

# بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی توسط جایگذاری بهینه تجهیزات کلیدزنی

محمودرضا حقی فام  
دانشیار

حمید فلقی  
دانشجوی دکترای

مریم رمضانی  
کارشناس ارشد

بخش مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی واسط میان مصرف‌کننده و سیستم انتقال و تولید هستند و به سبب نزدیکی به مشترکین از حساسیت خاصی برخوردارند. عمده‌ترین راهکار بهبود قابلیت اطمینان این بخش از سیستم قدرت، نصب تجهیزات کلیدزنی همچون سکسیونرها و نقاط مانور است. میزان موفقیت حاصل از انجام عملیات بازبایی بار در سطح شبکه‌های توزیع شدیداً به تعداد و مکان سکسیونرها و نقاط مانور وابسته است و با مکان‌یابی مناسب این تجهیزات در شبکه می‌توان کارایی عملیات مانور و بازبایی بار و در نتیجه سطح قابلیت اطمینان شبکه توزیع را بهبود بخشید. با توجه به اینکه مسأله تعیین مکان بهینه این دو تجهیز به هم وابسته است و پاسخ حاصل از مکان‌یابی یک نوع از این تجهیزات با تغییر وضعیت تعداد و مکان تجهیز دیگر، متفاوت می‌باشد لذا در طراحی شبکه توزیع جهت دست‌یابی به پاسخ بهینه، مسأله جایابی سکسیونرها و نقاط مانور می‌بایست توأمأ حل شود. در این مقاله روشی جدید جهت حل مسأله مکان‌یابی بهینه همزمان نقاط مانور و سکسیونرها در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در روش پیشنهاد شده هزینه‌های احداث کلیدها و خطوط، انرژی فروخته شده و بهره‌برداری و نگهداری شبکه در نظر گرفته شده است. برای بهینه‌سازی مسأله از روش حل جدیدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کارایی روش پیشنهادی از طریق طرح و اجرای آزمایش‌های مختلف روی یک شبکه توزیع نشان داده شده است.

## کلمات کلیدی

شبکه توزیع، سکسیونر، نقطه مانور، قابلیت اطمینان، مکان‌یابی، الگوریتم ژنتیک

## Reliability Enhancement in Electric Distribution Networks Using Optimal Allocation of Switching Devices

H. Falaghi  
Ph.D. Student

M.R. Haghifam  
Associated Professor

M. Ramezani  
MSc.

Department of Electrical Engineering  
Tarbiat Modarres University

## Abstract

*Electric distribution systems are wide separate parts of power systems. These networks are interface between load and transmission, generation systems with respect to radial configuration of distribution feeders. The main methods for improvement in reliability of distribution systems are*

*installation of switching devices such as sectionalizer and tie point. In this paper, an attempt has been made to develop a new and efficient algorithm for sectionalizer and tie point allocation simultaneously. A genetic algorithm based approach for determining optimal location and number of sectionalizers and tie points in distribution networks is presented. Costs of switches, lines and outage cost are considered in cost function. Test results verify the feasibility of applying the proposed method to manipulate the combinatorial switching device allocation in distribution networks.*

## Keywords

*Distribution System, Sectionalizer, Tie Point, Reliability, Allocation, GA*

## مقدمه

شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی گسترده‌ترین بخش سیستم قدرت به شمار می‌روند. این شبکه‌ها واسط میان مصرف‌کننده و سیستم انتقال و تولید هستند و به سبب نزدیکی به مصرف‌کنندگان از حساسیت خاصی برخوردارند به طوری که بروز هرگونه اختلال در این شبکه‌ها می‌تواند تغذیه مشترکین را به مخاطره اندازد. به دلیل ساختار، تنوع و تعداد تجهیزات بکاررفته، این شبکه‌ها بیشترین سهم را در عدم اعتماد سیستم قدرت به خود اختصاص داده‌اند. به طوری که آمار و بررسی‌ها نشان می‌دهد، تقریباً ۹۰٪ خاموشی‌های مشترکین به سیستم توزیع مربوط می‌شود از این رو بهبود سطح قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع توجه بسیاری از متخصصین و کارشناسان صنعت برق را به خود جلب کرده است [۱].

عمده‌ترین راه بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، نصب تجهیزات کلیدزنی همچون سکسیونرها و نقاط مانور است. هنگام وقوع خطا در یک فیدر توزیع پس از شناسایی و تعیین محل خطا، بخش آسیب‌دیده با استفاده از سکسیونرها از دیگر قسمت‌های فیدر جدا شده و مابقی بخش‌های سالم آن از طریق بستن نقاط مانور توسط فیدرهای مجاور تغذیه می‌شوند. به مجموعه این مراحل، عملیات مانور یا بازیابی بار گفته می‌شود [۱]. میزان موفقیت حاصل از انجام عملیات بازیابی بار در سطح شبکه‌های توزیع شدیداً به تعداد و مکان سکسیونرها و نقاط مانور وابسته است از این رو با مکان‌یابی مناسب این تجهیزات در شبکه می‌توان ضمن ارتقاء کارایی عملیات بازیابی بار، سطح قابلیت اطمینان شبکه توزیع را نیز بهبود بخشید.

تعدد فاکتورها و محدودیت‌های دخیل در مسأله، حالات بسیار زیاد ممکن جهت نصب سکسیونرها و نقاط مانور و نیز وابستگی مکان این دو تجهیز نسبت به یکدیگر، تعیین تعداد و مکان مناسب این ادوات را بسیار مشکل و پیچیده ساخته است. تاکنون مطالعات محدودی در راستای مکان‌یابی بهینه کلیدها در شبکه‌های توزیع انجام گرفته است. در [۲] تعیین مکان تجهیزات حفاظتی در شبکه توزیع با توجه به شاخص متوسط زمان خاموشی سیستم در قالب چهار اصل، ارائه شده است. روشی نیز مبتنی بر الگوریتم سخت‌کاری فولاد<sup>۱</sup> جهت مکان‌یابی سکسیونرها در شبکه‌های توزیع ارائه شده است که در آن هزینه‌های احداث سکسیونرها و انرژی توزیع نشده منظور گردیده است [۳]. در مرجع [۴] الگوریتمی جهت جایابی سکسیونرها برپایه اصل بهینه‌سازی Bellmann پیشنهاد شده است. در این روش، کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی توزیع نشده به عنوان هدف مسأله دنبال شده است. مسأله مکان‌یابی سکسیونرها با توجه به قیمت تجهیزات و انرژی فروخته نشده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز حل شده است [۵-۷]. در این تحقیقات با فرض معلوم بودن وضعیت نقاط مانور، سکسیونرها روی فیدرها جایابی شده‌اند. در [۸] از طریق جستجوی مستقیم و یکایک شماری تعداد و مکان سکسیونرها شبکه توزیع مشخص شده است البته در این تحقیق راهکارهایی برای دستیابی سریع‌تر به پاسخ پیشنهاد شده است. در [۹] مسأله تعیین نقاط مانوری شبکه با استفاده از روش جستجوی ممنوع<sup>۲</sup> حل شده است. در این مطالعه با فرض معلوم و موجود بودن تعداد مشخصی سکسیونر روی فیدرها، مکان مناسب نقاط مانوری و مسیر بهینه خطوط ارتباطی پشتیبان بین فیدرها، از بین حالات ممکن جستجو می‌شود.

بررسی تحقیقات انجام شده تاکنون نشان می‌دهد که در تمامی روش‌های ارائه شده، سکسیونرها با فرض معلوم بودن تعداد و مکان کلیدهای مانور جایابی شده است یا بالعکس، مکان نقاط مانور، با معلوم فرض نمودن وضعیت سکسیونرها تعیین شده است. اما مسأله تعیین مکان بهینه این دو تجهیز به هم وابسته است و پاسخ حاصل از مکان‌یابی یک نوع از این تجهیزات با تغییر وضعیت تجهیز دیگر، متفاوت خواهد بود بنابراین در طراحی شبکه‌های توزیع هوایی که یافتن مکان هر دو تجهیز

فوق‌الذکر مطرح است، جهت دستیابی به پاسخ بهینه، مسأله انتخاب بهترین حالت نصب سکسیونرها و نقاط مانور می‌بایست توأمأ حل شود. در این مقاله روشی جدید جهت حل همزمان مسأله مکان‌یابی بهینه نقاط مانور و سکسیونرها در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در تابع هزینه تعریف شده موارد زیر منظور شده است:

- هزینه احداث هر دستگاه سکسیونر
- هزینه احداث هر نقطه مانور شامل قیمت کلید و خط
- هزینه عدم تأمین انرژی مشترکین
- هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات

برای بهینه‌سازی مسأله از روش حل جدیدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک که یک الگوریتم چند مسیره است و امکان یافتن بهینه عمومی در آن زیاد است و همچنین در آن نگرانی از غیرخطی بودن توابع هدف و قیود وجود ندارد، استفاده شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی روی یک شبکه توزیع ارائه و بررسی شده است.

## ۱- فرموله کردن مسأله

### ۱-۱- مدل ریاضی تابع هزینه

هدف مسأله تعیین تعداد و مکان سکسیونرها و نقاط مانور به نحوی است که هزینه‌های نصب و احداث این تجهیزات، هزینه عدم تأمین انرژی مشترکین و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات نصب شده کمینه گردد. از طرفی احداث این تجهیزات کلیدزنی همانند دیگر طرح‌های اجرایی سیستم‌های توزیع در شرکت‌های برق با محدودیت بودجه روبروست به‌طوری‌که هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه جهت احداث تجهیزات و اجرای طرح نباید از حد مشخصی فراتر رود. این موضوع در کلیه تحقیقات انجام شده تاکنون نادیده گرفته شده است. در این مقاله محدودیت مربوط به منابع مالی اجرای طرح در قالب یک قید برای مسأله مورد بحث مدل شده است. با این توضیح مدل ریاضی تابع هزینه و قید مربوطه را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\text{Min } CF = \sum_{t=1}^{ny} P_w^t \cdot OC + \sum_{i=1}^n DS_i \cdot CS + \sum_{j=1}^m DT_j \cdot CT_j + \sum_{t=1}^{ny} P_w^t \cdot MC \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n DS_i \cdot CS + \sum_{j=1}^m DT_j \cdot CT_j \leq B$$

$$P_w = \frac{1 + \text{Infr}}{1 + \text{Intr}}$$

که در آن:

CF: مقدار کل تابع هزینه

OC: هزینه عدم تأمین انرژی مشترکین

DS<sub>i</sub>: متغیر تصمیم مربوط به نصب یا عدم نصب سکسیونر در مکان کاندید i (۱: سکسیونر نصب شده است، ۰: سکسیونر نصب نشده است).

CS: هزینه احداث یک دستگاه سکسیونر شامل قیمت و هزینه نصب

m: تعداد مکان‌های کاندید جهت احداث سکسیونر

DT<sub>j</sub>: متغیر تصمیم مربوط به احداث یا عدم احداث نقطه مانور در مکان کاندید j (۱: نقطه مانور احداث شده است، ۰: نقطه مانور احداث نشده است)

CT<sub>j</sub>: کمترین هزینه احداث نقطه مانور در مکان کاندید j شامل قیمت کلید، خط و هزینه نصب

m: تعداد مکان‌های کاندید جهت احداث نقطه مانور

MC: هزینه‌های سالیانه نگهداری و بهره‌برداری تجهیزات

B: حداکثر بودجه‌ای که می‌توان در طرح بکار برد  
 $P_w$ : ضریب اقتصادی جهت تبدیل هزینه‌های جاری به ارزش کنونی  
 Infr: نرخ تورم  
 Intr: نرخ بهره  
 n: دوره مطالعه برحسب سال

## ۱-۲- محاسبه هزینه عدم تأمین انرژی

با توجه به مدل بار، قیمت انرژی برای مدل‌های مختلف بار و ساختار سیستم، هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی در سیستم توزیع فشارمتوسط را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$OC = \sum_{i=1}^{N_b} \lambda_i \cdot L_i \cdot \left[ \sum_{j=1}^{N_{sw}^i} P_j \cdot t_{sw}^i \cdot CE_j + \sum_{j=1}^{N_{rp}^i} P_j \cdot t_{rp}^i \cdot CE_j \right] \quad (2)$$

که در آن:

$N_b$ : تعداد شاخه‌های فیدر

$\lambda_i$ : نرخ سالیانه وقوع خطا در شاخه نام فیدر

$L_i$ : طول شاخه نام برحسب کیلومتر

$N_{sw}^i$ : تعداد نقاط باری که پس از وقوع خطا در شاخه نام از طریق کلیدزنی و مانور تغذیه می‌شوند.

$P_j$ : متوسط بار نقطه نام برحسب کیلووات

$N_{rp}^i$ : تعداد نقاط باری که در هنگام وقوع خطا در شاخه نام پس از تعمیر بخش آسیب‌دیده تغذیه می‌شوند.

$t_{sw}^i$ : مدت زمان لازم جهت انجام عملیات مانور و کلیدزنی هنگام وقوع خطا در شاخه نام برحسب ساعت

$t_{rp}^i$ : مدت زمان لازم جهت تعمیر بخش آسیب‌دیده فیدر هنگام وقوع خطا در شاخه نام برحسب ساعت

$CE_j$ : هزینه عدم تأمین انرژی در پست توزیع نام

در رابطه (۲)،  $CE_j$  به مدل بار در هر یک از پست‌های توزیع بستگی دارد که می‌توان آن را از رابطه (۳) به دست آورد.

$$CE_j = (P_{res}^j \times IC_{res} + P_{com}^j \times IC_{com} + P_{ind}^j \times IC_{ind}) \quad (3)$$

که در آن  $P_{res}^j$ ،  $P_{com}^j$  و  $P_{ind}^j$ ،  $IC_{res}$ ،  $IC_{com}$  و  $IC_{ind}$  به ترتیب درصد بار و هزینه عدم تأمین هر واحد انرژی مربوط به بارهای خانگی، تجاری و صنعتی در پست توزیع نام باشد.

## ۲- روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

اکثر روش‌های سنتی همانند برنامه‌ریزی‌های خطی و غیرخطی، الگوریتم‌های تک‌مسیره می‌باشند. این الگوریتم‌ها عمل جستجو را از یک نقطه شروع و در هر مرحله اقدام به بهبود جواب‌ها می‌کنند و از یک مسیر به نقطه بهینه نزدیک می‌شود. این روش‌ها چنانچه در یک بهینه محلی گرفتار شوند، به سختی امکان تشخیص و عبور از آن را دارند. از آنجا که مسأله مورد بحث در این مقاله دارای نقاط بهینه محلی فراوانی است لذا امکان اینکه این روش‌ها در یکی از آنها گرفتار شوند، بسیار زیاد است ولی روش GA<sup>۳</sup> به جای یک نقطه، عمل جستجو را از چند نقطه (جمعیت اولیه) شروع کرده و از چندین مسیر مختلف به سمت پاسخ بهینه حرکت می‌کند از اینرو این روش در حل مسأله پیچیده مزبور به عنوان روش حل اختیار شده است. در قسمت‌های بعد نحوه انطباق الگوریتم ژنتیک با مسأله مکان‌یابی کلیدها در سیستم توزیع و مراحل انجام عملیات بهینه‌سازی آورده شده است.

## ۲-۱- کد گذاری متغیرهای تصمیم گیری

هدف، تعیین محل نصب سکسیونرها و نقاط مانور می باشد. این متغیرها توسط کروموزوم رشته  $D$  به صورت زیر تعریف می شوند. رشته  $D$  حاوی دو زیررشته  $DS$  و  $DT$  می باشد. ژن های زیررشته  $DS$  معرف نصب یا عدم نصب سکسیونرها در فیدر بود و ژن های زیررشته  $DT$  تعداد و محل نصب نقاط مانور را روی مکان های کاندید متناظر نشان می دهد.

$$D_k = [DS_1, \dots, DS_i, \dots, DS_n, DT_1, \dots, DT_j, \dots, DT_m] \quad (4)$$

که در آن:

$D_k$ : رشته  $k$ ام از جمعیت

$DS_i$ : متغیر تصمیم نصب یا عدم نصب سکسیونر در مکان کاندید  $i$ ام

$DT_j$ : تعداد تصمیم نصب یا عدم نصب نقطه مانور در مکان کاندید  $j$ ام

$n$ : تعداد مکان های کاندید جهت نصب سکسیونر

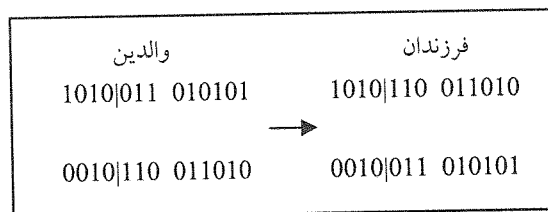
$m$ : تعداد مکان های کاندید جهت احداث نقطه مانور

## ۲-۲- جمعیت اولیه

ابتدا جمعیت اولیه ای شامل  $N$  رشته از کروموزوم های مورد بحث به صورت تصادفی تولید می شود. انتخاب تعداد اعضاء جمعیت اولیه اولین امریست که طراح می بایست انجام دهد. هرچه قدر تعداد اعضاء جمعیت اولیه بیشتر باشد، احتمال یافتن پاسخ بهینه مطلق افزایش پیدا می کند اما بالعکس حجم محاسبات نیز بالا می رود که این امر سرعت رسیدن به جواب را کاهش می دهد. در این مقاله، تعداد جمعیت اولیه  $N=75$  در نظر گرفته شده است.

## ۲-۳- عملگر تقاطع

تقاطع<sup>۴</sup> دارای دو مرحله است، در مرحله اول کروموزومها به طور تصادفی انتخاب می شوند و در مرحله دوم هر دو کروموزوم انتخاب شده می توانند با احتمال  $P_c$  ( $0 \leq P_c \leq 1$ ) با یکدیگر عمل تقاطع را انجام دهند. انجام عمل تقاطع می تواند به روش های متفاوتی صورت گیرد. در این مقاله، از دو نوع یک نقطه ای و دو نقطه ای برای انجام عمل 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. این روش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) نحوه انجام عمل تقاطع یک نقطه ای.

روش تقاطع یک نقطه ای این خاصیت را دارد که پرش های بلندتری در مجموعه جواب ایجاد می کند و برای مراحل اولیه که می خواهیم جمعیت اولیه را بسط دهیم، مناسب است ولی در مراحل نهایی که الگوریتم به سوی پاسخ همگرا می شود، از روش تقاطع دو نقطه ای استفاده می شود. در این روش عمل تقاطع برای هر قسمت از کروموزومها جداگانه اعمال می شود. در شکل (۲) روش تقاطع دو نقطه ای نشان داده شده است.

والدین	فرزندان
101 0011 010 101	101 0110 010101
	001 0011 011010
	0010110 011 010
001 0110 011 010	0010110 010 010

شکل (۲) نحوه اعمال عمل تقاطع دو نقطه‌ای.

## ۲-۴- عملگر جهش

پدیده پرش‌های ژنتیکی در دنیای واقعی در این الگوریتم توسط جهش<sup>۵</sup> مدل‌سازی شده است. در این روش با احتمال  $(0 \leq P_m \leq 1)$  یک یا چند ژن از رشته انتخاب شده از جمعیت موجود تغییر می‌کنند و رشته جدیدی تولید می‌گردد البته عمل جهش در هر بخش از کروموزوم به صورت جداگانه انجام می‌شود. شکل (۳) نحوه انجام عمل جهش را نشان می‌دهد.

والد	فرزند
1010011 010101	1110011 010001

شکل (۳) نحوه اعمال عمل جهش.

## ۲-۵- تابع برازندگی

به تمام کروموزوم‌های هر نسل (اعضای جمعیت) یک مقدار شایستگی نسبت داده می‌شود. از آنجا که هدف رسیدن به مقدار کمینه تابع هزینه است و نیز به منظور لحاظ کردن قید بودجه، تابع برازندگی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$F(D_i) = M - [CF(D_i) + C_p \cdot Inf(D_i)] \quad (5)$$

که در آن:

$M$ : یک عدد به اندازه کافی بزرگ

$CF(D_i)$ : مقدار تابع هزینه متناظر با کروموزوم  $D_i$

$Inf(D_i)$ : میزان غیرعملی بودن کروموزوم  $D_i$

$C_p$ : ضریب جریمه (ضریب ثابتی که بزرگ در نظر گرفته می‌شود).

برای محاسبه میزان غیرعملی بودن هر کروموزوم اگر  $g(D_i) \leq B$  قید بودجه مسأله باشد، در این صورت تعریف می‌کنیم:

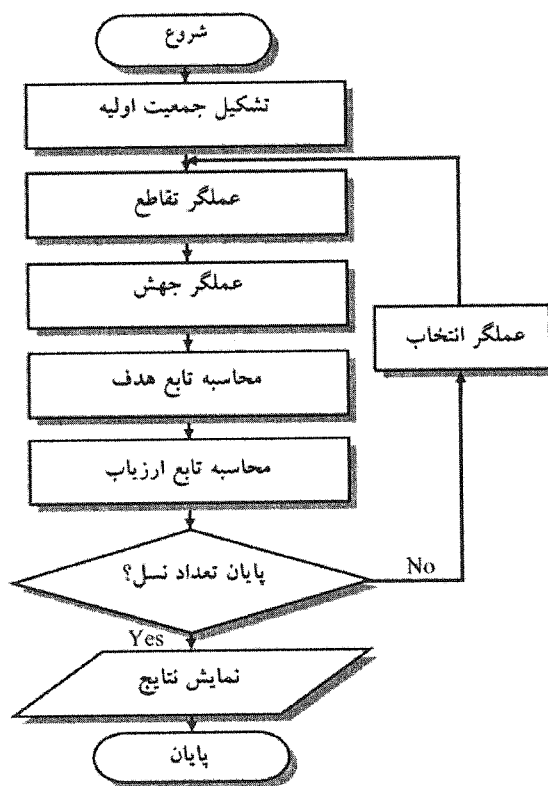
$$Inf(D_i) = \begin{cases} g(D_i) - B & \text{if } g(D_i) > B \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

به علت بزرگ بودن ضریب جریمه  $C_p$  در تکرارهای اول حل مسأله و تا هنگامی که جواب عملی یافت نشده است،  $GA$  به دنبال جواب‌های با میزان غیرعملی بودن کمتر می‌گردد تا وقتی که این مقدار صفر شود و به عبارت دیگر جواب‌هایی یافت شود که قید مسأله را ارضاء می‌نماید. با عبور از این مرحله و پرشدن جمعیت از کروموزوم‌های عملی، دیگر جواب‌های غیرعملی خودبخود انتخاب نمی‌گردند و از فضای جستجو حذف می‌شوند.

## ۲-۶- عملگر انتخاب

عمل انتخاب در الگوریتم ژنتیک به نحوی است که شاخص حضور کروموزوم‌های با برازش بیشتر در جمعیت جدید بیشتر باشد. در این مقاله عمل انتخاب به گونه‌ای ابتکاری انجام می‌شود به این صورت که ابتدا کروموزوم‌ها به صورت نزولی بر اساس میزان برازندگی مرتب و از ابتدا کروموزوم‌ها انتخاب می‌شوند. اگر تعداد اعضای با برازش بیشتر از متوسط برازندگی، بیش از تعداد جمعیت مورد نیاز بود، تمامی اعضای مورد نیاز از همین اعضا انتخاب می‌شوند در غیر این صورت علاوه بر انتخاب اعضای دارای برازش بیش از متوسط، مابقی تعداد مورد نیاز، از دیگر عضوهای دارای برازندگی کمتر از متوسط به طور تصادفی

برگزیده می‌شود [۶]. مطابق با این روش ضمن انتخاب کروموزوم‌های برتر، اعضای با برازش کم نیز به طور تصادفی شانس حضور در جمعیت جدید را پیدا می‌کنند.



شکل (۴) فلوچارت مراحل بهینه‌سازی مسأله.

### ۳- مطالعات عددی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، از یک سیستم آزمون که از مرجع [۱۴] اخذ شده است، با اضافه نمودن برخی اطلاعات استفاده شده است. این سیستم یک فیدر ۲۰ کیلوولت دارای ۳۲ شاخه است که اطلاعات مربوط به ساختار، بار و نرخ وقوع خطای آن در جدول (۱) آمده است. دیاگرام تک‌خطی و مکان‌های کاندید برای احداث نقاط مانور فیدر مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. اطلاعات فنی و اقتصادی مربوط به مکان‌های کاندید برای احداث نقاط مانور در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است تفاوتی که در میزان هزینه احداث نقاط مانور متناظر با مکان‌های کاندید مشاهده می‌شود ناشی از فواصل متفاوت این نقاط از فیدرهای مجاور است که بالطبع هزینه احداث خطوط برای هر یک متفاوت خواهد بود. در مطالعات انجام شده دو طرف تمامی شاخه‌های فیدر به عنوان مکان‌های کاندید برای نصب سکسیونر فرض شده است. این موضوع برای شاخه شماره ۴ در شکل (۵) نشان داده شده است.

متوسط زمان لازم انجام کلیدزنی و رفع خطا برای تمامی شاخه‌ها به ترتیب برابر ۰/۵ و ۲ ساعت در نظر گرفته شده و کل دوره مطالعه برابر ۱۵ سال و نرخ بهره و تورم نیز به ترتیب ۱۶ و ۱۵ درصد فرض شده است.

متوسط هزینه عدم تأمین یک کیلووات ساعت انرژی خانگی، تجاری و صنعتی به ترتیب برابر ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۵۰ ریال منظور شده است. هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات برابر ۲ درصد میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه جهت احداث تجهیزات در نظر گرفته شده است.

آزمایش‌های متعددی برای بررسی شرایط مختلف مسأله طراحی و انجام شده است که عبارتند از:

- ۱- در نظر گرفتن حالت پایه سیستم
- ۲- بررسی تأثیر متقابل نقاط مانور و سکسیونرها

۳- بررسی تأثیر تغییر در میزان بودجه طرح

۴- بررسی تأثیر تغییر در قیمت نقاط مانور

۵- بررسی تأثیر تغییر در قیمت سکسیونرها

جدول (۱) اطلاعات ساختار و بار فیدر مورد مطالعه.

شماره شاخه	گره ابتدا	گره انتها	طول [km]	نرخ وقوع خطا [f/yr.km]	متوسط بار گره انتها [kW]	نوع بار (%)	
						خانگی	تجاری
۱	۰	۱	۰/۰۹۲۲	۰/۵	۱۰۰	۱۰۰	۰
۲	۱	۲	۰/۴۹۳۰	۰/۵	۹۰	۱۰۰	۰
۳	۲	۳	۰/۳۶۶۰	۰/۳	۱۲۰	۶۲	۳۸
۴	۳	۴	۰/۳۸۱۱	۰/۳	۶۰	۱۰۰	۰
۵	۴	۵	۰/۸۱۹۰	۰/۹	۶۰	۹۰	۱۰
۶	۵	۶	۰/۱۸۷۲	۰/۹	۲۰۰	۱۰۰	۰
۷	۶	۷	۰/۷۱۱۴	۰/۹	۲۰۰	۰	۱۰۰
۸	۷	۸	۱/۰۳۰۰	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۹	۸	۹	۱/۰۴۴۰	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۱۰	۹	۱۰	۰/۱۹۶۶	۰/۵	۴۵	۱۰۰	۰
۱۱	۱۰	۱۱	۰/۳۷۴۴	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۱۲	۱۱	۱۲	۱/۴۶۸۰	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۱۳	۱۲	۱۳	۰/۵۴۱۶	۰/۵	۱۲۰	۱۰۰	۰
۱۴	۱۳	۱۴	۰/۵۹۱۰	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۱۵	۱۴	۱۵	۰/۷۴۶۳	۰/۵	۶۰	۱۰۰	۰
۱۶	۱۵	۱۶	۱/۲۸۹۰	۰/۵	۶۰	۰	۱۰۰
۱۷	۱۶	۱۷	۰/۷۳۲۰	۰/۹	۹۰	۱۰۰	۰
۱۸	۱	۱۸	۰/۱۶۴۰	۰/۹	۹۰	۱۰۰	۰
۱۹	۱۸	۱۹	۱/۵۰۴۲	۰/۹	۹۰	۲۲	۴۳
۲۰	۱۹	۲۰	۰/۴۰۹۵	۰/۹	۹۰	۱۰۰	۰
۲۱	۲۰	۲۱	۰/۷۰۸۹	۰/۹	۹۰	۵۰	۳۰
۲۲	۲	۲۲	۰/۴۵۱۲	۰/۹	۹۰	۵۵	۴۵
۲۳	۲۲	۲۳	۰/۸۹۸۰	۰/۹	۴۲۰	۱۰۰	۰
۲۴	۲۳	۲۴	۰/۸۹۶۰	۰/۹	۴۲۰	۸۲	۱۸
۲۱۲۵	۵	۲۵	۰/۲۰۳۰	۰/۹	۶۰	۳۰	۷۰
۲۶	۲۵	۲۶	۰/۲۸۴۲	۰/۳	۶۰	۸۰	۲۰
۲۷	۲۶	۲۷	۱/۰۵۹۰	۰/۳	۶۰	۱۰۰	۰
۲۸	۲۷	۲۸	۰/۸۰۴۲	۰/۳	۱۲۰	۰	۱۰۰
۲۹	۲۸	۲۹	۰/۵۰۷۵	۰/۳	۲۰۰	۰	۱۰۰
۳۰	۲۹	۳۰	۰/۹۷۴۴	۰/۳	۱۵۰	۱۰۰	۰
۳۱	۳۰	۳۱	۰/۳۱۰۵	۰/۳	۲۱۰	۲۸	۷۲
۳۲	۳۱	۳۲	۰/۳۴۱۰	۰/۳	۶۰	۱۰۰	۰
جمع	-	-	۱۹/۵۲۸۴	-	۳۷۱۵	-	-

### آزمایش ۱- حالت پایه‌ای سیستم

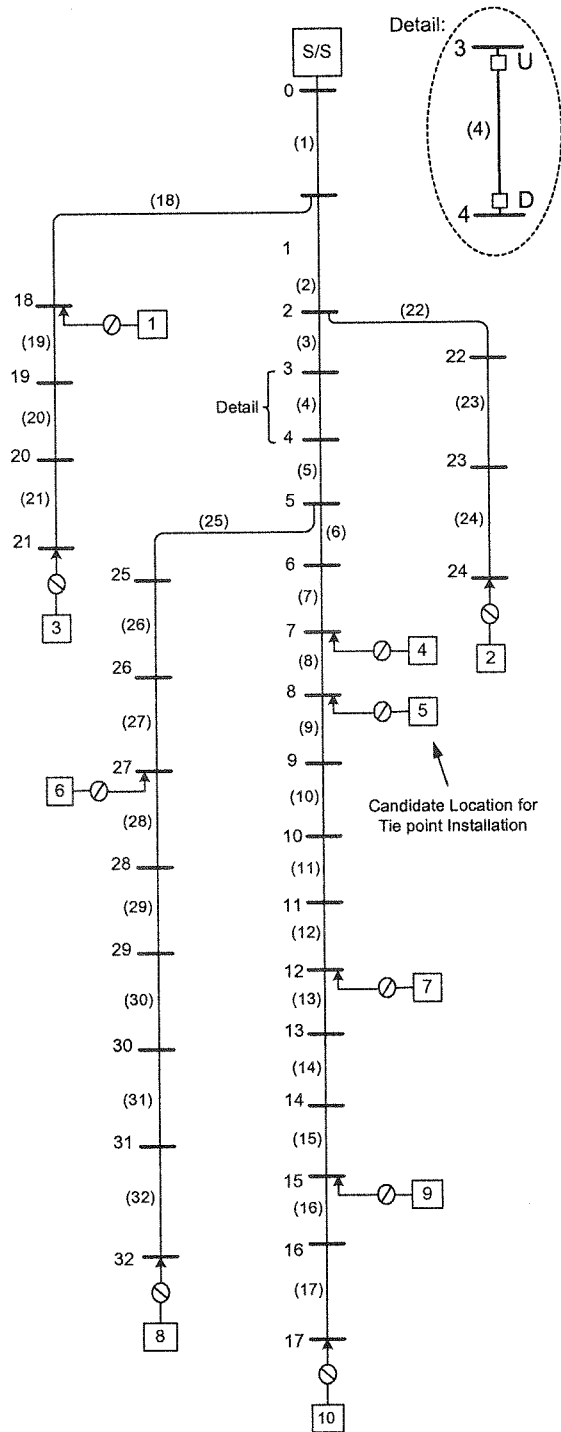
در این آزمایش با در نظر گرفتن سیستم مورد مطالعه شکل (۵) و اطلاعات ورودی جدول‌های (۲) و (۳)، مسأله مکان‌یابی سکسیونرها و نقاط مانور حل می‌شود. دیگر اطلاعات ورودی در این آزمایش عبارتند از:



- میزان حداکثر بودجه طرح (B): ۶۰ میلیون ریال

- هزینه احداث هر دستگاه سکیونر: ۷ میلیون ریال

نتایج حاصل از انجام این آزمایش شامل مکان و تعداد نقاط مانور و سکیونرها همچنین میزان بودجه مورد نیاز طرح و نیز هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی پس از اجرای طرح در جدول (۳) ارائه شده است. روند بهینه‌سازی تابع هزینه طی نسل‌های مختلف در این آزمایش در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل (۵) دیاگرام تک خطی فیدر مورد مطالعه.

جدول (۲) اطلاعات فنی و اقتصادی احداث نقاط مانور در مکان‌های کاندید.

شماره نقطه مانور کاندید	متصل به گره	متوسط ظرفیت [kW]	هزینه احداث [میلیون ریال]
۱	۱۸	۶۰۰	۱۳/۵
۲	۲۴	۷۰۰	۹/۵۰
۳	۲۱	۸۰۰	۱۰
۴	۷	۷۰۰	۱۲
۵	۸	۷۰۰	۱۰/۵
۶	۲۷	۹۰۰	۹
۷	۱۲	۸۰۰	۱۱/۵
۸	۳۲	۷۰۰	۹/۵
۹	۱۵	۸۰۰	۱۱
۱۰	۱۷	۷۰۰	۱۳

### آزمایش ۲- تأثیر متقابل نقاط مانور و سکسیونرها

در این آزمایش برای بررسی تأثیر متقابل مکان سکسیونرها و نقاط مانور مسأله در دو حالت زیر حل می‌شود:

**حالت ۱-۲:** یک نقطه مانور در مکان کاندیدای ۱۰ معلوم و نصب شده فرض می‌گردد سپس مکان و تعداد بهینه سکسیونرها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی جستجو می‌گردد.

**حالت ۲-۲:** یک نقطه مانور در مکان کاندیدای ۸ معلوم و نصب شده فرض می‌گردد سپس مکان و تعداد بهینه سکسیونرها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی جستجو می‌گردد. دیگر اطلاعات ورودی و شرایط همانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد.

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش شامل مکان و تعداد سکسیونرها همچنین میزان بودجه مورد نیاز طرح و نیز هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی پس از اجرای طرح در جدول (۳) ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌گردد، پاسخ حاصله در دو حالت فوق‌الذکر با یکدیگر متفاوت است بنابراین می‌توان گفت مکان بهینه سکسیونرها به مکان نقاط مانور وابسته بوده و با تغییر در مکان نقاط مانور، مکان و تعداد بهینه برای نصب سکسیونرها تغییر خواهد کرد. این امر اهمیت جابجایی توأم این دو تجهیز را برای دستیابی به پاسخ بهینه نشان می‌دهد.

### آزمایش ۳- تأثیر تغییر در میزان بودجه طرح

این آزمایش به منظور تحلیل تأثیر قید بودجه روی پاسخ مسأله طراحی شده است. به این منظور مسأله در سه حالت زیر حل می‌شود:

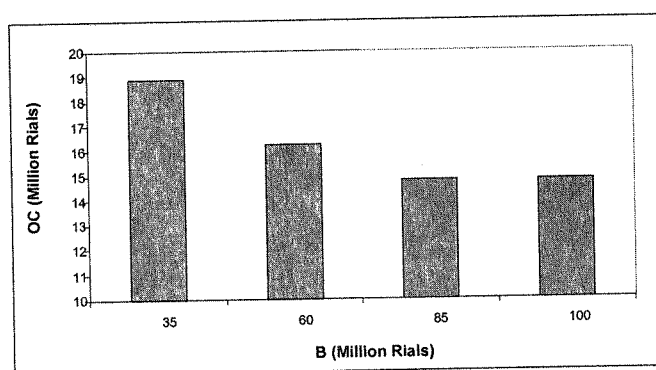
**حالت ۱-۳:** اطلاعات ورودی و شرایط همانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد تنها میزان حداکثر بودجه طرح (B) برابر ۳۵ میلیون ریال فرض می‌گردد.

**حالت ۲-۳:** تمامی شرایط همانند حالت ۱-۳ است و تنها حداکثر بودجه طرح (B) برابر ۸۵ میلیون ریال فرض می‌گردد.

**حالت ۳-۳:** تمامی شرایط همانند حالت ۱-۳ است و تنها میزان حداکثر بودجه طرح (B) برابر ۱۰۰ میلیون ریال فرض می‌گردد.

نتایج حاصل از انجام این آزمایش شامل مکان و تعداد ادوات کلیدزنی همچنین میزان بودجه مورد نیاز طرح و نیز هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی پس از اجرای طرح در جدول (۳) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که پاسخ حاصله در دو حالت ۲-۳ و ۳-۳ با یکدیگر یکسان بوده و با حالت ۱-۳ متفاوت است. در حالت ۱-۳ که میزان B کمتر از میزان آن در حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است، هیچ نقطه مانوری انتخاب نشده است و تعداد سکسیونرهای انتخاب شده نیز کمتر از تعداد مشابه آن در حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است ولی در حالت ۲-۳ که میزان B بیشتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است، تعداد نقاط مانور و سکسیونرهای انتخاب شده بیشتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است، اما در حالت ۳-۳ با وجود اینکه میزان B نسبت به حالت ۱-۳

۲ بیشتر فرض شده است نتایج به دست آمده با حالت ۲-۳ یکسان می‌باشد. علت مشابه بودن نتایج در این دو حالت اخیر در این است که اگرچه در حالت ۳-۳ بودجه بیشتری نسبت به حالت ۲-۳ قابل استفاده است اما بهره‌گیری بیشتر از منبع بودجه برای بهبود سطح قابلیت اطمینان از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست از اینرو تجهیزات کلیدزنی بیشتر از حالت ۲-۳ انتخاب نشده است. ملاحظه می‌گردد که میزان هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی در سیستم در حالت ۱-۳ نسبت به آزمایش ۱ بیشتر شده و در حالت ۲-۳ و ۳-۳ میزان آن کمتر از آزمایش ۱ می‌باشد. نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر در B در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶) نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر در میزان بودجه طرح (B).

بطور کلی می‌توان گفت با افزایش میزان بودجه قابل استفاده در طرح، می‌توان میزان هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی در سیستم را کاهش داد البته تا جایی که طرح از دیدگاه اقتصادی توجیه‌پذیر باشد.

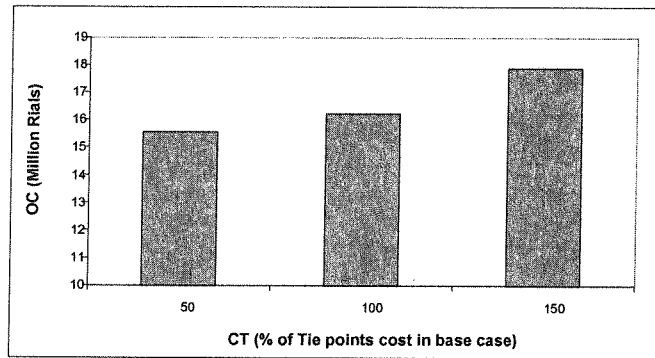
#### آزمایش ۴ = تأثیر تغییر در قیمت نقاط مانور

در این آزمایش اثر هزینه احداث نقاط مانور روی پاسخ مسأله مورد بررسی قرار می‌گیرد بنابراین مسأله موردنظر در دو حالت زیر حل می‌شود:

**حالت ۱-۴:** اطلاعات ورودی و شرایط همانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد با این تفاوت که هزینه احداث نقاط مانور ۵۰ درصد نسبت به آن کمتر فرض شده است.

**حالت ۲-۴:** تمامی شرایط همانند حالت ۱-۴ است ولی هزینه احداث نقاط مانور ۵۰ درصد نسبت به آزمایش ۱ بیشتر فرض شده است.

نتایج حاصل از این آزمایش شامل مکان و تعداد سکسیونرها و نقاط مانور همچنین میزان بودجه مورد نیاز طرح و نیز هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی پس از اجرای طرح در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با تغییر در هزینه احداث نقاط مانور، پاسخ مسأله تغییر کرده است. در حالت ۱-۴ که هزینه احداث نقاط مانور نسبت به حالت پایه‌ای آزمایش ۱ کمتر است، تعداد نقاط مانور انتخاب شده بیشتر از حالت پایه‌ای بوده و میزان هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی در سیستم نیز در نسبت به آزمایش ۱ کمتر شده است اما در حالت ۲-۴ که هزینه احداث نقاط مانور نسبت به حالت پایه‌ای آزمایش ۱ بیشتر است، هیچ یک از نقاط مانور کاندید برای احداث انتخاب نشده است ضمن اینکه مکان و تعداد انتخابی برای نصب سکسیونرها نیز نسبت به حالت پایه تغییر کرده است. در حالت ۲-۴ میزان هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی در سیستم نیز نسبت به آزمایش ۱ بیشتر شده است. نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر در قیمت نقاط مانور در شکل (۷) نشان داده شده است.



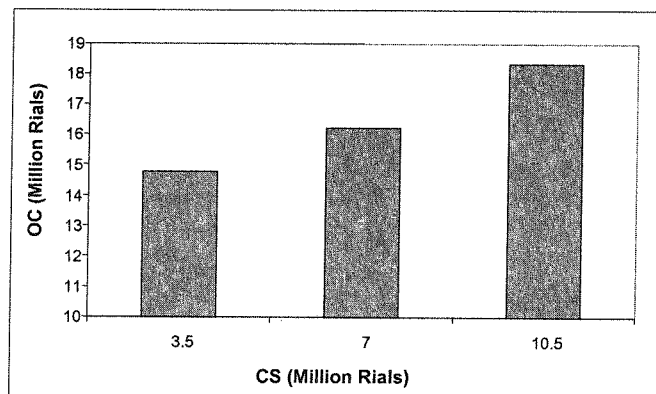
شکل (۷) نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر قیمت نقاط مانور (CT).

#### آزمایش ۵- تأثیر تغییر در قیمت سکسیونرها

این آزمایش به منظور بررسی تأثیر قیمت سکسیونرها روی پاسخ مسأله تدوین شده است به این منظور مسأله مورد نظر در دو حالت زیر حل می‌شود:

حالت ۱-۵: اطلاعات ورودی و شرایط همانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد با این تفاوت که قیمت هر دستگاه سکسیونر برابر ۳/۵ میلیون ریال فرض شده است.

حالت ۲-۵: تمامی شرایط همانند حالت ۱-۵ است ولی قیمت هر سکسیونر برابر ۱۰/۵ میلیون ریال فرض شده است. نتایج حاصل از این آزمایش شامل مکان و تعداد سکسیونرها و نقاط مانور همچنین میزان بودجه مورد نیاز طرح و نیز هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی پس از اجرای طرح در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با تغییر در هزینه احداث سکسیونرها، پاسخ مسأله تغییر می‌کند. در حالت ۱-۵ که قیمت هر دستگاه سکسیونر کمتر از میزان آن در حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است، تعداد بیشتری از این تجهیز برای نصب انتخاب شده است و هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی نیز کمتر شده است. در حالت ۲-۵ که قیمت این تجهیز بیشتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ فرض شده است، تعداد کمتری از این تجهیز برای نصب پیشنهاد شده است و هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی نیز بیشتر شده است. نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر در قیمت سکسیونرها در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸) نحوه تغییرات هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (OC) نسبت به تغییر قیمت سکسیونر (CS).

#### ۵- نتیجه گیری

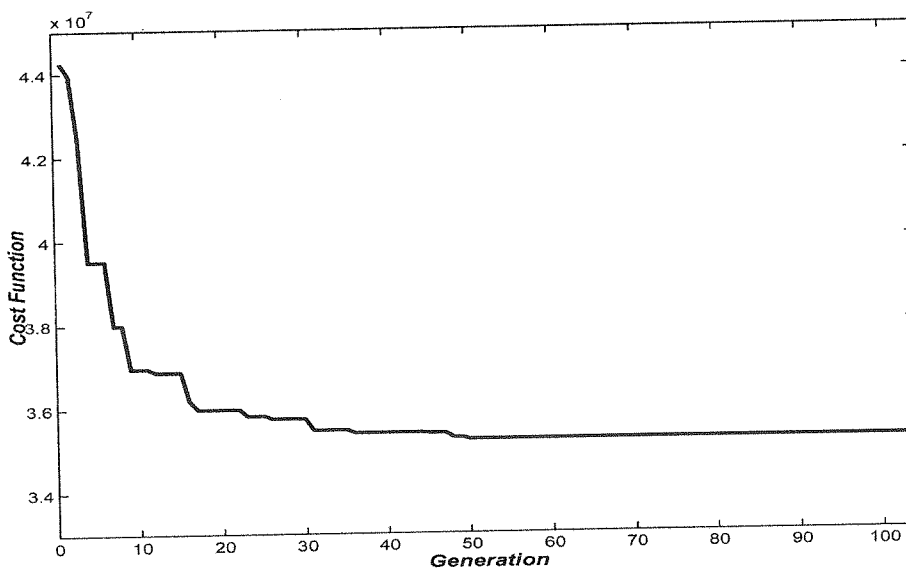
بررسی اهداف عملیات مانور نشان می‌دهد که انتخاب مناسب مکان سکسیونرها و نقاط مانور تأثیر بسزایی در بازیابی بارهای قطع شده پس از وقوع خطا در شبکه توزیع دارد. وجود این ادوات در شبکه قابلیت اطمینان سیستم را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوریکه با تغییر تعداد و مکان کلیدهای مانور و سکسیونرها، سطح قابلیت اطمینان فیدر به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. از طرفی مکان بهینه این دو تجهیز در شبکه به هم وابسته بوده و برای رسیدن به پاسخ مناسب می‌بایست این موضوع را مد نظر قرار داد. در این مقاله مسأله تعیین همزمان مکان بهینه سکسیونرها و نقاط مانور در شبکه

توزیع انرژی الکتریکی معرفی و مدل سازی گردید سپس بر مبنای مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک روشی برای حل مسأله ارائه شد. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، آزمایش های مختلفی بر روی یک فیدر نمونه اعمال گردید که نتایج آن در مقاله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

جدول (۳) نتایج اجرای آزمایش ها.

آزمایش	حالت	شماره سگشن های پیشنهادی سکسیونرها <sup>۱</sup>	مکان نقاط مانور	هزینه سالیانه عدم تأمین انرژی (میلیون ریال)	هزینه طرح (میلیون ریال)
۱	پایه	۲۵U, ۲۲U, ۱۸U, ۱۵U, ۸U, ۶U, ۳U	۹	۱۶/۲۳۵۳	۶۰
۲	۱-۲	۲۵D, ۲۲U, ۱۹U, ۱۵D, ۱۰U, ۶U, ۵U	۱۰ (معلوم)	۱۶/۸۴۳۳	۴۹
	۲-۲	۳۱D, ۲۶U, ۲۲U, ۱۸U, ۹U, ۷U, ۳U	۸ (معلوم)	۱۷/۰۸۲۵	۴۹
۳	۱-۳	۲۵U, ۲۲U, ۱۸U, ۸D, ۶U	-	۱۸/۸۸۰۴	۲۵
	۲-۳	۳۱D, ۲۶D, ۲۲U, ۱۸U, ۱۴D, ۸U, ۴U	۹ و ۸ و ۶	۱۴/۷۹۶۰	۸۳
	۳-۳	۳۱D, ۲۶D, ۲۲U, ۱۸U, ۱۴D, ۸U, ۴U	۹ و ۸ و ۶	۱۴/۷۹۶۰	۸۳
۴	۱-۴	۳۱D, ۲۶U, ۲۲U, ۱۸U, ۸U, ۴U	۸ و ۷ و ۶	۱۵/۵۳۲۱	۵۹/۲۵
	۲-۴	۲۵U, ۲۲U, ۱۸U, ۸U, ۶U, ۴U	-	۱۷/۸۵۵۱	۴۲
۵	۱-۵	۲۲U, ۱۸U, ۱۵D, ۱۲U, ۸U, ۶U, ۳U	۹	۱۴/۷۷۷۸	۴۶
	۲-۵	۳۰U, ۲۵U, ۲۴U	-	-	-
	۲-۵	۲۲U, ۱۸U, ۸U, ۴U	۹	۱۸/۸۸۰۴	۵۳

۱- باتوجه به اینکه در هر شاخه دو مکان کاندید برای نصب سکسیونر وجود دارد، این دو با حروف U: سمت منبع و D: سمت بار نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در شکل (۵) آمده است.



شکل (۹) روند بهینه سازی طی نسل های مختلف در آزمایش حالت ۱ پایه.

## زیر نویس ها

- 1-Simulated Annealing
- 2-Tabu Search
- 3-Genetic Algorithm

- 4-Crossover
- 5-Mutation

## مراجع

- [1] R. E. Brown, "Electric Power Distribution Reliability", Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2002.
- [2] J. Luth, "Four rules to help locate protective devices," Electrical World, Aug. 1991, pp. 36-37.

- [3] R. Billinton and S. Jonnavithula, "Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1646-1651.
- [4] G. Celli and F. Pilo, "Optimal Sectionalizing Switches Allocation in Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1167-1172.
- [5] G. Levitin, Mazal-Tov, and D. Elmakis, "Optimal Sectionalizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithm", Electric Power System Research, Vol. 31, 1994, pp. 97-102.
- [6] A. R. Abdelaziz, A. El-Habachi, "Hierarchical Genetic Algorithm-Based Switching Device Placement in Distribution Systems", Electrotechnical Conference, 11th Mediterranean IEEE MELECON 2002, May 7-9, Cairo, Egypt, pp. 585-589.
- [7] D. M. Falcao, "Genetic algorithms applications in electrical distribution systems", Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, Vol. 2, 12-17 May 2002, pp. 1063 -1068.
- [8] P. Wang and R. Billinton, "Demand-Side Optimal Selection of Switching Devices in Radial Distribution System Planning", IEE proceedings- Generation Transmission Distribution, Vol. 145, No. 4, July 1998, pp. 409-414.
- [9] K. Nara, and et al, "A Tabu Search Algorithm For Determining Distribution Tie Lines", International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, 28 Jun-2 Feb., 1996 ,pp. 266-270.
- [10] 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.
- [11] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 2<sup>nd</sup> edition, Plenum Press, New York, 1996.
- [12] IEEE Standard 1366-1998, IEEE trial-use guide for electric power distribution reliability Index, 1998
- [13] Goldberg, David E, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machin Learning", Addison-Wesley, 1989.
- [14] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Oct. 1989, pp. 1401-1407.