and Management: X, vol. 17, p. 100334, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100334).
[20] K. Y. Liu, W. Sheng, Y. Liu, X. Meng, Y. Liu, "Optimal siting and sizing of DGs in distribution system considering time-sequence characteristics of loads and DGs", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 69, pp. 430-440, Jul. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.033).
[21] M. H. Moradi, S. M. R. Tousi, M. Abedini, "Multi-objective PFDE algorithm for solving the optimal siting and sizing problem of multiple DG sources", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 56, pp. 117-126, Mar. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2013.11.014).
[22] A. El-Fergany, "Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 1197-1205, Jan. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.09.020).
[23] S. Sharma, S. Bhattacharjee, A. Bhattacharya, "Quasi-oppositional swine influenza model-based optimization with quarantine for optimal allocation of DG in radial distribution network", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 74, pp. 348-373, Jan. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.034).
[24] M. McGill, M. Koll, T. Noreault, "An evaluation of factors affecting document ranking by information retrieval systems", School of Information Studies, Syracuse University, Syracuse, NY, USA, Tech. Rep., Oct. 1979.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

[25] M. Chakravorty, D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 23, pp. 129-135, Feb. 2001 (doi: 10.1016/S0142-0615(00)00040-5).
[26] A. Rahideh, M. Mallaki, M. Najafi, A. Ghasemi, "Multi-objective placement and sizing of energy hubs in energy networks considering generation and consumption uncertainties", Heliyon, vol. 10, p. e31843, Jun. 2024 (doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31843).
[27] A. P. Agalgaonkar, S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, S. A. Soman, "Placement and penetration of distributed generation under standard market design", International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 1, Sep. 2004 (doi: 10.2202/1553-779x.1003).
[28] S. Abapour, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, "Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 9, no. 13, pp. 1455-1463, Sep. 2015 (doi: 10.1049/iet-gtd.2014.1143).
[29] M.-R. Haghifam, H. Falaghi, O. P. Malik, "Risk-based distributed generation placement", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 2, no. 2, pp. 252-260, Mar. 2008 (doi: 10.1049/iet-gtd:20070046).

زیرنویس‌ها:

1. Radial distribution networks (RDN)
2. Reactance-to-resistance ratio
3. Distributed generation (DG)
4. Metaheuristic algorithms
5. Hybrid methods
6. Locational marginal price (LMP)
7. Alternating current optimal power flow
8. Candidate buses
9. Composite index (CI)
10. Loss sensitivity factor (LSF)
11. Voltage deviation index (VDI)
12. Inverse accumulated weighting
13. Validation
14. Mixed-integer nonlinear programming (MINLP)
15. Test system
16. Sensitivity analysis
17. Non-linear programming (NLP)

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.571] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026