



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 4, 2021
Research Paper

Optimal Placement of Distribution substations with The Purpose of Reducing Losses and Energy Not Supplied by A Multi-Objective Function and Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm

Heshmatallah Nourizadeh¹, Mohsen Niasati²

^{1,2} Dept. of Electrical Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

Abstract:

Due to the increasing load growth and expansion and significant changes in structure of electricity distribution networks, the issues related to the optimization of these networks face many challenges. Optimal placement and capacity of Distribution substations and their feeder networks are among the important issues of optimization of distribution networks from technical and economic viewpoints. In this paper, considering two important factors including loss reduction and improvement of reliability in distribution networks, a new multi-objective function was presented for optimal placement of location and capacity of Distribution substations based on their service area. The proposed objective function includes all construction and operation costs of equipment, loss costs, and reliability index (Energy Not Supplied). The Artificial Bee Colony (ABC) algorithm was applied to optimize the proposed objective function with the purpose of determining the optimal placement and capacity of substations of two sample distribution networks. A comparison of results obtained from optimization of the proposed objective function by the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm with results of other algorithms in two sample networks indicates the efficiency and effectiveness of the proposed algorithm and objective function.

Keywords: Artificial bee colony algorithm (ABC), Distribution substations, Distribution Network, Optimal Placement, Reliability, Reduce losses.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.121806.1339>

مقاله پژوهشی

جایابی بهینه پست‌های توزیع به منظور کاهش تلفات و انرژی تأمین‌نشده به وسیله تابع

هدف چندمنظوره و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل

حشمت‌الله نوری زاده^۱، محسن نیاستی^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران

heshmat_norizadeh@semnan.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان - سمنان- ایران

Mniasati@Semnan.ac.ir

چکیده: به دلیل رشد و توسعه روزافزون بار و تغییرات زیاد ساختار شبکه‌های توزیع برق، مسائل مربوط به بهینه‌سازی این شبکه‌ها دارای چالش‌های متعددی است. جایابی و تعیین ظرفیت بهینه پست‌های توزیع و شبکه تغذیه‌کننده آنها از جمله مسائل مهم بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع از لحاظ فنی و اقتصادی است. در این مقاله، با در نظر گرفتن دو عامل مهم کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، یک تابع هدف چندمنظوره جدید برای جایابی مکان و ظرفیت بهینه پست‌های توزیع بر اساس حوزه تحت سرویس آنها ارائه شد. تابع هدف پیشنهادی شامل کلیه هزینه‌های احداث و بهره‌برداری تجهیزات، هزینه تلفات و نیز شاخص قابلیت اطمینان (انرژی تأمین‌نشده) می‌شود. از الگوریتم کلونی زنبورعسل برای بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی به منظور تعیین ظرفیت و جایابی بهینه پست‌های دو شبکه توزیع نمونه استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی با الگوریتم کلونی زنبورعسل با نتایج سایر الگوریتم‌ها در دو شبکه نمونه، کارایی و اثربخشی الگوریتم و تابع هدف پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم کلونی زنبورعسل، پست‌های توزیع، جایابی بهینه، شبکه‌های توزیع، قابلیت اطمینان، کاهش

تلفات.

۱- مقدمه

بهره‌برداری، نگهداری و ساخت شبکه و هم‌زمان بالابردن قابلیت اطمینان شبکه و مشترکین، هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی است [۱،۲].

در همین راستا، یکی از مؤثرترین روش‌ها در بهبود طراحی شبکه‌های آینده یا توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های موجود برای پاسخگویی به رشد بار و نیز افزایش قابلیت اطمینان، جایابی بهینه پست‌های توزیع است [۳-۵]. با توجه به پیچیدگی، غیرخطی و گسستگی مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع، به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع، امری اجتناب‌ناپذیر است.

در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل (ABC)^۱ به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی اکتشافی توسعه‌یافته برای

با توجه به اینکه برنامه‌ریزی و توسعه بلندمدت شبکه‌های توزیع به دلیل روند رو به رشد خصوصی‌سازی و افزایش چگالی، بارها به دلیل افزایش رشد روزافزون بار از ابعاد مختلف دارای پیچیدگی‌های متعددی است، یکی از اهداف مهم طراحان شبکه‌های توزیع، کاهش هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری و

^x تاریخ ارسال مقاله: ۹۸/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۱۷

نام نویسنده مسئول: محسن نیاستی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

الگوریتم ژنتیک با یک کدبندی پیشنهادی استفاده شده است. هزینه‌های مسئله شامل هزینه نصب و ارتقای ترانسفورماتورهای جدید و موجود، پست‌ها، فیدرها، منابع تولید پراکنده و هزینه تلفات است؛ اما قابلیت اطمینان و هزینه‌های مربوط در نظر گرفته نشده‌اند.

در [۱۶]، یک راه‌حل جدید برای برنامه‌ریزی توسعه بهینه پست‌های توزیع ارائه شده که از بردار شاخص هزینه برای پیدا کردن محل بهینه سرویس‌دهی پست، استفاده کرده است. در این مطالعات، مدل بار به صورت فازی در نظر گرفته شده و مدل هزینه لحاظ نشده است. مسئله مکان‌یابی بهینه پست‌های توزیع LV/MV با الگوریتم رقابتی استعماری (ICA) با هدف کاهش هزینه و تلفات شبکه توزیع در [۱۷] انجام شده است. برای حل مسئله مکان‌یابی بهینه پست‌های توزیع یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) با دو تابع هدف هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سالانه به همراه تعدادی از قیود فنی و اقتصادی در [۱۸] ارائه شده است. همچنین برای نشان دادن کارایی و صحت کار، مدل ارائه شده روی سیستم تست ۵۴ گره و سیستم توزیع واقعی ۲۰۱ گره پیاده‌سازی شده است. در مقاله [۱۹]، یک روش جدید مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی (k -means) برای تعیین محل، اندازه و ظرفیت بهینه پست‌های توزیع ارائه شد که تابع هدف شامل تلفات و هزینه‌های (سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و تلفات) است؛ اما در آن، محدودیت‌های الکتریکی به طور کامل لحاظ نشده است. در [۲۰]، یک مدل بهینه‌سازی MILP برای مدیریت و برنامه‌ریزی بلندمدت ظرفیت ترانسفورماتورهای توزیع پیشنهاد شده است. در این مدل، هزینه‌های فعلی برای سرمایه‌گذاری، تلفات، تعمیر و نگهداری و ارزش بازیابی ترانسفورماتورها برای انتخاب بهینه ترانسفورماتورهای توزیع ارائه شده است. یک مدل برنامه‌ریزی برای یافتن مکان بهینه پست‌های توزیع برای یک افق مشخص با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم ترکیبی مبتنی بر موقعیت جغرافیایی با روش رقابت جمعیت (BBOP) در [۲۱] ارائه شده است.

در مقاله [۲۲]، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) برای برنامه‌ریزی مسئله مکان‌یابی پست‌های توزیع، تعیین اندازه، ظرفیت و مکان پست‌های فشار ضعیف و فشار متوسط پیشنهاد شده است. در این مطالعه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و

حل مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع (تعیین محل، ظرفیت بهینه و حوزه تحت سرویس با رویکرد به حداقل رساندن هزینه‌ها (سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان) و بهبود پارامترهای قابلیت اطمینان با توجه به محدودیت‌های الکتریکی) استفاده شده است.

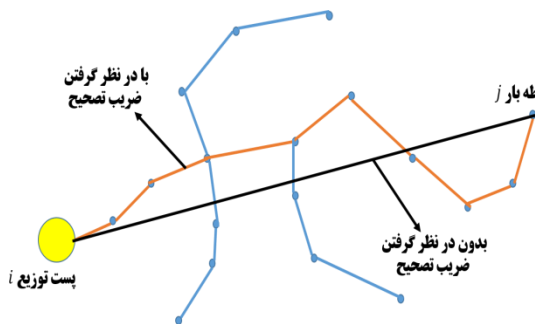
تا کنون مطالعات متعددی در خصوص جایابی بهینه پست‌های توزیع انجام شده است؛ برای نمونه، در مقالات [۵-۱]، بازبینی جامع از کلیات جایابی بهینه پست‌های توزیع ارائه شده است. یک رویکرد جدید برای تعیین بهینه مکان، ظرفیت، اندازه و حوزه سرویس‌دهی پست‌های LV/MV در [۶] ارائه و از روش‌های ریاضیاتی برای حل مسئله استفاده شده است؛ اما از مدل تلفات صرفه نظر شده است. از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۲ به همراه یک الگوریتم پخش بار معمولی برای حل مسئله برنامه‌ریزی شبکه توزیع در پژوهش انجام شده در [۷] استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش، به حداقل رساندن هزینه‌های ثابت، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در فیدرها و پست‌ها و هزینه‌های متغیر مرتبط با بهره‌برداری از شبکه توزیع است. همچنین به منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده، مطالعات روی دو شبکه واقعی انجام شده است. در مرجع [۸]، از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ممنوعه برای حل یک مدل فازی چندهدفه برای جایابی بهینه پست‌های شبکه توزیع استفاده شده است که به بهینه‌سازی تابع هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، کاهش هزینه‌های شبکه‌های توزیع شهری و همچنین تعیین اندازه و مکان بهینه فیدرهای توزیع می‌پردازد.

همچنین تا کنون برای حل مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی از جمله الگوریتم کلونی مورچگان [۹]، الگوریتم ژنتیک^۳ [۱۰]، الگوریتم جستجوی ممنوعه^۴ [۱۱]، الگوریتم اکتشافی سازنده^۵ [۱۲]، الگوریتم دیفرانسیل تکامل^۶ [۱۳] استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین اندازه، ظرفیت و مکان پست‌های توزیع با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری استفاده شد؛ ولی سایر هزینه‌ها و تلفات در نظر گرفته نشده‌اند [۱۴]. در مرجع [۱۵]، برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف، یک ساختار دوسطحی به صورت یک مدل غیرخطی آمیخته عدد صحیح با لحاظ کردن منابع تولید پراکنده در شبکه فشار ضعیف ارائه شده است. به منظور بهینه‌سازی این مسئله از

تلفات ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار تلفات به صورت $R.I^2$ است، برای کمینه کردن تلفات به دلیل اینکه متناسب با P_i^2 و R متناسب است، شاخص تلفات به صورت $P_i^2 Dist_{ij}$ است که برای هرکدام از بارها و پست‌ها تعریف شده است. در مبحث جاییابی پست‌های توزیع، هدف انتخاب بهترین مکان از بین نقاط کاندیدا است؛ به نحوی که کمترین هزینه‌ها و کمترین تلفات ممکن حاصل شود. مزیت عمده این تابع هدف، دقت بالا به علت در نظر گرفتن بیشتر محدودیت‌های بهره‌برداری سیستم توزیع است. به منظور واقعی‌تر شدن مسئله، یک ضریب تصحیح نیز در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱) مقدار متوسط فاصله هر موقعیت از پست توزیع تقریباً ۱,۵۵ برابر است. انحراف استاندارد نمونه‌های آماری ۸٪ است؛ از این رو، میانگین ارزش محاسبه شده پذیرفتنی است.

۲-۱- هزینه‌های سرمایه‌گذاری

این بخش از تابع هدف، شامل هزینه خرید زمین، هزینه خرید تجهیزات اولیه، هزینه اولیه فیدها و در صورت لزوم، هزینه خرید و نصب فیدر و کابل که در این تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین، هزینه‌های سرمایه‌گذاری به صورت روابط (۲) تا (۹) و در ادامه اطلاعات مربوط به



شکل (۱): نمایش گرافیکی ضریب تصحیح

متغیرهای مسئله در جدول پیوست (۱) آورده شده است

[۱۶, ۲۲].

$$C_{Inv} = C_{BL} + C_{PPE} + C_{Inflv} + C_{Dflv} + C_{Ins_trans} \quad (2)$$

بهره‌برداری به همراه تلفات در نظر گرفته شده‌اند؛ اما تأثیر قابلیت اطمینان در سیستم توزیع در مسئله بهینه‌سازی بررسی نشده است.

در این مقاله، یک تابع هدف چندمنظوره برای برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌های توزیع، با هدف در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و بهبود آن با استفاده از تعیین بهترین مکان نصب پست‌های توزیع و همچنین به حداقل رساندن تلفات و هزینه‌ها (شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان) ارائه شده و برای بالابردن دقت تابع هدف از ۱۲ قید فنی حاکم بر شبکه استفاده شده است. علاوه بر این، برای نزدیک‌بودن روش به طراحی‌های واقعی از هر دو نوع پست‌های هوایی و زمینی با ظرفیت‌های متفاوت بهره برده است.

بخش‌های مختلف مقاله در ادامه به شرح زیرند: در بخش دوم، مدل‌سازی و تحلیل ریاضی مسئله بررسی می‌شود. در بخش سوم، قیود حاکم بر شبکه، معرفی و در بخش چهارم و پنجم، شبکه مطالعه شده، معرفی، شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده بررسی شده‌اند.

۲-۲- مدل‌سازی و تحلیل ریاضی مسئله

از اطلاعات اصلی و ضروری برای جاییابی بهینه پست‌های توزیع، اطلاعات مربوط به برآورد بار بلندمدت منطقه مطالعه شده برای سال افق طراحی است. اطلاعات مربوط به برآورد بار براساس پیش‌بینی بار بلندمدت آمده است. در این مقاله، مطابق رابطه (۱)، یک تابع هدف چندمنظوره برای حداقل کردن هزینه و تلفات شبکه به همراه بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است [۳, ۲۰, ۲۱, ۲۲]:

$$TCOP = \min \sum_{i=1}^N (C_{Inv} + C_{ope} + C_R) + \theta \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} IL_{ij} \quad (1)$$

تابع هدف به دو بخش تقسیم شده که بخش اول، شامل هزینه‌ها و بخش دوم، شامل تلفات توان است. هزینه‌ها به عنوان بخش اول در این تابع هدف در سه بخش در نظر گرفته شده‌اند. در بخش اول، هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری، در بخش دوم هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و در بخش سوم هزینه‌های مربوط به قابلیت اطمینان پرداخته شده‌اند. در بخش دوم از تابع هدف، شاخص تلفات در فیدر فشار ضعیف براساس کمینه‌کردن

جایابی بهینه پست‌های توزیع به منظور کاهش تلفات و انرژی تأمین نشده به وسیله تابع هدف

اضافه بار پیش‌بینی شده را برطرف کرد؛ در غیر این صورت، دچار اضافه بار خواهد شد. به این منظور در این بخش، ضریب اضافه بار در ظرفیت پست‌های توزیع اعمال می‌شود که مطابق رابطه (۹) تعیین می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به متغیرهای مسئله در جدول پیوست (۲) آورده شده است [۱۴].

$$W = \frac{(1+G)^{Year}}{F_{LS} + F_{ols}} \quad (9)$$

۲-۲- هزینه‌های بهره‌برداری

این بخش از تابع هدف شامل دو قسمت است؛ بخش اول مربوط به هزینه‌های تلفات پست‌ها و فیدهای تعیین شده است. در بخش دوم، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری از پست‌های توزیع و فیدها و نیز هزینه‌های بهره‌برداری از آنها بیان شده که با توجه به نوع و ظرفیت هر پست توزیع برابر با یک مقدار مشخص است؛ بنابراین، هزینه‌های بهره‌برداری به صورت روابط (۱۰) تا (۱۷) [۱۰، ۱۴] و نیز برخی اطلاعات مربوط به متغیرها در جدول پیوست (۱) و (۲) آورده شده است.

$$C_{Opa} = C_{losses_flv} + C_{losses_cu} \quad (10)$$

$$+ C_{Losses_core} + C_{Rm_sub} + C_{Rm_feeder}$$

$$C_{losses_flv} = \left[\sum_{i=1}^{n_{sub}} \sum_{j=1}^{n_{loadj}} 3.zm_{ij} . Im_{ij}^2 \right] LSF . \alpha . \sigma . \varphi \quad (11)$$

$$C_{losses_cu} = \left[\sum_{i=1}^{n_{sub}} \delta_i . P_{cui} . (F_{ope_trans})^2 \right] LSF . \alpha . \sigma . \varphi \quad (12)$$

$$C_{Losses_core} = \left[\sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i . P_{corei} \right] \alpha . \sigma . \varphi \quad (13)$$

$$C_{Rm_sub} = 0.15 . \left[\sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i . C_{ope_subi} \right] \alpha . \sigma . \varphi \quad (14)$$

$$C_{Rm_feeder} = \left[\sum_{i=1}^{n_{sub}} \sum_{j=1}^{n_{loadj}} C_{ope_fdij} . Dist_{ij} \right] . \varphi \quad (15)$$

$$= \%20V_{mf}$$

در این بخش از تابع هدف، در قسمت اول به هزینه تلفات در فیدها، قسمت دوم و سوم به هزینه تلفات در ترانسفورماتورها (شامل تلفات مسی و تلفات آهنی)، قسمت چهارم هزینه‌های تعمیرات و نگهداری از پست‌ها و در نهایت در

$$C_{BL} = \sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i . C_{Bgi} . Dimensions \quad (3)$$

$$C_{PPE} = \sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i . C_{Trans_eque} \quad (4)$$

$$C_{Inflv} = \sum_{i=1}^{n_{sub}} \sum_{j=1}^{n_{loadj}} V_{mf} . Dist_{ij} \quad (5)$$

$$C_{Dflv} = D_c (KVA) . 3.R . \frac{I_{LOADn}^2}{1000} \quad (6)$$

$$C_{Ins_trans} = \sum_{i=1}^{n_{Block}} CB_{PTi} (F_i (KVA) * W) \quad (7)$$

هزینه‌های سرمایه‌گذاری به پنج قسمت تقسیم شده‌اند که قسمت اول آن، مربوط به هزینه خرید زمین مورد نیاز برای احداث پست‌های توزیع مدنظر است. در واقع این هزینه از نوع هزینه ثابت است و در ابتدای دوره مورد مطالعه در نظر گرفته خواهد شد. قسمت دوم مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل (هزینه خرید ترانسفورماتورها و تجهیزات مرتبط با آن و ساخت پست‌ها) است. قسمت سوم، مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه فیدهای فشار ضعیف هزینه‌های (سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه احداث)، قسمت چهارم مربوط به هزینه دیماندا فیدهای فشار ضعیف است. در واقع هزینه دیماندا، هزینه‌ای است که به صورت پرداخت‌های سالیانه دریافت شده و شامل هزینه تلفات فیدر و هزینه مربوط به افزایش سرمایه‌گذاری در بخش انتقال توان است. قسمت پنجم، بخش پایانی، به منظور مدل‌کردن هزینه‌های مربوط به نصب ترانسفورماتورها ارائه شده است. برای کمینه‌سازی فاصله بین بارها و پست‌های توزیع از معیار تلفات و معیار نزدیک‌ترین فاصله، مطابق با رابطه (۸) استفاده شده است [۲۱].

$$Dist_{ij} = \sqrt{(X_{subi} - X_{loadj})^2 + (Y_{subi} - Y_{loadj})^2} \quad (8)$$

با توجه به افزایش رشد، بارها در منطقه مدنظر، شبکه دچار افت ولتاژ یا کمبود ظرفیت پست‌های موجود می‌شود. در این حالت، اگر پست‌های توزیع مربوط، توانایی تأمین اضافه‌بار پیش‌بینی شده را داشته باشند، می‌توان با افزایش ظرفیت، مشکل

قسمت دوم، شاخص‌های مربوط به بار و انرژی بررسی می‌شوند. این شاخص‌ها به علت واقعی‌تر بودن شرایط، ارزیابی عادلانه‌تری از قابلیت اطمینان سیستم فراهم می‌آورند. در ادامه، شاخص‌های مربوط به بار و انرژی به صورت رابطه (۲۱) آورده شده‌اند.

$$C_{InterENS} = (ENS * W_{ENS}) \quad (21)$$

۳- معرفی محدودیت‌های حاکم بر شبکه

برای رسیدن به نقطه بهینه در مسئله بهینه‌سازی باید محدودیت‌های اعمال شود که باعث افزایش سرعت رسیدن به جواب بهینه شود. در ادامه، این محدودیت‌ها به صورت روابط (۲۲) تا (۳۲) آورده شده است.

* محدودیت تغذیه شدن تمامی بارها

$$\left(\sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i \cdot s_i \right) \cdot \cos \varphi = load_{total} \quad (22)$$

هیچ‌یک از گرهای بار یا مجموعه‌ای از آنها نباید از شبکه اصلی جدا بمانند. به عبارت دیگر، تمام بارهای شبکه باید تغذیه شوند [۲۱].

* محدودیت بارگذاری مجاز ترانسفورماتورها

$$s_{ni} \cdot F_{ope_trans} \geq s_i \quad (23)$$

به منظور بهره‌برداری مطمئن و پایدار، توان تحویلی ترانسفورماتورهای شبکه در حین طراحی شبکه‌های توزیع، ضریب بهره‌برداری اقتصادی ترانسفورماتورها باید به صورت درصدی از توان نامی آنها در نظر گرفته شود [۲۰].

* محدودیت ظرفیت ترانسفورماتورها

$$50\% s_i < s_i^{Cap} < 85\% s_i \quad (24)$$

به منظور افزایش طول عمر پست‌ها و نیز مسائل مربوط به بهره‌برداری و قابلیت اطمینان آنها، هر پست تا حد معینی از ظرفیت نامی خود اجازه بارگذاری دارد و به‌طور کامل بهره‌برداری نمی‌شود. این محدودیت به صورت رابطه بالا در مسئله مدل شده است [۱۹].

قسمت پنجم، هزینه تعمیرات و نگهداری فیدرها ارائه شده است. این قسمت از تابع هزینه، جزء هزینه‌های متغیر است؛ یعنی در طول دوره، برنامه‌ریزی در حال تغییر است؛ بنابراین، با استفاده از یک ضریب اقتصاد مهندسی هزینه‌های جاری به ارزش کنونی آنها تبدیل می‌شود. $T = T_h * 365 * 24$ زمان در ساعت (برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت $T_h = 5$ و برای برنامه‌ریزی بلندمدت $T_h = 10$)، نیز نرخ تورم $Infr$ ۰.۵٪ و نرخ بهره $Intr$ ۱۰٪ در نظر گرفته شده است [۱۶، ۲۲].

$$\varphi = \left(\frac{1 + Infr}{1 + Intr} \right)^T \quad (16)$$

$$F_{ope_trans} = \frac{s_i}{s_{ni}} \quad (17)$$

۳-۲- هزینه‌های قابلیت اطمینان

بررسی و مطالعه قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع با توجه به بالا بودن نرخ خاموشی و قطعی مشترکین در شبکه‌های توزیع، اولویت و اهمیت بالایی دارد. در همین راستا، در این بخش، تابع هدف شامل دو قسمت است؛ در قسمت اول، شاخص‌های مربوط به مصرف‌کننده و سیستم و در قسمت دوم، شاخص‌های مربوط به بار و انرژی ارائه شده‌اند. مهم‌ترین بخش نوآوری این مقاله، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و هزینه‌های آن و تأثیر آن بر شبکه توزیع است؛ بنابراین، هزینه‌های قابلیت اطمینان به صورت رابطه (۱۸) آورده شده‌اند.

$$C_R = C_{Inter SAIFI} + C_{Inter SAIDI} \quad (18)$$

$$+ C_{InterENS}$$

قسمت اول شاخص‌ها برای سیستم و مصرف‌کننده بیان شده است و شاخص‌های تمام مصرف‌کنندگان (مصرف‌کننده خانگی کوچک یا مصرف‌کننده صنعتی بزرگ) دارای اهمیت یکسانی‌اند. در ادامه، شاخص‌های مربوط به مصرف‌کننده و سیستم به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) آورده شده‌اند.

$$C_{Inter SAIFI} = (SAIFI * W_{SAIFI}) \quad (19)$$

$$C_{Inter SAIDI} = (SAIDI * W_{SAIDI}) \quad (20)$$

*** محدودیت بارگذاری مجاز خطوط فشار ضعیف**

$$Dist_{ij} \leq R_{max}^i \quad (31)$$

این محدودیت برای جلوگیری از تغذیه بارها ارائه شده است که خارج از شعاع سرویس دهی پست باشد [۲۱].

*** محدودیت طول فیدر فشار ضعیف**

$$0 < L_f < 0.4 \quad (32)$$

بر اساس استاندارد شبکه‌های فشار ضعیف ایران، حداکثر طول فیدر فشار ضعیف ۰.۴ متر فرض شده است.

*** محدودیت شعاعی بودن شبکه**

برای حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع باید هر نقطه بار متمرکز به طور کاملاً مستقیم و فقط از یک پست مشخص و معین تغذیه شود [۱۵].

۴- تشریح الگوریتم حل مسئله

در این بخش، از الگوریتم زنبورعسل مصنوعی (ABC) [۲۳]، به منظور به حداقل رساندن تابع هدف تعریف شده در رابطه (۱) استفاده شده است. در مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع، هر جواب (یک مکان در فضای جستجو) نشان‌دهنده یک مکان غذایی بالقوه است و کیفیت جواب معادل است با کیفیت آن منبع غذایی؛ بنابراین، هر مکان منبع غذایی یک بردار باینری از اعداد باینری (۰ و ۱) تعریف می‌شود. طول بردارها برابر با تعداد پست‌های توزیع پیشنهادی بوده و در آن، هر عامل (زنبورهای عسل مصنوعی "کارگر، ناظر و کاشف") متناظر با یکی از مکان‌های پیشنهادی برای پست‌های توزیع است. کارشناس شبکه، امکان‌سنجی محدودیت‌های جغرافیایی را بررسی خواهد کرد. این کار یا با بازرسی در محل یا با سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام می‌پذیرد. یک (۱) بودن هر عامل (زنبورهای عسل مصنوعی "کارگر، ناظر و کاشف") در مکان منبع غذایی، بیان‌کننده انتخاب شدن پست متناظر در شبکه آینده و صفر (۰) بودن آن بیان‌کننده انتخاب نشدن پست متناظر در شبکه آینده است. پس از یافتن هر منبع غذایی، مجموع ظرفیت بارپذیری پست‌های انتخاب شده متناظر با آن منبع غذایی، با مجموع بار کلیه بلوک‌های موجود مقایسه خواهد شد.

$$|I_{ij}| \leq |I_{max}| \quad (25)$$

این محدودیت، اهمیت زیادی دارد و طبق آن، جریان عبوری از فیدر باید در محدوده مجاز خود قرار گیرد که ۲۵۰ آمپر است [۱۱].

*** محدودیت افت ولتاژ مجاز در محل بار**

$$|\Delta v_{ij}| \leq |\Delta v_{max}| \quad (26)$$

این محدودیت نیز اهمیت زیادی دارد و طبق آن، ولتاژ باید در محدوده مجاز خود قرار گیرد و افت ولتاژ در سیستم توزیع فشار ضعیف معمولاً نباید از ۵ درصد مقدار نامی شبکه تجاوز کند [۱۹].

*** محدودیت تعداد نصب پست‌ها**

$$\sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i \leq N_{MAX} \quad (27)$$

با توجه به شبکه مورد مطالعه، تعداد پست‌های توزیع متفاوت اند [۱۶].

*** محدودیت تعداد فیدر خروجی پست**

$$NP_{ij} \leq N_{ij_feeder} \quad (28)$$

با توجه به شبکه مورد مطالعه، تعداد فیدرهای خروجی متفاوت اند.

*** محدودیت ظرفیت گرمایی فیدر**

$$S_{fi} < S_{max}^f \quad (29)$$

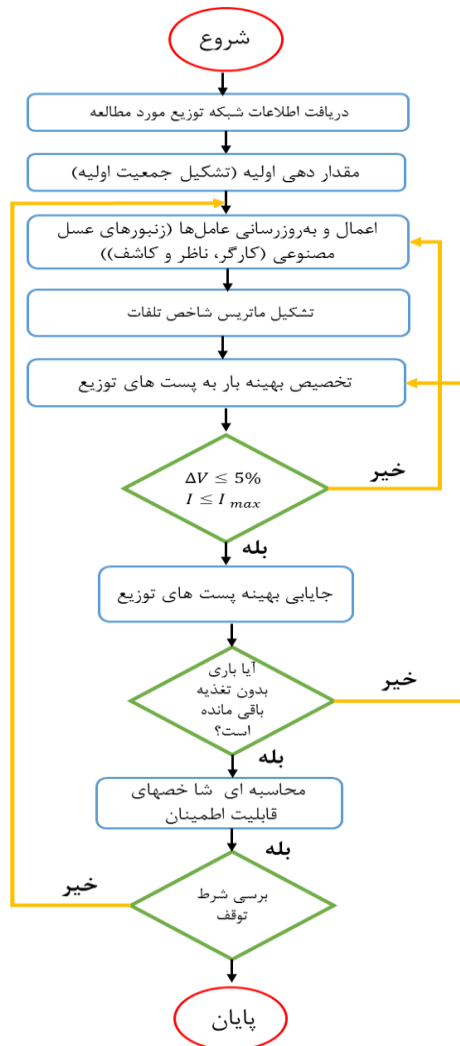
حداکثر توان عبوری در فیدرهای شبکه توزیع باید محدود به ظرفیت هادی‌ها باشد [۱۵].

*** محدودیت پروفیل ولتاژ**

$$0.95 pu < V_i < 1.05 pu \quad (30)$$

دامنه ولتاژ هر شین باید طبق رابطه (۳۰) در رنج پذیرفته شده‌ای باشد [۱۵].

*** محدودیت شعاع تغذیه پست‌های توزیع**



شکل (۲): الگوریتم جایابی بهینه پست‌های توزیع بهینه‌سازی‌اند.

۲- مقداردهی اولیه (تشکیل جمعیت اولیه)

در این بخش، تولید تصادفی راه‌حل‌های اولیه (منبع غذایی) ایجاد خواهد شد؛ یعنی جواب‌های ایجاد می‌شوند که بیان‌کننده عامل (زنبورهای عسل مصنوعی "کارگر، ناظر") است. همچنین در این بخش، پارامترهای تعداد زنبورهای عامل (زنبورهای عسل مصنوعی "کارگر، ناظر و کاشف")، جمعیت موقعیت‌ها (مکان‌ها)، موقعیت منابع غذایی کاندید تعیین می‌شوند.

۳- اعمال و به‌روزرسانی عامل‌ها (زنبورهای عسل مصنوعی "کارگر، ناظر و کاشف")

به‌منظور یافتن منابع غذایی بهینه در هر گام الگوریتم، یک زنبور کارگر تلاش می‌کند جوابی که ارائه می‌کند، به‌وسیله گام

اگر مجموع ظرفیت بارپذیری پست‌های انتخاب‌شده متناظر با هر منبع غذایی از مجموع بار کلیه بلوک‌های موجود کمتر باشد، آن منبع غذایی، منبع غذایی ناپذیرفتنی تلقی می‌شود و با منبع غذایی جدیدی جایگزین خواهد شد. این امر به‌منظور افزایش سرعت همگرایی و کوچک‌کردن فضای جستجو انجام می‌شود. مقدار تابع برازندگی در این مسئله، عکس تابع هزینه مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع و نسبتی از حجم شهد آن منبع غذا در مکان مدنظر و تعداد منابع غذایی است که برابر با تعداد زنبورهای (کارگر، ناظر) است تا با ماکزیم‌کردن تابع برازندگی تابع هزینه، مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع، مینیمم شود. بعد از محاسبه تابع برازندگی برای هر منبع غذایی، ماتریس شاخص تلفات ایجاد می‌شود و با توجه به پست‌های انتخاب‌شده در هر منبع غذایی، تخصیص بهینه بار به پست‌های توزیع انجام می‌شود. سپس در این مرحله، ظرفیت، مکان بهینه و حوزه تحت سرویس پست‌های توزیع با توجه به محدودیت‌های از پیش تعریف‌شده تعیین می‌شود. درنهایت شاخص‌های مربوط به قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. تکرار این فرآیند تا رسیدن به پاسخ بهینه ادامه می‌یابد.

در این مقاله، به‌منظور بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم پیشنهادی برای هرکدام از توابع از روش تجزیه به‌صورت مجموع وزن‌دار استفاده شده است. در این روش، برای توابع هدف با توجه به اهمیت آن، یک ضریب وزنی انتخاب شده است که جواب بهینه را با توجه به اولویت‌بندی تابع هدف‌های موجود به دست می‌آورد.

۱-۴- مراحل الگوریتم حل مسئله

با توجه به ماهیت مسئله، مراحل الگوریتم حل مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع به شرح زیرند:

۱- داده‌های ورودی

تعدادی داده‌های مورد نیاز برای جایابی بهینه پست‌ها شامل اطلاعات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، داده‌های مربوط به پیش‌بینی بار، مشخصات و داده‌های مربوط به پست‌های توزیع، داده‌های مربوط به هزینه‌های (سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری)، پارامترهای مهم در بحث

توجه به پیش‌بینی بار صورت گرفته در محل مدنظر مشخص می‌شود.

✓ اولویت‌بندی بهترین پست‌ها برای هر بلوک براساس

شاخص تلفات: با توجه به ماتریس شاخص تلفات، حال سطرهای این ماتریس را به صورت جداگانه و صعودی مرتب می‌کنیم؛ بدین صورت برای هر کدام از بلوک‌های بار مدنظر بهینه‌ترین پست توزیع به ترتیب بهینه‌بودن جواب در اولویت قرار می‌گیرد.

✓ اولویت‌بندی بلوک‌ها براساس حداقل شاخص تلفات

آنها: پس از مشخص شدن بهترین پست‌ها براساس ترتیب اولویت، هر کدام از بلوک‌های بار موجود با توجه به درایه اول سطر ماتریس شاخص تلفات به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. با انجام این کار، بلوک‌های بار منطقه مطالعه شده با توجه به بهینه‌ترین شاخص تلفاتشان مرتب خواهند شد. در این حالت بلوک مربوط، سطر اول ماتریس شاخص تلفات بهترین شاخص را در مقایسه با دیگر بلوک‌ها دارد.

✓ تخصیص بار بلوک‌ها به بهترین پست‌ها: در این

بخش، با توجه به جایابی بهینه پست‌های توزیع بار بلوک‌های متناظر و اولویت‌بندی آن در مرحله قبل به بهترین پست‌ها به ترتیب اولویت اختصاص داده می‌شوند، تا زمانی که ظرفیت بهترین پست تکمیل شود؛ در این صورت پست توزیع، که ظرفیت آن تکمیل شده است، کنار گذاشته می‌شود و بقیه پست‌های توزیع جدید با توجه به ترتیب اولویت آنها تا تغذیه شدن تمام بارهای شبکه مطالعه شده انتخاب می‌شوند.

✓ اعمال محدودیت افت ولتاژ مجاز در محل بار و حد

بارگذاری مجاز خطوط فشار ضعیف: برای اعمال محدودیت افت ولتاژ برای هر یک از بلوک‌های بار، تمام پست‌های توزیع مشخص می‌شوند که به عنوان پست تغذیه کننده انتخاب شده‌اند و بقیه پست‌ها از اولویت بلوک‌های مدنظر حذف می‌شوند.

✓ تعیین ظرفیت، مکان بهینه و حوزه تحت سرویس: در

این حالت، براساس ماتریس شاخص تلفات جایابی بهینه پست‌ها صورت می‌گیرد. درباره پست‌های موجود در شبکه توزیع دو حالت صدق می‌کند: حالت نخست اینکه لازم و ضروری است به ظرفیت قبلی پست افزوده شود و حالت دوم اینکه ظرفیت پست تا حد ممکن کاهش یابد یا به عبارتی

جستجوی محلی بهبود دهد. بعد از آن تلاش خواهد کرد زنبورهای ناظر را برای مکان فعلی خود به کار گیرد. زنبورهای ناظر از میان مکان‌های بهبود یافته طبق کیفیت آن مکان‌ها جواب‌های بهتر را انتخاب و در نتیجه، زنبورهای ناظر بیشتری به خود جذب می‌کنند. اگر زنبور ناظر به کار گماشته شده، قادر باشد مکان بهتری را بیابد، زنبور کارگر مکان خود را به روز می‌کند؛ در غیر این صورت در مکان فعلی خود باقی می‌ماند. افزون بر آن، یک زنبور کارگر زمانی مکان خود را ترک خواهد کرد که قادر نباشد مکان خود را در تعداد معینی گام بهبود دهد (به این تعداد گام، حد می‌گویند). اگر زنبور کارگر مکان خود را ترک کند، به زنبور کاشف تبدیل خواهد شد؛ یعنی مکان جدید به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌شود و در هر مرحله بهترین جواب، ذخیره و این عمل دوباره تکرار می‌شود؛ در نتیجه، تابع برازندگی به صورت رابطه (۳۳) به دست می‌آید.

$$Fitness\ function = \frac{1}{TOCP} \quad (33)$$

۴- تشکیل ماتریس شاخص تلفات و بار

به منظور مینیم‌سازی تابع هزینه، مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع، بارها باید به گونه‌ای به پست‌های توزیع اختصاص یابند که کمترین تلفات و هزینه حاصل شود. با توجه به اینکه تلفات اهمی با توان دوم جریان و توان اول مقاومت مسیر متناسب است، جریان، با بار بلوک I_j با P_i^2 مقاومت مسیر و فاصله بلوک i از پست توزیع am با $Dist_{ij}$ متناسب است. بر اساس این، شاخص تلفات ناشی از تغذیه بار بلوک I_j با پست i محاسبه می‌شود. پس از محاسبه شاخص تلفات برای هر یک از بلوک‌ها نسبت به هر کدام از پست‌ها، ماتریس شاخص تلفات بدین صورت تشکیل می‌شود که درایه آن، برابر با شاخص تلفات بلوک I_j نسبت به پست توزیع i است.

۵- تخصیص بهینه بار به پست‌های توزیع

تخصیص بهینه بار بلوک‌ها به پست‌های توزیع براساس اصول اساسی زیر انجام می‌گیرد:

✓ تقسیم ناحیه مطالعه شده براساس موقعیت جغرافیایی:

ناحیه مطالعه شده در این تحقیق به نواحی کوچک‌تر تقسیم می‌شود که بلوک نامیده می‌شود و بار هر یک از این بلوک‌ها با

توزیع با توجه به معیارهای از پیش تعیین شده است. به دلیل افزایش چگالی بار یا رشد بار منطقه در افق ۱۰ ساله، پست‌های موجود نمی‌توانند بارهای خود را به‌طور کامل تغذیه کنند؛ بنابراین، باید با توجه به شرایط فعلی، جایابی مجدد برای تعیین مکان و ظرفیت بهینه پست‌های موجود انجام شود؛ از این رو، پست‌های توزیع موجود منتخب در برنامه‌ریزی بلندمدت حضور دارند (با این فرض که ظرفیت این پست‌ها می‌تواند تغییر کند یا با پست جدید جایگزین شود). در این مطالعات، همچنین پست‌های توزیع با ظرفیت بیشتر از ۴۰۰ kVA، پست‌های زمینی و کمتر از این ظرفیت، پست‌های هوایی در نظر گرفته شده‌اند. سیستم تحت مطالعه در دوره برنامه‌ریزی بلندمدت یک منطقه با مساحت ۱۲۰۰*۱۶۰۰ مترمربع است.



شکل (۳): نقشه جغرافیایی چگالی بار شبکه مطالعه‌شده اول (دوره

۱۰ ساله) [۱۷]

جدول (۱): اطلاعات شبکه مطالعه‌شده اول

شرح	اندازه	شرح	اندازه
رشد بار	۲۰٪	حداکثر ظرفیت بارگذاری پست‌ها	۸۵٪
نقطه بار متمرکز	۴۱۰	حداکثر شعاع تغذیه پست‌ها	۴۰۰ متر
ضریب بار	۰٫۷	ضریب توان	۱

جدول (۲): اطلاعات شبکه مطالعه‌شده دوم

شرح	اندازه	شرح	اندازه
رشد بار	۲۰٪	حداکثر ظرفیت بارگذاری پست‌ها	۸۵٪
نقطه بار متمرکز	۵۷۰	حداکثر شعاع تغذیه پست‌ها	۴۰۰ متر
ضریب بار	۰٫۷	ضریب توان	۱

جابه‌جا شود. درباره پست‌های پیشنهادی نیز ظرفیت پست‌های توزیع از قبل مشخص نبوده است؛ بنابراین، با توجه به میزان تراکم و چگالی بار در محل احداث پست‌های توزیع و میزان بار متصل شده به آن، ظرفیت پست با الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی تعیین خواهد شد.

۶- تغذیه شدن تمام بارها: پس از آنکه تخصیص بهینه بار

بلوک‌ها به پست‌های توزیع انتخاب‌شده در یک منبع غذایی انجام گرفت، اگر تمام بلوک‌های بار تغذیه شده باشند، این منبع غذایی، یک آرایش پذیرفته شده شناخته می‌شود؛ اما اگر یک یا چند بلوک بار، بدون تغذیه باقی مانده باشند، آن منبع غذایی به‌عنوان آرایش ناپذیرفتنی، از چرخه محاسبات حذف می‌شود.

۷- محاسبه قابلیت اطمینان متداول‌ترین شاخص‌های

قابلیت اطمینان شامل (ENS, SAIDI, SAIFI) می‌شوند که برای بهبود اهداف قابلیت اطمینان در این الگوریتم ارزیابی و محاسبه می‌شوند.

۸- شرط همگرایی: فرآیند الگوریتم زنبورعسل مصنوعی

(ABC)، برای بهینه‌سازی مسئله جایابی بهینه پست‌های توزیع تا همگراشدن محاسبات ادامه پیدا می‌کند. شرط همگرایی در این الگوریتم آن است که با افزایش تعداد تکرارها در تابع برازندگی، در منبع غذایی نهایی هیچ تغییری ایجاد نشود.

۵- معرفی شبکه‌های مطالعه‌شده و بررسی نتایج

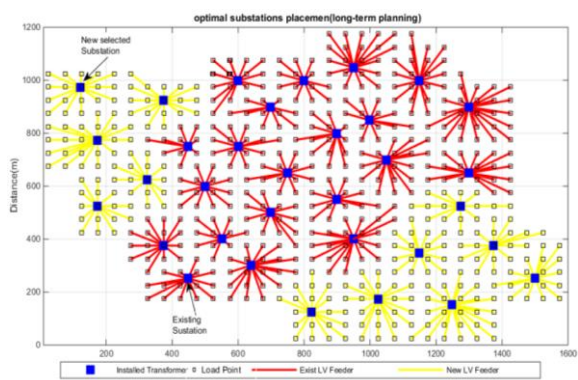
شبیه‌سازی

در این مسئله با استفاده از اطلاعات مکانی مشترکین و شبکه توزیع به‌منظور افزایش بهره‌وری شبکه‌های توزیع که مهم‌ترین شاخص‌های آنها هزینه، تلفات و قابلیت اطمینان‌اند، روشی برای جایابی بهینه پست‌های توزیع ارائه شده است. همچنین به‌منظور بررسی واقعی‌تر مسئله و نشان‌دادن عدم وابستگی الگوریتم ارائه‌شده به توپولوژی شبکه، مطالعات برای دو شبکه مجزا برای برنامه‌ریزی بلندمدت (دوره ۱۰ ساله) انجام شده است.

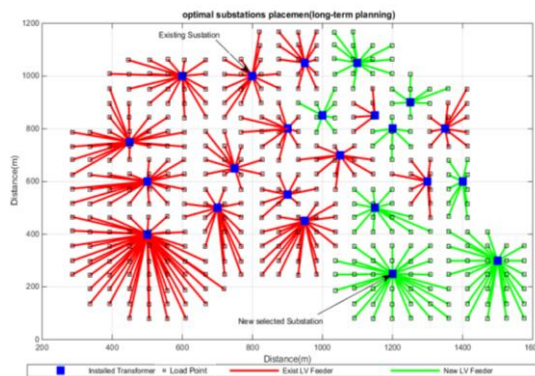
۱-۵- شبکه مطالعه‌شده اول

نقشه جغرافیایی چگالی بار شبکه مطالعه‌شده مطابق شکل (۳) ارائه شده است. هدف از بهینه‌سازی این مسئله، تعیین بهترین مکان، ظرفیت، اندازه و زمان بهینه نصب پست‌های

براساس نتایج مطالعات، بار اختصاص یافته به پست‌های توزیع در افق طراحی ده‌ساله، مطابق شکل (۴) است.



شکل (۶): مکان نصب پست‌ها و بارهای اختصاص یافته به آنها برای شبکه مطالعه شده اول (دوره ۱۰ ساله) [۲۴]



شکل (۴): مکان نصب پست‌ها و بارهای اختصاص یافته به آنها برای شبکه مطالعه شده اول (دوره ۱۰ ساله)

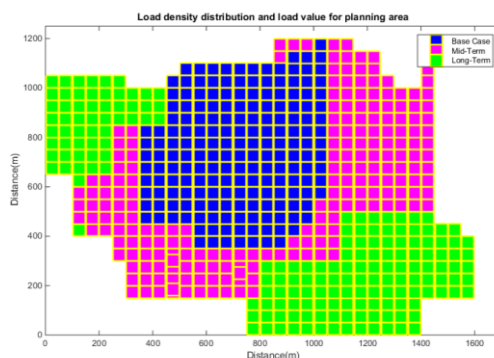
در این مطالعات از دو سناریو استفاده شده است. در هر دو سناریو با توجه به بار مصرفی شبکه مطالعه شده، میزان رشد بار مشخص شده و سپس جایابی بهینه پست‌های توزیع برای دوره ده ساله با فرض معلوم بودن پست‌های توزیع (دوره پایه و دوره پنج ساله) انجام شده و از میان پست‌های کاندید، پست‌های انتخابی برای تغذیه تمام بارهای موجود در شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی، مشخص شده‌اند. همچنین در این مطالعات، برای مشخص کردن نوع شبکه (هوایی یا زمینی) با توجه به آرایش انتخاب شده نهایی، نوع پست‌های توزیع (هوایی یا زمینی بودن آن) در منطقه مطالعه شده تعیین می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۴) و (۶)، براساس نتایج مطالعات انجام شده با الگوریتم و روش پیشنهادی برای شبکه مطالعه شده اول، تعداد ۲۳ پست توزیع هوایی و زمینی با ظرفیت‌های مختلف انتخاب شده‌اند. ۷ پست جدید (با توجه به رشد بار و توسعه شهری) و ۱۵ پست دیگر از پست‌های موجود بوده‌اند که ظرفیت بعضی از آنها اصلاح شده است تا کل پست‌ها بتوانند بار کل منطقه در افق ده‌ساله را به طور کامل تغذیه کنند. براساس نتایج مطالعات انجام شده برای شبکه مطالعه شده دوم، تعداد ۳۳ پست توزیع هوایی و زمینی با ظرفیت‌های مختلف برای تغذیه بار مشترکین برای افق طراحی ۱۰ ساله تعیین شده‌اند. از ۳۳ پست تعیین شده، ۲۱ پست توزیع از قبل موجود بوده و ۱۲ پست توزیع جدیدند. از نتایج در جدول (۳) مشخص است در شبکه مطالعه شده اول، بیشترین درصد بارگذاری مربوط

به پست هوایی شماره (۸) با مختصات (۷۵۰-۴۵۰) با ظرفیت نامی (۳۱۵ kVA) و با ظرفیت بارگذاری (۲۵۱ kW) و درصد بارگذاری ۷۳٫۶۸ درصد است. همچنین در شبکه

۵-۲- شبکه مطالعه شده دوم

نقشه جغرافیایی چگالی بار شبکه مطالعه شده دوم، مطابق شکل (۵) است. براساس محدودیت‌های جغرافیایی و اجرایی برای احداث پست، ۴۰ نقطه، مکان‌های اولیه برای احداث پست مناسب تشخیص داده شده‌اند. سیستم تحت مطالعه در دوره برنامه‌ریزی بلندمدت یک منطقه با مساحت ۱۶۰۰*۱۲۵۰ مترمربع است. به دلیل افزایش چگالی بار یا رشد بار منطقه در افق ۱۰ ساله، پست‌های موجود نمی‌توانند بارهای خود را به طور کامل تغذیه کنند.



شکل (۵): نقشه جغرافیایی چگالی بار شبکه مطالعه شده دوم (دوره ۱۰ ساله) [۲۴]

توزیع مجاور نتوانند اضافه بار پست‌های توزیع دچار اضافه بار را تأمین کنند، الگوریتم بهینه‌سازی در یکی از مکان‌های پیشنهادی نزدیک به پست توزیع دچار اضافه بار، امکان‌سنجی احداث پست‌های توزیع را انجام می‌دهد و بهترین مکان با توجه به اولویت‌بندی آنها به ترتیب برای نصب پست توزیع جدید پیشنهادی اختصاص داده می‌شود. نتایج حاصل از جایابی بهینه پست‌های توزیع (موقعیت نصب پست‌های انتخاب شده، توان بارگذاری، ظرفیت نامی پست و درصد بارگذاری) برای شبکه‌های مطالعه شده اول و دوم، مطابق جدول (۳) بیان شده‌اند.

مطالعه شده دوم، بیشترین درصد بارگذاری مربوط به پست هوایی شماره (۲۶) با مختصات (۶۵۰-۱۳۰۰) با ظرفیت نامی (kVA) ۲۵۰ و با ظرفیت بارگذاری (kW) ۲۱۰ و درصد بارگذاری ۸۴,۰۰ درصد است.

با توجه به جدول (۳)، مشخص است تمام پست‌های توزیع مطابق رابطه (۲۴) در محدوده مجاز بارگذاری شده‌اند. در این حالت، اگر پستی دچار اضافه بار شود، در هر مرحله اتصال بار پست‌های توزیع دچار اضافه بار به پست‌های مجاور تابع هدف با الگوریتم بهینه‌سازی، اجرا و مقدار بهینه پست توزیع از لحاظ فنی و اقتصادی مشخص می‌شود. اگر در هر شرایطی پست‌های

جدول (۳): مقایسه نتایج برای شبکه‌های مطالعه شده اول و دوم

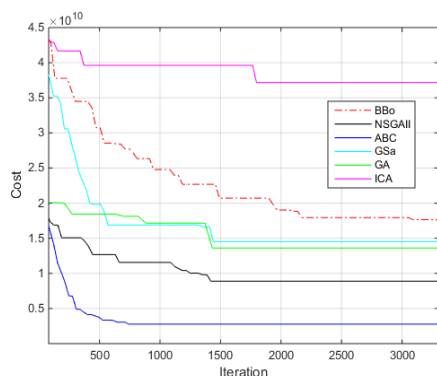
مطالعه شده دوم	شبکه	تعداد	مختصات نصب	مطالعه شده اول	شبکه	مختصات نصب	تعداد
درصد	ظرفیت نامی پست (kVA)	توان بارگذاری (kW)	موقعیت نصب پست‌های انتخاب شده (X, Y)	درصد	ظرفیت نامی پست (kVA)	توان بارگذاری (kW)	موقعیت نصب پست‌های انتخاب شده (X, Y)
۷۵,۸۰	۳۱۵	۲۳۹	۹۷۵ ۱۲۵	۶۵,۷۱	۳۱۵	۲۰۷	۴۰۰ ۵۰۰
۷۳,۸۰	۵۰۰	۳۶۹	۷۷۵ ۱۷۵	۵۳,۳۳	۳۱۵	۱۶۸	۶۰۰ ۵۰۰
۷۲,۶۹	۳۱۵	۲۲۹	۵۳۰ ۱۷۵	۷۵,۲۵	۴۰۰	۳۰۱	۱۰۰۰ ۶۰۰
۷۳,۲۰	۲۵۰	۱۸۳	۶۲۵ ۳۲۵	۴۶,۲۵	۲۵۰	۱۱۵	۵۰۰ ۷۰۰
۷۰,۷۵	۴۰۰	۲۸۳	۳۷۵ ۳۷۵	۶۰,۴۰	۲۵۰	۱۵۱	۶۵۰ ۷۵۰
۵۸,۷۳	۳۱۵	۱۸۵	۹۲۵ ۳۷۵	۵۷,۷۵	۴۰۰	۲۳۱	۵۵۰ ۹۰۰
۷۰,۱۵	۳۱۵	۲۲۱	۷۵۰ ۴۵۰	۷۲,۵۰	۴۰۰	۲۹۰	۱۰۵۰ ۹۵۰
۷۳,۶۵	۳۱۵	۲۳۲	۲۵۰ ۴۵۰	۷۳,۶۸	۳۱۵	۲۵۱	۷۵۰ ۴۵۰
۷۱,۵۰	۴۰۰	۲۸۶	۴۰۰ ۵۵۰	۵۱,۲۰	۲۵۰	۱۲۸	۱۰۰۰ ۸۰۰
۵۸,۴۱	۳۱۵	۱۸۴	۷۵۰ ۶۰۰	۷۴,۰۰	۲۰۰	۱۴۸	۸۰۰ ۹۰۰
۸۲,۵۳	۳۱۵	۲۶۰	۳۰۰ ۶۴۰	۷۰,۲۵	۴۰۰	۲۸۱	۴۵۰ ۹۵۰
۸۰,۴۷	۶۳۰	۵۰۷	۵۰۰ ۷۰۰	۷۰,۰۱	۲۵۰	۱۷۵	۷۰۰ ۱۰۵۰
۷۲,۲۲	۶۳۰	۴۵۵	۶۵۰ ۷۵۰	۶۳,۵۰	۲۰۰	۱۲۷	۸۵۰ ۱۱۵۰
۷۸,۰۹	۳۱۵	۲۴۶	۱۰۰ ۸۰۰	۷۷,۶۰	۲۵۰	۱۹۴	۶۰۰ ۱۳۰۰
۷۷,۷۷	۳۱۵	۲۴۵	۱۲۵ ۸۲۵	۷۱,۱۱	۳۱۵	۲۲۴	۸۰۰ ۱۳۵۰
۸۱,۹۰	۳۱۵	۲۵۸	۵۵۰ ۹۰۰	۷۹,۰۴	۳۱۵	۲۴۹	۸۵۰ ۱۰۰۰
۷۲,۵۰	۴۰۰	۲۹۰	۱۰۵۰ ۹۵۰	۷۲,۰۶	۳۱۵	۲۲۷	۱۰۵۰ ۱۱۰۰
۷۲,۰۰	۵۰۰	۳۶۰	۴۰۰ ۹۵۰	۶۶,۰۰	۲۰۰	۱۳۲	۵۰۰ ۱۱۵۰
۷۳,۷۵	۴۰۰	۲۹۵	۸۵۰ ۱۰۰۰	۷۹,۵۰	۲۰۰	۱۵۹	۲۵۰ ۱۲۰۰
۸۳,۶۰	۵۰۰	۴۱۸	۱۷۵ ۱۰۲۵	۵۹,۳۶	۳۱۵	۱۸۷	۸۰۰ ۱۲۰۰
۸۳,۰۰	۴۰۰	۳۳۲	۷۰۰ ۱۰۵۰	۶۶,۰۰	۲۰۰	۱۳۲	۹۰۰ ۱۲۵۰
۶۴,۵۰	۴۰۰	۲۸۵	۳۵۰ ۱۱۰۰	۵۵,۷۵	۴۰۰	۲۲۳	۶۰۰ ۱۴۰۰
۸۲,۸۵	۳۱۵	۲۶۱	۱۰۰۰ ۱۱۵۰	۵۴,۳۰	۳۱۵	۱۷۱	۳۰۰ ۱۵۰۰
۷۸,۰۰	۴۰۰	۳۱۲	۱۵۰ ۱۲۵۰	-	-	-	-

۸۱,۶۰	۵۰۰	۴۰۸	۹۰۰	۱۳۰۰	۲۵	-	-	-	-	-	۲۵
۸۴,۰۰	۲۵۰	۲۱۰	۶۵۰	۱۳۰۰	۲۶	-	-	-	-	-	۲۶
۷۴,۲۵	۴۰۰	۲۹۷	۹۷۵	۱۳۲۵	۲۷	-	-	-	-	-	۲۷
۷۷,۲۰	۲۵۰	۱۹۳	۷۷۵	۱۳۵۰	۲۸	-	-	-	-	-	۲۸
۸۰,۶۳	۳۱۵	۲۵۴	۵۳۰	۱۴۵۰	۲۹	-	-	-	-	-	۲۹
۶۸,۵۰	۲۰۰	۱۳۷	۶۲۵	۱۵۰۰	۳۰	-	-	-	-	-	۳۰
۸۲,۵۰	۴۰۰	۳۳۰	۳۷۵	۱۵۲۵	۳۱	-	-	-	-	-	۳۱
۷۷,۷۷	۳۱۵	۲۴۵	۹۲۵	۱۵۵۰	۳۲	-	-	-	-	-	۳۲
۶۵,۱۰	۳۱۵	۲۰۵	۷۵۰	۱۶۰۰	۳۳	-	-	-	-	-	۳۳

کاهش هزینه‌های تلفات و انرژی توزیع‌نشده به میزان چشمگیری کاهش یافته است.

با توجه به جدول (۵)، استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبورعسل به منزله روش حل پیشنهادی، باعث بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه‌های مورد مطالعه شده است. در مقایسه با روش‌های دیگر، تلفات و مقدار انرژی توزیع‌نشده به مقدار چشمگیری کاهش یافته است که باعث کاهش هزینه و بهبود عملکرد شبکه می‌شود.

به منظور مقایسه عملکرد و نحوه همگرایی الگوریتم‌ها، مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در یافتن مینیمم هزینه، در شکل (۷) رسم شده است. این مشخصه برای میانگین ۵ مرتبه اجرای مستقل الگوریتم‌ها ترسیم شده است. با توجه به مشخصه‌های همگرایی، روش پیشنهادی (در این مسئله) با تولید جمعیت اولیه مناسب، دقت همگرایی بهتر و سریع‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشته و در کمترین تکرار نسبت به سایر الگوریتم‌های به همگرایی رسیده است.



شکل (۷): نمودار همگرایی الگوریتم‌های موجود و الگوریتم

پیشنهادی

همچنین، به منظور دستیابی به عملکرد بهتر و درک بیشتر از عملکرد سیستم‌های قدرت از استاندارد ۱۳۶۶-IEEE برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع شعاعی استفاده شده است. در جدول (۴)، شاخص‌های مربوط به قابلیت اطمینان شبکه‌های مطالعه‌شده، پس از جایابی بهینه پست‌ها آورده شده است. با توجه به جدول (۴)، مشخص است استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل مصنوعی (ABC) باعث بهبود شاخص‌های مربوط به قابلیت اطمینان (میزان انرژی توزیع‌نشده، متوسط تعداد قطعی‌ها و متوسط زمان قطعی‌ها) در شبکه مطالعه‌شده اول و دوم شده است که نشان از کارایی تابع هدف و الگوریتم انتخابی در جایابی بهینه پست‌های توزیع می‌دهد. در جدول (۵) پاسخ الگوریتم‌های پیشنهادی نویسندگان بررسی شده است. نتایج تمام الگوریتم‌های موجود در جدول (۵) روی تابع هدف چندمنظوره پیشنهادی در این مقاله اجرا شده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۵)، کمترین میزان انرژی توزیع نشده (ENS) در شبکه مطالعه‌شده اول و دوم، مربوط به الگوریتم (ABC) و روش پیشنهادی است که در مقایسه با روش‌های دیگر به میزان چشمگیری کاهش یافته است که باعث بهبود سرویس‌دهی به مشترکین و کاهش مدت زمان خاموشی آنها و در نهایت پایداری شبکه مطالعه‌شده می‌شود. با توجه به نتایج، مشخص است پس از جایگذاری بهینه پست‌های پیشنهادی در شبکه‌های مطالعه‌شده، تلفات کاهش می‌یابد؛ به نحوی که میزان تلفات در شبکه مطالعه‌شده اول و دوم در الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود کاهش پیدا کرده است. همچنین هزینه‌های کل دوره برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده از الگوریتم و روش پیشنهادی در شبکه مطالعه‌شده اول و دوم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بهینه‌سازی به علت

جدول (۴): شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های مطالعه‌شده

شاخص‌های قابلیت اطمینان	شبکه مطالعه‌شده اول	شبکه مطالعه‌شده دوم
SAIFI	۱,۱۰۰۷	۱,۵۲۳۲
SAIDI	۱,۲۲۶۴	۱,۷۰۱۹
ENS	۵۵۲,۸۳	۵۹۱,۴۵

جدول (۵): مقایسه پاسخ الگوریتم کلونی زنبورعسل با پاسخ برخی از الگوریتم‌های دیگر

الگوریتم‌های بهینه‌سازی	شاخص‌های تابع هدف	انرژی توزیع نشده (ENS)	تلفات (kW)	هزینه (\$)	انرژی توزیع نشده (ENS)	تلفات (kW)	هزینه (\$)
الگوریتم (GA)	۵۸۱,۹۰	۲۹۵,۸۰	۴۲۸,۳۲	۸۴۴۰۱۹	۶۵۴,۶۷	۳۹۵,۲۵	۸۶۲۵۶۶
الگوریتم (ICA)	۶۲۶,۳۹	۳۶۶,۶۲	۳۸۹,۱۹	۸۰۰۱۸۶۴	۵۸۴,۵۹	۳۹۸,۵۶	۸۷۴۵۲۵۱
الگوریتم (NSGAI)	۵۵۶,۹۶	۲۶۹,۸۴	۳۸۹,۱۹	۸۰۰۱۸۶۴	۵۸۴,۵۹	۳۹۸,۵۶	۸۷۴۵۲۵۱
الگوریتم (BBO)	۶۰۷,۳۶	۳۰۵,۳۲	۳۸۹,۱۹	۸۰۰۱۸۶۴	۵۸۴,۵۹	۳۹۸,۵۶	۸۷۴۵۲۵۱
الگوریتم (GSA)	۵۹۵,۵۳	۳۰۹,۵۱	۴۱۲,۲۵	۸۵۴۵۲۵۸	۶۴۵,۲۳	۴۱۲,۲۵	۸۵۴۵۲۵۸
الگوریتم (ABC)	۵۵۲,۸۳	۲۷۶,۱۷	۳۸۸,۶۹	۷۹۹۹۰۴۵	۵۹۱,۴۵	۳۸۸,۶۹	۷۹۹۹۰۴۵

سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در زمینه برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌های توزیع قادر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل جامع چندمنظوره و هدفمند برای برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن اطلاعات واقعی به منظور تعیین تعداد، مکان، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی پست‌های توزیع با توجه به شرایط فعلی شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در این پژوهش، مدل‌سازی و مطالعات با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و فنی در شبکه توزیع برای مدیریت ظرفیت پست‌های هوایی و زمینی شبکه‌های توزیع انجام شده است. به همین منظور، در این مقاله از یک تابع هدف جامع جدید و الگوریتم کلونی زنبورعسل برای جابجایی بهینه پست‌های توزیع به منظور افزایش قابلیت اطمینان (کاهش انرژی توزیع نشده) و کاهش تلفات شبکه و همچنین کاهش هزینه‌های (سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان) استفاده شده است. مطالعات روی دو شبکه مستقل انجام شده است.

مقایسه نتایج مطالعات نشان‌دهنده کاهش هزینه، تلفات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع مطالعه‌شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج سایر الگوریتم‌ها (NSGAI، GSA، BBO، ICA، GA)، مقایسه شده‌اند که نشان می‌دهد الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) عملکرد بهتری را ارائه کرده و به کم‌ترین هزینه کلی در همه موارد منجر شده است. این امر کارایی و اثربخشی الگوریتم پیشنهادی را اثبات می‌کند و اینکه این الگوریتم به ارائه عملکرد بهتر در مقایسه با

علائم و نشانه‌ها

C_{Inv}	هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری
C_{Opa}	هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری
C_R	هزینه‌های مربوط به قابلیت اطمینان
C_{BL}	هزینه مربوط به خرید زمین
C_{PPE}	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه تجهیز و ساخت پست‌ها
C_{Inflv}	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه فیدرهای فشار ضعیف
C_{Dflv}	هزینه‌های مربوط به دیماند فیدر فشار ضعیف
C_{Ins_trans}	هزینه‌های مربوط به نصب ترانسفورماتورها
C_{Bgi}	هزینه خرید هر مترمربع زمین در بلوک مدنظر
C_{Trans_eque}	هزینه خرید ترانسفورماتور و تجهیزات داخلی و مصالح ساختمان پست i ام
CB_{PTi}	هزینه خرید ترانسفورماتور خریداری شده
C_{losses_flv}	هزینه تلفات در فیدرهای فشار ضعیف
C_{losses_cu}	هزینه تلفات مسی در پست‌های توزیع i ام
C_{Losses_core}	هزینه تلفات هسته در پست‌های توزیع i ام
C_{Rm_sub}	هزینه تعمیر و نگهداری از پست‌های توزیع i ام
C_{Rm_feeder}	هزینه تعمیر و نگهداری از فیدرهای فشار ضعیف
$C_{ope-subi}$	هزینه سرویس و نگهداری سالیانه از فیدر تغذیه‌کننده بار i ام از پست توزیع i ام
$C_{ope-fdij}$	هزینه سرویس و نگهداری سالیانه از فیدر تغذیه‌کننده بار i ام از پست i ام

تعداد بار تغذیه شده از پست i ام	n_{loadi}
تعداد مصرف کننده موجود در شبکه	N_C
حداکثر تعداد مجاز ترانسفورماتورها	N_{MAX}
تعداد بار Z ام تغذیه شده از پست توزیع i ام	NP_{ij}
حداکثر فیدر فشار ضعیف خروجی مجاز پست توزیع i ام به سمت بار Z ام	N_{ij_feeder}
تلفات مسی پست توزیع i ام	P_{cui}
تلفات آهنی پست توزیع i ام	P_{corei}
مقاومت طول فیدر Z ام	R
حداکثر شعاع قابل قبول پست i ام	R_{max}^i
توان بارگذاری شده روی پست توزیع i ام	S_i
ظرفیت نامی پست توزیع i ام	S_{ni}
شاخص متوسط دفعات خاموشی سیستم	$SAIFI$
شاخص متوسط زمان خاموشی سیستم	$SAIDI$
ظرفیت پست توزیع Z ام	s_i^{Cap}
توان عبوری از فیدر بار Z ام	s_{fi}
حداکثر توان عبوری از فیدر بار Z ام	s_{max}^f
کل هزینه های جایابی بهینه پست های توزیع	$TCOP$
هزینه احداث یک متر از فیدرهای فشار ضعیف	V_{mf}
حد مجاز ولتاژ در شبکه	V_i
ضریب اضافه بار	W
طول و عرض محل احداث پست توزیع i ام	$X_{subi} \cdot Y_{subi}$
طول و عرض بلوک بار Z ام	$X_{loadj} \cdot Y_{loadj}$
تعداد سال های افق برنامه ریزی	$year$
مقاومت فیدر اتصال دهنده بار Z ام به پست i ام	zm_{ij}
ارزش تلفات	α
افت ولتاژ در محل بار مشترکین	Δv_{ij}
حداکثر افت ولتاژ در محل بار مشترکین	Δv_{max}
متغیر تصمیم گیری در صورت انتخاب، برابر یک و در غیر این صورت، صفر	δ_i
ضریب ارزش کنونی	φ
ضریب جریمه	ϱ

پیوست (۱)

جدول ۱: اطلاعات متغیرهای مربوط به ترانسفورماتورهای

به کاررفته

نوع پست	ترانسفورماتور (KVA)	ابعاد نصب پست ها (مترمربع)	تلفات مسی (W)	تلفات آهنی (W)
هوایی	۲۵	۱,۵	۷۵۰	۱۱۰
هوایی	۵۰	۱,۵	۱۲۵۰	۲۱۰

هزینه مربوط به کل متوسط تعداد وقفه ها در سیستم	$C_{InterSAIFI}$
هزینه مربوط به کل متوسط وقفه های زمانی در سیستم	$C_{InterSAIDI}$
هزینه مربوط به کل انرژی تأمین نشده در دوره مطالعه شده	$C_{InterENS}$
هزینه مربوط به متوسط تعداد وقفه ها در سیستم در یک سال	C_{SAIFI}
هزینه مربوط به متوسط وقفه های زمانی در سیستم در یک سال	C_{SAIDI}
هزینه مربوط به انرژی تأمین نشده در یک سال	C_{ENS}
ضریب وزنی شاخص $SAIFI$	$C_{SAIFI} * N_C$
ضریب وزنی شاخص $SAIDI$	$C_{SAIDI} * N_C$
ضریب وزنی شاخص ENS	$C_{ENS} * N_C$
ضریب توان شبکه	$\cos \varphi$
ابعاد مورد نیاز برای نصب و احداث پست Z ام	$Dimension$
فاصله بار Z ام از پست توزیع i ام	$Dist_{ij}$
هزینه دیماند یا تقاضا فیدر Z ام	$D_c (KVA)$
شاخص کل انرژی تأمین نشده	ENS
متوسط تقاضای بار با ترانسفورماتور i ام	$F_i (KVA)$
ضریب بار سیستم	F_{LS}
ضریب اضافه بار برای ترانسفورماتور	F_{ols}
ضریب بهره برداری ترانسفورماتور (پست)	f_{ope_trans}
نرخ رشد سالیانه بار	G
کل بارهای تغذیه شده با پست توزیع Z ام	I_J
شاخص تلفات در فیدر فشار ضعیف در بار بلوک Z ام از پست توزیع Z ام	IL_{ij}
مقدار بار فیدر Z ام در سال n ام	I_{LOADn}^2
جریان تک فاز عبوری از بار Z ام به سمت پست توزیع i ام	Im_{ij}
نرخ تورم	$Infr$
نرخ بهره	$Intr$
جریان عبوری از بار Z ام به سمت پست توزیع i ام	I_{ij}
حداکثر جریان عبوری مجاز از فیدرهای فشار ضعیف	I_{max}
ضریب تلفات	LSF
مجموع بار مصرفی تمام مشترکین	$Load\ total$
طول مجاز فیدر Z ام	L_f
تعداد کل توابع هدف	N
تعداد کل بلوک های مطالعه شده	n_{Block}
تعداد پست توزیع پیشنهادی	n_{sub}

methods for optimal reconfiguration and compensation of distribution networks", *Eur. Trans. Electr. Power*, Vol. 9, No. 1, pp. 35–41, Jan. 1999.

[6] Temraz, H. K., and M. M. A. Salama, "A planning model for siting, sizing and timing of distribution substations and defining the associated service area", *Electric Power Systems Research*, Vol. 62, No. 2, pp. 145–151, 2002.

[7] Gomez, J. F., H. M. Khodr, P. M. De Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, R. Villasana, and A. J. Urdaneta, "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits", *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 996–1004, 2004.

[8] Ramírez-Rosado, Ignacio J., and José Antonio Domínguez-Navarro, "New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems", *IEEE Transactions on Power systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 224–233, 2006.

[9] Amoiralis, Eleferios I., et al, "Ant colony solution to optimal transformer sizing problem", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, pp. 1–6, 6–9 Oct 2007.

[10] El-Fouly, T. H. M., Zeineldin, H. H., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A, "A new optimization model for distribution substation siting, sizing, and timing", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 30, No. 5, pp. 308–315, 2008.

[11] Cossi, Antonio Marcos, Rubén Romero, and José Roberto Sanches Mantovani, "Planning and projects of secondary electric power distribution systems", *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1599–1608, 2009.

[12] Lavorato, Marina, et a, "A constructive heuristic algorithm for distribution system planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 3, pp. 1734–1742, 2010.

[13] Zifa, L., & Xing, L, "Optimal planning of substation locating and sizing based on adaptive niche differential evolution algorithm", In 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and

۱۷۰۰	۲۸۰	۲	۷۵	هوایی
۲۱۵۰	۳۴۰	۲	۱۰۰	هوایی
۲۵۰۰	۴۰۰	۲,۵	۱۲۵	هوایی
۳۶۰۰	۵۰۰	۲,۵	۱۶۰	هوایی
۴۰۰۰	۵۷۰	۳	۲۰۰	هوایی
۴۴۵۰	۶۱۰	۳	۲۵۰	هوایی
۵۴۰۰	۷۲۰	۴	۳۱۵	هوایی
۶۴۵۰	۸۵۰	۵	۴۰۰	هوایی
۷۸۰۰	۱۰۰۰	۱۰	۵۰۰	زمینی
۹۳۰۰	۱۲۰۰	۱۵	۶۳۰	زمینی
۱۱۰۰۰	۱۴۵۰	۱۵	۸۰۰	زمینی
۱۳۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰	۱۰۰۰	زمینی
۱۵۰۰۰	۲۲۰۰	۲۵	۱۲۵۰	زمینی
۱۹۸۰۰	۲۵۵۰	۲۵	۱۶۰۰	زمینی

پیوست (۲)

جدول ۲: اطلاعات مربوط به متغیرهای مسئله

اندازه	شرح	اندازه	شرح
۱۲۰٪	ضریب اضافه بار ترانسفورماتور	۰,۳	ضریب بار سیستم
۰,۰۳۳۷	ضریب تلفات	۱۰٪	نرخ رشد سالیانه بار
-	-	۰,۰۱ دلار	ارزش تلفات

مراجع

[1] T. Gönen and I. J. Ramirez-Rosado, "Review of distribution system planning models: a model for optimal multistage planning", *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 133, No. 7, pp. 397, 1986.

[2] D. Hongwei et al. , "Optimal planning of distribution substation locations and sizes Model and algorithm", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 18, no. 6, pp. 353–357, 1996.

[3] K. Suresh and L. Lawrence, "Power distribution planning: A review of models and issues", *IEEE Transactions on Power Systems* ., Vol, No. 12, pp. 1151–1159, 1997.

[4] C.-S. Chen and T.-H. Wu, "Optimal distribution transformer sizing by dynamic programming", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 20, No. 3, pp. 161–167, 1998.

[5] A. Augugliaro, L. Dusonchet, and E. R. Sanseverino, "Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: Three heuristic

- [19] Vahedi, Soroush, Mahdi Banejad, and Mohsen Assili, "Optimal location, sizing and allocation of subtransmission substations using K-means algorithm", 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp.1-5, 23-26 Jul 2015.
- [20] M.Humayun et al, "Optimal capacity management of substation transformers over long-run", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. 1, pp. 632–641, 2016.
- [21] L. L. Li, Y. F. Yang, C. H. Wang, and K. P. Lin, "Biogeography-based optimization based on population competition strategy for solving the substation location problem", Expert Syst. Appl., Vol. 97, No. 1, pp. 290–302, 2018.
- [22] S. N. Ravadanegh and R. G. Roshanagh, "A heuristic algorithm for optimal multistage sizing, siting and timing of MV distribution substations," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 105, pp. 134–141, 2013.
- [23] Karaboga, Dervis; Bahriye Akay, A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214, 2009, 108- 132.
- [24] Mehrdad Mehrpour, Optimal Locating of Substations with Combination of GA (Genetic Algorithm) and MST (Minimum Spanning Tree) Algorithm by Load Assignment technique, M.Sc. Thesis, Tabriz University, Tabriz, 129, 2009.
- Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 1255-1259, 1-6 July 2011.
- [14] J. E. Mendoza, M. E. López, H. E. Peña, and D. A. Labra, "Low voltage distribution optimization: Site, quantity and size of distribution transformers", *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 91, No. 1, pp. 52–60, 2012.
- [15] Rastgoo, Abdullah, Ghasemi, Sasan, Bahramara, Salah. Providing a bi-level model for medium and low voltage distribution network expansion planning *Computational Intelligence in Electrical Engineering* 10.22108 / isee.2019.118945.12, .1399; 11 (2): 95-110. Doi.
- [16] S. M. Mazhari, H. Monsef, and H. Falaghi, "A hybrid heuristic and learning automata-based algorithm for distribution substations siting, sizing and defining the associated service areas", *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 433–456, 2014.
- [17] S. N. Ravadanegh, "A multistage expansion planning method for optimal substation placement", *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, Vol. 10, No. 1, pp. 65–74, 2014.
- [18] R. R. Gonçalves, J. F. Franco, and M. J. Rider, "Short-term expansion planning of radial electrical distribution systems using mixed-integer linear programming", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 9, No. 3, pp. 256–266, 2015.

¹ Artificial Bee Colony Algorithm

² Ant Colony Optimization

³ Genetic Algorithm

⁴ Tabu Search Algorithm

⁵ Constructive Heuristic Approach

⁶ Differential Evolution Algorithm

⁷ Imperialist Competitive Algorithm

⁸ Mixed Integer Linear Programming

⁹ K-Means Optimization Clustering Algorithm

¹⁰ biogeography-based optimization with population competition algorithm