

# مکانیابی همزمان پستهای فوق توزیع و واحدهای تولید پراکنده در طراحی شبکه‌های توزیع

حمید فلقی<sup>۱</sup>، محمودرضا حقی فام<sup>۲\*</sup>، محسن پارسا مقدم<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد بخش مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار بخش مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

haghifam@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۶)

**چکیده**- حضور واحدهای تولید پراکنده در سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی، گزینه‌های جدیدی را در طراحی و توسعه این بخش از سیستم قدرت فراهم ساخته است. در این مقاله مسأله مکانیابی پستهای فوق توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده به عنوان گزینه‌ای دیگر برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم به صورت استاتیکی برای یک دوره زمانی، مدلسازی و حل شده است. در مدل ریاضی تابع هدف مسأله انواع هزینه‌های ثابت و متغیر طرح فرمولبندی شده است. همچنین محدودیتهای مرتبط با شبکه و بهره‌برداری از پستها و واحدهای تولید کننده در مدلسازی منظور شده است. از مدل و روش پیشنهادی می‌توان در تعیین تعداد، مکان، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی بهینه پستها در کنار واحدهای تولید پراکنده استفاده کرد. تابع هدف پیشنهاد شده و قیود مرتبط با آن، نوعی مدل غیرخطی را تشکیل می‌دهند که برای بهینه‌سازی آن از روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در انتها با انجام آزمایشهای کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

**کلید واژگان:** شبکه‌های توزیع، پست فوق توزیع، تولید پراکنده، طراحی.

## ۱- مقدمه

افزایش قیمت انرژی و تجهیزات، ریسک اقتصادی را به‌خصوص در محیطهای تجدیدساختار شده افزایش داده و موجب شده که طراحان شبکه‌های توزیع به روشهای دقیق‌تر و مناسبتری برای طراحی این شبکه‌ها روی آورند. مرور تحقیقات و مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در طراحی شبکه‌های توزیع، بیشترین تمرکز بر مکانیابی بهینه پستهای توزیع و فوق توزیع، مسیریابی بهینه فیدرها و

هدف اصلی طراحی و توسعه شبکه‌های توزیع، پاسخ به رشد مصرف برق با حداکثر کارایی اقتصادی به نحوی است که محدودیتهای حاکم بر سیستم رعایت شود. وجود عناصر متعدد در شبکه‌های توزیع که متغیرهای تصمیم متعددی را ایجاد می‌کنند، مسأله طراحی و توسعه این شبکه‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. از سوی دیگر حجم بالای سرمایه‌گذاری و

تعیین سطح مقطع هادیها بوده است [۱، ۲]. به سبب پیچیدگی مسأله، معمولاً دستیابی به پاسخ مناسب در تمامی مراحل و در قالب مجموعه‌ای واحد به سادگی امکان پذیر نیست. از این رو مسأله طراحی شبکه‌های توزیع به چند بخش تقسیم می‌شود که تعیین مکان بهینه پستهای فوق توزیع یکی از این بخشها است.

پستهای فوق توزیع در واقع نقاط تزریق انرژی از سیستم انتقال به شبکه‌های توزیع به شمار می‌روند و نقش پل ارتباطی میان این دو بخش از سیستم قدرت را ایفا می‌کنند. بنابراین تعیین مکان مناسب یا نامناسب این پستها می‌تواند طراحی دیگر بخشهای شبکه توزیع مانند پستهای توزیع و فیدرهای فشار متوسط را تحت تأثیر قرار دهد. به بیان دیگر در صورتی که در مکانیابی پستهای فوق توزیع دقت کافی مبذول نشود، روبه‌رو شدن با مشکلات فنی و اقتصادی در طراحی فیدرهای فشار متوسط و دیگر قسمت‌های سیستم توزیع دور از انتظار نخواهد بود [۲].

پیدایش واحدهای کوچک تولیدکننده موسوم به تولیدکننده‌های پراکنده (Distributed Generation-DG) در سیستم‌های توزیع که نتیجه پیشرفت تکنولوژی و تجدیدساختار در صنعت برق است، گزینه‌های جدیدی را در طراحی و توسعه این سیستمها فراهم ساخته است [۳]. از سوی دیگر با توجه به قیود مکانی به‌ویژه در مناطق شهری با تراکم بالا و نیز محدودیتهای مالی شرکتها در احداث پستهای فوق توزیع، بهره‌گیری از واحدهای DG در فرایند طراحی و توسعه شبکه برای شرکت‌های برق جذابیت خاصی یافته است. از این رو مسأله طراحی شبکه‌های توزیع باید به منظور ملحوظ کردن احداث DG به‌عنوان گزینه‌ای جدید، بازمینی و متناسب با آن فرمولبندی شود.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه طراحی و توسعه سیستم‌های توزیع انجام شده است. در [۱، ۴] دسته‌بندی و مرور مدل‌های ارائه شده در این زمینه یافت می‌شود. تحقیقات متنوعی نیز با موضوع مکانیابی پستها انجام

شده که در آنها فقط پستهای فوق توزیع به‌عنوان متغیرهای تصمیم مطرح شده است. در [۵] روش توانمندی برای ظرفیت‌یابی پستها ارائه شده که در آن افت ولتاژ به‌عنوان یکی از معیارها در احداث پست جدید مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتمی مبتنی بر حل مسأله حمل و نقل برای تعیین مکان، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی پستها در [۶] آورده شده است. در تابع هدف این الگوریتم از تغذیه بارهای بزرگ به‌وسیله پستهای دور از آن جلوگیری می‌شود. در [۷] روشی مبتنی بر شاخه و کران برای حل مسأله جایابی پستها در قالب کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر ارائه شده است. در [۸] تعیین مکان، ظرفیت، حوزه سرویس‌دهی و نیز برنامه زمانبندی توسعه پستهای فوق توزیع در قالب یک تابع هدف و قیود مربوط، به صورت مدلی غیرخطی و پیوسته فرمولبندی شده است. در آن مطالعه هزینه‌های شبکه پایین‌دستی (فشار متوسط) در مدلسازی ملحوظ نشده است. تحقیقات دیگری نیز در زمینه جایابی پستها انجام شده که در بیشتر آنها کاهش هزینه‌های جاری و سرمایه‌گذاری به‌عنوان هدف طراحی موردنظر بوده است [۹] - [۱۱] اما در بیشتر آنها مسأله موردنظر به‌طور کامل و دقیق با جزئیات لازم مدلسازی نشده است و با انجام ساده‌سازیهایی از واقعیت دور شده‌اند.

در سالهای اخیر مطالعات نسبتاً متنوعی در زمینه مکانیابی واحدهای DG در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در اکثر قریب به اتفاق آنها با فرض وجود شبکه موجود، مکان و ظرفیت بهینه احداث واحدهای DG در نقاط این شبکه با هدف کاهش تلفات [۱۲، ۱۳، ۱۵] بهبود پروفیل ولتاژ [۱۴] و ارتقای قابلیت اطمینان [۱۵] جستجو می‌شود. به‌کارگیری DG در مسأله طراحی شبکه‌های توزیع نیز در [۱۶] مورد توجه قرار گرفته است. در آن تحقیق سعی شده تا حضور DG به‌عنوان گزینه‌ای علاوه بر پست و فیدر در مسأله توسعه شبکه بررسی شود. اگر چه روش

## ۲- تشریح مسأله

### ۲-۱- اجزای هزینه طرح

هدف از مکانیابی توأم پستهای فوق توزیع و واحدهای DG، تأمین ظرفیت مورد نیاز به منظور تغذیه بار شبکه به وسیله این تجهیزات به نحوی است که ضمن رعایت محدودیت‌های حاکم، هزینه‌های احداث و بهره‌برداری سیستم کمینه شود. در این مقاله، مسأله مورد نظر برای طراحی در یک مرحله زمانی به صورت استاتیکی مدلسازی می‌شود. با توسعه مدل پیشنهادی در قالب روش شبه‌دینامیک [۱۷] می‌توان برنامه توسعه و احداث پستها و واحدهای تولیدی را طی چند دوره زمانی به دست آورد.

متغیرهای تصمیم در مسأله عبارتند از: مکان، تعداد، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی به تفکیک برای پستها و واحدهای تولیدی.

هزینه‌های طرح را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: اولین بخش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است که ثابت بوده و فقط یک بار در هنگام احداث پستها و واحدهای تولیدی مصرف می‌شود و به میزان بارگذاری در دوره بهره‌برداری بستگی ندارد. بخش دوم هزینه‌های متغیر را شامل می‌شود که به نحوه بهره‌برداری و بارگذاری واحدهای DG و پستها بستگی دارد [۲]. هزینه‌های ثابت طرح عبارتند از:

- هزینه زمین و اتصال پستها به خطوط فوق توزیع؛
- هزینه ترانسفورماتور و تجهیزات پستها؛
- هزینه احداث واحدهای تولید پراکنده؛
- هزینه احداث شبکه فشار متوسط (شبکه پایین دستی).
- هزینه‌های متغیر طرح موارد زیر است:
- هزینه بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده؛
- هزینه تأمین توان مورد نیاز شبکه به وسیله پستهای فوق توزیع؛
- هزینه تلفات در شبکه فشار متوسط؛

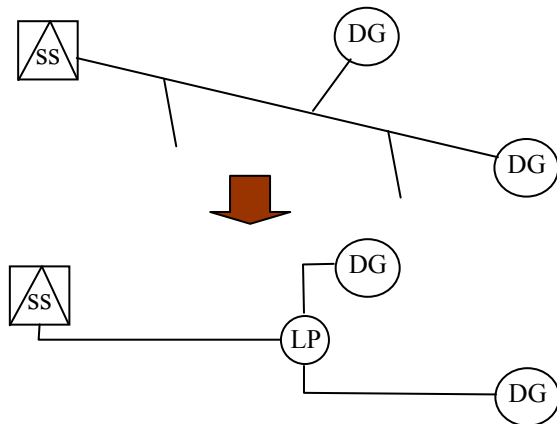
و مدل پیشنهاد شده در نوع خود جالب است، اما جامعیت لازم را برای جستجوی حالات متنوع احداث پستهای فوق توزیع ندارد.

لذا با وجود مدل‌های مختلف در زمینه مکانیابی پستهای فوق توزیع و نیز جایابی واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، تاکنون مدل کاملی در زمینه طراحی توأم پستها و واحدهای DG در طراحی سیستم‌های توزیع ارائه نشده است. این در حالی است که با حضور تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مرتبط با احداث واحدهای DG در کنار احداث یا توسعه پستهای فوق توزیع به منظور تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.

در این مقاله تعیین مکان، ظرفیت و حوزه سرویس‌دهی پستهای فوق توزیع در حضور واحدهای DG به عنوان گزینه‌ای جدید به منظور تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم به صورت استاتیکی جهت یک دوره زمانی مدلسازی و حل شده است. این مسأله از دیدگاه شرکت‌های توزیع مورد توجه قرار گرفته و سعی شده است در تابع هدف پیشنهادی، تا حد امکان، هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با احداث پستها و واحدهای تولیدی، هر چه نزدیکتر به واقعیت مدلسازی شود؛ ضمن آنکه محدودیتهایی مانند افت ولتاژ، ظرفیت بارگذاری پستها و واحدهای DG، تغذیه شعاعی بارها به وسیله پستها مورد توجه قرار گرفته است. تابع هدف پیشنهادی و محدودیتهای مرتبط با آن، نوعی مدل ریاضی غیرخطی را تشکیل می‌دهد که برای بهینه‌سازی آن از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است.

در ادامه، نحوه مدلسازی و بهینه‌سازی مسأله در قالب الگوریتم ژنتیک تشریح می‌شود و در انتها با انجام چند آزمایش و تحلیل نتایج به دست آمده، کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

و این مدل به عنوان یک فیدر مجازی مطرح می شود که نماینده ای از فیدر واقعی است [۱۱].



شکل ۱ مدل سازی فیدرهای فشار متوسط در مطالعه

با توضیح بالا، فاصله میان پست (یا واحد تولیدی)  $Z_j$  با مختصات  $(X_i, Y_i)$  تا نقطه بار  $Z_j$  با مختصات  $(X_j, Y_j)$  از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$L_{ij} = |X_i - X_j| + |Y_i - Y_j| \quad (1)$$

با حضور واحدهای تولید پراکنده به عنوان گزینه ای علاوه بر پستهای فوق توزیع برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، ضمن تعیین مکان و ظرفیت این واحدها، باید نحوه بهره برداری از آنها نیز مشخص و متناسب با آن اجزای هزینه های بهره برداری طرح ارزیابی شود. به این ترتیب دیگر منظور کردن میزان مصرف در نقاط بار فقط به صورت پیک، کافی و مناسب نیست و باید سطوح مختلف بار آنها در مدلسازی ملحوظ شود. در این مقاله اطلاعات بار نقاط مصرف به صورت منحنی تداومی بار چندسطحی مانند شکل ۲، در محاسبات منظور شده است. در مطالعات پیش بینی بار برای هر یک از نواحی برقی با توجه به نوع کاربری اراضی و سابقه مصرف، این منحنی تداومی بار را نیز می توان پیش بینی کرد [۱۸].

در بخش سوم، مدلسازی ریاضی اجزای هزینه و نحوه ترکیب آنها در قالب تابع هدف طرح آورده است.

## ۲-۲- نقاط مصرف

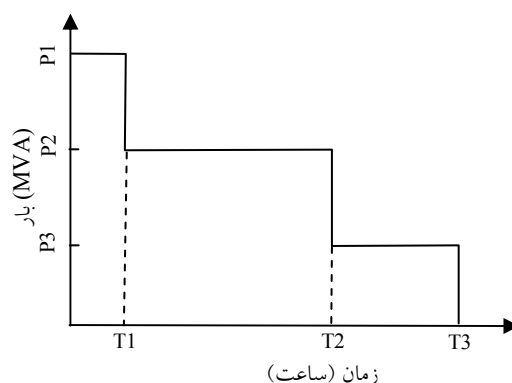
برای در نظر گرفتن سیستم پایین دست، باید بار و نحوه تغذیه آنها مدلسازی شود. برای مدلسازی بار در مسأله مکانیابی پستها و واحدهای تولیدی، ابتدا محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، به نواحی کوچکتری (نواحی برقی) تقسیم بندی می شود. هر ناحیه برقی به همراه بار مصرفی متناظر در مرکز ثقل آن، به عنوان نقطه بار تعریف می شود. میزان مصرف آتی در نقاط بار را می توان با یکی از روشهای موجود برای پیش بینی بار به دست آورد [۱۸]. از آنجاکه برطبق مدلسازی ارائه شده در این مقاله هر یک از نقاط بار در واقع نماینده ای از مصرف توان در نواحی متناظر است که به وسیله یک فیدر فشار متوسط تغذیه خواهد شد، پیشنهاد می شود که در مطالعات پیش بینی بار نواحی برقی به نحوی انتخاب شوند که میزان پیک توان مصرفی آنها، در محدوده معمول بارگذاری یک فیدر فشار متوسط باشد.

اگر چه در مسأله مکانیابی پستها و واحدهای DG، طراحی دقیق شبکه فشار متوسط مدنظر نیست، اما باید توجه داشت که به منظور مدلسازی تلفات و افت ولتاژ شبکه پایین دستی و نیز حصول اطمینان از امکان طراحی صحیح در مرحله مسیریابی فیدرهای فشار متوسط - که پس از حل مسأله حاضر انجام می شود - باید شبکه فشار متوسط به نوعی در مطالعه جایابی پستها و واحدهای تولیدی شبیه سازی شود. از این رو در این مقاله از مجموع فواصل عمودی و افقی میان نقاط بار تا واحدهای DG و پستهای فوق توزیع مانند شکل ۱ برای شبیه سازی فیدرهای فشار متوسط استفاده شده است. باید توجه داشت که نقاط بار دارای ماهیتی فرضی بوده

بنابراین برای هر نقطه بار  $z$ ، میزان توانی را که به وسیله واحدهای DG و پست فوق توزیع تأمین می شود می توان به ترتیب از روابط (۲) و (۳) به دست آورد:

$$P_{j,d}^{(DG)} = \sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d} P_{j,d} \quad , j=1,2,\dots,nlp, \quad d=1,2,\dots,nld \quad (2)$$

$$P_{j,d}^{(SS)} = (1 - \sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d}) P_{j,d} \quad , j=1,2,\dots,nlp, \quad d=1,2,\dots,nld \quad (3)$$



شکل ۲ منحنی تداومی مصرف برای نقاط بار

### ۳-۲- تابع هدف

مدل ریاضی تابع هدف پیشنهادی برای مکانیابی استاتیکی پستهای فوق توزیع و واحدهای DG به صورت زیر است.

$$\text{Min } F = AC_{SS} + IC_{SS} + IC_{DG} + OC_{SS} + OC_{DG} + AC_{LP} \quad (4)$$

در تابع مذکور، ارزیابی اقتصادی مبتنی بر مقایسه ارزش کنونی طرحها انجام می شود. بنابراین هزینه های ثابت اولیه بدون تغییر در تابع هزینه وارد می شوند، اما هزینه های جاری در دوره مطالعه، به صورت معادل ارزش کنونی در تابع هزینه منظور می شوند. تابع هدف (۴) دارای شش قسمت است که در ادامه به تفکیک تشریح می شود.

(۱) هزینه دسترسی به پستهای فوق توزیع -  $AC_{SS}$   
این بخش از تابع هدف، هزینه های خرید زمین پستها و نیز اتصال آنها را به خطوط فوق توزیع (شبکه بالادستی) دربردارد که می تواند با توجه به موقعیت جغرافیایی مکان کاندیدای احداث پست متفاوت باشد. طبیعی است که برای پستهای موجود، این بخش از تابع هدف تقریباً برابر صفر خواهد بود. این هزینه در قالب ریاضی به صورت زیر تعریف می شود.

$$AC_{SS} = \sum_{i=1}^{nss} AC_i (1 - e^{-M P_{SS,i}}) \quad (5)$$

$$P_{SS,i} = \max_{d=1,2,\dots,nld} \left( \sum_{j=1}^{nlp} \alpha_{ij} P_{j,d}^{SS} \right) \quad , i=1,2,\dots,nss \quad (6)$$

### ۳- مدلسازی ریاضی

در این قسمت فرمولبندی ریاضی مسأله مکانیابی استاتیکی پستهای فوق توزیع و واحدهای DG تشریح می شود. در این مدلسازی فرض بر این است که شرکت های توزیع وظیفه تأمین انرژی مشترکین، مدیریت، طراحی و بهره برداری از سیستم توزیع را به عهده دارند.

### ۳-۱- متغیرهای تصمیم

با توجه به ساختار شبکه توزیع، هر فیدر فشار متوسط باید به وسیله یک پست فوق توزیع تغذیه شود و واحدهای تولید پراکنده نیز می توانند در تأمین توان مصرفی آن فیدر مشارکت کنند. در مدل پیشنهادی نیز هر نقطه بار که نماینده یک فیدر فشار متوسط است، به یکی از پستهای فوق توزیع متصل می شود و یک یا چند واحد DG نیز می تواند در تغذیه آن سهیم باشد. در این مسأله علاوه بر تعیین اتصال نقاط بار به پستها، اتصال واحدهای DG به نقاط بار و میزان مشارکت آنها در تأمین توان مصرفی این نقاط نیز باید مشخص شود. بنابراین در مدلسازی پیشنهادی، متغیرهای مستقل تصمیم گیری در مسأله عبارتند از:

- اتصال نقاط بار به پستهای فوق توزیع ( $\alpha_{ij}$ );
- اتصال هر واحد تولیدی به نقاط بار و نسبتی از توان این نقاط مصرف که در هر سطح بار به وسیله واحد تأمین می شود ( $\beta_{ij,d}$ ).

منحنی تغییرات این تابع در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل هر پله نشانگر تغییر ظرفیت پست می باشد. برای پستهای موجود در سیستم، هزینه ظرفیتهای نصب شده برابر صفر در نظر گرفته می شود.

(۳) هزینه احداث واحدهای تولید پراکنده -  $IC_{DG}$  با توجه به ظرفیت واحدهای  $DG$  که معمولاً کمتر از ۱۰ مگاوات آمپر است، این واحدها مساحت کمتری را در مقایسه با پستهای فوق توزیع اشغال می کنند. بنابراین برخلاف پستها که زمین مورد نیاز یکی از پارامترهای مهم در هزینه احداث آنها را تشکیل می دهد، در خصوص احداث واحدهای  $DG$  این پارامتر چندان مؤثر نیست و تنها هزینه قابل توجه، به خرید و نصب تجهیزات واحد تولیدی مربوط است. این بخش از تابع هدف به صورت روابط زیر قابل تعریف است.

$$IC_{DG} = \sum_{i=1}^{ndg} C_{DG}(P_{DG,i}) \quad (۸)$$

$$P_{DG,i} = \max_{d=1,2,\dots,nld} \left( \sum_{j=1}^{nlp} \beta_{ij,d} P_{j,d} \right), \quad i=1,2,\dots,ndg \quad (۹)$$

معمولاً واحدهای  $DG$  به صورت ماژولهایی از یک ظرفیت خاص (برای مثال یک مگاوات آمپر) احداث می شوند. تابع  $C_{DG}(P_{DG,i})$  در رابطه (۸) همین موضوع را نشان می دهد. منحنی تغییرات این تابع نیز مشابه شکل ۳ است.

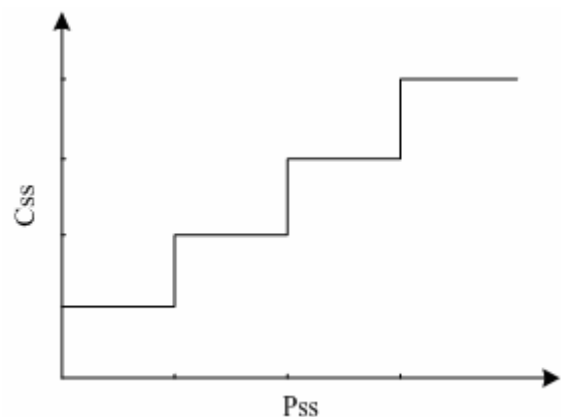
(۴) هزینه بهره برداری از پستهای فوق توزیع -  $OC_{SS}$  در بازار رقابتی برق، شرکتهای توزیع باید هزینه انرژی الکتریکی مورد نیاز در شبکه تحت پوشش خود را که از طریق پستهای فوق توزیع از سیستم انتقال دریافت می کنند، بپردازند. توان اکتیو دریافتی از طریق پستهای فوق توزیع شامل

در این روابط  $P_{SS,i}$  حداکثر بارگذاری پست فوق توزیع  $i$  را نشان می دهد. لذا اگر یک بارگذاری پست مقداری غیرصفر باشد به این معنا است که پست مورد نظر برای احداث انتخاب شده و در نتیجه، هزینه دسترسی به آن نیز باید در تابع هدف ملحوظ شود. از سوی دیگر اگر هیچ باری به وسیله پست تأمین نشود، آن پست نباید احداث شود و هزینه دسترسی به آن نیز برابر صفر خواهد بود. این مفهوم در رابطه (۵) با استفاده از عبارت  $(1 - e^{-MP_{SS,i}})$  مدلسازی شده که در آن  $M$  عددی بزرگ است.

(۲) هزینه احداث پستهای فوق توزیع -  $IC_{SS}$  هزینه ترانسفورماتور و دیگر تجهیزات مرتبط با پستهای فوق توزیع در این بخش از تابع هدف منظور شده که به صورت زیر تعریف می شود.

$$IC_{SS} = \sum_{i=1}^{nss} C_{SS}(P_{SS,i}) \quad (۷)$$

ظرفیت پستها دارای ماهیتی گسسته بوده و اعداد خاصی را می تواند اختیار کند. در رابطه (۷) ماهیت پله ای هزینه احداث هر پست به وسیله تابع  $C_{SS}(P_{SS,i})$  با توجه به میزان بارگذاری آن تعیین می شود.



شکل ۳ تغییرات پله ای هزینه احداث پست نسبت به بارگذاری آن

۶) هزینه دسترسی به نقاط بار-  $AC_{LP}$  در نظر گرفتن شبکه فشار متوسط با تمام جزئیات در مدلسازی ارائه شده مدنظر نیست؛ اما همانگونه که در بخش ۲-۲ گفته شد، مدل ساده شده فیدرهای فشار متوسط برای ارزیابی هزینه‌های احداث شبکه فشار متوسط در مدلسازی معرفی شده است. با توجه به اینکه نقاط بار از طریق پستها یا واحدهای تولیدکننده تغذیه می‌شوند، می‌توان هزینه دسترسی به نقاط بار یا به بیان دیگر هزینه احداث شبکه فشار متوسط را به صورت زیر تعریف کرد:

$$(13) \quad AC_{LP} = \left( \sum_{i=1}^{nss} \sum_{j=1}^{nlp} L_{ij} (1 - e^{-M\alpha_{ij}}) + \sum_{i=1}^{ndg} \sum_{j=1}^{nlp} L_{ij} (1 - e^{-M \sum_{d=1}^{nld} \beta_{ij,d}}) \right) \cdot K_F$$

در نظر گرفتن این هزینه در تابع هدف طرح با ممانعت از طولانی شدن فیدرها، دسترسی به پاسخ عملی را آسان‌تر می‌سازد.

### ۳-۳- محدودیتها

تابع هدف (۴) همراه با مجموعه‌ای از محدودیتها، مدل کلی مکانیابی توأم پستهای فوق توزیع و واحدهای تولید پراکنده را تشکیل می‌دهد. با توجه به لزوم رعایت قیود حاکم بر شبکه و نیز بهره‌برداری از تجهیزات، ملحوظ کردن محدودیتهای زیر در مدل بهینه‌سازی ضروری است.

۱) محدودیت بارگذاری پستهای فوق توزیع به منظور ملحوظ کردن قید قابلیت اطمینان، برای پستهای فوق توزیع حد بارگذاری در نظر گرفته می‌شود به طوری که بارگذاری هر پست باید در محدوده مجاز آن باشد. به صورت ریاضی این قید با رابطه زیر تعریف می‌شود.

دو بخش است: یک بخش بار شبکه توزیع و بخش دیگر تلفات اهمی فیدرهای فشار متوسط. از طرف دیگر قیمت توان اکتیو می‌تواند در سطوح مختلف بارگذاری متفاوت باشد و معمولاً در ساعات پیک بیشتر و در دیگر ساعات کمتر است. معادل ارزش کنونی هزینه بهره‌برداری از پستها (تأمین توان سیستم) در دوره مطالعه از رابطه (۱۰) حاصل می‌شود.

$$(10) \quad OC_{SS} = \sum_{t=1}^{ny} \left( PW^t \sum_{i=1}^{nss} \sum_{j=1}^{nlp} \sum_{d=1}^{nld} \alpha_{ij} [(P_{j,d}^{SS} \cdot pf_j + R L_{ij} (\frac{P_{j,d}}{V})^2] T_d K_{SSi,d} \right)$$

که در آن:

$$(11) \quad PW = \frac{1 + InfR}{1 + IntR}$$

باید توجه داشت که نقاط مصرف و ارتباط آنها با پستهای فوق توزیع به صورت تقریبی مدلسازی شده و بنابراین عبارت مربوط به تلفات در رابطه (۱۰) دارای تقریب است.

۵) هزینه بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده -  $OC_{DG}$  تولید توان در واحد DG نیازمند صرف هزینه برای تأمین منبع انرژی ورودی به آن و نیز هزینه تعمیرات و نگهداری واحد است. میزان تولید در هر یک از سطوح بار و نقطه باری که به وسیله هر یک از واحدهای DG تغذیه می‌شود، با متغیر  $\beta_{ij,d}$  مشخص می‌شود، بنابراین ارزش کنونی هزینه بهره‌برداری از واحد تولیدی در دوره مطالعه را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$(12) \quad OC_{DG} = \sum_{t=1}^{ny} \left( PW^t \sum_{i=1}^{ndg} \sum_{j=1}^{nlp} \sum_{d=1}^{nld} \beta_{ij,d} [(P_j \cdot pf_j + R L_{ij} (\frac{P_j}{V})^2] T_d K_{DG} \right)$$

در این رابطه نیز مانند رابطه (۱۰) با توجه به تقریبی بودن مدلسازی اتصال نقاط بار به واحدهای DG، عبارت مربوط به تلفات دارای تقریب است.

از آنجاکه طراحی دقیق فیدرها مدنظر نیست لذا بار منطقه به صورت نقاط بار موردنظر مطابق قسمت ۲-۲ مدل سازی می شود. این نقاط بار در واقع بیانگر چند نقطه بار اصلی در ناحیه برقی موردنظر است و بار هر یک از آنها مطابق روابط (۲) و (۳) با توجه به متغیرهای تصمیم  $\alpha_{ij}$  و  $\beta_{ij,d}$  به پست های فوق توزیع و واحدهای DG تخصیص داده می شود. سپس با توجه به میزان توان اختصاص داده شده و اتصال حاصل میان نقاط بار و پست های فوق توزیع و نیز واحدهای DG، پخش بار انجام و قید افت ولتاژ (۱۶) بررسی می شود.

باید توجه داشت که پارامتر  $\Delta V_{max}$  در مدل پیشنهادی می تواند به عنوان معیاری برای کنترل حداکثر فاصله نقاط بار متصل به پست ها و واحدهای DG به کار رود، به صورتی که با انتخاب مقادیر کمتر برای  $\Delta V_{max}$  حداکثر فواصل مذکور کاهش پیدا خواهد کرد.

۴) محدودیت تغذیه نقاط بار به وسیله واحدهای تولیدی در طراحی شبکه های توزیع در حضور واحدهای DG سعی می شود که بیشتر بار شبکه از طریق پست های فوق توزیع به عنوان منابع اصلی تأمین توان تأمین شود و واحدهای DG محوری تأمین توان شبکه را به عهده نداشته باشد [۱۶]. به همین منظور در مسأله حاضر، محدودیت حداکثر توانی که از هر نقطه بار می تواند به وسیله DG تأمین شود به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d} \leq 0.35 \quad j=1,2,\dots,nlp; \quad d=1,2,\dots,nld \quad (17)$$

۵) محدودیت شعاعی بودن شبکه فشار متوسط تغذیه تمامی نقاط بار یکی از قیود اساسی در طراحی و توسعه شبکه های توزیع به شمار می رود. علاوه بر این هر نقطه بار باید فقط از یک پست فوق توزیع تغذیه شود که قید شعاعی بودن شبکه فشار متوسط را در بر دارد. از

$$0 \leq P_{SS,i} \leq K_L \cdot S_{SS,i} \quad i=1,2,\dots,nss, \quad S_{SS,i} \in \Omega_i \quad (14)$$

که در آن  $K_L$  درصد مجاز بارگذاری پست ها و  $H_i$  مجموعه ظرفیتهای قابل احداث در مکان نام است.

۲) محدودیت بهره برداری از واحدهای DG  
میزان بارگذاری هر واحد تولیدی باید کمتر از ظرفیت آن واحد باشد:

$$0 \leq P_{DG,i} \leq S_{DG,i} \quad i=1,2,\dots,ndg \quad (15)$$

۳) محدودیت افت ولتاژ

افت ولتاژ در نقاط بار در هر یک از سطوح بار باید در محدوده مجاز باشد [۱۹]. از آنجاکه در مدل پیشنهادی در صورت حضور واحدهای تولیدی، هر نقطه بار به وسیله یک پست فوق توزیع و یک یا چند واحد DG تغذیه می شود، برای محاسبه میزان افت ولتاژ در نقاط مصرف، از پخش بار [۲۰] استفاده شده است. در محاسبات پخش بار پست فوق توزیع به صورت باس Slack و واحدهای DG به صورت باس PV مدل سازی شده است. نقاط بار نیز به صورت باسهای PQ مدل سازی شده است. محاسبات پخش بار برای هر یک از سطوح بار انجام می شود. بنابراین اگر  $\Delta V_{j,d}$  میزان افت ولتاژ نقطه بار  $j$  در سطح بار  $d$  باشد داریم:

$$0 \leq \Delta V_{j,d} \leq \Delta V_{MAX} \quad j=1,2,\dots,nlp, \quad d=1,2,\dots,nld \quad (16)$$

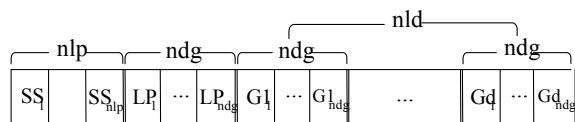
لازم است توضیح دهیم که این قید از آن رو در مدل گنجانده شده تا از اتصال نقاط بار به پست ها یا واحدهای DG دور از آنها جلوگیری شود. به بیان دیگر وجود این قید در مرحله جایابی پست های فوق توزیع (مرحله اول) موجب می شود که در مرحله مسیریابی و طراحی فیدرهای توزیع (مرحله دوم) که با استفاده از نتایج مرحله اول انجام می شود، با مشکلات کمتری از نظر افت ولتاژ مواجه شویم.



ساده‌سازی است [۲۲]. از دیگر مزایای این روش، ارائه چندین پاسخ مناسب به‌جای یک راه حل واحد است که این به طراح این امکان را می‌دهد تا بهترین پاسخ را برای اجرا و پیاده‌سازی انتخاب نماید. در این الگوریتم، متغیرهای تصمیم مسأله معمولاً در قالب رشته‌هایی موسوم به کروموزوم کدگذاری می‌شود. این الگوریتم با جمعیت اولیه‌ای که به‌صورت تصادفی یا به‌وسیله کاربر تولید شده، آغاز می‌شود سپس با توجه به محدودیتها و قیود مسأله، امکان‌پذیری هر یک از اعضای جمعیت بررسی می‌شود و برای آن دسته از اعضایی که با توجه به تابع هدف بهینه‌سازی کیفیت بالاتری دارند، عمل تقاطع (ترکیب رشته‌های دو والد) و جهش (تغییر تصادفی یک یا چند بیت از هر رشته) انجام شده و فرزندان تولید می‌شوند، این روند تا رسیدن به پاسخ مطلوب ادامه می‌یابد. در ادامه نحوه انطباق الگوریتم ژنتیک با مسأله مورد بحث آورده شده است.

#### ۴-۱- کدگذاری متغیرهای تصمیم

در این مقاله، هر کروموزوم که عضوی از یک جمعیت است، اتصال نقاط بار به پستها و واحدهای تولیدی و نیز درصد بارگذاری واحدهای تولیدی در سطوح بار مختلف را نشان می‌دهد. ساختار کروموزوم پیشنهادی حاوی چند زیررشته به‌صورت شکل ۴ است.



شکل ۴ ساختار کروموزوم پیشنهادی

بخش اول کروموزوم (SS) دارای nlp ژن بوده و اتصال نقاط بار به پستها را نشان می‌دهد. هر ژن i از زیررشته SS معرف شماره پستی است که بار iام به آن

طرف دیگر هر نقطه بار می‌تواند به‌وسیله یک یا چند واحد تولیدی نیز تغذیه شود. اما اتصال واحدهای DG به نقاط بار در تمامی سطوح بار باید یکسان باشد. این محدودیت را می‌توان در قالب دو رابطه زیر بیان کرد:

$$\sum_{i=1}^{nss} \alpha_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, nlp \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{nss} (1 - e^{-\sum_{d=1}^{nld} \beta_{ij,d}}) \leq 1, j = 1, 2, \dots, nlp \quad (19)$$

(۶) محدودیت احداث پست و DG در مکانهای کاندیدا شده

معمولاً احداث پست در یک مکان کاندیدا شده یا توسعه پستهای موجود با توجه به قیود فنی و جغرافیایی با محدودیت روبه‌رو است به‌طوری‌که نمی‌توان بیش از ظرفیت خاصی در آنها پست احداث کرد یا پستهای موجود را توسعه داد. این قید با رابطه (۲۰) مدل‌سازی شده است:

$$0 \leq S_{SS,i} \leq S_{SS,i}^{MAX}, i = 1, 2, \dots, nss \quad (20)$$

اگر چه احداث واحدهای DG در مقایسه با پستها از نظر مکانی با محدودیت‌های کمتری روبه‌رو است، اما در هر مکان کاندیدا برای احداث واحد تولیدکننده نیز حد بیشینه‌ای از نظر ظرفیت DG قابل نصب وجود دارد که می‌توان آن را به‌صورت رابطه زیر نشان داد:

$$0 \leq S_{DG,i} \leq S_{DG,i}^{MAX}, i = 1, 2, \dots, ndg \quad (21)$$

#### ۴- روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

در این مقاله برای دستیابی به پاسخ بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این روش که مطابق اصول تکامل طبیعی مدل‌سازی شده، مبنای کار «شانس بیشتر برای انتخاب اعضای با برآزش بالاتر» است [۲۱]. الگوریتم ژنتیک روشی ساده و کارآمد برای مدل‌سازی ریاضی حقیقت فیزیکی مسأله بدون هیچگونه

**۴-۳- عملگر تقاطع**

در این مرحله با استفاده از عملگر تقاطع دو کروموزوم از بین جمعیت اولیه به عنوان والد به طور تصادفی انتخاب و سپس با احتمال  $(P_c < 1)$  عمل تقاطع بین آنها انجام می شود. انجام عمل تقاطع می تواند به روشهای متفاوتی انجام می شود.

در این مقاله، از دو روش یک و چند نقطه ای برای تقاطع استفاده شده است. در روش یک نقطه ای دو رشته انتخابی از جمعیت اولیه، از یک نقطه تصادفی، اطلاعات خود را مبادله می کنند. روش تقاطع یک نقطه ای این خاصیت را دارد که پرشهای بلندتری را در مجموعه جواب ایجاد می کند و برای مراحل اولیه ای که می خواهیم جمعیت اولیه را بسط دهیم، مناسب است اما در مراحل نهایی - که الگوریتم به سوی پاسخ همگرا می شود - از روش تقاطع چند نقطه ای استفاده می شود. در این روش عمل تقاطع برای هر زیررشته از کروموزومها جداگانه اعمال می شود به طوری که در دو زیررشته SS و LP تقاطع به صورت جابه جایی و در دیگر زیررشته ها به صورت ریاضی [۱۱] انجام می شود.

**۴-۴- عملگر جهش**

عملگر جهش در ساده ترین حالت عبارت است از تغییر تصادفی یک یا چند ژن از یک کروموزوم. در عملگر جهش برای هر کروموزوم با احتمال  $(P_m < 1)$  یک یا چند ژن از رشته انتخاب شده از جمعیت موجود در محدوده مجاز خود تغییر می کنند و رشته جدیدی تولید می شود. البته در این مقاله عمل جهش در هر بخش از کروموزوم به صورت جداگانه انجام می شود.

**۴-۵- تابع برازش**

بrazش، کیفیت هر کروموزوم را با توجه به مقدار تابع هدف و قید مسأله نشان می دهد. از آنجاکه

متصل است. به عنوان مثال اگر ژن سوم این زیررشته برابر ۷ باشد به این معنا است که نقطه بار شماره ۳ به پست شماره ۷ متصل است و  $\alpha_{v,3}=1$ .

در زیررشته دوم کروموزوم (LP) به تعداد ndg ژن وجود دارد که نشان دهنده اتصال واحدهای DG به نقاط بار هستند. هر ژن از این زیررشته معرف شماره نقطه باری است که واحد تولیدی نام به آن متصل است. بقیه کروموزوم شامل تعداد nld زیررشته است که هر یک از آنها به تعداد ndg ژن دارد. هر ژن از زیر رشته dam این مجموعه می تواند اعداد اعشاری کوچکتر از یک را اختیار کند و نشان می دهد که واحد تولیدی نام چه نسبتی از توان نقطه بار متناظر با ژن نام در زیررشته LP در سطح بار dam را تأمین می کند. برای مثال اگر ژن سوم زیررشته های LP و G2 به ترتیب برابر ۷ و ۰/۲ باشد به این مفهوم است که واحد تولیدی ۳ به نقطه بار ۷ متصل است و ۰/۲ بار آن را در سطح بار دوم تأمین می کند و  $\beta_{2,v,3}=0/2$  اگر ژن مربوط به یک مکان کاندیدی تولید پراکنده در زیررشته LP برابر صفر باشد به این معنا است که واحد مربوط به آن ژن انتخاب نشده و در نتیجه ژنهای متناظر با آن در زیررشته های G1 تا Gd نیز صفر در نظر گرفته می شوند.

**۴-۲- جمعیت اولیه**

ابتدا تعدادی از کروموزومهای مورد بحث به صورت تصادفی به عنوان جمعیت اولیه تولید می شود. انتخاب تعداد اعضای جمعیت اولیه نخستین گامی است که طراح باید انجام دهد. هر چه تعداد اعضای جمعیت اولیه بیشتر باشد، احتمال یافتن پاسخ بهینه مطلق افزایش پیدا می کند اما به عکس حجم محاسبات نیز بالا می رود که این سرعت رسیدن به جواب را کاهش می دهد.

به روش انتخاب نخبگان انجام می‌شود. در این روش ابتدا بهترین کروموزوم‌های موجود در جمعیت حاضر با احتمال صددرصد برای نسل جدید انتخاب می‌شوند. سپس از روش چرخ گردان برای انتخاب کروموزوم‌ها به تعداد جمعیت اولیه براساس مقدار برازندگی استفاده می‌شود [۲۱].

## ۵- مطالعات عددی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک مثال پایه طراحی و سپس آزمایش‌هایی بر روی آن انجام شده است. منطقه مورد مطالعه در این مثال که در شکل ۵ نمایش داده شده، دارای ۱۶ نقطه بار است که اطلاعات بار پیش‌بینی شده آنها در قالب سه سطح بار در جدول ۱ آورده شده است. در این منطقه دو پست موجود با ظرفیت ۴۵ مگاوات آمپر و چهار مکان کاندیدا برای احداث پستهای فوق‌توزیع جدید وجود دارد که حداکثر بارگذاری مجاز در تمام آنها برابر ۷۰ درصد ظرفیت فرض شده است. سایر مشخصات این پستها در جدول ۳ ارائه شده است. برای احداث واحدهای تولید پراکنده نیز سیزده مکان کاندید در نظر گرفته شده که حداکثر ظرفیت قابل احداث در تمامی آنها برابر ۵ مگاوات آمپر است. دیگر اطلاعات مورد نیاز در این مطالعات عددی در جدول ۲ آورده شده است.

در این مطالعات فرض بر آن است که ظرفیت DG ضریبی از یک مگاوات آمپر است. بنابراین حداقل ظرفیتی که در هر مکان کاندیدا می‌تواند احداث شود یک مگاوات آمپر است.

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، آزمایش‌های زیر طراحی و اجرا شده که در ادامه تشریح و نتایج حاصل از آنها ارائه می‌شود.

آزمایش ۱- در نظر گرفتن حالت پایه‌ای سیستم

آزمایش ۲- بررسی تأثیر حذف مکانهای کاندیدای پست‌ها

کمینه‌سازی تابع هدف مطلوب است و نیز به منظور ملحوظ کردن قیود مدل، تابع برازندگی به صورت زیر تعریف شده است که عبارت دوم آن نشان‌دهنده جریمه مرتبط با هر عضو با توجه به عبور از قیود مدل است [۱۱]:

$$\text{Fit}(\text{Chr}) = [F(\text{Chr}) + C_p \cdot \text{Inf}(\text{Chr}) + a]^{-1} \quad (22)$$

میزان غیرعملی بودن هر کروموزوم به این طریق به دست می‌آید که اگر  $G_i(\text{Chr}_k) \leq b_i$  قید نام مدل مسأله باشد، در این صورت تعریف می‌کنیم:

$$d_i = \begin{cases} 0 & ; G_i(\text{Chr}) \leq b_i \\ (G_i(\text{Chr}) - b_i) / b_i & ; \text{Otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{Inf}(\text{Chr}) = \sum_{i \in I_C} d_i \quad (24)$$

در این روابط  $d_i$  میزان عبور از قید نام و  $I_C$  مجموعه محدودیت‌هایی می‌باشد که به وسیله کروموزوم نقض شده است.

به علت بزرگ بودن ضریب جریمه  $C_p$ ، در تکرارهای اول جستجو و تا هنگامی که جوابهای عملی یافت نشده، الگوریتم ژنتیک به دنبال جوابهایی با میزان غیرعملی بودن کمتر می‌گردد تا وقتی که عبارت دوم تابع برازش صفر شود و به عبارت دیگر جوابهایی یافت شود که قید مسأله را ارضاء می‌نماید. با عبور از این مرحله و پر شدن جمعیت از کروموزومهای عملی، دیگر جوابهای غیرعملی خودبه‌خود انتخاب نشده و از فضای جستجو حذف می‌شوند.

## ۴-۶- انتخاب

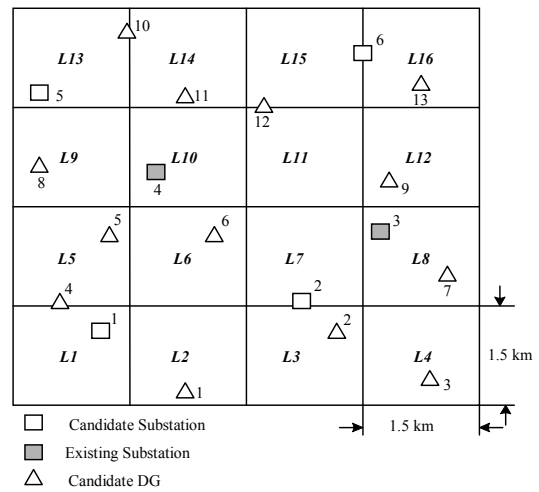
اساساً نحوه اجرا در عملگر انتخاب به گونه‌ای است که شاخص حضور کروموزوم‌های با برازندگی بیشتر در جمعیت جدید بیشتر باشد. در این تحقیق عمل انتخاب

جدول ۲ اطلاعات فنی و اقتصادی مورد نیاز برای مطالعه

مقدار	پارامتر
۳۰۰۰	هزینه احداث شبکه فشار متوسط [\$/km]
۵۰	قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار اول [\$/MWh]
۳۰	قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار دوم [\$/MWh]
۲۰	قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار سوم [\$/MWh]
۵	حداکثر افت ولتاژ مجاز در نقاط بار [%]
۲۸۰۰۰۰	هزینه احداث DG [\$/MVA]
۲۷	هزینه تولید توان DG [\$/MWh]
۰/۱۲۵	مقاومت واحد طول شبکه فشار متوسط [km/اهم]
۰/۱۲۷	راکتانس واحد طول شبکه فشار متوسط [km/اهم]
۲۰	ولتاژ نامی شبکه فشار متوسط [kV]
۲۵	بازه مطالعه [سال]
۰/۰۷	نرخ سالیانه تورم
۰/۱۲	نرخ سالیانه بهره

جدول ۳ مشخصات پستهای موجود و کاندیدا

شماره پست	وضعیت	هزینه دسترسی [S]	ظرفیتهای قابل احداث
۱	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰
۲	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰
۳	موجود	-	۷۵، ۶۰، ۴۵
۴	موجود	-	۷۵، ۶۰، ۴۵
۵	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰
۶	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰



شکل ۵ منطقه مورد مطالعه

جدول ۱ اطلاعات بار پیش بینی شده نقاط بار

ضریب قدرت	بار پیش بینی شده [MVA]			نقطه بار
	سطح سوم $T_3=5260$	سطح دوم $T_2=2500$	سطح اول $T_1=1000$	
۰/۹	۳/۲	۵/۶	۸	۱
۰/۹	۲/۴	۴/۲	۶	۲
۰/۹	۲/۴	۴/۲	۶	۳
۰/۹	۴	۷	۱۰	۴
۰/۹	۲/۸	۴/۹	۷	۵
۰/۹	۲/۴	۴/۲	۶	۶
۰/۹	۳/۲	۵/۶	۸	۷
۰/۹	۴	۷	۱۰	۸
۰/۹	۳/۶	۶/۳	۹	۹
۰/۹	۳/۲	۵/۶	۸	۱۰
۰/۹	۳/۶	۶/۳	۹	۱۱
۰/۹	۳/۲	۵/۶	۸	۱۲
۰/۹	۲/۸	۴/۹	۷	۱۳
۰/۹	۳/۶	۶/۳	۹	۱۴
۰/۹	۴	۷	۱۰	۱۵
۰/۹	۴	۷	۱۰	۱۶

### آزمایش ۱- حالت پایه‌ای سیستم

در این آزمایش به منظور بررسی اثر DG به عنوان گزینه‌ای جدید علاوه بر پستها برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، با در نظر گرفتن منطقه مورد مطالعه و اطلاعات ورودی فوق، مسأله در دو حالت زیر حل شده است.

حالت ۱-۱: با حذف مکانهای کاندیدای احداث DG از منطقه مورد مطالعه، فقط پستهای فوق توزیع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مکانیابی شده است.

حالت ۲-۱: با در نظر گرفتن امکان احداث واحدهای تولیدکننده پراکنده در مکانهای کاندیدا، مسأله برای مکانیابی توأم پستها و واحدهای تولیدی حل شده است. دیگر اطلاعات ورودی و شرایط، مانند حالت ۱-۱ است.

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش شامل ظرفیت، میزان بارگذاری و نیز نقاط بار تغذیه شده به وسیله پستها و واحدهای تولیدی به ترتیب در جدولهای ۴ تا ۶ ارائه شده است. هم‌چنان‌که ملاحظه می‌شود، پاسخ حاصل در دو حالت فوق با یکدیگر متفاوت بوده و مجموع ظرفیت پستهای منتخب در حالت ۲-۱ کمتر از حالت ۱-۱ است. حضور واحدهای DG در تأمین ظرفیت شبکه موجب شده است که پست شماره ۶ - که در حالت ۱-۱ انتخاب شده بود - در حالت ۲-۱ انتخاب نشود ضمن اینکه ظرفیت پست شماره ۳ نیز در حالت ۲-۱ کاهش یابد.

اجزای هزینه تابع هدف در این آزمایش در جدول ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که میزان تابع هدف در حالت ۲-۱ کمتر از حالت ۱-۱ بوده و اجرای پاسخ حاصل در حالت اخیر از نظر اقتصادی بیشتر مقرون به صرفه خواهد بود.

در شکل ۶ نیز ولتاژ نقاط مصرف در پاسخ به دست آمده از دو حالت فوق نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در بیشتر نقاط بار، حضور DG توانسته است افت ولتاژ را کاهش دهد. فقط در نقاط بار ۱۵ و ۱۶ که در حالت ۱-۱ از پست شماره ۶ تغذیه

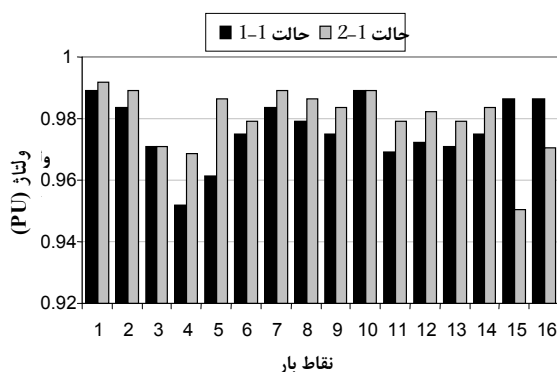
می‌شده‌اند، افت ولتاژ در حالت ۲-۱ افزایش پیدا کرده است. علت این پدیده، حذف پست مربوط در حالت ۲-۱ است که در نتیجه، نقاط بار مذکور از فواصل دورتر تغذیه شده‌اند.

جدول ۴ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۱-۱ آزمایش ۱

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزه سرویسی
		اول	دوم	سوم	
۱	۳۰	۲۰	۱۴	۸	۶، ۲، ۱
۳	۷۵	۵۱	۳۵/۷	۲۰/۴	۱۲، ۱۱، ۸، ۷، ۴، ۳
۴	۶۰	۴۰	۲۸	۱۶	۱۴، ۱۳، ۱۰، ۹، ۵
۶	۳۰	۲۰	۱۴	۸	۱۶، ۱۵

جدول ۵ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۲-۱ آزمایش ۱

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزه سرویسی
		اول	دوم	سوم	
۱	۳۰	۲۰	۱۲/۴۸	۱۰/۸	۶، ۵، ۲، ۱
۳	۶۰	۴۱/۹	۲۹/۲۳	۲۴/۴	۱۶، ۱۲، ۱۱، ۸، ۷، ۴، ۳
۴	۶۰	۳۵	۲۳/۹۹	۱۷/۲	۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۰، ۹



شکل ۶ حداقل ولتاژ نقاط بار در آزمایش ۱

جدول ۶ نتایج واحدهای تولید کننده انتخاب شده در حالت ۱-۲ آزمایش ۱

شماره DG	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقطه بار تغذیه شونده
		اول	دوم	سوم	
۱	۲	۲	۱/۴۷	-	۲
۲	۳	۲/۸	۱/۹۶	-	۷
۳	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۴
۴	۲	۲	۱/۹۵	-	۱
۵	۲	۲	۲	-	۵
۶	۱	۱	۱	-	۶
۷	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۸
۸	۳	۳	۲/۲	-	۹
۹	۳	۲/۸	۱/۹۶	-	۱۲
۱۰	۲	۲	۱/۷۱	-	۱۳
۱۱	۳	۳	۲/۲	-	۱۴
۱۲	۳	۳	۲/۲	-	۱۱
۱۳	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۱۶

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش شامل ظرفیت، میزان بارگذاری در سطوح مختلف و نیز نقاط بار تغذیه شده به وسیله پستها و واحدهای تولیدی به ترتیب در جدولهای ۷ تا ۹ نمایش داده شده است. اجزای هزینه تابع هدف در این آزمایش نیز در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۷ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۲-۱ آزمایش ۲

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزه سرویسی
		اول	دوم	سوم	
۳	۹۰	۶۱	۳۹/۶۵	۲۴/۴	۱۶، ۱۲، ۱۱، ۸، ۷، ۴، ۳
۴	۱۲۰	۷۰	۴۵/۵	۲۸	۱۳، ۱۰، ۹، ۶، ۵، ۲، ۱، ۱۵، ۱۴

جدول ۸ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۲-۲ آزمایش ۲

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزه سرویسی
		اول	دوم	سوم	
۳	۷۵	۴۵/۷	۳۱/۹۳	۲۴/۴	۱۶، ۱۲، ۱۱، ۸، ۷، ۴، ۳
۴	۷۵	۴۸/۸	۳۳/۷۹	۲۸	۱۰، ۹، ۶، ۵، ۲، ۱، ۱۵، ۱۴، ۱۳

جدول ۹ نتایج واحدهای تولید کننده انتخاب شده در حالت ۲-۲ آزمایش ۲

شماره DG	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقطه بار تغذیه شونده
		اول	دوم	سوم	
۱	۲	۲	۱/۴۷	-	۲
۲	۲	۲	۱/۴۷	-	۳
۳	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۴
۴	۳	۲/۸	۱/۹۵	-	۱
۵	۳	۲/۴۵	۱/۷۶	-	۵
۶	۲	۲	۱/۴۷	-	۶
۷	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۸
۸	۲	۳	۲/۲	-	۹
۹	۳	۲/۸	۱/۹۵	-	۱۲
۱۰	۳	۲/۴۵	۱/۷۱	-	۱۳
۱۱	۳	۳	۲/۲	-	۱۴
۱۲	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۱۵
۱۳	۴	۳/۵	۲/۴۵	-	۱۶

### آزمایش ۲- حذف پستهای کاندیدا

این آزمایش برای بررسی اثر حذف مکانهای کاندیدای احداث پست از منطقه مورد مطالعه طراحی شده است. این آزمایش وضعیتی را نشان می دهد که به علت محدودیتهای جغرافیایی در مناطق شهری با تراکم بالا یا قیمت بسیار زیاد زمین، امکان احداث پست جدید در منطقه وجود ندارد، لذا فقط با توسعه پستهای موجود، ظرفیت مورد نیاز سیستم را می توان تأمین کرد.

بنابراین مسأله در دو حالت زیر حل شده است:

حالت ۱-۲: با حذف مکانهای کاندیدای احداث پستهای جدید و DG از منطقه مورد مطالعه، مسأله فقط با فرض امکان توسعه پستهای موجود حل شده است. به مجموعه ظرفیتهای قابل احداث در پستهای موجود، ۹۰ و ۱۲۰ مگاوات امپر اضافه شده است. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی مانند آزمایش ۱ است.

حالت ۲-۲: تمامی شرایط مانند حالت ۱-۲ است و فقط امکان احداث DG در مکانهای کاندیدای مربوط نیز در حل مسأله منظور شده است.

جدول ۱۰ اجزای هزینه حاصل از اجرای آزمایشها

آزمایش ۲		آزمایش ۱		
حالت ۲-۲	حالت ۱-۲	حالت ۲-۱	حالت ۱-۱	
۰	۰	۱۵۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	هزینه دسترسی به پستهای فوق توزیع [S]
۱۸۰۰۰۰۰	۲۶۰۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰۰	هزینه احداث پستهای فوق توزیع [S]
۱۱۲۰۰۰۰۰	۰	۱۰۰۸۰۰۰۰	۰	هزینه احداث واحدهای تولید پراکنده [S]
$۳۳۰/۴۳۲۸ \times ۱۰^6$	$۴۰۳/۹۲۷۷ \times ۱۰^6$	$۳۳۲/۶۷۸۲ \times ۱۰^6$	$۴۱۲/۳۶۵۵ \times ۱۰^6$	هزینه بهره‌برداری از پستهای فوق توزیع در دوره مطالعه [S]
$۵۸/۹۹۷۲ \times ۱۰^6$	۰	$۵۷/۶۳۵۷ \times ۱۰^6$	۰	هزینه بهره‌برداری از واحدهای تولیدکننده در دوره مطالعه [S]
۲۷۲۲۵۰	۲۲۲۷۵۰	۲۳۱۷۵۰	۱۵۷۵۰۰	هزینه دسترسی به نقاط بار [S]
$۴۰۲/۷۰۲۲ \times ۱۰^6$	$۴۰۶/۷۵۰۴ \times ۱۰^6$	$۴۰۲/۶۷۵۷ \times ۱۰^6$	$۴۱۶/۳۲۳۰ \times ۱۰^6$	مقدار کل تابع هدف [S]

منافع اقتصادی قابل توجهی را برای شرکت‌های توزیع در پی داشته باشد. با توجه به تأثیر عوامل مختلف در تعیین ترکیب بهینه پستهای فوق توزیع و واحدهای DG در تأمین ظرفیت شبکه‌های توزیع، حل این مسأله با پیچیدگی‌های خاصی توأم می‌شود. در این مقاله مسأله مکانیابی توأم پستهای فوق توزیع و واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع از دیدگاه شرکت‌های توزیع در قالب نوعی مدل ریاضی به صورت تابع هدف و قیود مرتبط با آن مدل‌سازی شد. در این مدل، سعی شد تا حد امکان اجزای هزینه ناشی از احداث DG در کنار پستهای فوق توزیع به عنوان منابع تأمین توان مورد نیاز سیستم، ملحوظ شود. برای حل مدل‌های پیشنهادی از روش الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده گردید و مراحل به کارگیری آن تشریح شده است. آزمایشهایی برای بررسی کارایی روش پیشنهادی در یک منطقه نمونه انجام شد. مدل پیشنهادی در این مقاله برای برنامه‌ریزی استاتیکی در یک مرحله زمانی کاربرد دارد؛ البته با توسعه مدل پیشنهادی در قالب روش شبه‌دینامیک به سادگی می‌توان برنامه احداث پستها و واحدهای DG را در طی چند دوره زمانی به دست آورد.

باید توجه داشت که DGها انواع مختلفی دارند که از نظر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و نیز هزینه‌های

همانگونه که مشاهده می‌شود در حالت ۱-۲ - که بدون حضور DG پستها جایابی شده‌اند - ظرفیتهای پستهای ۳ و ۴ به ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ مگاوات آمپر به دست آمده است. این در حالی است که با فرض امکان توسعه ظرفیت پستهای موجود تا ۱۲۰ مگاوات آمپر، دستیابی به پاسخ عملی امکان پذیر شده است. اما در حالت ۲-۲ که با حضور واحدهای تولید پراکنده طراحی انجام شده است، ظرفیت پستهای ۳ و ۴ برابر ۷۵ مگاوات آمپر که کمتر از حالت ۱-۲ است. این نتیجه نشان می‌دهد که حضور واحدهای DG در طراحی ظرفیت مورد نیاز سیستم به ویژه در مناطق با محدودیت احداث پستهای جدید، می‌تواند کاربرد داشته باشد. همچنین مجموع ظرفیت واحدهای تولیدی در این آزمایش ۳۹ مگاوات آمپر و بیشتر از آزمایش ۱ است. علت این پدیده را می‌توان، تغذیه بارها از فواصل دورتر، یا به بیان دیگر، طولانی‌تر بودن فیدرها در حالت ۲-۲ نسبت به حالت ۱-۲ دانست، زیرا با طولانی‌تر شدن فیدرها تلفات در سیستم بالا رفته و حضور واحدهای تولیدی می‌تواند از این افزایش جلوگیری کند.

## ۶- نتیجه گیری

حضور واحدهای تولیدکننده پراکنده، گزینه‌های جدیدی را در طراحی شبکه‌های توزیع فراهم ساخته است. این می‌تواند





- Systems, vol. 12, No. 3, 1997, pp. 1151–1159.
- [2] H. L. Willis, Power Distribution Planning Reference Book. New York: Marcel Dekker, 1997.
- [3] G. W. Ault and J. R. Mc Donald, “Planning for Distributed Generation within Distribution Networks in Restructured Electricity Markets”, IEEE Power Engineering Review, vol. 20, Feb. 2000, pp. 52–54.
- [4] R. Sempertegui, J. Bautista, R. Grino, J. Pereira, “Models and Procedures for Electric Energy Distribution Planning”, A Review”, 15<sup>th</sup> Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [5] E. Masud, “An Interactive Procedure for Sizing and Timing Distribution Substations Using Optimization Techniques”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 93, 1974, 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 Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 94, 1975, pp. 230–235.
- [7] G. L. Thampson and D. L. Wall, “A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Location”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 5, 1981, pp. 2683–2687.
- به وسیله واحدهای DG تأمین می شود  
(برحسب MVA)
- $P_{j,d}^{(SS)}$  میزانی از توان نقطه بار  $z$  در سطح بار  $d$  که به وسیله پست فوق توزیع تأمین می شود  
(برحسب MVA)
- $P_f$  ضریب قدرت بار در نقطه مصرف  $z$
- $P_{DG,i}$  پیک بارگذاری واحد تولیدی  $i$  (برحسب MVA)
- $R$  مقاومت شبکه فشار متوسط (برحسب Ohm/kM)
- $S_{DG,i}$  ظرفیت واحد تولیدی  $i$  (برحسب MVA)
- $S_{SS,i}$  ظرفیت پست فوق توزیع  $i$  (برحسب MVA)
- $S_{DG,i}^{MAX}$  حداکثر ظرفیت DG قابل احداث در مکان  $i$  (برحسب MVA)
- $S_{SS,i}^{MAX}$  حداکثر ظرفیت قابل احداث در مکان پست  $i$  (برحسب MVA)
- $T_d$  مدت زمان تداوم سطح بار  $d$  (برحسب ساعت)
- $V$  ولتاژ نامی شبکه فشار متوسط (برحسب kV)
- $\Delta V_{MAX}$  حداکثر افت ولتاژ مجاز در نقاط بار (برحسب kV)
- $\Delta V_{j,d}$  میزان افت ولتاژ نقطه بار  $z$  در سطح بار  $d$  (برحسب kV)
- $\Omega_i$  مجموع ظرفیتهای قابل احداث در مکان پست  $i$

## ۷- منابع

- [1] S. K. Khator and L. C. Leung. “Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues”, IEEE Transactions on Power

- Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, No. 4, Nov. 2004, pp. 2068–2076.
- [14] M. A. Kashem, G. Ledwich, “Multiple Distributed Generators for Distribution Feeder Voltage Support”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, No. 3, Sept. 2005, pp. 676 – 684.
- [15] G. Celli, E. Ghaiani, S. Mocci, and F. Pilo, “A Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 750–757.
- [16] W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and M. M. A. Salama, “An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 1158–1165.
- [17] I. J. Ramirez-Rasudo and T. Gonen, “Pseudodynamic Planning for Expansion of Power Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, No.1, 1991, PP. 245–254.
- [18] H. L. Willis, Spatial Electric Load Forecasting: Second Edition. NewYork: Marcel Dekker, 2002.
- [19] T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill Book, 1986.
- [20] Y. Zhu and K. Tomsovic, “Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems
- [8] H. K. Temraz, M. M. A. Salama, “A Planning Model for Siting, Sizing and Timing of Distribution Substations and Defining the Associated Service Area”, Electric Power Systems Research, 62, 2002, pp. 145–151.
- [9] Dai Hongwei, Yu Yixin, Huang Chunhua, Wang Chengshan, Ge Shaoyun, “Optimal Planning of Distribution Substation Locations and Sizes-Model and Algorithm”, IEEE TENCON’ 93 BEIJING, 1993, pp. 351–354.
- [10] K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, M. Kitagawa, K. Yamanaka, “New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 1, Feb. 1990, pp. 126–132.
- [11] 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, 2002, pp. 37–50.
- [12] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, “Placement of dispersed generation systems for reduced losses”, in Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences, Maui, HI, 2000.
- [13] C. Wang, and M. H. Nehrir, “Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power

- [22] H. Lee Willis, H. Tram, M. V. Engel, and L. Finley, "Optimization Applications to Power Distribution", IEEE Computer Applications in Power, vol. 8, No. 4, 1995, pp. 12-17.
- with Dispersed Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, No. 3, pp. 822-827, 2002.
- [21] Goldberg, David E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

