روشی نوین جهت بازآرایی چند منظوره شبکه توزیع با استفاده از ترکیب الگوریتم زنبورها و تئوری گراف

هاجر باقری طولابی[۱]، محمدحسن مرادی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:

۹۱/۸/۸

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۱/۱۱/۱۵

چکیده:

بازآرایی شبکه های توزیع برق، بالاخص در حضور سیستم های اتوماسیون، یکی از اهداف بهره برداری در شبکه های قدرت محسوب می شود. بازآرایی را می توان با اهداف متنوعی انجام داد که کاهش تلفات یکی از مهمترین آنهاست. در این مقاله، عملیات بازآرایی با ترکیب جدیدی از الگوریتم زنبورها و تئوری گراف، با کمک تابع هدف چندمنظوره بدیع و نسبتاً کاملی جهت کاهش تلفات، نامتعادلی توان در فیدر، تعداد عملیات سوئیچینگ و بهبود پروفیل ولتاژ صورت گرفته است. از الگوریتم زنبورها برای انجام عملیات بازآرایی چند منظوره و از تئوری گراف جهت بررسی وضعیت شعاعی شبکه ضمن تغذیه همه بارها پس از بازآرایی بهره گرفته شده است. برنامه مورد نظر جهت بازآرایی شامل ترکیب این دو تکنیک ، در محیط نرم افزار مطلب نوشته شده و بر روی یک شبکه نمونه ۳۳ باسه و ۱۲.۶۶ کیلوولت آزمایش شده است. نتیجه نهایی نشان دهنده موفقیت ترکیب این دو تکنیک در معرفی ساختار جدید بهینه ای برای شبکه توزیع می باشد.

کلمات کلیدی:

الگوریتم زنبور عسل، بازآرایی چندمنظوره، تئوری گراف، شبکه توزیع

۱) عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد واحد خرم آباد (نویسنده مسئول) hajar.bagheri@ieee.org

۲) عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا- همدان mh_moradi@yahoo.co.uk

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مقدمه

شبکه‌های توزیع برق، واسط بین سیستم انتقال و مصرف کنندگان هستند. این شبکه ها معمولاً با ساختار شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. پیکربندی شعاعی دارای مزایایی همچون جریان اتصال کوتاه کمتر و هماهنگی حفاظتی آسان‌تر است، در حالی که منجر به کاهش قابلیت اطمینان تغذیه مصرف کنندگان، افزایش کل تلفات توان و افت ولتاژ در نقاط بار می‌شود. "تای سوئیچ‌ها" و "سکشنلایزرها" دو نوع سوئیچ مورد استفاده در سیستم‌های توزیع هستند. با تغییر وضعیت باز و بسته بودن این سوئیچ‌ها در زمان بهره‌برداری، ساختار شبکه توزیع نیز تغییر خواهد کرد. این تغییر در پیکربندی سیستم توزیع به عنوان بازآرایی شناخته می‌شود و با اهداف مختلفی مانند کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش تعادل بار و ... انجام می‌شود. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه روش‌های مختلف بازآرایی با اهداف گوناگون برای سیستم‌های توزیع صورت پذیرفته است[۵, ۲۷, ۳۱].

بازآرایی شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات، برای اولین بار توسط مرلین و بک [۲] در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. روش آنها با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی شاخه و قید، به تعیین ساختاری از شبکه توزیع می‌پردازد که حداقل تلفات را داراست. در این روش، ابتدا تمام سوئیچ‌ها جهت ایجاد یک پیکربندی مش مانند، بسته می‌شوند و سپس به طور متوالی به منظور دست‌یابی به ساختاری شعاعی با حداقل تلفات باز می‌شوند. پس از این تکنیک، الگوریتم‌های زیادی با اهداف مختلف برای بازآرایی سیستم‌های توزیع ارائه شدند. گوسوامی و باسو [۲۵] یک الگوریتم ابتکاری برای بازآرایی ارائه کردند که با استفاده از یک برنامه پخش بار اجرا می‌شود. در سال۱۹۹۷ تالسکی و راجیسیک[۲۲] یک تکنیک بهینه‌سازی برای تعیین ساختار سیستم توزیع با حداقل تلفات انرژی برای یک دوره معین ارائه دادند. جنبه‌های کاربردی استفاده از بازآرایی بهینه سیستم‌های توزیع توسط بورازن و راجیکویچ [۲۹] در سال ۱۹۹۷ معرفی شدند. یک الگوریتم بازآرایی شبکه در سال ۱۹۹۸ با استفاده از شاخص‌های ولتاژ، اهمی و تصمیم‌گیری توسط لین و چاین [۳۲] برای تعیین عملیات سوئیچینگ معرفی شد. گومز و همکاران [۱۳] نیز یک الگوریتم ابتکاری برای شبکه‌های توزیع بزرگ معرفی کردند که با یک ساختار مشی که تمام سوئیچ‌های آن در ابتدا بسته شده آغاز می‌شود، سپس سوئیچ‌ها یکی پس از دیگری برای رسیدن به سیستمی با حداقل تلفات، با استفاده از یک برنامه پخش بار، باز می‌شوند. در سال ۲۰۰۵، روش جدیدی مبتنی بر تکنیک مسیر به گره به منظور مدل‌سازی بازآرایی توسط راموست و اکسپوزیت [۱۲] ارائه شد. اشمیت و همکاران[۱۴] هم به معرفی یک تکنیک بازآرایی بر اساس روش استاندارد نیوتن برای به حداقل رساندن تلفات پرداختند. ژو و همکارانش [۲۰] دو الگوریتم بازآرایی را جهت تعادل بار و بازیابی سرویس توسعه دادند و برای حل مسأله بازآرایی، از ترکیب قوانین ابتکاری و منطق فازی به منظور اهداف بهینه‌سازی استفاده کردند. جان[۳۳] ، اگلیر [۱] و همکارانشان از تکنیک‌های هوش مصنوعی برای بازآرایی با حداقل تلفات استفاده کردند. داس [۷] یک قاعده فازی چند منظوره را جهت بهینه‌سازی شبکه توزیع با چهار هدف متعادل کردن بار فیدرها، کاهش توان اکتیو، انحراف ولتاژ گره‌ها و نقض محدودیت جریان شاخه مدل‌سازی نمود. اگرچه نتایج به دست آمده با ارزش هستند، اما نقصان گزارش شده مقاله مورد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

نظر این است که معیارهای انتخاب توابع عضویت در آن ارائه نشده اند . نارا و همکارانش [۱۶] با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (GA)به حل مسأله بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات پرداختند. در سال ۲۰۱۱، الگوریتم جستجوی هماهنگ (HSA)توسط رائو و همکاران [۲۳] برای بازآرایی بهینه شبکه‌های توزیع بزرگ، مورد استفاده قرار گرفت.

در این مقاله، با ترکیب جدیدی از الگوریتم زنبورها[۱] و نظریه گراف[۲] به حل مسأله بازآرایی سیستم توزیع جهت کاهش تلفات، نامتعادلی توان در فیدر، تعداد عملیات سوئیچینگ و بهبود پروفیل ولتاژ در قالب برنامه نویسی و اجرای آن در محیط نرم افزار Matlab پرداخته شده است. روش ترکیبی پیشنهادی بر روی یک سیستم توزیع نمونه اعمال شده و نتایج در بخش مطالعات عددی ارائه گردیده است. در انتها نیز جهت بررسی کفایت روش ترکیبی ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها صورت گرفته است.

الگوریتم زنبورها

در طبیعت، مجموعه‌ای از زنبورهای عسل می‌توانند خود را به فواصل دور رسانده و در جهت‌های مختلف و به طور همزمان از منابع غذایی استفاده کنند. این مجموعه با فرستادن زنبورهای جستجوگر به سمت منابع مناسب‌تر گسترش می‌یابد. دراین فرایند، گل‌های با شهد بالا میزبان زنبورهای بیشتر و گل‌های با شهد کمتر شاهد زنبورهای کمتری خواهند بود. زنبورهای بازرس آغازگر فرایند جستجو در یک مجموعه هستند. زنبورهای بازرس به صورت تصادفی از یک گلزار به سمت گلزار دیگر حرکت کرده و پس از کسب اطلاعات از آنها، به کندو برگشته و شروع به تبادل اطلاعاتی از قبیل جهت گلزار و مسافت کندو تا گلزار می‌کنند [۹, ۱۰].

الگوریتم زنبورها یک الگوریتم جستجوی جدید بر مبنای جمعیت می‌باشد که در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این الگوریتم از رفتار مجموعه زنبورهای عسل در جستجوی غذا الهام گرفته شده است و نوعی جستجوی همسایگی تصادفی را انجام می‌دهد که درمسائل بهینه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲۸]. مراحل یافتن جواب بهینه توسط الگوریتم زنبورعسل در قالب یک نمودار جریانی در شکل ۱ نشان داده شده که به شرح زیر خلاصه شده است:

- ایجاد مجموعه جواب اولیه.
- بررسی برازندگی مجموعه جواب‌های اولیه.
- تکرار حلقه زیر تا حصول شرط توقف.

---

۱) Bees Algorithm
۲) Graph Theory

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

- ایجاد یک مجموعه جدید همسایگی به منظور یافتن جواب‌های جدید.
- انتخاب مکان‌ها برای جستجوی همسایگی.
- استخدام زنبورها برای مکان های انتخاب شده.
- انتخاب بهترین زنبور (به لحاظ برازندگی) از هر بسته.
- اضافه نمودن زنبورهای باقیمانده برای جستجوی تصادفی و بررسی برازندگی آنها و مقایسه جواب‌های قدیم و جدید.
- پایان حلقه.

الگوریتم با وارد کردن n زنبور بازرس به صورت تصادفی در فضای جستجو شروع و برازندگی مکان‌های رویت شده توسط n زنبور بازرس بررسی می‌گردد. زنبورهایی با بالاترین مقادیر برازندگی به عنوان زنبورهای منتخب انتخاب شده و مکان‌های مشاهده شده آنها جهت جستجوی همسایگی مشخص می‌گردند. در مراحل بعد، الگوریتم عملیات جستجو را به همسایگی مکان‌های انتخاب شده هدایت می‌کند. همان طور که ذکر گردید، زنبورها بر اساس میزان برازندگی مکان‌های رویت شده انتخاب می‌شوند و الگوریتم از مقادیر برازندگی مربوطه جهت بررسی مکان‌های برتر استفاده میکند [۱۰, ۱۷].

پارامترهای موجود در این الگوریتم عبارتند از:

n: تعداد زنبورهای بازرس.

m: تعداد مکان های منتخب از میان مکان های مشاهده شده زنبورهای بازرس.

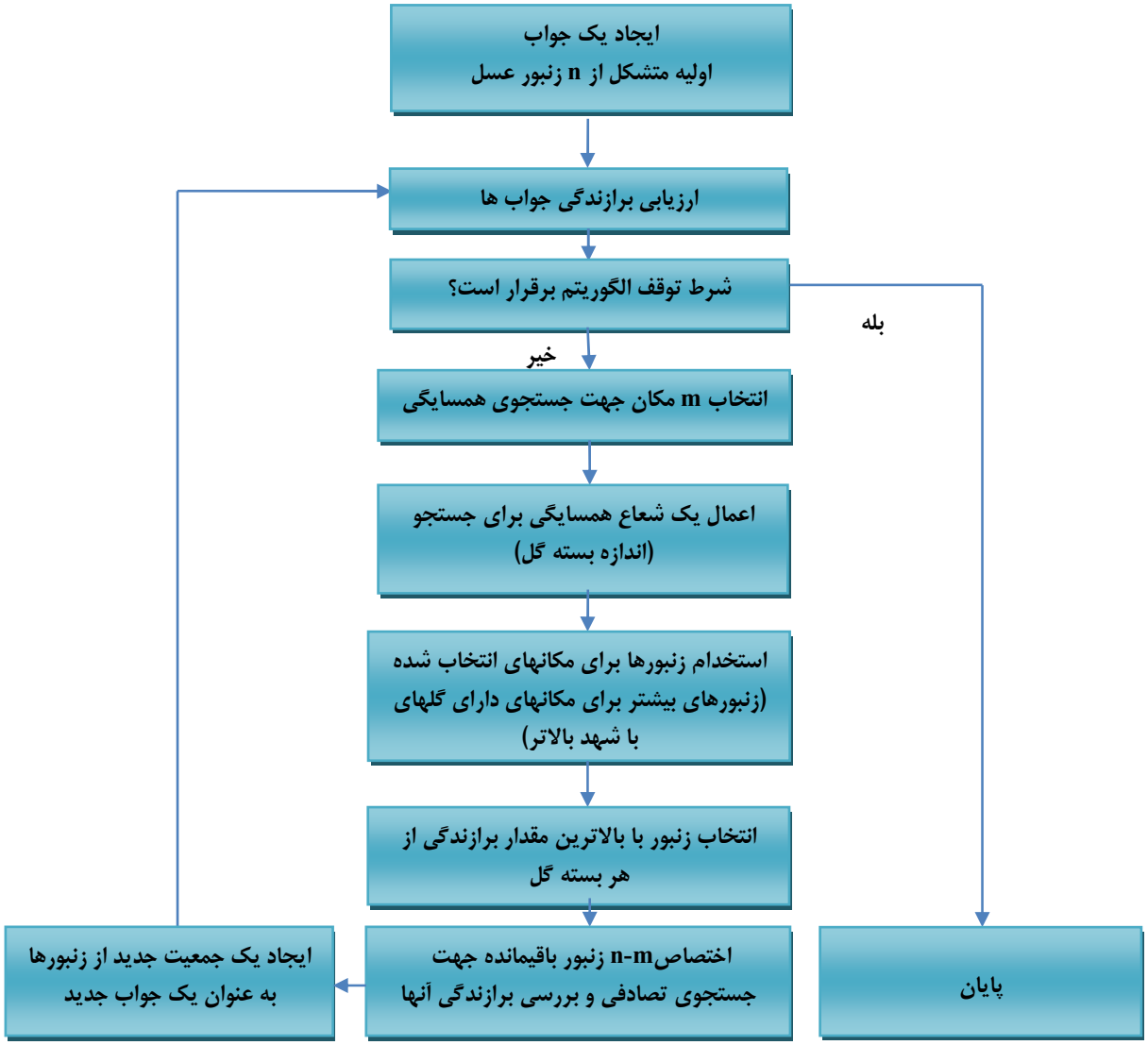
e: تعداد مکان های برتر از میان m مکان منتخب.

nep: تعداد زنبورهای استخدام شده برای e مکان منتخب.

nsp: تعداد زنبورهای استخدام شده برای m-e مکان باقیمانده.

ngh: اندازه بسته گل (شعاع همسایگی در جستجوی تصادفی).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۱) نمودار جریانی الگوریتم زنبورعسل

تئوری گراف

یک گراف توسط یک ماتریس باینری G (V ، E) [۲۱] معرفی می‌شود که در آن بردار V مجموعه گره‌ها در گراف و بردار E مجموعه‌ای از زوج‌های نامرتب معرف رابطه بین گره‌های مختلف موجود در گراف است که به هر کدام از آنها یال

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

گفته می‌شود. درجه هر گره یا رأس توسط تعداد یال‌های متصل به آن رأس تعریف می شود. یک مسیر[۱] در گراف یک گذر از رأس‌های متوالی در امتداد یک سری از یال‌هاست. رأس انتهای یک یال، رأس ابتدای یال بعدی در توالی محسوب می‌شود. دور (cycle) مسیر ساده‌ای است که رأس شروع و پایانی آن یکی باشد. گراف همبند، گرافی است که بین هر دو رأس آن حداقل یک مسیر وجود داشته باشد. درخت، یک گراف همبند است که هیچ دوری در آن وجود ندارد. در یک گراف درخت، اگر V تعداد رئوس و E تعداد یال‌ها باشد، معادله (۱) برقرار است:

$$V = E - 1 \qquad (۱)$$

تعداد دورها برای هر گراف با معادله (۲) ارائه می‌شود:

$$cycle = (E + V) - 1 \qquad (۲)$$

یک گراف با n گره را می توان با ماتریس مجاورت زیر توصیف کرد :

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \qquad (۳)$$

در این ماتریس، اگر دو گره i و j به طور مستقیم به هم متصل شوند ، عنصر a_{ij} متناظر برابر یک و در غیر این صورت، برابر با صفر خواهد بود.

در این مقاله، از نظریه گراف به منظور بررسی حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع پس از بازآرایی (ساختار درختی برای گراف متناظر با شبکه جدید) و نیز تغذیه همه بارها (همبند بودن گراف جدید پیشنهادی) استفاده شده است.

فرمول بندی مسأله

همان طور که در بخش های پیشین مقاله اشاره شد، بازآرایی فیدرهای توزیع، در شرایط بهره برداری با اهداف مختلفی از طریق تغییر وضعیت باز و بسته بودن سوئیچ‌ها انجام می‌شود. در این مقاله، بازآرایی با چهار هدف کاهش تلفات توان، نامتعادلی توان در فیدر، تعداد عملیات سوئیچینگ و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه توزیع انجام شده است.

کاهش تلفات توان

کاهش تلفات توان، به عنوان یکی از مهم ترین اهداف متداول بازآرایی در تابع هدف در نظر گرفته شده است و معادل

۱) Path

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

ریاضی آن به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود [۳, ۱۵, ۲۶] :

$$f_l = \sum_{k=1}^{n} (r_k . I_k^{\,2}) \quad , \quad I_k \le I_{k\max} \tag{۴}$$

که در آن:

n : تعداد کل سکشن ها

r_k : مقدار مقاومت هادی سکشن K ام

I_k : جریان عبوری از سکشن K ام

کاهش نامتعادلی توان در فیدر

دلایل مختلفی وجود دارند که منجر به عدم تعادل توان موجود بر روی سکشن‌های یک فیدر می‌شوند مانند توزیع ناهمگون، رفتار تصادفی و پیش‌بینی نشده مشترکین و .... هدف اصلی این بخش، کاهش نامتعادلی در مقادیر توان اکتیو و راکتیو همه سکشن‌ها می‌باشد، بنابراین، معادل ریاضی آن در تابع هدف به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته شده است:

$$f_i = Variance\left[\frac{S_1}{S_{1\max}}, \frac{S_2}{S_{2\max}}, ..., \frac{S_k}{S_{k\max}}, ..., \frac{S_n}{S_{n\max}} \right] \tag{۵}$$

که در آن:

S_k : مقدار توان ظاهری عبوری از سکشن K ام

$S_{k\max}$: ماکزیمم توان ظاهری مجاز سکشن K ام

کاهش تعداد عملیات سوئیچینگ

جهت گذر از ساختار اولیه به ساختار بهینه شبکه توزیع در ضمن عملیات بازآرایی با کمترین تعداد سوئیچینگ، نیاز به طراحی تابع هدفی مناسب است تا ضمن دستیابی به حالت بهینه شبکه، از کلیدزنی‌های اضافه پرهیز شود. به این منظور، تابع هدف زیر در نظر گرفته شده است:

$$\min f_s = \sum_{k=1}^{n} \left| SW_k - SW_{ak} \right| \tag{۶}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

که در آن:

SW_k : وضعیت جدید سوئیچ K ام

SW_{ak} : وضعیت اولیه سوئیچ K ام

بهبود پروفیل ولتاژ

هدف عمده این بخش، کاهش انحراف مقادیر ولتاژ باس‌ها از مقایر نامی آنها می‌باشد. بنابراین، تابع هدفی به صورت معادله (۷) برای آن در نظر گرفته شده است:

$$V_{k\min} \le V_k \le V_{k\max} \quad , \quad k = 1,2,...,n_l \ \min f_d = \max\left|V_k - V_r\right| \quad , \tag{۷}$$

که در آن:

n_l : تعداد کل باس ها

V_k : ولتاژ واقعی باس K ام و

V_r : ولتاژ نامی باس K ام

حل مسأله بر اساس الگوریتم زنبور عسل و تئوری گراف

در این مطالعه جهت بازآرایی با چهار هدف تشریح شده در بخش پیشین مقاله، یک تابع هدف چند منظوره، با مدل ریاضی زیر در نظر گرفته شده است:

$$E = Minimum \left[a_1.(f_l - f_{l\min}) + a_2.(f_i - f_{i\min}) + a_3.(f_d - f_{d\min}) + a_4.(f_s - f_{s\min}) + P\right] \tag{۸}$$

$$\sum_{i=1}^{4} a_i = 1$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

در تابع هدف چند منظوره فوق، a_i ها، ضرایب وزنی هر یک از توابع هدف چهارگانه می‌باشند، پارامتر P نیز تابع جریمه است که به صورت زیر و با معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$P = A.T_{cycle(number)} + B.M_{isolated-loads(number)} \quad (۹)$$

در معادله بالا، $T_{cycle(number)}$ تعداد دورهای شکل گرفته در گراف متناظر شبکه، $M_{isolated-loads(number)}$ تعداد بارهای منفصل شده از سیستم ، A و B پارامترهای ثابت معادله هستند که در این مطالعه، مقدار ۰.۰۴ برای هر کدام از آنها فرض شده است.

علاوه بر این، برای مسأله بازآرایی شبکه های توزیع شعاعی، چهار قید مطرح است که در ساختار پیشنهادی جدید باید در نظر گرفته شوند، این قیود عبارتند از :

– (حداکثر و حداقل مقدار مجاز ولتاژ باس ها) $k = 1,2,...n_l \; V_{k\min} \le V_k \le V_{k\max}$

– (حداکثر و حداقل مقدار مجاز جریان مجاز شاخه‌ها) $k = 1,2,..n \; I_k \le I_{k\max}$

– لزوم حفظ پیکربندی شعاعی شبکه توزیع .

– تغذیه تمام گره‌های موجود در سیستم توزیع.

در این مطالعه، قیود حد مجاز ولتاژ باس‌ها و جریان شاخه‌ها درون توابع هدف f_l و f_d گنجانده شده، لزوم حفظ پیکربندی شعاعی و تغذیه تمام گره‌های موجود در سیستم توزیع نیز با بهره‌گیری از تئوری گراف برآورده شده‌اند.

روش پیشنهادی بازآرایی چند منظوره شبکه توزیع، با استفاده از الگوریتم زنبور عسل و تئوری گراف در قالب نمودار جریانی زیر مرحله به مرحله شرح داده شده است: (برای انجام پخش بار از تکنیک ارائه شده در [۲۴] استفاده شده است.)

مرحله ۱. دریافت داده‌های باس‌ها، بارها و شاخه‌های شبکه توزیع مورد نظر.

مرحله ۲. ایجاد حل اولیه تصادفی به کمک الگوریتم زنبور عسل.

مرحله ۳. اجرای برنامه پخش بار [۲۴]، محاسبه برازندگی جواب‌ها و مقدار تابع هدف E_{best} .

مرحله ۴. تولید یک فضای همسایگی جهت جستجوی جواب‌های جدید.

مرحله ۵. اجرای مجدد برنامه پخش بار. محاسبه برازندگی جواب های جدید و مقدار تابع هدف جدید E_{new}

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مرحله ۶. پیشنهاد ساختار جدید، مقایسه برازندگی جواب‌ها و توابع هدف قدیم و جدید. جایگزینی تابع هدف کوچکتر با E_{best}

مرحله ۷. اگر شرایط خروج از الگوریتم برقرار، نیست به مرحله ۴ برو.

مرحله ۸. بررسی برقراری قیود بازآرایی (حفظ ساختار شعاعی و تغذیه همه بارهای شبکه) در ساختار جدید پیشنهادی، به کمک تئوری گراف به شرح زیر:

الف. ایجاد ماتریس مجاورت متناظر با پاسخ پیشنهادی الگوریتم زنبور عسل در مرحله۶ و نام گذاری آن به صورت ماتریس A۱. این ماتریس اطلاعات نحوه اتصال باس‌های فیدر با ساختار جدید را نشان می‌دهد.

ب. محاسبه ماتریس A۲ با حذف عناصر تکراری ماتریس A۱ و مقایسه عناصر غیر صفر ماتریس A۲ با تعداد باس‌های شبکه. نتیجه این مقایسه دو حالت (۱) نابرابری و حالت (۲) برابری عناصر غیر صفر ماتریسA۲ با تعداد باس‌های شبکه می‌باشد:

حالت (۱): این حالت به معنی ناهمبند بودن گراف متناظر با ساختار جدید پیشنهادی می‌باشد و حاکی از عدم تغذیه همه باس‌های موجود در شبکه است. در این حالت، تابع هدف جریمه می‌شود و فرایند به مرحله ۴ برمی‌گردد.

حالت (۲): در این حالت نیز اگر با حذف ستون اول ماتریسA۱ ماتریسی با حداقل یک سطر صفر تولید شود، باز هم به معنی ناهمبند بودن گراف متناظر با ساختار جدید پیشنهادی و عدم تغذیه همه باس‌های موجود در شبکه است که مستلزم جریمه تابع هدف و رجوع به مرحله ۴ است. در غیر این صورت، گراف متناظر با ساختار پیشنهادی همبند است. اگر هیچ بار تغذیه نشده‌ای وجود نداشته باشد، تعداد دورهای گراف متناظر به کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود. اگر تعداد دورهای محاسبه شده ساختار پیشنهادی صفر باشد یعنی گراف متناظر درختی بوده و به فرم شعاعی است و همه بارها نیز تغذیه شده‌اند. در غیر این صورت، باز هم تابع هدف جریمه می‌شود و این فرایند مجدداً از مرحله ۴ دوباره تکرار می‌شود.

مرحله ۹. ساختار جدید پیشنهادی و پایان.

نتایج اعمال تکنیک پیشنهادی بر روی فیدر نمونه

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک فیدر توزیع نمونه انتخاب شده است. نمودار تک خطی این فیدر در شکل۲ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای همه سکشن‌ها، سوئیچ لحاظ شده است. این فیدر یک فیدر ۱۲.۶۶ کیلو ولت، با ۳۳ باس، ۳۲ سکشنلایزر و ۵ تای سوئیچ می‌باشد. اطلاعات الکتریکی ساختار اولیه این فیدر شامل مقاومت، راکتانس، توان اکتیو و راکتیو هر سکشن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

دو آزمایش متفاوت جهت بررسی عملکرد تکنیک ترکیبی پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

آزمایش اول: در تابع هدف اصلی، برای توابع هدف چهارگانه ضرایب وزنی متفاوت به صورت زیر لحاظ می‌شود:

$$a_1 = 0.4 \;,\; a_2 = 0.4 \;,\; a_3 = 0.1 \text{ , and } a_4 = 0.1$$

آزمایش دوم: در تابع هدف اصلی، برای توابع هدف چهارگانه ضرایب وزنی یکسان به صورت زیر لحاظ می‌شوند:

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0.25$$

با اعمال تکنیک ترکیبی پیشنهادی در قالب برنامه نوشته شده در محیط نرم افزار مطلب بر روی فیدر نمونه با ورود داده‌های اولیه فیدر مورد نظر در مدت زمانی معادل تقریباً ۷ دقیقه برای آزمایش اول و ۴ دقیقه برای آزمایش دوم، ساختارهای جدید با تغییر وضعیت تعدادی از سوئیچ‌ها ارائه شد.

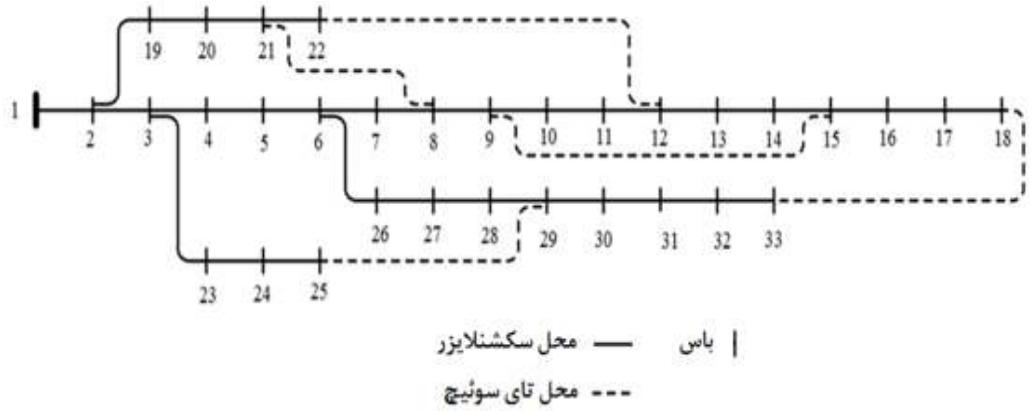
سوئیچ‌های پیشنهادی و نتایج عددی حاصل از اعمال روش ترکیبی پیشنهادی بر روی فیدر نمونه، در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. همان طور که در این جدول دیده می‌شود، مقدار تلفات توان اکتیو با ساختار اولیه فیدر، قبل از بازآرایی برابر ۲۰۲.۷۳۰ کیلو وات می‌باشد و با اعمال تکنیک پیشنهادی، در آزمایش اول، میزان تلفات به میزان تقریباً ۳۱ درصد و در آزمایش دوم ۲۹.۵ درصد کاهش یافته است. میزان تعادل توان در شبکه نیز در هر دو آزمایش بهبود یافته است، اما مقدار این بهبود برای آزمایش اول که ضریب تابع هدف مربوطه بیشتر از آزمایش دوم می‌باشد، مقدار بالاتری گزارش شده است.

تعداد عملیات سوئیچینگ برای آزمایش اول عدد ۸ و برای آزمایش دوم عدد ۶ را نشان می‌دهد. در هر دو آزمایش ۵ سوئیچ باز پیشنهاد شده است که شماره سکشن‌های آنها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. به همین ترتیب، شاخص انحراف ولتاژ باس‌ها از مقادیر نامی نیز در هر دو آزمایش بهبود یافته و از مقدار اولیه ۰.۹۶۲۲ به ترتیب به مقادیر ۰.۰۷۰۲ برای آزمایش اول و ۰.۰۶۸۲ برای آزمایش دوم رسیده است که به معنی بهبود نسبی افت ولتاژ شبکه است.

در جدول ۳ نیز مقادیر دامنه ولتاژها بر حسب پریونیت، قبل و پس از بازآرایی برای هردو آزمایش ارائه شده‌اند. فرایند همگرایی توابع هدف f_1 ، f_i و f_d برای هر دو آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴ نتایج مقایسه تلفات بین روش پیشنهادی در آزمایش اول و سایر روشها را نشان می‌دهد. همان طور که از این جدول مشاهده می‌شود، تکنیک ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها عملکرد قابل قبولی داشته است. جدول ۵ نیز نشان دهنده پارامترهای انتخاب شده جهت عملکرد رضایت بخش الگوریتم زنبورها می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۲) دیاگرام تک خطی فیدر نمونه

جدول ۱) اطلاعات الکتریکی فیدر نمونه [۵]

شماره سکشن	آغاز	پایان	R(Ohm)	X(Ohm)	P(KW)	Q(KVAR)
1	1	2	0.0922	0.0470	100	60
2	2	3	0. 4930	0.2511	90	40
3	3	4	0. 3660	0.1864	120	80
4	4	5	0. 3811	0.1941	60	30
5	5	6	0. 8190	0.7070	60	20
6	6	7	0. 1842	0.6188	200	100
7	7	8	0. 7114	0.2351	200	100
8	8	9	1. 0300	0.7400	60	20
9	9	10	1. 0440	0.7400	60	20
10	10	11	0. 1966	0.0650	45	30
11	11	12	0. 3744	0.1238	60	35
12	12	13	1. 4680	1.0550	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	17	18	0.7320	0.5740	90	40
18	2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	40
23	23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	24	25	0.8960	0.7011	420	200
25	6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25

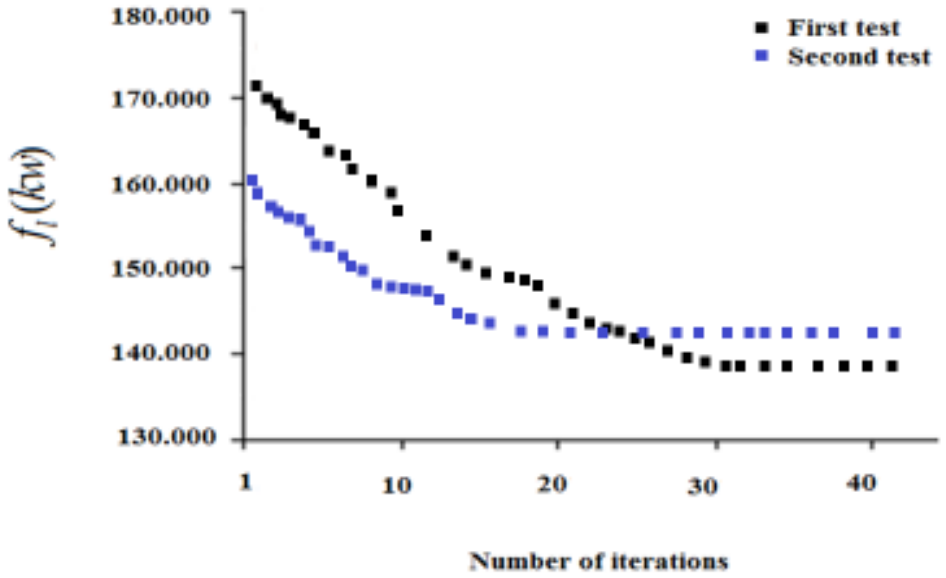
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

شماره سکشن	آغاز	پایان	R(Ohm)	X(Ohm)	P(KW)	Q(KVAR)
27	27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9742	0.9630	150	70
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.3410	0.5320	60	40
33*	21	8	2.0000	2.0000	–	–
34*	9	15	2.0000	2.0000	–	–
35*	12	22	2.0000	0.5000	–	–
36*	18	33	0.5000	0.5000	–	–
37*	25	29	0.5000	0.5000	–	–
* شاخه های باز						

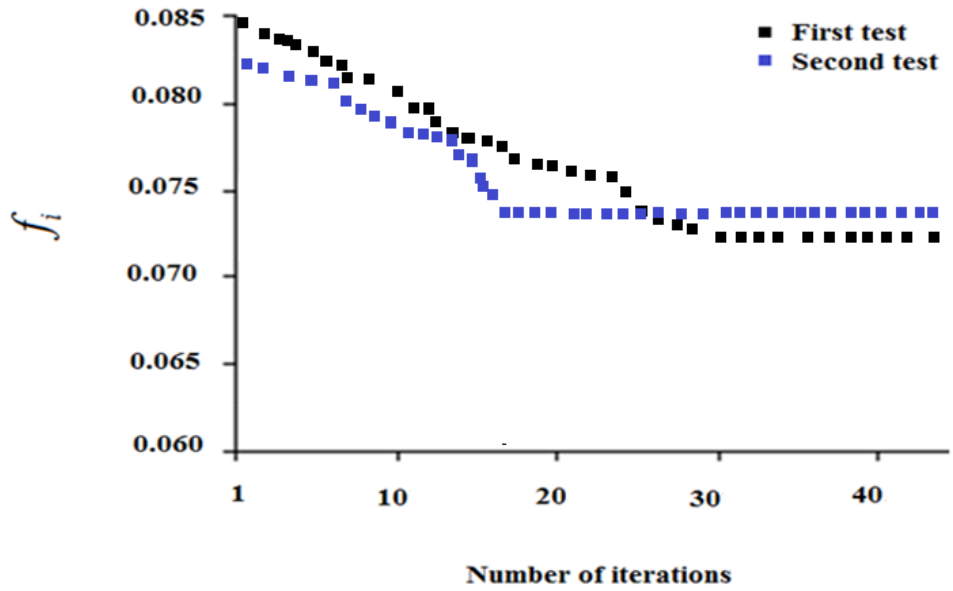
جدول ۲) نتایج اعمال تکنیک پیشنهادی

پارامتر	ساختار اولیه	ساختار جدید پیشنهادی(آزمایش اول)	ساختار جدید پیشنهادی(آزمایش دوم)
مقدار تابع هدف (KW) f_l	202.730	139.534	142.809
کاهش تلفات (٪)	–	31.172	29.557
f_i	0.119	0.072	0.074
درصد بهبود نامتعادلی توان در فیدر	–	39.495	37.815
f_s	–	8	6
تعداد سوئیچ های باز	5	5	5
سکشن تای سوئیچ مربوطه	33–34–35–36–37	7–9–14–32–37	6–9–14–32–37
$(p.u)\ f_d$	0.0962	0.0702	0.0628
مدت زمان اجرای برنامه توسط CPU (ثانیه)	–	401	257

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

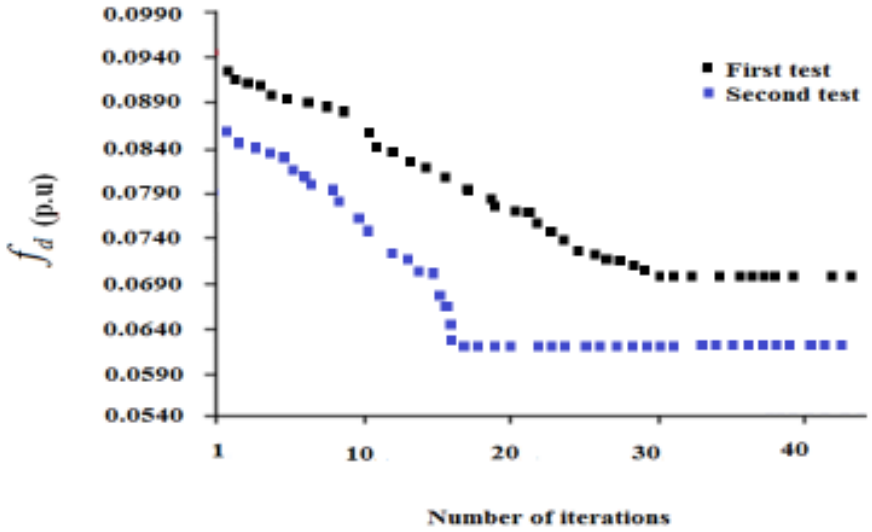


شکل ۳) فرایند همگرایی تابع هدف f_i



شکل ٤) فرایند همگرایی تابع هدف f_i

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل ۵) فرایند همگرایی تابع هدف f_d

جدول ۳) مقادیر دامنه ولتاژ باس‌ها قبل و پس از بازآرایی با تکنیک پیشنهادی

باس	اندازه ولتاژ(پریونیت) قبل از بازآرایی	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش اول	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش دوم	باس	اندازه ولتاژ(پریونیت) قبل از بازآرایی	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش اول	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش دوم
1	1.000000	1.000000	1.000000	18	0.888741	0.974223	0.972144
2	0.974841	0.998429	0.998613	19	0.974296	0.993985	0.969550
3	0.960493	0.986357	0.953824	20	0.970605	0.996641	0.993278
4	0.952907	0.948888	0.986375	21	0.969876	0.995804	0.995811
5	0.945386	0.971383	0.988415	22	0.969214	0.965471	0.973468
6	0.926508	0.954920	0.959909	23	0.956826	0.982475	0.992276
7	0.922832	0.914380	0.946231	24	0.949952	0.945843	0.981383
8	0.917877	0.943927	0.952275	25	0.946526	0.972877	0.979924
9	0.911414	0.937517	0.952279	26	0.924566	0.950538	0.997970
10	0.905422	0.931472	0.927824	27	0.921989	0.954953	0.963535
11	0.904542	0.938994	0.937943	28	0.910346	0.936474	0.903859
12	0.903006	0.899346	0.936405	29	0.901997	0.947101	0.895270
13	0.896699	0.922701	0.980183	30	0.898446	0.924894	0.931733
14	0.894346	0.880006	0.887718	31	0.894108	0.920117	0.967503

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

باس	اندازه ولتاژ(پریونیت) قبل از بازآرایی	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش اول	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش دوم	باس	اندازه ولتاژ(پریونیت) قبل از بازآرایی	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش اول	اندازه ولتاژ(پریونیت) پس از بازآرایی- آزمایش دوم
15	0.892883	0.988771	0.926099	32	0.893150	0.919598	0.927573
16	0.891471	0.947282	0.944951	33	0.892853	0.898738	0.925230
17	0.889367	0.915296	0.972764	–	–	–	–

جدول٤) مقایسه بین نتایج تکنیک پیشنهادی با سایر روش‌ها

تکنیک	سکشن مربوط به تای سوئیچ ها	تلفات توان (KW)
Original configuration[۵]	33–34–35–36–37	202.73
Shirmohammadi and Hong (۱۹۸۹)[۲۷]	7–10– 14– 32– 37	140.26
Goswami and Basu (۱۹۹۲)[۲۵]	7–9– 14– 32– 37	139.53
GA (Nara,۱۹۹۲) [۱۶]	33–9–34– 28– 36	140.6
Vanderson Gomes et al. (۲۰۰۵)[۳۱]	7– 9– 14– 32– 37	139.53
روش پیشنهادی(آزمایش اول)	7–9–14–32–37	139.534

جدول ۵) پارامترهای انتخاب شده جهت همگرایی مناسب الگوریتم زنبورها

شماره آزمایش	اول	دوم
n: تعداد زنبورهای بازرس (ساختارهای پیشنهادی اولیه برای شبکه توزیع مورد نظر با توجه به انواع وضعیت سوئیچ ها)	70	70
m: تعداد مکان های منتخب از میان مکان مشاهده شده توسط زنبورهای بازرس (ساختارهای منتخب از میان ساختارهای پیشنهادی شبکه توزیع)	10	9
e: تعداد مکانهای برتر از میان m مکان منتخب (ساختارهای پیشنهادی برتر با حداقل تابع هدف چند منظوره از میان ساختارهای منتخب شبکه توزیع مورد نظر)	3	2
nep: تعداد زنبورهای استخدام شده برای e مکان منتخب (تای سوئیچ های پیشنهادی جهت ساختارهای برتر)	28	24
nsp: تعداد زنبورهای استخدام شده برای m-e مکان باقیمانده (تای سوئیچ های پیشنهادی جهت ساختارهای باقیمانده)	7	7
ngh: اندازه بسته گل(شعاع همسایگی در جستجوی تصادفی) (فضای جستجوی تصادفی برای معرفی ساختارهای جدید برای شبکه توزیع مورد نظر)	5	5

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

نتیجه گیری

در این مقاله، عملیات بازآرایی شبکه توزیع، با ترکیب جدیدی از الگوریتم زنبورها و تئوری گراف و با کمک یک تابع هدف چند منظوره بدیع و نسبتاً کامل به منظور کاهش تلفات، نامتعادلی توان در فیدر، تعداد عملیات سوئیچینگ و بهبود پروفیل ولتاژ صورت گرفته است. با برنامه نویسی در نرم افزار مطلب، از الگوریتم زنبور عسل جهت عملیات بازآرایی و از تئوری گراف به منظور حفظ ساختار شعاعی شبکه و تغذیه همه بارها در ضمن عملیات بازآرایی بهره گرفته شده است. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، برنامه مورد نظر بر روی یک فیدر توزیع نمونه ۱۲.۶۶ کیلو ولت ۳۳ باسه، با ۳۲ سکشنلایزر و ۵ تای سوئیچ، در دو حالت با ضرایب وزنی متفاوت و برابر آزمایش شده است. بررسی نتایج نشان دهنده بهبود هر چهار تابع هدف برای هر دو آزمایش اما با مقادیر متفاوت است که به معنی قابلیت انعطاف تابع هدف چند منظوره پیشنهادی با مقاصد متنوع مورد نظر اپراتور می‌باشد. در نهایت، مقایسه‌ای بین مقدار کاهش تلفات تکنیک ترکیبی پیشنهادی و سایر روش‌ها جهت بازآرایی بر روی فیدر مورد نظر صورت گرفته است که مؤید عملکرد قابل قبول روش ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در هر دو حالت است.

مراجع

[۱] A. Augugliaro, L. Dusonchet, M. Ippolito, and E. R. Sanseverino. ۲۰۰۳. "Minimum Losses Reconfiguration of MV Distribution Networks Through Local Control of Tie-Switches", IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. ۱۸, No. ۳, pp. ۷۶۲–۷۷۱.

[۲] A. Merlin and H. Back. (۱۹۷۵). "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system", In Proc. ۵th Power System Computation Conf., Cambridge, U.K, pp. ۱–۱۸.

[۳] A.Y. Abdelaziz F.M. Mohamed, S.F. Mekhamer, and M.A.L. Badr. ۲۰۱۰. "Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm" Electric Power Systems Research, Vol. ۸۰, No. ۸, pp. ۹۴۳–۹۵۳.

[۴] AtashpazGargari. E and Lucas. C. ۲۰۰۷. "Simulated annealing algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol. ۷, pp. ۴۶۶۱–۴۶۶۶.

[۵] Baran, M. E. and Wu, F. F ۱۹۸۹. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. ۴, No. ۲, pp. ۱۴۰۱–۱۴۰۷.

[۶] *Cerny,V.* ۱۹۸۵."Thermo dynamical approach to the traveling salesman problem, An efficient

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

simulation algorithm", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. ۴۵, pp. ۴۱–۵۱.

[۷] D. Das. ۲۰۰۶. "A Fuzzy Multi-Objective Approach for Network Reconfiguration of Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. ۲۱, No. ۱, pp. ۲۰۲–۲۰۹.

[۸] D. E. Goldberg. ۱۹۸۹. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", New York: Addison-Wesley.

[۹] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim and M.Zaidi. ۲۰۰۵. "Technical Note: Bees Algorithm. Cardiff University", Cardiff: Manufacturing Engineering Centre.

[۱۰] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim and M.Zaidi (۲۰۰۶) "The Bees Algorithm, A Novel Tool for Complex Optimisation Problems" in ۲nd Int Virtual Conf on Intelligent Production Machines and Systems, pp. ۴۵۴-۴۵۹.

[۱۱] E. Atashpaz Gargari and C. Lucas. (۲۰۰۷). "Designing an optimal PID controller using Colonial Competitive Algorithm", First Iranian Joint Congress on Intelligent and Fuzzy Systems, Mashhad, Iran.

[۱۲] E. R. Ramos and A. G. Exposito. ۲۰۰۵. "Path-based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction", IEEE Trans. Power Syst. Vol. ۲۰, No. ۲, pp. ۵۵۶ –۵۶۴.

[۱۳] F. V. Gomes and S. Carneiro, Jr. ۲۰۰۵. "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems", IEEE Trans. Power Syst. Vol. ۲۰, No. ۳, pp. ۱۳۷۳ –۱۳۷۸.

[۱۴] H. P. Schmidt and N. Kagan. ۲۰۰۵. "Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization", IEEE Trans. Power Syst. Vol. ۲۰ No.۳, pp. ۱۳۱۱–۱۳۱۹.

[۱۵] J.Z. Zhu. ۲۰۰۲. "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm", Electric Power Systems Research Vol. ۶۲, No. ۱, pp. ۳۷–۴۲.

[۱۶] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara. ۱۹۹۲. "Implementation Of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration" , IEEE Transaction on Power Delivery. Vol.۷ No.۳, pp. ۱۰۴۴–۱۰۵۱.

[۱۷] K. Von Frisch. ۱۹۷۶. "Bees: Their Vision,Chemical Senses and Language", Revised Edition ed, Ithaca, Cornell University Press, N.Y.

[۱۸] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D.and Vecchi, M. P. ۱۹۸۳. "Optimization by Simulated Annealing", Science. Vol. ۲۲۰ No.۴۵۹۸, pp. ۶۷۱–۶۸۰.

[۱۹] Lopez, E. and Opaso, h. ۲۰۰۴. "Online reconfiguration considering variability demand: Applications to real networks", IEEE Transactions on Power Systems. Vol.۱۹, No.۱, pp. ۵۴۹–۵۵۳.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[۲۰] Q. Zhou, D. ۱۹۹۷. Shirmohammadi and W. H. E. Liu. Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing", IEEE Trans. Power Syst. Vol.۱۲, No.۲, pp. ۷۲۴–۷۲۹.

[۲۱] R. Diestel. ۲۰۰۵. "Graph theory" Springer-Verlag Heidelberg, New York.

[۲۲] R. Taleski and D. Rajicic. ۱۹۹۷. "Distribution Network Reconfiguration for Energy Loss Reduction", IEEE Transaction on Power System Vol.۱۲, No.۱, pp. ۳۹۸–۴۰۶.

[۲۳] R.S. Rao, S.V.L. Narasimham, M.R. Raju, and A.S. Rao. ۲۰۱۱. "Optimal Network Reconfiguration of Large-Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems Vol. ۲۶, No. ۳, pp. ۱۰۸۰-۱۰۸۸.

[۲۴] S.Ghosh and D.Das. ۱۹۹۹. "Method for load-flow solution of radial distribution networks**",** IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.**Vol.**۱۴۶, No.۶, pp. ۶۴۱–۶۴۸.

[۲۵] S. K. Goswami and S. K. Basu. ۱۹۹۲. "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", IEEE Trans. Power Del. Vol. ۷, No. ۳, pp. ۱۴۸۴ –۱۴۹۱.

[۲۶] Saeed Jazebi, Behrooz Vahidi. ۲۰۱۲. "Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances", Electric Power Systems Research, Vol. ۹۱, pp. ۹-۱۷.

[۲۷] Shirmohammadi. D. and Hong, H. W. ۱۹۸۹. "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. ۴, No. ۱, pp. ۱۴۹۲–۱۴۹۸.

[۲۸] T.D. Seeley. ۱۹۹۶. "The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies", Massachusetts:Harvard University Press, Cambridge.

[۲۹] V. Borozan and N. Rajakovic. ۱۹۹۷. "Application Assessments of Distribution Network Minimum Loss Reconfiguration", IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. ۱۲, No. ۴, pp. ۱۷۸۶–۱۷۹۲.

[۳۰] V. Borozan, D. Rajicic, and R. Ackovski. ۱۹۹۵. "Improved Method for Loss Minimization in Distribution Networks", IEEE Transaction on Power System" Vol. ۱۰, No. ۳, pp. ۱۴۲۰–۱۴۲۵.

[۳۱] Vanderson Gomes. F., Carneiro.S., Pereira. J. L. R., Garcia Mpvpan, and RamosAraujo, L. ۲۰۰۵. "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. ۲۰ No. ۳, pp. ۱۳۷۳–۱۳۷۸.

[۳۲] W. M. Lin and H. C. Chin. ۱۹۹۸. "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Transaction on Power Delivery. Vol.۱۳, No.۳, pp. ۸۷۰–۸۷۵.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[۳۳] Y. J. Jeon, J. C. Kim, J. O. Kim, J. R. Shin, and K. Y. Lee. ۲۰۰۲. "An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. ۱۷, No. ۴, pp. ۱۰۷۰–۱۰۷۸.

Based on DSP", Int. Conf. on Instrumentation Science and Technology, China, pp. ۱۳۲۷-۱۱۳۳۱.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]