

# رویکردی جدید بر توسعه پست‌های فوق‌توزیع مبتنی بر وزن‌دهی فازی ویژگی‌های الکتریکی و جغرافیایی شبکه توزیع مورد مطالعه

سید مهدی مظهري<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، حسن منصف<sup>۲</sup>، دانشیار، حمید فلقی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- mazhari@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران- hmonsef@ut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- falaghi@birjand.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله مسأله توسعه دینامیک پست‌های فوق‌توزیع با استفاده از یک ماتریس احتمال فازی مورد بررسی قرار گرفته است. این ماتریس احتمال که در بردارنده شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه است، احتمال اتصال هر یک از بارهای شبکه را به پست‌های نامزد تعیین می‌نماید. به منظور تشکیل این ماتریس، شرایط فیزیکی مسأله مکان‌یابی پست‌های فوق‌توزیع بررسی و فرمول‌بندی شده‌اند. با ترکیب این ماتریس با الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی راهکار جدیدی برای توسعه پست‌های فوق‌توزیع ارائه شده است. بدین وسیله مسأله بهینه‌سازی از حالت انتزاعی خارج شده و الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی، ویژگی‌های جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه را در ساختار خود پیاده می‌کند. در پایان، با حل مسأله توسعه پست‌های فوق‌توزیع برای یک منطقه واقعی از شهرستان اردبیل در قالب چندین سناریو، کارایی روش پیشنهادی بررسی و نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت؛ توسعه پست‌های فوق‌توزیع؛ خوشه‌یابی فازی؛ طراحی دینامیک سیستم توزیع.

## A New Method for Sub-Transmission Substation Expansion Planning via a Fuzzy Weighted Approach Applied to the Electrical and Geographical Properties of the Under Study Network

S. M. Mazhari<sup>1</sup>, H. Monsef<sup>2</sup>, H. Falagi<sup>3</sup>

1. Faculty of Engineering- Amirkabir University-Tehran- Iran

2. Faculty of Electrical and computer engineering Tehran University – Tehran – Iran

3. Faculty of Electrical and computer engineering- Birjand University – Birjand - Iran

**Abstract:** This paper presents a new solution approach to solve the sub-transmission substation expansion planning (SSEP) within large distribution networks. To do so, the SSEP is investigated based on a probability matrix which contains geographical and electrical features of the studied distribution network. The developed algorithm includes different electrical constraints and considers all prevalent cost indices. Possibility of supplying any of loads from each substation is calculated through the proposed method using membership matrix, modifying center of gravity theory and providing other heuristic approaches. Complexity of the problem is substantially reduced by means of the calculated probability matrix, and optimization process is carried out based on the introduced probability matrix. Detailed numerical results and comparisons presented in the paper show that the proposed approach could noticeably improve the quality of problem solutions and can be used as an effective tool for SSEP within actual distribution networks.

**Keywords:** Power system optimization; sub-transmission substation expansion planning; fuzzy clustering; dynamic distribution system planning.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۴

نام نویسنده مسئول: سید مهدی مظهري

نشانی نویسنده مسئول: ایران-تهران-خیابان ولیعصر-دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

تکاملی، تحقیقات متعددی برای حل این مشکلات انجام شده است. به عنوان مثال در [۳] با طراحی چند نوع جهش تکمیلی دقت پاسخ افزایش یافته ولی به موازات آن زمان حل مسأله نیز چندین برابر شده است. در [۱۲] با اعمال یک روش ابتکاری به الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی، سرعت پاسخ بهبود یافته است. [۱۳] نیز با تلفیق دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی سعی در حل مشکل کرده است.

در این مقاله مسأله توسعه پست‌های فوق توزیع مبتنی بر ماتریس احتمال پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. این ماتریس احتمال که در بر دارنده شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه است، احتمال اتصال هر یک از بارهای شبکه را به پست‌های نامزد تعیین می‌نماید. به منظور تشکیل این ماتریس احتمال، شرایط فیزیکی مسأله مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع بررسی و فرمول‌بندی شده‌اند. با ترکیب این ماتریس با الگوریتم ژنتیک، راهکار جدیدی برای توسعه پست‌های فوق توزیع ارائه گشته است. بدین وسیله مسأله بهینه‌سازی از حالت انتزاعی خارج شده و الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی، ویژگی‌های جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه را در ساختار خود پیاده می‌کند. با استفاده از ماتریس احتمال پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک، هدفمند شده و لذا مشکلات موجود در روش‌های مرسوم، مرتفع می‌گردند. در پایان، با حل مسأله توسعه پست‌های فوق توزیع برای بخشی از استان اردبیل، کارایی روش پیشنهادی در قالب چندین سناریو، بررسی و نشان داده شده است.

## ۲- فرمول‌بندی مسأله

## ۱-۲- تابع هزینه

همانطور که ذکر شد، هدف از مکان‌یابی بهینه پست‌ها، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، تعداد، ظرفیت و حوزه سرویس دهی پست‌ها به نحوی است که کمترین هزینه به سیستم تحمیل شده و قیود شبکه نیز رعایت شوند. هزینه سیستم از مجموع هزینه‌های زیر تشکیل می‌شود:

هزینه ثابت پست شامل هزینه زمین، ترانسفورماتور و تجهیزات پست‌ها و ...

هزینه احداث فیدرهای فشار متوسط (شبکه پایین‌دستی)،

هزینه تلفات فیدرهای فشار متوسط،

هزینه تلفات پست‌های فوق توزیع.

این هزینه‌ها را می‌توان به صورت زیر در قالب یک تابع هزینه فرمول‌بندی نمود:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{ns} C_{sub,i} + \sum_{i=1}^{ns} \sum_{j=1}^{nl} C_{line} \cdot d_{ij} \cdot \beta_{ij} + \sum_{h=1}^{ny} CF^h \cdot \sum_{i=1}^{ns} \sum_{j=1}^{nl} LSF \cdot d_{ij} \cdot \left( \frac{8760 r}{V_{nom}^2} \right) \cdot C_{loss} \cdot S_j^2 \cdot \beta_{ij} + \sum_{h=1}^{ny} CF^h \cdot \sum_{i=1}^{ns} 8760 C_{loss} \cdot P_{iron,i} + \sum_{h=1}^{ny} CF^h \cdot \sum_{i=1}^{ns} 8760 LSF \cdot C_{loss} \cdot P_{cu,i} \cdot \left( \frac{\sum_{j=1}^{nl} \beta_{ij} \cdot S_j}{CS_i} \right)^2 \quad (1)$$

با توجه به گسترش روز افزون مصرف انرژی الکتریکی، طراحی مناسب شبکه آینده و توسعه شبکه فعلی اهمیت زیادی دارد. مکان‌یابی و توسعه بهینه پست‌های فوق توزیع به عنوان گذرگاه ورود انرژی الکتریکی به سیستم توزیع، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. برای این منظور ناحیه مورد مطالعه به تعداد زیادی حوزه نامنظم، که به آن‌ها حوزه برقی گفته می‌شود، تقسیم می‌گردد. سپس کل بار پیش‌بینی شده هر حوزه برقی در مرکز ثقل حوزه قرار می‌گیرد. با مشخص شدن محل نقاط نامزد و سایر اطلاعات فنی و اقتصادی، مسأله توسعه پست‌ها در قالب یک مسأله بهینه‌سازی حل می‌گردد [۱]. هدف از توسعه بهینه پست‌ها، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، تعداد، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی پست‌ها به نحوی است که کمترین هزینه به سیستم تحمیل شده و قیود شبکه نیز رعایت شوند. قیود تغذیه تمامی بارها، محدودیت بارپذیری مجاز پست‌ها، محدودیت افت ولتاژ و محدودیت تغذیه هر کدام از بارها از یک پست، قیود موجود در مسأله توسعه پست‌های فوق توزیع را تشکیل می‌دهند.

با توجه به اهمیت موضوع، تا کنون روش‌های مختلفی برای حل مسأله پیشنهاد شده است [۱۳-۱۱]. مراجع [۴-۲] از الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله استفاده کرده‌اند. در حالی که [۲] با فرض عدم قطعیت در بارها، اثر تغذیه حوزه‌های برقی از چند پست را ارزیابی نموده، توسعه پست‌های فوق توزیع با استفاده از روش شبه‌پویا مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۳] با ارائه چندین عملگر تکمیلی، توسعه استاتیکی پست‌های فوق توزیع را با استفاده از ژنتیک اصلاح شده مطالعه نموده است. با استفاده از این عملگرها، احتمال حبس شدن پاسخ در کمینه‌های محلی کاهش یافته ولی به موازات آن مدت زمان حل مسأله چندین برابر شده است. [۴] در ضمن طراحی سیستم توزیع، مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع و تعیین حوزه سرویس‌دهی پست‌ها را با استفاده از بهینه‌سازی مبتنی بر تلفات بررسی نموده است. مرجع [۵] ضمن معرفی راهکار جدیدی برای طراحی بلندمدت، توسعه پست‌های فوق توزیع را با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی اعداد صحیح مطالعه کرده است. علاوه بر این موارد، استفاده از الگوریتم مهاجرت پرندگان [۶-۷]، الگوریتم اجتماع مورچگان [۸-۹] و استفاده از روش‌های ابتکاری [۱۱-۱۰]، نمونه‌هایی از تحقیقات انجام شده در این زمینه هستند.

در این میان روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های ابتکاری از نظر دقت پایین، ولی از نظر سرعت سریع هستند. روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی با جستجوی هدفمند در فضای حالت‌های ممکن برای مسأله به پاسخ‌های مناسبی دست می‌یابند، از اینرو از نظر دقت خوب ولی بسیار کند هستند. این روش‌ها دو اشکال عمده دارند. یکی سرعت بسیار پایین همگرایی و دیگری عدم رسیدن به جواب واحد در چندین بار اجرای الگوریتم‌ها به عبارت دیگر توقف در یکی از کمینه‌های محلی است. با توجه به جاذبه روش‌های بهینه‌سازی

در این رابطه  $CS_i$  ظرفیت نامی پست  $i$  ام و  $kl_{min}$  و  $kl_{max}$  درصد حداکثر و حداقل بارگیری مجاز پست مربوطه را نشان می‌دهند.

$$LSF = 0.15\kappa + 0.85\kappa^2 \quad (2)$$

$$CF = (1 + Infr)/(1 + Intr) \quad (3)$$

$$d_{ij} = K_S \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \quad (4)$$

که در آن:

$C_{total}$  هزینه کل طرح (بر حسب واحد پول)،

$C_{sub,i}$  هزینه‌های ثابت پست  $i$  شامل هزینه زمین، تجهیزات،

ساخت و ... (بر حسب واحد پول)،

$C_{loss}$  هزینه تلفات انرژی (بر حسب  $kWh$  / واحد پول)،

$C_{line}$  هزینه احداث شبکه فشار ضعیف (بر حسب  $km$  / واحد

پول)،

$CF$  ضریب تبدیل هزینه جاری به ارزش کنونی،

$d_{ij}$  فاصله پست  $i$  از بار  $j$  (بر حسب  $km$ )،

$LSF$  ضریب تلفات،

$\kappa$  ضریب بار،

$Infr$  نرخ تورم سالیانه،

$Intr$  نرخ بهره سالیانه،

$P_{cu,i}$  تلفات بارداری پست  $i$  در بار نامی (بر حسب  $kW$ )،

$P_{iron,i}$  تلفات هسته پست  $i$  (بر حسب  $kW$ )،

$S_j$  بار پیش‌بینی شده در نقطه بار  $j$  ام (بر حسب  $kVA$ )،

$CS_i$  ظرفیت نامی پست  $i$  ام (بر حسب  $kVA$ )،

$r$  مقاومت خط فشار متوسط (بر حسب  $\Omega / km$ )،

$ny$  طول دوره مطالعه (بر حسب سال)،

$ns$  تعداد پست‌ها،

$nl$  تعداد نقاط بار،

$V_{nom}$  ولتاژ خطی نامی مدار ثانویه،

$\beta_{ij}$  متغیر تصمیم‌گیری، نشان‌دهنده اتصال یا عدم اتصال بار به

پست. در صورت اتصال پست  $i$  به بار  $j$  برابر یک و در غیر

این صورت صفر در نظر گرفته می‌شود،

$x_i$  و  $y_i$  مختصات گره  $i$  ام،

$K_S$  ضریب اصلاح فاصله.

## ۲-۲- قیود شبکه

محدودیت‌های حاکم بر مسأله عبارتند از [۱۱]:

**الف-** محدودیت در حداکثر بارگذاری مجاز پست‌ها:

با توجه به شرایط فنی و به دلیل رعایت قابلیت اطمینان، پست‌های شبکه در مقداری کمتر از ظرفیت نامی بارگیری می‌شوند. برای این منظور لازم است هر کدام از پست‌های انتخاب‌شده از شرط زیر پیروی نمایند:

$$kl_{min} \cdot CS_i \leq \sum_{j=1}^{nl} \beta_{ij} \cdot S_j \leq kl_{max} \cdot CS_i, \quad i = 1, \dots, ns \quad (5)$$

**ب-** محدودیت در تغذیه بارها:

با توجه به محدودیت شعاعی بودن شبکه فشار متوسط، هر نقطه بار می‌بایست تنها توسط یک پست فوق توزیع تغذیه گردد. این فیدر را می‌توان در قالب ریاضی به صورت زیر بیان نمود:

$$\sum_{i=1}^{ns} \beta_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, nl \quad (6)$$

**پ-** محدودیت افت ولتاژ:

تغذیه مناسب به مشترکین برق و جلوگیری از طولانی شدن فیدرهای فشار متوسط مستلزم رعایت محدودیت افت ولتاژ در نقاط بار است. بنابراین می‌توان گفت:

$$\left| \frac{d_{ij} \cdot S_j}{V_{nom}} \cdot z \cdot \sum_{i=1}^{ns} \beta_{ij} \right| \leq \Delta V_{max}, \quad i = 1, \dots, nl \quad (7)$$

که در آن  $\Delta V_{max}$  حداکثر افت ولتاژ مجاز و  $z$  مقاومت فیدر فشار متوسط در واحد طول، می‌باشد. یادآوری این نکته حائز اهمیت است که محاسبه دقیق افت ولتاژ و تلفات، مستلزم حل مسأله مسیریابی فیدرهای فشار متوسط است؛ با این وجود، مسیریابی فیدرها بخشی از وظایف شرکت‌های توزیع بوده و شرکت‌های برق منطقه‌ای (صاحبان پست‌های فوق توزیع) نقشی در آن‌ها ندارند. بر این اساس، معمولاً محاسبه تلفات و افت ولتاژ با در نظر گرفتن فیدرهای مجازی و اعمال تقریب‌هایی به مسأله انجام می‌شوند [۶-۲].

## ۳- روش حل

حل مشکلات مربوط به روش‌های بهینه‌سازی تکاملی مستلزم ارائه راهکارهای ابتکاری است، به نحوی که از دقت روش کاسته نشده و سرعت همگرایی به جواب بهینه افزایش یابد. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که در آن یک جمعیت اولیه تولید و برازندگی آن محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از یک روش انتخاب (مثل روش چرخ رولت) دسته‌ای از این جمعیت انتخاب شده و با اعمال عملگرهای ژنتیک (جهش، ادغام و ...) نسل جدیدی تولید می‌گردد. تولید نسل تا جایی ادامه می‌یابد که عضو با برازندگی مورد نظر تولید و یا تعداد تکرارها (تولید نسل‌ها) از حد معینی بیشتر شود [۴-۲].

در روش‌های مرسوم، ساختار کروموزوم مشابه شکل (۱) انتخاب شده و هر ژن نماینده یکی از نقاط بار فرض می‌شود. عدد قرار گرفته در هر ژن نشان‌دهنده پستی است که نقطه بار مربوطه به آن متصل خواهد

$$\frac{2}{n(n-1)} \sum_{j < i} \frac{1}{1 + \beta \cdot d_{ij}} = 0.5 \quad (9)$$

در این رابطه  $n$  معرف تعداد نمونه‌ها بوده و یادگیری وزن ویژگی‌ها به معنای محاسبهٔ به‌تدریج بردار وزن  $w = (w_1, \dots, w_n)$  می‌باشد. تعبیر بردار وزن  $w$  بدین صورت است که هر چه مولفه  $k$  ام این بردار بزرگتر باشد، اهمیت مولفه  $k$  ام نمونه‌ها نیز در خوشه‌بندی بیشتر می‌باشد. برای محاسبه بردار وزن لازم است تا یک معیار برای ارزیابی میزان تشابه نمونه‌ها ارائه شود. تابع معیار ارزیابی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۵]:

$$E(w) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_i \frac{1}{2} [p_{ij}^{(w)}(1 - p_{ij}) + (1 - p_{ij}^{(w)})] \quad (10)$$

در این رابطه  $p_{ij}$  بیانگر میزان تشابه نمونه  $i$  و  $j$  بر مبنای فاصله می‌باشد.

برای کمینه‌سازی تابع فوق از روش نزول در امتداد گرادیان استفاده می‌شود. اگر تغییرات مولفه  $k$  ام بردار وزن با  $\Delta w_k$  نشان داده شود، نتیجه می‌شود:

$$\Delta w_k = -\eta \frac{\partial E(w)}{\partial w_k}, \quad 0 < k < n \quad (11)$$

پس از محاسبه بردار وزن  $w$  تابع معیار الگوریتم خوشه‌بندی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J^{(w)}(U; V, X) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \cdot (d_{ij}^{(w)})^2 \quad (12)$$

در این رابطه:

$m$  یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برابر ۲ انتخاب می‌شود. اگر  $m$  برابر ۱ باشد، تابع هدف خوشه‌بندی  $C$  میانگین کلاسیک به دست می‌آید؛  
 $V$  ماتریس مختصات نمایندگان خوشه‌ها؛  
 $X$  ماتریس مختصات نمونه‌ها؛  
 $n$  تعداد نمونه‌ها،  
 $u_{ij}$  میزان تعلق نمونه  $j$  ام در خوشه  $i$  ام.

با استفاده از  $u_{ij}$  ها، ماتریس تعلق  $U$  که دارای  $C$  سطر و  $n$  ستون است، تعریف می‌شود. مؤلفه‌های این ماتریس می‌توانند هر مقداری بین ۰ تا ۱ انتخاب گردیده اما مجموع مؤلفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر ۱ باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت:

$$\sum_{i=1}^C u_{ik} = 1, \quad k = 1, \dots, n \quad (13)$$

شد. با توجه به اینکه تعداد نقاط بار و نقاط نامزد در یک مسئله واقعی بزرگ است، زمان حل مسئله بسیار طولانی می‌گردد [۳].

در این مقاله با محدودسازی الگوریتم ژنتیک سرعت حل مسئله افزایش یافته است. برای این منظور احتمال انتخاب هر عدد برای هر ژن هدفمند شده است. در حقیقت انتخاب عدد مربوط به هر ژن از حالت تصادفی خارج و به ماتریس احتمال وابسته شده است. این ماتریس احتمال، در بر دارندهٔ شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه بوده و به منظور فرمول‌بندی این موارد، از ماتریس تعلقات و تئوری مراکز ثقل استفاده می‌نماید.

۳	۱	۵	۴۰	...	...	۱	۱	۳۰	۲
$\underbrace{\hspace{10em}}_{nl}$									

شکل (۱): ساختار در نظر گرفته شده برای کروموزوم

### ۳-۱- ماتریس تعلقات و خوشه‌یابی فازی با استفاده از الگوریتم یادگیری وزن ویژگی‌ها

خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت بوده و فرآیند خودکاری است که در طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که اعضای آن مشابه یکدیگرند، تقسیم شده و به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. معیار تشابه خوشه‌ها متفاوت بوده و به عنوان مثال می‌توان معیار فاصله را برای خوشه‌بندی مورد استفاده قرار داده و نمونه‌هایی را که به یکدیگر نزدیکتر هستند، به عنوان یک خوشه در نظر گرفت. به این نوع خوشه‌بندی، خوشه‌بندی مبتنی بر فاصله نیز گفته می‌شود [۱۴]. یکی از الگوریتم‌های خوشه‌بندی، الگوریتم  $C$  میانگین فازی می‌باشد. در این الگوریتم نمونه‌ها به  $C$  خوشه، که تعداد  $C$  از قبل مشخص شده است، تقسیم می‌شوند. در روش خوشه‌یابی با استفاده از یادگیری وزن ویژگی‌ها، در ابتدا با استفاده از روشهای یادگیری، میزان تشابه بین نمونه‌ها محاسبه شده و سپس از روی تشابهات نمونه‌ها تابع هدف الگوریتم  $C$  میانگین فازی ارائه می‌شود. یکی از روش‌های ارائه شده در این زمینه روش  $Wang$  است [۱۵]. در این روش میزان تشابه نمونه  $i$  و نمونه  $j$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_{ij}^{(w)} = \frac{1}{1 + \beta \cdot d_{ij}^{(w)}} \quad (8)$$

در رابطه فوق:

$d_{ij}^{(w)}$  فاصله وزن‌دار نمونه  $i$  و نمونه  $j$ ،  
 $\beta$  ضریبی مثبت است که برای قرار گرفتن میزان تشابه در فاصله [۰ ۱] استفاده شده است.  
مقدار  $\beta$  از معادلهٔ زیر بدست می‌آید:

نقطه‌بار به هر یک از پست‌ها و در نتیجه ژن‌های الگوریتم ژنتیک هدفمند می‌گردد. بدین منظور، برای هر نقطه‌بار مجموعه‌ای از نقاط نامزد (و پست‌های موجود) که این نقطه‌بار می‌تواند به آنها متصل شود، انتخاب می‌گردد. پست‌هایی که این نقطه‌بار نمی‌تواند به آنها وصل شود بر مبنای مشکل افت ولتاژ انتخاب می‌گردند. در مرحله بعد هر کدام از این نقاط نامزد (و پست‌های موجود) برای هر نقطه‌بار، وزن‌دهی می‌شوند. برای این کار از پنج پارامتر که معرف شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه است، استفاده می‌شود.

### پارامتر اول: تعلق نقطه‌بار به پست

با فرض تمامی پست‌های نامزد به عنوان مرکز ثقل و استفاده از رابطه (۱۴) میزان تعلق هر نقطه‌بار به هر یک از پست‌ها مشخص می‌گردد. بر این اساس، میزان تعلق نقطه‌بار مربوطه ( $j$ ) به پست‌های نزدیکتر بیشتر بوده و لذا احتمال انتخاب شدن آنها نیز بیشتر می‌گردد:

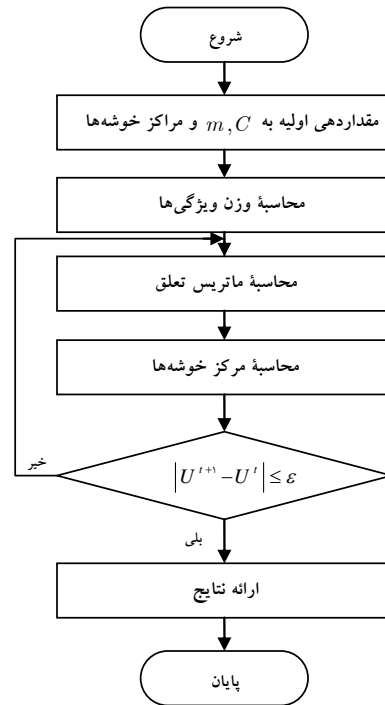
$$P_{1,ij} = u_{ij}, \quad \forall j \in \Omega_{load}, \quad i \in \Omega_{sl,j} \quad (17)$$

که در این رابطه:

$u_{ij}$  میزان تعلق نقطه‌بار  $j$  ام به پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$  مجموعه بارهای موجود در شبکه،  $\Omega_{load}$  مجموعه پست‌هایی که نقطه‌بار  $j$  ام می‌تواند به آنها متصل گردد.

### پارامتر دوم: هزینه‌های ثابت و سرمایه‌گذاری شده در پست‌ها

در یک ساختار شهری، نقاط نامزد مختلف با توجه به محل جغرافیایی، دارای هزینه احداث و بهره‌برداری متفاوتی هستند. از طرفی در پست‌های موجود هزینه‌های بسیاری سرمایه‌گذاری شده است. با توجه به ارزش پست‌های موجود، معمولاً در توسعه پست‌های فوق توزیع این پست‌ها انتخاب می‌گردند. با این همه با توجه به تفاوت هزینه سرمایه‌گذاری شده در پست‌های موجود، به نسبت ابعاد زمین، ترانسفورماتور و تجهیزات موجود در پست، باید تفاوتی میان توسعه پست‌های موجود ایجاد گردد. به منظور رعایت این موارد، مجموع هزینه‌های ثابت (هزینه زمین، ترانسفورماتور و تجهیزات) یک نقطه نامزد (یا پست موجود) نسبت به مجموع هزینه‌های ثابت تمامی نقاط نامزد (و پست‌ها موجود)، مطابق رابطه (۱۸) ارزش‌گذاری می‌گردد. بر طبق این رابطه، نقطه نامزدی که هزینه‌های ثابت کمتری داشته باشد، احتمال انتخاب شدنش بیشتر و از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است. به صورت مشابه، احتمال انتخاب پست‌های با سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر، افزایش می‌یابد. همانطور که در رابطه (۱۹) مشاهده می‌شود، جمله اول، نشان‌دهنده ارزش پست‌های موجود است. از طرفی به منظور رعایت شرایط واقعی حاکم بر پست‌ها، ضریب استهلاک به رابطه اعمال



شکل (۲): خوشه‌یابی فازی با استفاده از الگوریتم یادگیری وزن ویژگی‌ها

برای یافتن رابطه‌های مربوط به  $u_{ik}$ ،  $x_i$  و  $y_i$  کافی است تابع معیار الگوریتم خوشه‌یابی کمینه شود. با استفاده از رابطه (۱۳) و برابر صفر قرار دادن مشتق تابع معیار نتیجه می‌شود:

$$u_{ik} = 1 / \sum_{j=1}^C (d_{jk}^w / d_{ik}^w)^{2/(m-1)} \quad (14)$$

$$x_i = \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \times x_k / \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \quad (15)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \times y_k / \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \quad (16)$$

در این صورت مراحل الگوریتم به شکل زیر خواهد بود:

- گام ۱) مقداردهی اولیه برای  $C$ ،  $m$  و مراکز خوشه‌ها،
  - گام ۲) محاسبه وزن ویژگی‌ها با استفاده از رابطه (۱۰)،
  - گام ۳) محاسبه ماتریس تعلق با استفاده از رابطه (۱۴)،
  - گام ۴) محاسبه مراکز ثقل جدید با توجه به ماتریس تعلق محاسبه شده با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶)،
  - گام ۵) تکرار گام‌های فوق تا زمانی که  $|U^{t+1} - U^t| \leq \epsilon$ .
- شکل (۲) چگونگی انجام این الگوریتم را نشان می‌دهد.

### ۳-۲- هدفمندسازی انتخاب عدد قرار گرفته در هر ژن

در یک شبکه واقعی احتمال اتصال یک نقطه‌بار به تمام پست‌ها یکسان نیست، از طرفی احتمال انتخاب یک پست نامزد و یا توسعه یک پست موجود با سایر پست‌ها متفاوت است. ماتریس احتمال، ماتریسی  $ns \times nl$  بعدی است که احتمال اتصال یک نقطه‌بار را به هر یک از پست‌ها نشان می‌دهد. با استفاده از این ماتریس، احتمال اتصال

بایستی موارد موثر در انتخاب پست‌ها به دقت مد نظر قرار گیرد. یکی از این موارد نزدیکی پست‌ها به مراکز ثقل بار است.

از دیدگاه فنی و با فرض مشخص بودن تعداد بهینه پست‌ها، بهترین مکان برای احداث پست‌ها نقاط نزدیک به مراکز ثقل بار است [۱۱]. با توجه به اینکه از نظر فیزیکی هر شبکه فقط یک مرکز جرم (مرکز ثقل) دارد، لذا تعیین چند مرکز ثقل برای یک شبکه کار دشواری است. برای این منظور بایستی شبکه به نحوی مناسب به چند بخش مجزا افراز گردد. از آنجایی که افراز مطلق یک ساختار پیوسته به چندین بخش کوچکتر امکان‌پذیر نیست، لذا در هر صورتی این بخش‌ها به یکدیگر تعلق خواهند داشت. با اصلاح الگوریتم خوشه‌یابی فازی می‌توان راهکار مناسبی را برای محاسبه مراکز ثقل شبکه یافت. برای این منظور کافی است در یک الگوریتم خوشه‌یابی فازی به روش  $C$  میانگین روابط (۲۲) و (۲۳) به صورت زیر اصلاح گردند:

$$x_i = \sum_{k=1}^n (u'_{ik})^m \times x_k / \sum_{k=1}^n (u'_{ik})^m \quad (22)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^n (u'_{ik})^m \times y_k / \sum_{k=1}^n (u'_{ik})^m \quad (23)$$

به این ترتیب با اجرای الگوریتم خوشه‌یابی فازی به جای محاسبه مراکز ثقل خوشه‌ها، مراکز ثقل شبکه (مرکز ثقل بار و فاصله) محاسبه می‌گردد.

نزدیکی به مراکز ثقل بار می‌تواند معیار مفیدی برای انتخاب یک نقطه نامزد در پاسخ نهایی مسئله مکان‌یابی پست‌ها باشد. بر این اساس مطابق رابطه (۲۴)، با تغییر تعداد مراکز ثقل بار (از عدد ۱ تا حداکثر تعداد نقاط نامزد و پست‌های موجود) و مقایسه این فواصل برای نقاط نامزد مختلف، احتمال انتخاب پست‌های نزدیک به مراکز ثقل بار بیشتر می‌گردد.

$$P_{4,ij} = 1 - \left( \sum_{c=1}^{ns} d'_{ikc} / \sum_{m=1}^{n_{slj}} \sum_{c=1}^{ns} d'_{mkc} \right) \quad (24)$$

$$d'_{ikc} = d_{ikc} / \sum_{m=1}^{n_{slj}} d_{mkc} \quad (25)$$

در این روابط:

$d_{ikc}$  فاصله پست  $i$  ام از  $k$  امین مرکز ثقل بار شبکه وقتی که تعداد مراکز ثقل برابر  $c$  فرض گردد،  
 $d'_{ikc}$  فاصله ارزش‌گذاری شده برای  $d_{ikc}$ ،  
 $k_c$  نزدیکترین مرکز ثقل به یک پست وقتی که تعداد مراکز ثقل شبکه برابر  $c$  فرض گردد.

### پارامتر پنجم: حوزه سرویس‌دهی با فرض انتخاب تمام پست‌ها

اگر پاسخ مسئله مکان‌یابی پست‌های فوق توزیع برای سال هدف، تمامی نقاط نامزد و پست‌های موجود شبکه در سال مبنا را شامل شود، حوزه سرویس‌دهی به راحتی و با اتصال هر نقطه‌بار به نزدیکترین پست، با

شده است. در این رابطه،  $\varepsilon$  معرف یک عدد بسیار کوچک است و به منظور محدود ماندن مقدار  $P_{2,ij}$  در شرایطی که  $P_{worth,ij}$  برای همه نقطه‌بارها صفر است، به رابطه اضافه شده است.

$$P_{2,ij} = P_{worth,ij} / \sum_{i=1}^{n_{slj}} P_{worth,ij}, \quad \forall j \in \Omega_{load}, i \in \Omega_{slj} \quad (18)$$

$$P_{worth,ij} = (C_{inv,i} \times k_{dep,i}) - C_{cons,i} + \max(\Omega_{cons,j}) + \varepsilon \quad (19)$$

در این روابط:

$P_{worth,ij}$  ارزش هزینه‌ای پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $n_{sl,j}$  تعداد پست‌های موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $C_{inv,i}$  هزینه سرمایه‌گذاری شده در پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $k_{dep,i}$  ضریب استهلاک پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $C_{cons,i}$  هزینه ثابت پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $\Omega_{cons,j}$  مجموعه هزینه‌های ثابت پست‌های موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$

### پارامتر سوم: تعلق نقاط بار به پست

اگر چه میزان تعلق یک نقطه‌بار به یک پست معین، تاثیر بسزایی در اتصال این نقطه‌بار به آن پست دارد ولی در انتخاب پست مورد نظر مناسب نیست. بر این اساس احتمال انتخاب یک پست تاثیر بسزایی در احتمال اتصال بارهای نزدیک به آن دارد. یکی از موارد موثر در انتخاب یک پست میزان تعلق مجموعه بارها به این پست است. رابطه (۲۰) نحوه ارزش‌گذاری این پارامتر را نشان می‌دهد. بر طبق این رابطه احتمال انتخاب پست نامزدی که نقطه‌بارهای بیشتری به آن تعلق دارند و به عبارتی به آن نزدیک هستند، بیشتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه تعلق، با اعمال اثر توان نقاط بار، اصلاح شده است.

$$P_{3,ij} = \sum_{k=1}^{nl} u'_{ik} / \sum_{m=1}^{n_{slj}} \sum_{n=1}^{nl} u'_{mn}, \quad \forall j \in \Omega_{load} \quad (20)$$

$$u'_{ik} = S_k \times u_{ik} / \sum_{j=1}^{nl} S_j \quad (21)$$

در این روابط:

$u'_{ik}$  تعلق اصلاح‌شده نقطه‌بار  $k$  ام به پست  $i$  ام موجود در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$   
 $nl$  تعداد کل بارهای موجود در شبکه،  
 $S_k$  میزان بار مصرفی نقطه‌بار  $k$  ام.

### پارامتر چهارم: نزدیکی به مراکز ثقل بار

همانطور که ذکر شد، میزان احتمال انتخاب یک پست تاثیر بسزایی در احتمال اتصال سایر نقاط بار به پست مورد نظر دارد. به همین دلیل

**گام ۱** برای هر نقطه بار مجموعه‌ای از نقاط نامزد (و پست موجود) که این نقطه بار می‌تواند به آنها متصل شود، انتخاب می‌گردد.

**گام ۲** رابطه (۲۷) برای هر کدام از این نقاط نامزد و برای هر یک از نقاط بار محاسبه می‌شود.

**گام ۳** ساختاری مشابه شکل (۱) برای کروموزوم برگزیده می‌شود.

**گام ۴** عملگرهای ژنتیکی به صورت مرسوم به مسأله اعمال می‌شوند، با این تفاوت که به جای انتخاب تصادفی عدد مربوط به هر ژن، عدد انتخاب شده از میان نقاط انتخاب شده در گام یک بوده و احتمال انتخاب شدن آنها نیز متناسب با عدد مربوطه در گام دو خواهد بود.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که احتمال اتصال یک نقطه بار به پست‌هایی که در مجموعه  $\Omega_{sl,j}$  قرار ندارند، برابر صفر منظور می‌گردد. از طرفی، انتخاب ژن‌ها در جمعیت اولیه و عملگر جهش، دقیقاً مبتنی بر ماتریس احتمال پیشنهادی می‌باشد.

#### ۴- مطالعات عددی و نتایج

##### ۴-۱- معرفی

برای استفاده از روش پیشنهادی برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار *Matlab 7* نوشته شد. کاربر با رسم حوزه‌های برقی (و یا ارائه فایل *GIS*) و نیز وارد نمودن اطلاعات تمامی بارها، پست‌های موجود، نقاط کاندیدا و دیگر اطلاعات فنی و اقتصادی، پاسخ مسأله مکان‌یابی را در سال افق مشاهده خواهد کرد. در این مقاله مسأله توسعه پست‌های فوق توزیع برای یک منطقه واقعی از استان اردبیل، با روش پیشنهادی حل و نتایج حاصل شده با سایر روش‌ها [۲-۳]، در قالب چندین سناریو، مقایسه شده است. منطقه مذکور در شکل (۳) مشاهده می‌شود. کامپیوتر استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای اطلاعات فنی شامل، سی‌پی‌یو *Centrino 1.8 GH* و  $1^{GB}$  رم می‌باشد.

رعایت قید حداکثر بارگیری مجاز پست‌ها، تعیین می‌گردد. بدیهی است که حل مجدد مسأله، با نادیده گرفتن پست‌هایی که در این حالت به آنها هیچ باری متصل نشده، هیچ‌گونه تغییری در پاسخ نهایی ایجاد نمی‌کند. برای اعمال این موارد و افزایش احتمال انتخاب پست‌هایی که در حالتی مشابه، میزان بار بیشتری به آنها متصل است، احتمال انتخاب هر نقطه نامزد مطابق رابطه (۲۶) تعیین می‌گردد.

$$P_{S,ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\Omega_{sub,i}}} (u_{ik} \times S_k)}{\sum_{k=1}^{n_{\Omega_{sub,i}}} S_k} \quad (26)$$

در این رابطه:

$\Omega_{sub}$  مجموعه پست‌های موجود و نامزد،

$\Omega_{sub,i}$  مجموعه بارهای متصل به پست  $i$  ام در حالتی که همه پست‌ها انتخاب شده باشند،

$n_{\Omega_{sub,i}}$  تعداد کل بارهای موجود در مجموعه  $\Omega_{sub,i}$

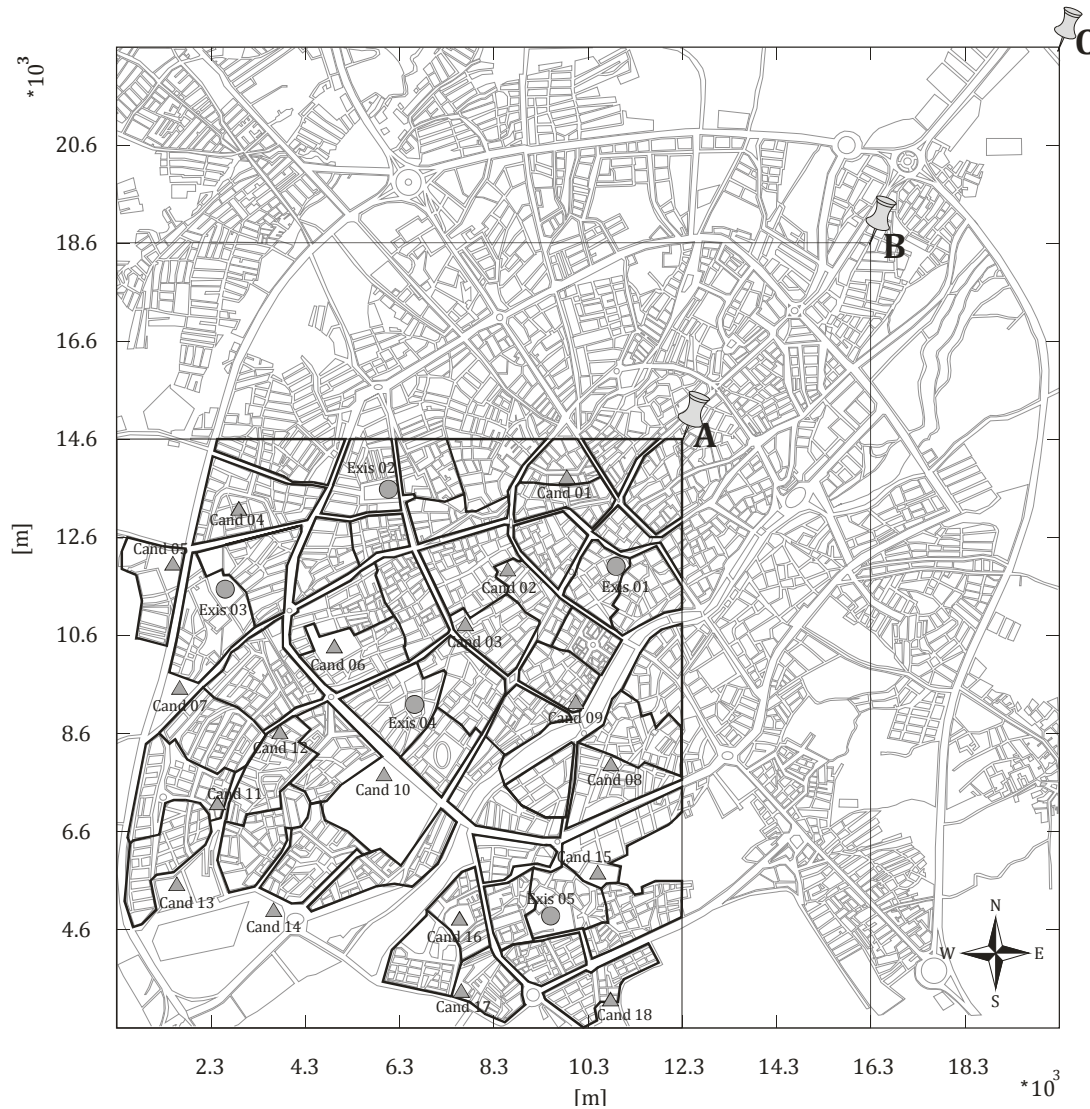
##### ۳-۳- ماتریس احتمال اتصال نقاط بار و پست‌ها

در این بخش پارامترهای مختلفی به منظور اثرگذاری بر احتمال انتخاب نقاط نامزد و نیز احتمال اتصال نقاط بار به پست‌ها، ذکر شدند. اگر چه تعیین احتمال اتصال نقاط بار، وابسته به احتمال انتخاب پست‌ها است، با این همه می‌توان پارامترهای ذکر شده را در دو دسته کلی جای داد. در حالی که دسته‌ای از این پارامترها، از جمله پارامتر اول، به ویژگی نقاط بار وابسته هستند، دسته‌ای دیگر، شامل پارامترهای دوم تا پنجم، به ویژگی پست‌ها مرتبط می‌شوند. با این تفاسیر و با توجه به اینکه تمامی پارامترهای محاسبه شده نرمالیزه هستند، عناصر ماتریس احتمال مطابق رابطه (۲۷) تعیین می‌گردند.

$$P_{S,ij} = P_{1,ij} \times \left( \frac{\sum_{n=2}^5 P_{n,ij}}{\sum_{m=1}^{n_{\Omega_{sl,j}}} \sum_{n=2}^5 [P_{1,mj} \times P_{n,mj}]} \right) \quad (27)$$

##### ۴-۳- مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی

محدودسازی فضای حل مسأله و هدفمند کردن ژن‌های الگوریتم ژنتیک با استفاده از ماتریس احتمال پیشنهادی، مطابق گام‌های زیر انجام می‌گیرد:



شکل (۳): ناحیه مورد مطالعه

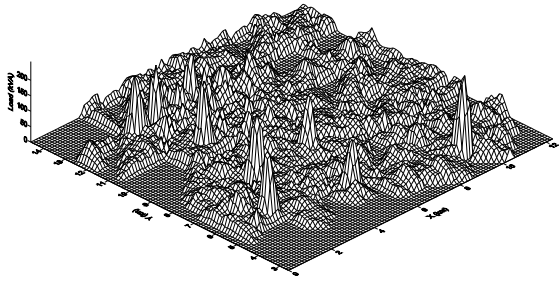
میانگین افزایش مصرف در دوره‌های اول و دوم به ترتیب، ۱۱٪ و ۱۷٪ و نرخ بهره و تورم در تمام سال‌ها برابر ۹٪ و ۱۰٪ فرض می‌گردد. بیشینه درصد بارگذاری پست‌ها، بیشینه افت ولتاژ، ضریب تصحیح فاصله و هزینه هر کیلو وات ساعت مصرف انرژی الکتریکی به ترتیب برابر ۷۵٪، ۵٪، ۳۳٪ و ۷/۵ سنت، می‌باشد. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای دوره زمانی اول مطابق جدول (۲) و حوزه سرویس دهی پیشنهادی مطابق شکل (۶) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، از میان پست‌های موجود، سه پست توسعه یافته و علاوه بر این، دو پست جدید نیز احداث شده است. از طرفی میانگین بارگیری از پست‌ها ۶۴/۱۲٪ و کمینه افت ولتاژ در نقاط بار برابر ۴/۴۷٪ می‌باشد که مقادیر مناسبی هستند.

#### ۴- نتایج اجرای برنامه

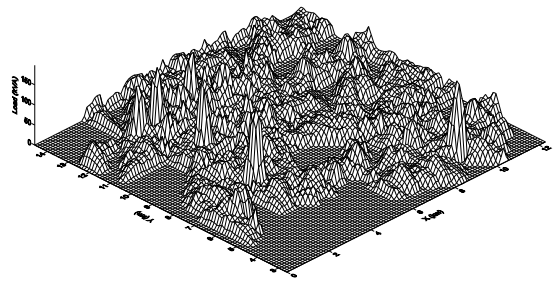
##### سناریوی اول

در این سناریو مسأله توسعه دینامیک پست‌ها برای بلوک A از شکل (۳) بررسی می‌شود. در حالی که محل پست‌های نامزد و موجود در شکل (۳) نشان داده شده، وضعیت بارهای شبکه در دو دوره متوالی مطابق شکل‌های (۴) و (۵) در نظر گرفته می‌شود. این بلوک شامل ۵۰۷۹۶ مشترک بوده و توسعه دینامیک پست‌های فوق توزیع برای یک دوره پانزده ساله که به دو زیر بازه هفت و هشت سال تقسیم می‌شوند، بررسی می‌گردد. اطلاعات کامل پست‌های موجود مطابق جدول (۱) است. از طرف دیگر، حداکثر ظرفیت قابل نصب در پست‌های نامزد برابر  $90^{MVA}$  فرض می‌گردد. منحنی بار مصرفی مشترکین در بازه‌های زمانی اول و دوم به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها،





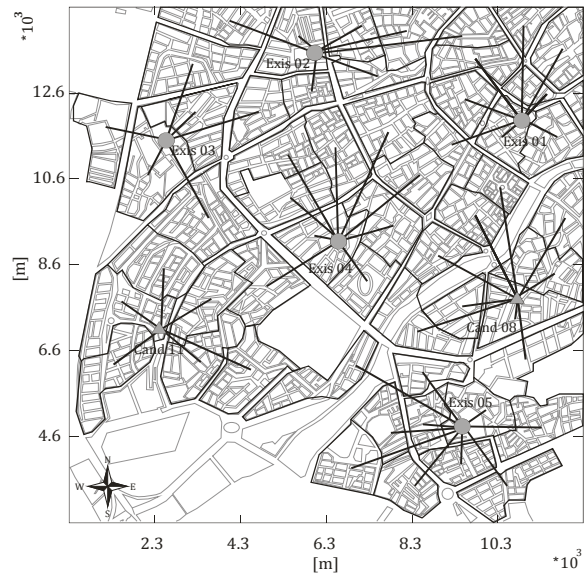
شکل (۵): منحنی بار مصرفی بلوک A شکل (۳) در بازه زمانی دوم



شکل (۴): منحنی بار مصرفی بلوک A شکل (۳) در بازه زمانی اول



شکل (۷): توسعه پست‌ها در بازه زمانی دوم برای بلوک A از شکل (۳)



شکل (۶): توسعه پست‌ها در بازه زمانی اول برای بلوک A از شکل (۳)

پست‌های نامناسب، فضای حل مسأله را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش دادند در نتیجه احتمال محبوس شدن در نقاط کمینه محلی کاهش یافته است.

### سناریوی دوم

با توجه به اینکه در این پژوهش راهکار جدیدی، مبتنی بر ماتریس احتمالات، به منظور توسعه پست‌های فوق توزیع برای شبکه‌های بزرگ مقیاس ارائه گشته است، لذا در این سناریو اثر تغییر ابعاد مسأله بر کیفیت پاسخ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر آنالیز حساسیت در مورد هر یک از پارامترهای ماتریس احتمال انجام گرفته است.

جدول (۵) نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های مختلف را برای بلوک‌های مختلف مشخص شده در شکل (۳)، نشان می‌دهد. بر طبق این نتایج راهکار پیشنهادی با افزایش ابعاد مسأله و در نتیجه افزایش حالات ممکن برای مسأله، قابلیت خود را بیشتر نمایش داده و مدت زمان حل مسأله را نسبت به سایر روش‌ها بیشتر کاهش می‌دهد.

پاسخ پیشنهادی برای دوره زمانی دوم در جدول (۳) و حوزه سرویس‌دهی مربوطه در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، برق‌رسانی مطلوب به مشترکان در دوره دوم، مستلزم توسعه یک پست موجود و احداث یک پست جدید است. از طرفی میانگین بارگیری از پست‌ها ۶۷/۷۵٪ و حداقل افت ولتاژ در نقاط بار برابر ۴/۵۹٪ می‌باشد که مقادیر مناسبی هستند.

به منظور بررسی کیفیت راهکار پیشنهادی، نتایج با پاسخ‌های حاصل از مراجع [۲-۳] مقایسه شده‌اند. برای این منظور، [۳] از حالت استاتیک به حالت دینامیک تغییر یافته و در راهکار ارائه شده توسط [۲] عدم قطعیت بارها و نیز امکان اتصال یک حوزه برقی به دو پست، حذف شده است. تمامی برنامه‌ها به صورت مستقل برای ده بار اجرا شده و نتایج حاصله در جدول (۴) ارائه شده‌اند. مطابق این نتایج راهکار پیشنهادی نه تنها کیفیت پاسخ‌ها را بهبود بخشیده، بلکه سرعت رسیدن به پاسخ را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است. در حقیقت ماتریس احتمال، با افزایش احتمال اتصال مناسب نقاط بار به پست‌ها و کاهش احتمال انتخاب

دارند، ولتیرکیب آنها با پارامترهای دو و پنج، پاسخ‌های بهتری را نتیجه می‌دهد

جدول (۶) نتایج حاصل از آنالیز حسایت بر روی بلوک C شکل (۳) را نشان می‌دهد. مطابق این نتایج، اگر چه پارامترهای یک، سه و چهار بیشترین تاثیر را در کیفیت و زمان رسیدن به پاسخ بهینه

جدول (۱): وضعیت پست‌های موجود در بلوک A از شکل (۳)

نام	ظرفیت نصب شده (MVA)	ظرفیت‌های قابل نصب (MVA)	نام	ظرفیت نصب شده (MVA)	ظرفیت‌های قابل نصب (MVA)
Exist 01	۳۰	۱۵	Exist 04	۴۵	۱۵
Exist 02	۱۵	۳۰, ۱۵	Exist 05	۳۰	۶۰, ۴۵, ۳۰, ۱۵
Exist 03	۱۵	۶۰, ۴۵, ۳۰, ۱۵			

جدول (۲): پاسخ توسعه پست‌ها برای بلوک A از شکل (۳) در بازه زمانی اول

وضعیت پست‌های موجود				
نام	ظرفیت نصب شده (MVA)	بار (MVA)	ظرفیت جدید (MVA)	بارگذاری (%)
Exist 01	۳۰	۲۰/۴۱۵	۳۰	۶۸/۰۵۱
Exist 02	۱۵	۱۹/۴۹۲	۳۰	۶۴/۹۷۳
Exist 03	۱۵	۱۹/۲۶۵	۳۰	۶۴/۲۱۷
Exist 04	۴۵	۳۰/۷۵۸	۴۵	۶۸/۳۵۱
Exist 05	۳۰	۲۴/۷۲۲	۴۵	۵۰/۹۶۰
وضعیت پست‌های جدید				
نام	بار (MVA)	ظرفیت جدید (MVA)	بارگذاری (%)	
Candidate 08	۲۰/۵۶۶	۳۰	۶۸/۵۵۵	
Candidate 11	۱۵/۶۷۱	۳۰	۵۲/۲۳۶	

جدول (۳): پاسخ توسعه پست‌ها برای بلوک A از شکل (۳) در بازه زمانی دوم

وضعیت پست‌های موجود				
نام	ظرفیت نصب شده (MVA)	بار (MVA)	ظرفیت جدید (MVA)	بارگذاری (%)
Exist 01	۳۰	۲۲/۱۶۲	۳۰	۷۳/۸۷۳
Exist 02	۳۰	۲۱/۳۳۴	۳۰	۷۱/۱۱۱
Exist 03	۳۰	۲۲/۳۹۳	۳۰	۷۴/۶۴۵
Exist 04	۴۵	۳۸/۱۶۵	۶۰	۶۳/۶۰۸
Exist 05	۴۵	۲۹/۸۷۱	۴۵	۶۶/۳۸۰
Candidate 09	۳۰	۲۲/۱۸۹	۳۰	۷۳/۹۶۳
Candidate 11	۳۰	۱۸/۳۷۱	۳۰	۶۱/۲۳۶
وضعیت پست‌های جدید				
نام	بار (MVA)	ظرفیت جدید (MVA)	بارگذاری (%)	
Candidate 02	۱۸/۶۱۵	۳۰	۶۲/۰۵۰	

جدول (۴): پاسخ توسعه پست‌ها برای بلوک A از شکل (۳) با استفاده از روش‌های مختلف

زمان (دقیقه)	انحراف معیار (دلار)	میانگین پاسخ‌ها (میلیون دلار)	بهترین پاسخ (میلیون دلار)	روش حل
۵۱/۳۳	۲۰۹۹۹۲/۹۸	۱۰/۰۰۰۷	۹/۸۵۳۳	GA مبتنی بر مرجع [۲]
۲۶۳/۷۲	۸۱۷۲۵/۴۶	۹/۴۲۳۶	۹/۳۲۰۱	GA مبتنی بر مرجع [۳]
۹/۵۵	۸۰۳۹۱/۹۵	۸/۸۵۶۶	۸/۸۰۱۳	GA مبتنی بر روش پیشنهادی

جدول (۵): آنالیز حساسیت توسعه پست‌ها برای ابعاد مختلف از شبکه مورد مطالعه

آزمون					هزینه (میلیون دلار)	زمان (دقیقه)
۱					۱۷/۲۰۸۴	۱۲۷/۴
۲	✓				۱۶/۷۰۸۳	۴۱/۰
۳	✓	✓			۱۶/۶۳۷۸	۳۸/۶
۴	✓		✓		۱۶/۳۶۵۲	۳۱/۸
۵	✓		✓		۱۶/۲۷۰۱	۲۷/۷
۶	✓	✓		✓	۱۶/۲۱۹۵	۲۵/۹
۷	✓		✓	✓	۱۶/۱۴۶۶	۲۷/۳
۸	✓	✓	✓	✓	۱۵/۹۷۶۴	۲۲/۸
۹	✓	✓	✓	✓	۱۵/۹۲۵۹	۱۸/۰

جدول (۶): آنالیز حساسیت پارامترهای ماتریس احتمال

حوزه	نتایج	GA مبتنی بر مرجع [۲]	GA مبتنی بر مرجع [۳]	GA مبتنی بر روش پیشنهادی
ناحیه A	هزینه (میلیون دلار)	۹/۸۵۳۷	۹/۳۲۰۱	۸/۸۰۱۳
	زمان (دقیقه)	۵۱/۳۳	۲۶۳/۷۲	۹/۵۵
ناحیه B	هزینه (میلیون دلار)	۱۳/۹۰۰۲	۱۳/۴۸۰۳	۱۲/۷۲۶۱
	زمان (دقیقه)	۸۷/۵۴	۳۸۲/۶۳	۱۴/۳۲
ناحیه C	هزینه (میلیون دلار)	۱۷/۱۷۳۰	۱۶/۷۰۹۴	۱۵/۹۲۵۲
	زمان (دقیقه)	۱۳۵/۱۶	۶۳۱/۹۲	۱۸/۰۳

جدول (۷): تفاوت روش دینامیک و شبه‌دینامیک برای شکل (۳)

نتایج	شبه‌دینامیک	دینامیک
هزینه بازه اول (میلیون دلار)	۹/۴۷۳۰	۱۰/۱۶۷۲
هزینه بازه دوم (میلیون دلار)	۷/۰۳۶۳	۵/۷۵۸۷
هزینه کل (میلیون دلار)	۱۶/۵۰۳۹	۱۵/۹۲۵۹
زمان کل (دقیقه)	۵/۷۶	۱۸/۰۳

### سناریوی سوم

نتایج حاصل از این سناریو در جدول (۷) آورده شده است. مطابق این نتایج اگر چه روش شبه‌دینامیک نتایج بهتری را برای دوره زمانی اول نتیجه داده است [۱۶]، ولی عدم اطلاع دقیق از چگونگی تغییر بارها در دوره زمانی دوم، سبب شده تا نتایج ضعیف‌تری را نسبت به روش دینامیک ارائه دهد. از طرف دیگر همانطور که مشاهده می‌شود، مدت زمان حل مسأله در روش شبه‌دینامیک بسیار کمتر از روش دینامیک است. بر اساس این نتایج، اگر چه حل مسأله در زمان کم از مزیت‌های یک طرح توسعه است ولی با توجه به اینکه در توسعه پست‌های فوق‌توزیع، کاهش هزینه‌ها و دستیابی به جواب بهینه در اولویت قرار دارد، لذا توسعه واقعی پست‌های فوق‌توزیع می‌بایست بر مبنای روش دینامیک انجام گیرد.

### ۵- نتیجه‌گیری

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی راهکار مناسبی را برای حل مسأله توسعه پست‌های فوق‌توزیع مهیا می‌کنند. با این حال دو ضعف بارز این روش‌ها یعنی سرعت پایین حل و عدم یگانگی پاسخ در اجرای چندباره الگوریتم، طراحان سیستم توزیع را با مشکلاتی مواجه کرده است. در این مقاله با هدفمندسازی الگوریتم ژنتیک، راهکارهایی برای حل این ضعف‌ها ارائه شد. برای این منظور با ارائه یک ماتریس احتمال، مشتمل بر شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکه مورد مطالعه، الگوریتم ژنتیک از حالت انتزاعی خارج شده و ویژگی‌های ذکر شده را در ساختار الگوریتم پیاده می‌کند. بر این اساس عدد قرار گرفته در هر ژن هدفمند شده و پست‌های نامزد بر مبنای ماتریس تعلقات و نیز خوشه‌یابی فازی اصلاح شده وزن دار می‌گردند. در پایان با حل مسأله مکان‌یابی برای یک منطقه واقعی و مقایسه نتایج با ساختارهای دیگر ژنتیک، کارایی راهکار پیشنهادی نشان داده شد. همانطور که مشاهده شد، روش پیشنهادی ضمن کاهش احتمال محبوس ماندن پاسخ در کمینه‌های محلی، سرعت حل را افزایش داده است. بر این اساس، راهکار پیشنهادی ملزومات فنی مسأله توسعه پست‌ها را رعایت نموده و قابل استفاده در شبکه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد.

- [15] X. Wang, Y. Wang and L. Wang, "Improving fuzzy c-means clustering based on feature-weight learning," *Pattern Recognition, Letters* 25, 2004.
- [16] I. J. Ramirez-Rosado, T. Gonen, "Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 245-254, 1991

## مراجع

- [1] R. H. Fletcher and K. Strunz, "Optimal distribution system horizon planning—part I: Formulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, 2007.
- [2] M-R. Haghifam, M. Shahabi, "Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, 63, pp. 37-50, 2002.
- [3] M. H. Sepasian, H. Seifi, A. A. Foroud, S. H. Hosseini, and E. M. Kabir, "A new approach for substation expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 997-1004, May 2006.
- [4] S. Najafi, S.H. Hosseini, M. Abedi, A. Vahidnia, and S. Abachezadeh, "A framework for optimal planning in large distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, 2009.
- [5] T.H.M. El-Fouly, H.H. Zeineldin, E.F. El-Saadany and M.M.A. Salama, "A new optimization model for distribution substation sitting, sizing, and timing," *Electric Power Systems Research*, vol. 30, pp. 308-315, 2008.
- [6] A. Mantawy and M. Al-Muhaini, "A new particle-swarm-based algorithm for distribution system expansion planning including generation," *Proceedings 2nd Iasme/Wseas Int. Conf. on Energy & Environment*, June 2008.
- [7] A. Hajizadeh and H. Hajizadeh, "PSO-based planning of distribution systems with distributed generations," World Academy of Science, *Engineering and Technology* 45, 2008.
- [8] J. F. Gomez, P. M. De Oliveira L. Ocque J. M. Yusta R. Villasana, H.M. Khodr and A. J. Urdaneta, "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, pp. 996-1004, May. 2004.
- [9] J.M. Alvarado, E.V. Alvarado, M.A. Arévalo, S.P. Quituisaca, J.F. Gomez and P.M. De Oliveira-De Jesus, "Ant colony systems application for electric distribution network planning," *IEEE 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2009.
- [10] H. K. Temraz, M.M.A. Salama, "A planning model for sitting, sizing and timing of distribution substations and defining the associated service area," *Electric Power Systems Research* 62, pp. 145-151, 2002.
- [۱۱] سیدمهدی مظهری، حمید فلقی و محسن فرشاد، "مکان‌یابی چند مرحله‌ای پست‌های فوق‌توزیع با استفاده از یک روش ابتکاری جدید"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، ۱۳۸۹.
- [12] A. Navarro and H. Rudnick, "Large-scale distribution planning —part I: simultaneous network and transformer optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, May 2009.
- [۱۳] وحید امیر، حسین سیفی، محمدصادق سپاسیان و غلامرضا یوسفی، "برنامه‌ریزی توسعه توأم پست‌ها و خطوط فوق‌توزیع به کمک الگوریتم‌های ژنتیک، اجتماع مورچگان و ترکیب ژنتیک با اجتماع مورچگان"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، شماره ۱، بهار ۱۳۸۷.
- [14] G.E. Tsekouras and H. Sarimveis, "A new approach for measuring the validity of the fuzzy c-means algorithm," *Advances in Engineering Software* 35, pp. 567-575, 2004.

