

## بازنگری در فلسفه طراحی شبکه توزیع کلانشهرها با استفاده از الگوریتم PSO خود تطبیقی

12-F-PDS-2387

سید محمد صادق غیائی<sup>۱</sup>، فیروزه رامشخواه<sup>۱</sup>، عبدالحمید ارسطو<sup>۱</sup>، سید محمد هاشمی<sup>۲</sup>

۱- شرکت توزیع برق تهران بزرگ

۲- قطب علمی قدرت - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: مکانیابی پست، مسیریابی فیدر، الگوریتم اجتماع ذرات، درخت پوشای مینیمم، روش یکنواخت سالیانه

### چکیده

اولیه استفاده شد. تابع هدف نیز مینیمم کردن مجموع سرمایه‌گذاری اولیه (احداث پست‌ها، فیدرها و...) و هزینه‌های بهره‌برداری (تلفات و...) لحاظ گردید.

### ۱- مقدمه

امروزه موضوع کاهش نقدینگی جهت توسعه شبکه در شرکت‌های توزیع در کنار مشکلاتی همانند افزایش قیمت زمین و معضل دستیابی به زمین مناسب برای احداث پست‌های جدید توزیع در کلانشهرها از مهمترین چالش‌هایی است که پیش روی مدیریت شبکه‌های توزیع در شهرهای بزرگ کشورمان قرار دارد. مجموعه این مشکلات و پاسخگویی به نیازهای رشدیابنده بار در مناطق متراکم شهری توجه هر چه بیشتر به طراحی بهینه شبکه‌های توزیع را ایجاب می‌نماید. تخصیص داشتن بیش از نیمی از تلفات شبکه به شبکه‌های فشار ضعیف در کنار معضلات فوق، باعث شده است پیشنهاد کاهش حجم شبکه فشار ضعیف یا به عبارت بهتر کاهش نسبی طولی شبکه فشار ضعیف به فشار متوسط در جهت نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر پست‌های جدید به مراکز

توجه به تراکم زیاد بار، افزایش قیمت و دشواری دسترسی به زمین مناسب برای احداث پست و همچنین کاهش نقدینگی در شرکت‌های توزیع پس از خصوصی‌سازی از یک سو و از سوی دیگر تلفات قابل توجه در شبکه فشار ضعیف که بیش از نیمی از تلفات ۱۶,۲ درصدی بخش توزیع را تشکیل می‌دهد، نیاز به بازنگری در فلسفه طراحی و ساختار شبکه توزیع در کلانشهر تهران را ضروری نموده است. یکی از پرطرفدارترین پیشنهادات در چنین فضایی، استفاده از ترانس‌های کوچک جهت نزدیکی هرچه بیشتر به مراکز ثقل بار و کاهش طول شبکه فشار ضعیف در جهت کاهش تلفات در این بخش از شبکه می‌باشد. در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های طراحی بهینه شبکه و با مطالعات فنی-اقتصادی، صحت پیشنهاد مورد نظر در شبکه‌هایی نمونه با ویژگی‌های مختلف مورد تحقیق قرار گرفته است. با توجه به تعدد راه‌حل‌های ممکن برای چنین مسأله‌ای، الگوریتم PSO (بهینه‌سازی اجتماع ذرات) به عنوان ابزار اصلی حل انتخاب و از میان روش‌های ارزیابی اقتصادی پروژه، روش یکنواخت سالانه جهت تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری

عمده ثقل بار و استفاده از ترانس‌های با ظرفیت کمتر در سطح مدیریت کلان بخش توزیع شکل گیرد. به عبارت بهتر فضای ایجاد شده بازنگری جدی فلسفه طراحی شبکه‌های توزیع را در محیطهای متراکم و یا در حال توسعه شهری ایجاب نموده است.

با توجه به تبعیت وضعیت فعلی فلسفه طراحی کشورمان از کشورهای اروپایی و نزدیکی پیشنهاد مورد نظر به فلسفه طراحی غالب در کشور آمریکا و توجه به عدم وجود سطح ولتاژ میانی در شبکه توزیع کشورمان، در این مقاله بررسی میزان صحت و کاربردی بودن پیشنهاد فوق در شبکه توزیع کشور، با استفاده از الگوریتم‌های طراحی بهینه شبکه و تعیین طرح بهینه (به‌خصوص ظرفیت بهینه ترانسفورماتورها) برای چگالی‌های مختلف بار صورت گرفته است.

طراحی بهینه سیستم توزیع در دهه‌های اخیر بارها در مقالات مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و راه حل‌های متفاوتی برای آن ارائه شده است [۱-۳]؛ در اغلب این مقالات هدف حداقل کردن هزینه‌ی کلی با انتخاب بهینه سائز و مکان پست‌ها و مسیر فیدرهاست که این هزینه شامل دو محور کلی هزینه‌های نصب و بهره‌برداری و نگهداری می‌شود. برای طراحی سیستم توزیع ابتدا باید مقدار بارها و مکان جغرافیایی آن‌ها مشخص شده و سپس پست‌ها با حداقل هزینه به نحوی مکانیابی و تعیین سائز شوند که تغذیه تمام بارها تأمین گردد. البته باید در نظر داشت که در این پروسه عوامل مؤثر بسیاری از جمله چگالی بارها، محدودیت‌های جغرافیایی، میزان رشد بار، نرخ تورم، مسائل مربوط به تعویق سرمایه‌گذاری و ... دخیل هستند. در طراحی یک سیستم توزیع به علت امکان انتخاب‌های بسیار زیاد و یا حتی بیشمار که وجود دارد، تعیین جواب بهینه با بررسی تک-تک جواب‌ها کاری غیرممکن است. از آنجا که هزینه‌های احداث سیستم توزیع بسیار بالاست، هرگونه پیشرفتی در این مسأله بسیار مهم و از لحاظ اقتصادی قابل توجه خواهد بود.

در حال حاضر برای بهینه‌سازی شبکه توزیع راه حل‌های بسیار گوناگونی وجود دارد که از دیدگاه در نظرگیری مکانیابی پست<sup>۱</sup> و مسیریابی فیدر<sup>۲</sup> به صورت همزمان یا جدای از هم، به دو دسته کلی یکپارچه و مجزا دسته‌بندی می‌شوند [۴]. اما از آنجا که در نظرگیری همزمان این دو قسمت باعث افزایش تعداد متغیرها و نیز افزایش نمایی درجه پیچیدگی معادلات مسأله می‌شود، در تحلیل‌های یکپارچه ساده‌سازی‌های فراوانی منظور می‌گردد و اکثر محققین نیز از روش‌های مجزا بهره می‌برند. در مرجع [۵] از تکرار چندین مرحله بهینه‌سازی در امتداد یکدیگر به صورت مداوم برای غلبه بر حجم بالای محاسبات استفاده شده است. در مرجع [۶] برای مکانیابی و تعیین سائز و محدوده پست توزیع، از مدل کردن شرایط مسأله حمل و نقل بهینه با هدف جلوگیری از انتقال توان در فواصل طولانی استفاده شده است. در تحقیق [۷] با در نظرگیری هر دو دسته هزینه ثابت و متغیر، از روش انشعاب و تحدید<sup>۳</sup> که در تئوری گراف در دسته‌بندی روش‌های هوشمند غیرهدفمند قرار می‌گیرد، برای تعیین مکان بهینه پست‌ها استفاده شده است. روش‌های بسیار زیاد دیگری نیز برای این مسأله ارائه شده است که در اینجا تنها به ذکر همین چند مورد به عنوان نمایندگانی از این طیف وسیع بسنده می‌کنیم.

هدف اصلی از این مقاله بررسی تأثیر شاخص‌های گوناگون بارهای الکتریکی مصرف‌کنندگان مانند پراکندگی جغرافیایی، چگالی، نرخ رشد و ... آن‌ها بر تعداد و سائز بهینه پست‌ها در سیستم توزیع و تحلیل حساسیت نتایج به این شاخص‌هاست. در این مقاله با در نظر گرفتن قیمت‌های واقعی، عامل زمان، رشد بار، نرخ تورم و ... روشی مرکب از تئوری گراف و الگوریتم اجتماع ذرات تطبیقی ارائه شده که در ادامه به معرفی روش مذکور و بررسی نتایج حاصل از آن می‌پردازیم.

<sup>۱</sup>. substation locating

<sup>۲</sup>. feeder routing

<sup>۳</sup>. branch & bound

## ۲- معرفی روش پیشنهادی

هرچند از لحاظ تنوریک، الگوریتم‌های تکاملی قابلیت تحلیل هر مسئله‌ای با هر میزان گستردگی را در خود دارند، اما در برخی موارد با توجه به حجم بالای داده‌ها و به تبع آن تعداد بالای متغیرها و نیز محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری استفاده از این الگوریتم‌ها به تنهایی ممکن نبوده و به منظور کاهش بار محاسباتی، باید بخش‌هایی از مسئله را از دوش الگوریتم اصلی برداشته و به روال‌هایی دیگر تحمیل نمود که این روال‌ها نیز خود می‌توانند روش‌های تکاملی دیگر و یا حتی روشی همانند همان الگوریتم اصلی باشند. هرچند این برونسپاری اجباری می‌تواند تا حدودی باعث ایجاد خلل در رسیدن به جواب بهینه الگوریتم گردد، اما به علت محدودیت‌های ذکر شده بعضاً مجبور به شکستن روال کلی به چندین زیرروال و پذیرش عیب مذکور خواهیم بود.

به دلایل فوق، در این مقاله نیز از یک روش سه مرحله‌ای برای حل کامل مسئله مکان‌یابی پست و مسیریابی فیدرهای فشار متوسط و فشار ضعیف استفاده شده است. روند کلی انتخابی بدین ترتیب است که انتخاب محل پست‌ها توسط الگوریتم اجتماع ذرات، مسیریابی فیدرهای فشار ضعیف و فشار متوسط توسط دو زیرروش مجزای متفاوت و انتخاب تعداد ترانس‌ها توسط یک الگوریتم فوقانی انجام می‌شود که این سه بخش دائماً در حال تبادل نتایج بوده و هر بخش بسته به نتایج حاصله، تغییراتی در طرز کار بخش‌های دیگر ایجاد می‌کند.

شایان ذکر است علت اصلی استفاده از دو زیرروال متفاوت برای مسیریابی فیدرهای فشار متوسط و فیدرهای فشار ضعیف در تفاوت سطح ولتاژ و در نتیجه جریان عبوری از آنهاست که میزان نسبت هزینه تلفات به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را در یکی قابل صرف‌نظر و برعکس در دومی، قابل توجه می‌نماید. بنابراین با صرف‌نظر از تلفات در فیدرهای فشار متوسط، با توجه به ارتباط مستقیم هزینه‌های احداث با طول فیدر، در بخش فشار متوسط عملاً بهینه‌سازی به پیدا کردن طول مینیمم فیدر و یا به

عبارت دیگر مسئله مینیمم درخت پوشا (که در ادامه به آن خواهیم پرداخت) تبدیل می‌شود. اما در بخش فشار ضعیف، علاوه بر تأثیر طول بر هزینه‌ی احداث، باید به تأثیر آن بر تلفات در کنار جریان هر بار نیز توجه نمود که هر یک پیچیدگی‌های خاص خود را دارد.

## ۳- نحوه تعامل زیرروال‌ها با یکدیگر

همانطور که ذکر شد، روش پیشنهادی از ترکیب چندین روال با محوریت الگوریتم اجتماع ذرات تشکیل شده است که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است؛ ارتباط اجزای روش پیشنهادی، نحوه تبادل داده‌ها بین آنها و اصلاحات اعمالی هر جزء بر اجزاء دیگر به صورت مختصر به شرح زیر است:

۱- حداقل تعداد پست‌های لازم بر حسب بزرگ‌ترین ظرفیت پست موجود و مجموع ظرفیت بارها، بدون در نظر گرفتن سایر محدودیت‌ها و به صورت خوشبینانه انتخاب و به عنوان ورودی به الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات داده می‌شود.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی در سه مرحله متفاوت با تعداد تکرارهایی معین و با مد نظر قرار دادن قیود متفاوت انجام می‌گیرد:

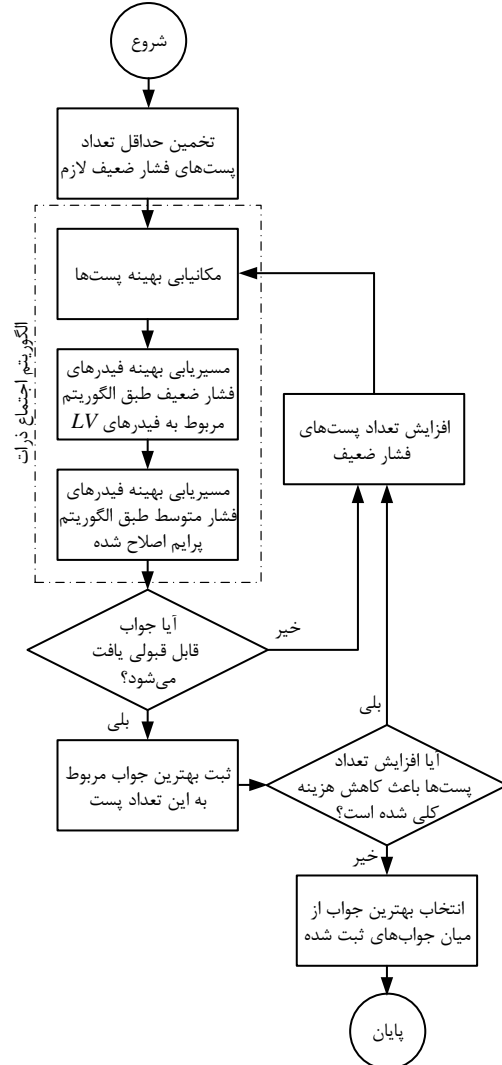
۲-۱- مکان پیشنهادی برای پست‌های فشار ضعیف در هر تکرار ارائه می‌شود.

۲-۲- طبق روال تعیین شده برای مسیریابی فیدرهای فشار ضعیف، بارهای متصل به هر پست و در نتیجه ظرفیت هر پست مشخص می‌گردد.

۲-۳- پست‌ها با مکان‌هایی مشخص به عنوان ورودی به الگوریتم پریم بهبود یافته خورانده شده و مسیریابی فشار متوسط انجام می‌شود.

۲-۴- در این مرحله با مشخص شدن مسیر فیدرها و تعداد پست‌ها و ظرفیت آنها، تابع برازندگی جواب و به عبارت دیگر کل هزینه‌ها مشخص شده و جواب بدست آمده نیز ثبت می‌گردد.

۲-۵- در صورت برآورده شدن شرط پایان تکرار، بهترین جواب بدست آمده به عنوان خروجی متناظر با این تعداد پست ارائه می‌شود و در غیر این صورت بازگشت به مرحله (۲-۱) انجام می‌شود.



شکل ۱: روندنمای روش پیشنهادی و نحوه تعامل اجزای آن

۳- در صورت عدم یافتن جوابی قابل قبول به علت کمبود تعداد پست‌ها پس از تعداد تکرارهای از پیش تعیین شده‌ای، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات خود را با وضعیت جدید تطابق داده، تعداد پست‌ها را اضافه کرده و دوباره به مرحله ۲ برمی‌گردد و در غیر این صورت، به مرحله بعد می‌رود.

۴- با به جواب رسیدن الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، بهترین جواب ثبت و حساسیت کاهش هزینه نسبت به افزایش تعداد پست‌ها سنجیده می‌گردد؛ در

صورت مثبت بودن این شاخص، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بار دیگر خود را با وضعیت جدید تطابق داده، تعداد پست‌ها را یک عدد اضافه کرده و به مرحله ۲ باز می‌گردد و در غیر این صورت، متوقف شده و بهترین جواب ثبت شده را به عنوان جواب نهایی ارائه می‌کند.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) اولین بار در سال ۱۹۹۵ میلادی و با الهام از رفتار اجتماعی و دینامیک حرکتی ارگانیزم‌های طبیعی همچون دسته‌ی پرندگان، کلونی حشرات، گروه ماهی‌ها و... معرفی شد [۸]. PSO به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی از شاخصی به نام ذرات تشکیل می‌شود. هر ذره در طول زمان در فضای جستجوی چند بعدی پرواز و در حین این پرواز با استفاده از بهترین وضعیت خود و ذرات همسایه، وضعیت آتی خود را تنظیم می‌کند. شاخص دیگری که در PSO تعریف می‌شود، دسته نام دارد. یک دسته مجموعه‌ای از ذرات همسایه و تجربیات گذشته آن است. اگر  $X$  بردار وضعیت‌های مختلف یک ذره باشد، بنابراین وضعیت  $i$  امین ذره در فضای  $d$  بعدی، با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}) \quad (1)$$

و بهترین وضعیت قبلی هر ذره نیز به صورت زیر ضبط می‌شود:

$$xbest_i = (xbest_{i1}, xbest_{i2}, \dots, xbest_{id}) \quad (2)$$

در رابطه (۲) بهترین وضعیت از بین وضعیت ذرات یک گروه  $Pbest_d$  نامگذاری می‌شود. شاخص دیگری که در PSO تعریف می‌شود، شتاب نام دارد. شتاب ذره  $i$  در فضای  $d$  بعدی را با رابطه (۳) نشان می‌دهیم:

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}) \quad (3)$$

برای جستجوی شتاب و وضعیت بهتر، شتاب و وضعیت هر ذره در تکرار بعدی توسط روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود:

$$v_{id}^{t+1} = w \times v_{id}^t + c_1 \times rand_1 \times (xbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 \times rand_2 \times (Pbest_d - x_{id}^t) \quad (4)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad \{i=1,2,\dots,n \quad d=1,2,\dots,m\} \quad (5)$$

که در روابط فوق  $n$  تعداد ذرات گروه،  $m$  تعداد اعضا در یک ذره،  $t$  شمارنده تکرارها،  $w$  ضریب وزنی،  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌های شتاب،  $rand$  مقادیری اتفاقی بین ۰ و ۱،  $v_{id}^t$  شتاب تکرار  $t$ م در محدوده  $V_d^{\min} \leq v_{id}^t \leq V_d^{\max}$ ،  $x_{id}^t$  وضعیت ذره در تکرار  $t$ م و  $V^{\max}$  معیار شایستگی است. اگر مقدار  $V^{\max}$  خیلی بالا باشد، احتمال دارد که ذرات به حل گذشته برگردند و اگر خیلی پایین باشد ذرات فضای جستجوی کمی پیدا می‌کنند. اگر ثابت‌های وزن شتاب، یعنی  $c_1$  و  $c_2$  خیلی کوچک باشد، جواب حول و حوش جواب بهینه پرسه می‌زند و به آن نمی‌رسد و اگر خیلی بزرگ باشد، حرکت به سمت وضعیت جدید با شیب تندی انجام می‌گیرد؛ این ضرایب نیز به صورت تجربی مشخص می‌شود و ضریب وزنی نیز در کل به صورت خطی و بر اساس رابطه (۶) کاهش می‌یابد:

$$w = w_{\max} - ((w_{\max} - w_{\min}) / \text{iter}_{\max}) \times \text{iter} \quad (6)$$

که  $\text{iter}_{\max}$  حداکثر شماره تکرار است و  $\text{iter}$  نشان‌دهنده شماره تکرار است. در ادامه به معرفی سایر زیر روال‌های مختلف استفاده شده در کنار این الگوریتم می‌پردازیم.

## ۵- مسیریابی فیدرها

در مسیریابی فیدر فشار ضعیف و با فرض بار نقطه‌ای برای مصرف‌کنندگان، هر بلوک بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی همانند حداکثر طول فیدر، حداکثر جریان مجاز فیدر، حداکثر تعداد فیدرهای خروجی هر پست و... به نزدیکترین پست ممکن اتصال می‌یابد. اما در مسیریابی فشار متوسط، با مسأله مینیمم درخت پوشا روبرو هستیم که در ادامه به تشریح آن خواهیم پرداخت.

## ۵-۱ مینیمم درخت پوشا:

درخت پوشای گرانی با  $n$  رأس، درختی با دقیقاً  $n-1$  یال است؛ اگر یک یال به آن اضافه کنیم شرط بدون حلقه بودن (درخت بودن) آن نقض می‌شود و اگر یک یال از

آن حذف کنیم شرط همبند بودن آن نقض خواهد شد. در نتیجه می‌توان درخت پوشای یک گراف با  $n$  رأس را به این صورت تعریف کرد:

((زیر درختی از گراف که دارای  $n-1$  یال می‌باشد.))

اما مینیمم درخت پوشا یا درخت فراگیر مینیمم یک گراف وزندار، درختی دربرگیرنده تمام رئوس آن گراف است که بین سایر درخت‌های فراگیر آن گراف دارای کمترین وزن باشد. وزن تخصیص داده شده به یک یال می‌تواند هزینه یال، زمان پیمایش یال، طول و یا موارد دیگری باشد.

مسأله درخت فراگیر مینیمم و حل بهینه آن، دارای طیف کاربردی وسیعی از آنالیز خوشه‌بندی آماری، شناسایی گفتار و پردازش تصویر گرفته، تا انواع مسائل جاییابی بهینه در شبکه‌های مخابراتی، مدیریت شهری و مهندسی راهسازی می‌باشد [۹].

در صورتی که وزن هر یال  $e \in E$  از گراف همبند و غیرجهتدار  $G = \langle V, E \rangle$  که در آن  $V$  مجموعه رئوس با  $|V| = n$  و  $E$  مجموعه یال‌های گراف با  $|E| = m$  باشد، به احتمال یک برابر مقدار ثابتی باشد، گوئیم که گراف  $G$  گرانی قطعی است. برای یافتن درخت فراگیر مینیمم در یک گراف قطعی، الگوریتم‌های حریصانه متنوعی ارائه شده که از معروف‌ترین آنها می‌توان الگوریتم‌های راشال (۱۹۵۶)، پریم (۱۹۵۷)، دایجکسترا (۱۹۵۹) و سولین (۱۹۷۷) را نام برد [۱۰]. الگوریتم‌های حریصانه الگوریتم‌هایی‌اند که در هر انتخاب فارغ از انتخاب‌های قبل یا بعد، تنها به بهترین انتخاب لحظه‌ای می‌پردازند.

## ۵-۲ انتخاب الگوریتم سازنده درخت

مسأله مینیمم درخت پوشا در تئوری گراف و ریاضیات همچنان به عنوان یک مسأله باز و در حال بحث مطرح است؛ بنابراین طبیعی است که در حال حاضر ممکن است برای این مسأله هیچ الگوریتمی منجر به ایجاد جواب بهینه مطلق نگشته و تمامی روش‌ها تنها بهینه‌هایی محلی را بدست دهند. با توجه به اینکه امکان رسیدن به بهینه مطلق وجود نداشته و هر الگوریتم بسته به شرایط ممکن

است بهتر از دیگری عمل کند، بنابراین باید برای مسیریابی فیدر الگوریتمی را انتخاب نمود که با فیزیک مسأله سازگاری بیشتری داشته باشد؛ با توجه به این نکته الگوریتم پریم که بر خلاف سایر روش‌ها ذاتاً توانایی لحاظ نمودن فیدرهای از پیش موجود در شبکه را در خود دارد، جهت مسیریابی بهینه انتخاب شد.

### ۳-۵ معرفی الگوریتم پریم

الگوریتم پریم از یک رأس دلخواه شروع شده و در هر مرحله کوتاهترین یال که یک رأس آن در درخت و به درخت دیگرش خارج از درخت باشد را انتخاب و به درخت اضافه می‌کند و این روند را تا در برگرفتن تمامی رئوس گراف ادامه می‌دهد. بر خلاف روش‌هایی چون راشال که در آن‌ها با جنگلی روبرو هستیم که کل درخت‌ها در نهایت با پیوستن به یکدیگر تبدیل به یک درخت واحد می‌گردند، در اینجا همواره تنها یک درخت در حال رشد وجود دارد و همین خصیصه است که قابلیت لحاظ کردن فیدرهای موجود را به صورت یال‌هایی تعیین شده از مراحل قبلی این الگوریتم به ما می‌دهد.

به دلیل برخی نیازهای فنی مسأله (مانند نیاز به دورهای باز در فیدر برای تسهیل در ایجاد مسیر تغذیه مانور) و عیوب ذاتی الگوریتم‌های حریصانه (مانند گذر یال‌ها از روی هم)، تغییراتی جهت بهبود این الگوریتم اعمال و هر راه‌حل ارائه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، به عنوان ورودی به این مدل بهبود یافته انتقال داده شده و خروجی آن به عنوان راه‌حل مسأله مسیریابی فیدرهای فشار متوسط به الگوریتم بهینه‌سازی بازخورنده می‌شود. مرتبه زمانی اجرای چنین الگوریتمی در بهترین و کاراترین پیاده‌سازی ممکن، برابر با  $O(e \cdot \log(n))$  خواهد بود [۱۰].

### ۶- تابع هدف بهینه‌سازی

در پیاده‌سازی سیستم توزیع نیز همانند بسیاری از دیگر چالش‌های مهندسی، انتخاب‌های فراوانی وجود دارد که

از میان آن‌ها باید اقتصادی‌ترین گزینه را برگزید؛ اما برای گزینش بهترین جواب، ابتدا باید هزینه‌های متفاوت مشخص و سپس به روشی مقایسه گردند که در این بخش به این مهم پرداخته شده است.

### ۶-۱ هزینه‌های نصب و بهره‌برداری

پس از هر تکرار الگوریتم اجتماع ذرات و به ازای هر جواب، تمام اطلاعات اجرای طرح از جمله مکان و ظرفیت هر پست، مسیر فیدر فشار ضعیف از هر بلوک بار تا پست، مسیر اتصال پست‌های توزیع به پست فوق توزیع از طریق فیدرهای فشار متوسط و... مشخص شده است. بنابراین در یک تقسیم‌بندی عمده از هزینه‌های موجود، برای هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (احداث و نصب) و هزینه‌های بهره‌برداری (تلفات) خواهیم داشت:

$$FC = \sum_{p=1}^P TC_p + \sum_{m=1}^M MVC_m + \sum_{l=1}^L LVC_l \quad (V)$$

$$LC = \left( \sum_{j=1}^J LL_j + OL \times \sum_{i=1}^I (NL_i + \alpha_i \times FL_i) \right) \times PP \quad (\Lambda)$$

که در آن FC مجموع کل هزینه‌های اولیه شامل TC یا همان هزینه احداث پست‌ها به علاوه MVC یا همان هزینه احداث کل فیدرهای فشار متوسط و نیز LVC یا هزینه احداث کل فیدرهای فشار ضعیف است. همچنین LC مجموع هزینه تلفات فیدرها (LL) و پست‌ها، PP قیمت واحد انرژی، NL و FL به ترتیب تلفات بی‌باری و بار نامی ترانس،  $\alpha$  ضریب بارگذاری و OL عمر مفید تجهیزات هستند.

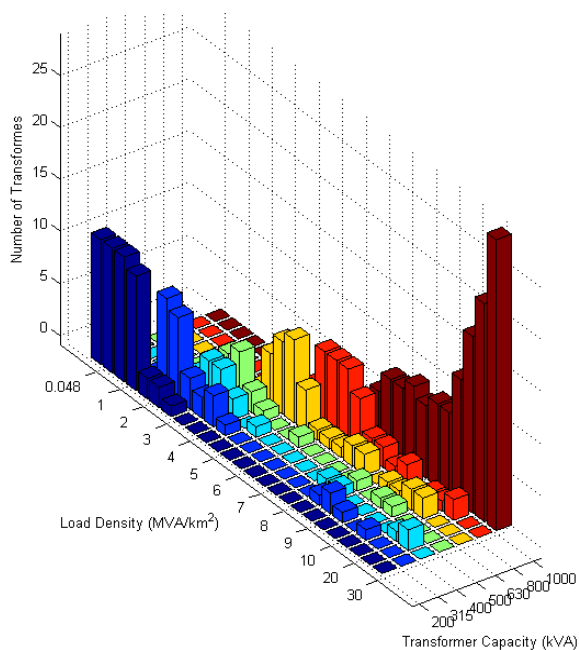
### ۶-۲ مقایسه اقتصادی طرح‌ها

می‌دانیم در مقایسه سودآوری پروژه‌های مختلف علاوه بر میزان هزینه و درآمدها، باید به زمان تزریق یا خروج نقدینگی حاصل از آن‌ها نیز توجه داشت. برای این منظور روش‌های مختلفی در علم اقتصاد وجود دارد که یکی از آنها ((روش یکنواخت سالیانه)) است. در یک بیان از این روش، هزینه اولیه P برای یک پروژه، پس از گذشت عمر

تغییر چگالی بار در فضایی نمونه مورد بررسی قرار گرفت. برای حفظ جامعیت مسأله و پرهیز از حالت‌های خاص، مکان‌های کاندید برای پست‌های جدید و کلیه مسیرهای مجاز برای احداث شبکه فشار متوسط به صورت کاملاً تصادفی انتخاب گردید. نتایج کلی در جدول (۱) و شکل (۲) آمده است.

جدول ۱: تعداد و ظرفیت پست‌های انتخابی در هر چگالی

تعداد	تعداد استفاده شده از هر ظرفیت ترانسفورماتور ( $kVA$ )							چگالی بار $kVA/km^2$
	۲۰۰	۳۱۵	۴۰۰	۵۰۰	۶۳۰	۸۰۰	۱۰۰۰	
کل								
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۰۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۵۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۰۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۵۰۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰۰۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵۰۰
۱۱	۲	۷	۱	۱	۷	۷	۰	۶۰۰۰
۱۱	۳	۷	۱	۰	۱	۰	۰	۶۵۰۰
۱۱	۵	۵	۱	۰	۱	۰	۰	۷۰۰۰
۱۱	۷	۷	۲	۲	۲	۲	۰	۷۵۰۰
۱۲	۷	۷	۲	۱	۰	۰	۰	۸۰۰۰
۱۲	۸	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۸۵۰۰
۱۲	۷	۲	۰	۰	۱	۲	۰	۹۰۰۰
۱۱	۸	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۹۵۰۰
۱۲	۸	۱	۰	۱	۲	۱	۰	۱۰۰۰۰
۱۶	۱۲	۱	۰	۰	۲	۱	۰	۱۵۰۰۰
۲۰	۱۷	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۲۰۰۰۰
۲۳	۲۱	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۲۵۰۰۰
۲۸	۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰۰۰۰



شکل ۲: تعداد و ظرفیت پست‌های انتخابی در هر چگالی

مفید  $n$  سال، دارای ارزش اسقاطی  $SV$  فرض می‌گردد. سپس هزینه  $P$  را با استفاده از فاکتور  $A/P$  به هزینه یکنواخت سالیانه و مقدار  $SV$  نیز با استفاده از فاکتور  $A/F$  به درآمد یکنواخت سالیانه تبدیل و در آخر مقدار  $SV$  معادل شده با علامت منفی با هزینه عملیاتی سالیانه و مقدار  $P$  معادل شده جمع می‌گردد. با این توضیحات، تابع هدف مسأله بهینه‌سازی به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\min EUAC = AC + P(A/P, i\%, n) - SV(A/F, i\%, n) \\ = LC + \left( FC \times i \times (1+i)^{OL} \right) / \left( (1+i)^{OL} - 1 \right) \quad (9)$$

که در اینجا  $n$  همان  $OL$  یا عمر مفید تجهیزات سیستم،  $AC$  هزینه بهره‌برداری یا انرژی تلف شده در هر سال و  $i$  نرخ بهره سالیانه است. بهترین جواب هر تکرار، جوابی است که کمترین مقدار  $EUAC$  را بدست بدهد. مسلماً این تابع هدف با قیودی مانند تأمین تغذیه تمام بارها، محدودیت حداکثر بار هر ترانس، محدودیت طول فیدرها و... همراه است که به علت وضوح زیاد، در اینجا از بازنویسی آن‌ها صرف‌نظر شده است.

## ۷- شبیه‌سازی

همانطور که در چکیده نیز ذکر شد، هدف از این مقاله بررسی پیشنهاد استفاده از ترانس‌های کوچک جهت نزدیکی هرچه بیشتر به مراکز ثقل بار و کاهش طول شبکه فشار ضعیف در جهت کاهش تلفات در شبکه توزیع است که اخیراً طرفداران بسیاری نیز یافته است؛ بنابراین شبیه‌سازی‌های مختلفی برای بررسی تأثیر عوامل مختلفی از جمله پراکندگی جغرافیایی بارها، چگالی بارهای منطقه، نرخ رشد بار و نرخ بهره (تورم) بر سائز ترانس‌ها انجام و آنالیز حساسیت سائز بهینه ترانس به هر عامل بررسی شد. به عنوان نمونه برای آنالیز حساسیت ظرفیت پست‌ها نسبت به تغییرات ((چگالی بار))، اجرای الگوریتم با استفاده از مقادیر اندک برای مناطق حاشیه‌ای، مقادیر متوسط برای مناطق نرمال و مقادیر بالا برای مناطق مرکزی و پرجمعیت شهری تکرار گردید و سناریوهای مختلف با پراکندگی، تعداد و محل ثابتی از بارها و تنها با

با انجام آنالیز حساسیت‌های مشابهی برای هر عامل همزمان با ثابت نگه داشتن سایر عوامل، می‌توان به یک نتیجه‌گیری کلی در مورد ارتباط تغییرات هر پارامتر با سائز بهینه ترانس‌ها رسید که خلاصه این نتایج در جدول (۲) بیان شده است؛ نتایج به دست آمده گویای آن است که وزن تلفات فشار ضعیف در تابع هزینه در بسیاری از شرایط و حالات، در موازنه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نصب ترانس‌های کوچک متعدد با هزینه تلفات این ترانس‌ها بسیار کمتر است. لذا این نتایج فرضیه اقتصادی بودن کاهش شبکه فشار ضعیف در شرایط کلی را مردود دانسته و نشان می‌دهد که طراحی بهینه و اقتصادی شبکه، کاملاً به شرایط و پراکندگی بار و وضعیت پست‌های قبلی وابسته است.

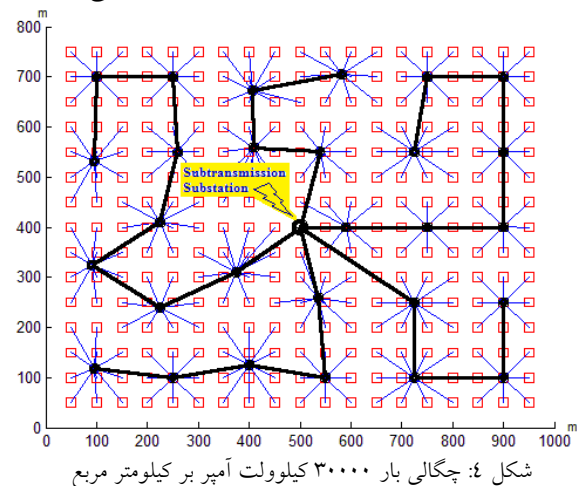
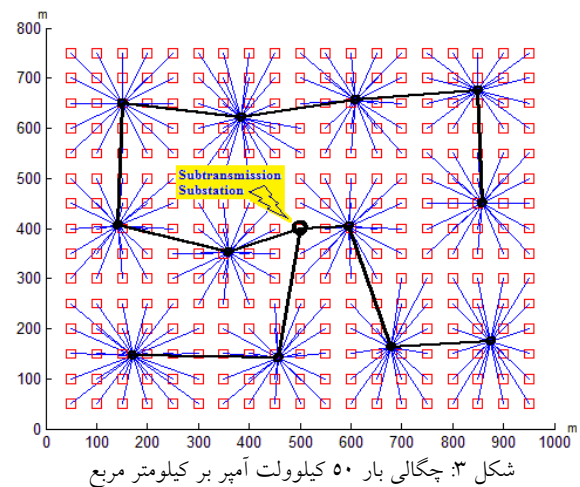
جدول ۲: تأثیر عوامل مختلف بر سائز بهینه پست‌ها

عامل	ارتباط با ظرفیت بهینه پست‌ها
ضریب رشد بار	معکوس
چگالی بار در منطقه	مستقیم
پراکندگی جغرافیایی بارها	معکوس
نرخ بهره	معکوس

## مراجع:

- [1] T. Gunen, "Bibliography of Power Distribution System Planning," *IEEE Trans. Power System*, June 1983, Vol. 102, No. 6.
- [2] H.L. Willis, J.E.D. Northcote-Green, "Comparison of Several Computerized Distribution Planning Methods," *IEEE Trans. Power System*, Jan. 1985, Vol. 104, No. 1.
- [3] D.W. Ross, M. Carson, A.I. Cohen, "Development of Advanced Methods for Planning Electric Energy Distribution Systems," *U.S. DOE Report*, ET-78-C-03-1845, Feb. 1980.
- [4] H. Temraz, V. Quintana, "Distribution System Expansion Planning Models: An Overview," *Electric Power Syst. Res.*, 1993, Vol. 26, pp. 61-70.
- [5] E. Masud, "An Interactive Procedure for Sizing and Timing Distribution Substations Using Optimization Techniques," *IEEE Trans. Power System*, 1974, Vol. 1993, pp. 1281-1286.
- [6] D. Crowford, S. Holt, "A Mathematical Optimization Technique for Locating and Sizing Distribution Substations and Deriving their Optimal Service Areas," *IEEE Trans. Power System*, 1975, Vol 1994, pp. 230-235.

همانطور که قابل مشاهده است، این نتایج به وضوح بیانگر انتخاب تعداد بالایی از پست‌های ظرفیت پایین در چگالی‌های اندک و تغییر روند به سوی انتخاب پست‌های ظرفیت بالا در چگالی‌های زیاد است. شایان ذکر است که جهت دستیابی به نتایج واقعی‌تر نیز از هزینه‌های منطبق با آخرین فهرست‌بهای منتشر شده -مربوط به نیمه دوم سال ۹۰- استفاده شد. همچنین از ضریب طول ۱,۳ برای تصحیح طول و مسیر غیرمستقیم فیدرها، نرخ بهره ۲۰٪ و طول عمر بهره‌برداری ۳۰ سال برای تجهیزات استفاده شد. به‌علاوه از اطلاعات ترانس‌های واقعی (محصولات شرکت ایران ترانسفو) ساخته شده طبق استاندارد DIN42503، کابل‌های از نوع زیرزمینی و پست‌های کیوسک استفاده شده و مشخصات فنی و نیز هزینه‌های متناظر با آن‌ها در شبیه‌سازی‌ها به کار رفته است. اشکال (۳) و (۴) دو نمونه از مکانیابی پست‌ها و مسیریابی فیدرها را در یک ناحیه ۸۰۰×۱۰۰۰ متر و برای دو چگالی متفاوت نشان می‌دهد.





[9] K. Hutson, D. Shier, "Minimum Spanning Trees in Networks with Varying Edge Weights", *Annals of Operations Research*, 2006, Vol. 146, No. 1, pp. 3-18.

[10] H. Ahrabian, A. Nowzari-Dalini, "Parallel Algorithms for Minimum Spanning Tree Problem", *Intern. J. Computer Math.*, 2002, Vol. 79, No. 4, pp. 441-448.

[7] G. Thompson, D. Wall, "A Branch-and-Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations," *IEEE Trans. Power System*, 1981, Vol. 100, pp. 2683- 2688.

[8] J. Kennedy, "Particle Swarm Optimization," *Proc. Int. Conf. on Neural Netwrok*, Washington, DC, USA, Nov/Dec 1995, Vol. 4, pp. 1942-1948.