

# A Bi-level Model for Low Voltage Distribution Network Planning Simultaneously with the Voltage Stability of Medium Voltage Network

Abdollah Rastgou<sup>\*</sup>, Saman Hosseini-Hemati

Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran  
E-mails: abdollah.rastgou@iau.ac.ir; saman.hosseini@iau.ac.ir  
<sup>\*</sup> corresponding author

## Short Abstract

In this paper, a model for distribution network expansion planning is presented, which is based on a bi-level model and can resolve the conflict between the medium and low voltage distribution networks in the size and optimal placement of transformers. In the proposed model, the upper and lower levels are medium and low voltage networks, respectively. The conflict between the two levels is that each network tends to determine the location and size of the transformers according to their wishes. Therefore, this paper has tried to solve this conflict, which is the size and location of transformers, by presenting a bi-level model, and to reach an optimal point that is in accordance with the desire of both levels. The objective function of the first level is the voltage stability criterion and the objective function of the second level is to reduce the operating and investment costs by considering distributed generations. Since the desired model is non-linear, it is solved using the tabu search by splitting the model into two sub-problems. To show the effectiveness of the proposed model, the problem is solved in three different scenarios and necessary comparisons have been made.

## Keywords

Distribution network planning, bi-level programming, tabu search, voltage stability.

## 1- Short Introduction

In this paper, the objective function of the first level of the proposed bi-level model is to maximize the voltage stability index in the medium voltage network, and the objective function of the lower level is to minimize the cost of operation and investment of the low voltage network. The variable that connects these two levels is the size and placement of distribution transformers. Due to the radial condition of the distribution network, the problem has been solved by using the tabu search algorithm. The main contributions of this paper can be listed as follows:

- Integrated planning of medium and low voltage networks
- Using the voltage stability index at the medium voltage level
- Using the size and location of distribution transformers as a parameter connecting high and low levels

## 2- Proposed Work and Methodology

In the bi-level problem, each level is an optimization model that is formed by an objective function and a set of constraints related to it. One of the main features of this type of optimization is the conflict between these two levels, where the decisions of one affect the decisions of the other. In the method proposed in this paper, the upper level (medium voltage network) is the maximum voltage stability index criterion and the lower level is responsible for planning the low voltage distribution network. In general, medium and low-voltage distribution networks are owned by one owner and it can be assumed that there is no conflict between participating agents. However, the contradiction in this system is due to the location and dimensions of the transformers, which are responsible for transferring power from the medium voltage network to the low voltage network. To validate the proposed model, three different scenarios are considered as follows:

- Scenario 1: study medium and low voltage networks independently
- Scenario 2: using the model without considering distributed generations
- Scenario 3: applying the model by considering distributed generations

In all scenarios, it is assumed that because the medium voltage network is connected to the transmission system, it is sufficient to supply the load and the expansion of the distribution network takes place only on the low voltage side. In the first scenario, where the medium voltage network and the low voltage network are considered independently, the planning is such that first a list of transformers is proposed, then one of them is selected and the branch connected to it is identified, and then the operating conditions are checked. If the operating limits are not violated, the objective functions are evaluated and these steps are repeated until all options of the list of connectable transformers are checked and the optimal solution of the objective functions is obtained. The second and third scenarios apply the proposed method, with the difference that in the third scenario, distributed generations are also applied.

## 3- Conclusion

In this paper, an integrated two-level model for the distribution network is presented. In most of the studies, medium voltage and low voltage distribution networks are considered as two independent networks and separate plans have been made for each; however, these two networks are not independent of each other and the effect of change in one network will affect the other network. In this article, medium-voltage and low-voltage distribution networks are included as a single system. The proposed model considers medium voltage network planning at the high level and low voltage network planning at the low level. The objective function at the high level is to maximize the voltage stability index and at the low level to reduce the investment and operation costs, which are bound to a set of restrictions. In addition, the influence of distributed generation sources is included in the low-voltage network. The proposed model of the conflict created in planning for both networks, which is the placement and size of transformers, which affects the currents circulating in both networks. When the bi-level model is solved, there is an influence on the related variables between both the upper and lower-level problems, which is provided by the transformers, because their capacity, location, and peak demand affect the solution of each level. This aspect provides the possibility of finding high-quality solutions and the results show the efficiency of the model and its solution method.

## 4- References

- [1] M. Kabirifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghaie, N. Pourghaderi, and P. Dehghanian, "A bi-level framework for expansion planning in active power distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 2639–2654, 2021.
- [2] A. Bagheri, H. Monsef, and H. Lesani, "Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 56–70, 2015.

## ارائه مدلی دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع فشار ضعیف هم‌زمان با پایداری ولتاژ شبکه فشار متوسط

عبداله راستگو

استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

سامان حسینی همتی

استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

### چکیده

در این مقاله مدلی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع انرژی الکتریکی ارائه می‌شود که مبتنی بر مدل بهینه‌سازی دوسطحی بوده و قادر است تعارض بین شبکه فشار متوسط توزیع و شبکه فشار ضعیف توزیع را در سایز و جابجایی بهینه ترانسفورماتورها برطرف نماید. در مدل پیشنهادی سطح بالا شبکه فشار متوسط و سطح پایین شبکه فشار ضعیف است. در واقع تعارض بین دو سطح این است که هر سطح تمایل دارد که مکان و سایز ترانسفورماتورها را مطابق میل خود تعیین کند؛ بنابراین، در این مقاله سعی شده است که با ارائه مدلی دوسطحی این تعارض که همان سایز و مکان ترانسفورماتورها است را برطرف نموده و به نقطه بهینه‌ای دست یافت که مطابق میل هر دو سطح باشد. تابع هدف سطح اول معیار پایداری ولتاژ و تابع هدف سطح دوم کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری با لحاظ کردن منابع تولید پراکنده است. از آنجا که مدل موردنظر غیرخطی است با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه با تجزیه مدل به دو زیر مسئله به حل آن پرداخته می‌شود. به منظور نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، در سه سناریو متفاوت مسئله موردنظر حل و مقایسه‌های لازم صورت می‌گیرد.

### کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی شبکه توزیع، برنامه‌ریزی دوسطحی، الگوریتم جستجوی ممنوعه، پایداری ولتاژ.

نام نویسنده مسئول: دکتر عبدالله راستگو

ایمیل نویسنده مسئول: [abdollah.rastgou@iau.ac.ir](mailto:abdollah.rastgou@iau.ac.ir)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

### ۱- مقدمه

سرمایه‌گذاری حداقل شود و ثانیاً از دید بهره‌برداری شبکه توزیع محدودیتی در بهره‌برداری ایجاد نکند [۱]. برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مقید به قیود فنی تعریف می‌گردد و هر طرحی که در ارتباط با شبکه‌های توزیع انجام شود باید قادر به عرضه انرژی مورد تقاضای سیستم را داشته باشد، ضمن آن که استانداردهای فنی مورد لزوم را نیز برآورده سازد و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه را کاهش دهد. برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع می‌تواند در شبکه توزیع اولیه و شبکه توزیع ثانویه به کار گرفته شود. شبکه توزیع اولیه شبکه فشار متوسط توزیع و شبکه توزیع ثانویه شبکه فشار ضعیف توزیع است. برنامه‌ریزی می‌تواند به دو صورت برنامه‌ریزی توسعه و برنامه‌ریزی تقویت بیان شود. در طرح‌های توسعه، برنامه‌ریز با توجه به قیود زیست‌محیطی مسیرهای جدیدی جهت احداث فیدها انتخاب می‌کند. در طرح‌های تقویت، شبکه در برخی فیدها تقویت می‌شود. برنامه‌ریزی مقید به قیود فنی شبکه از جمله، قیود مربوط به پخش بار، محدودیت ولتاژ شین‌ها و محدودیت‌های افت ولتاژ، محدودیت ظرفیت فیدها و پست‌ها، محدودیت در استفاده از استاندارد ترانسفورماتورها و کابل‌ها و شعاعی بودن شبکه توزیع است [۲، ۳]. برای بالا بردن بازده بهره‌برداری و تشویق سرمایه‌گذاران، برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع دست‌خوش تغییرات اساسی از دید مدیریت و مالکیت شده است. تجدید ساختار اهداف جدیدی را در شبکه وارد کرده است. تفکیک

برنامه‌ریزی شبکه قدرت در واقع زیرمجموعه‌ای از برنامه‌ریزی کلان انرژی در یک کشور است که وابسته به پارامترهای بسیاری از جمله رشد اقتصادی است. برای داشتن سیستمی پایدار در شبکه قدرت، باید همواره برنامه‌ریزی و مدیریتی صحیح صورت گیرد. در مطالعات برنامه‌ریزی، بخش‌هایی از سیستم کفایت و توانایی خود را در تأمین انرژی مصرف‌کنندگان از دست داده‌اند و هدف تعیین ویژگی، نوع، زمان ورود و محل نصب تجهیزات جدید در زمان آینده است؛ به طوری که ضمن برگرداندن کفایت‌مندی مطلوب شبکه، هزینه توسعه نیز کاهش یابد. یکی از بخش‌های برنامه‌ریزی در شبکه قدرت، برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع است که به دلیل نزدیک‌تر بودن به سمت مصرف‌کننده، نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای جلوگیری از قطعی بار و کاهش سطح قابلیت اطمینان سیستم دارد. برنامه‌ریزی شبکه توزیع یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی سیستم قدرت است که مهم‌ترین هدف آن تأمین بار الکتریکی شبکه با مشخص کردن مکان، زمان و ظرفیت احداث پست‌ها و فیدهای توزیع متعاقب رشد تقاضای بار الکتریکی در یک افق زمانی مشخص با کمترین هزینه است؛ بنابراین، برنامه‌ریزی شبکه توزیع شامل ارائه یک طرح توسعه برای تأمین اقتصادی و فنی توان الکتریکی به نحوی که سطح قابلیت اطمینان شبکه حفظ یا بهبود یابد، است. منظور از تأمین اقتصادی و فنی توان آن است که اولاً هزینه‌های

است. در [۱۸]، یک مدل دوسطحی متشکل از دو نهاد تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی و بهره‌بردار شبکه توزیع به‌منظور مدل‌سازی نحوه مشارکت خودروهای الکتریکی در بازار انرژی و تأمین بخشی از تقاضای شبکه توزیع ارائه شده است. در جدول (۱)، طبقه‌بندی مطالعات انجام شده از جنبه‌های مختلف در این خصوص آمده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی مطالعات انجام شده از جنبه‌های مختلف

مرجع	نوع شبکه	منبع DG	تابع هدف	سطح پایداری ولتاژ بار	جایابی ترانسفورماتور
[۴]	اولیه	✓	دوسطحی	چند	✗
[۵]	اولیه	✓	دوسطحی	تک	✗
[۶]	اولیه	✓	دوسطحی	تک	✗
[۷]	اولیه	✗	دوسطحی	تک	✗
[۸]	اولیه	✓	دوسطحی	چند	✗
[۹]	اولیه	✓	دوسطحی	تک	✗
[۱۰]	یکپارچه	✓	دوسطحی	چند	✓
[۱۱]	یکپارچه	✓	دوسطحی	چند	✓
[۱۲]	اولیه	✓	تک هدفه	تک	✗
[۱۳]	یکپارچه	✗	تک هدفه	تک	✗
[۱۴]	اولیه	✗	تک هدفه	تک	✗
[۱۵]	یکپارچه	✗	تک هدفه	چند	✗
[۱۶]	اولیه	✗	تک هدفه	تک	✗
[۱۷]	اولیه	✗	تک هدفه	تک	✗
[۱۸]	اولیه	✗	دوسطحی	چند	✗
مقاله	یکپارچه	✓	دوسطحی	چند	✓

در این مقاله تابع هدف سطح اول بیشینه‌سازی شاخص پایداری ولتاژ در شبکه فشار متوسط است و تابع هدف سطح پایین کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شبکه فشار ضعیف است. متغیری که این دو سطح را به هم مرتبط می‌سازد سایز و جایابی ترانسفورماتورهای توزیع است. در بخش دوم، این ساختار به‌طور کامل توضیح داده می‌شود. برای حل مسائل دوسطحی از روش KKT و یا استفاده از متغیرهای دوگان استفاده می‌شود اما وجود قید شعاعی بودن شبکه توزیع باعث می‌شود که مسئله غیرخطی شده و توسط روش‌های ریاضی نتوان آن را حل نمود؛ اگرچه همه توابع و قیود هم به‌صورت خطی باشند؛ بنابراین، با توجه به قید شعاعی بودن شبکه توزیع، توسط یکی از روش‌های فرا ابتکاری به نام الگوریتم جستجوی ممنوعه به حل مسئله پرداخته می‌شود و سعی خواهد شد که جواب بهینه را تا حد ممکن به بهینه سراسری نزدیک کرد.

نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- برنامه‌ریزی یکپارچه شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف
- بکارگیری شاخص پایداری ولتاژ در سطح فشار متوسط
- استفاده از سایز و مکان ترانسفورماتورهای توزیع به‌عنوان پارامتر ارتباط‌دهنده سطح بالا و پایین
- توسعه شبکه توزیع در سطح فشار ضعیف شامل توسعه و احداث فیدر و همچنین منابع تولید پراکنده
- بکارگیری الگوریتم جستجوی ممنوعه در حل مسئله

## ۲- ساختار مسئله پیشنهادی

در مدل مسئله دوسطحی، هر سطح یک مدل بهینه‌سازی است که توسط

بخش‌های مختلف سبب بروز تعارض‌های گوناگونی در بین بازیگران بازار شده است. در این شرایط ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی سازگار با نیازمندی‌های جدید احساس می‌گردد. روش‌های کلاسیک که با حداقل‌سازی هزینه‌ها، برنامه‌ریزی را با یک مسئله بهینه‌سازی با یک تابع هدف مدل می‌کنند دیگر قادر به پاسخ‌گویی نیازمندی‌های جدید نیستند. یکی از موارد مهم در بحث توسعه شبکه‌های توزیع جایابی بهینه ترانسفورماتورها است. در مباحث کلاسیک این مورد فقط به دید کاهش تلفات در نظر گرفته می‌شد و همچنین از دید شبکه فشار متوسط این برنامه‌ریزی لحاظ می‌شد. اکثر مطالعات صورت گرفته در سطح ولتاژ فشار متوسط (شبکه اولیه) و یا فقط در سطح ولتاژ فشار ضعیف (شبکه ثانویه) است و مطالعات کمی هر دو شبکه را با هم لحاظ نموده‌اند. در مطالعات انجام‌شده شبکه توزیع را در حل مسئله بهینه‌سازی به‌صورت دو شبکه مجزا یا مستقل در نظر گرفته و یک مسئله سرتاسری با یک بهینه‌سازی تک‌هدفه و با چندهدفه را بیان کرده‌اند درحالی‌که این دو شبکه از هم مستقل نبوده و تغییر در یک شبکه اثر متقابلی بر شبکه دیگر خواهد گذاشت و به‌بیان‌دیگر تأثیر متقابل برنامه‌ریزی در هر کدام از شبکه‌ها جدای از نیازمندی‌های خاص خود بر روی شبکه دیگر صرف‌نظر شده است؛ از این‌رو یکی از ابزارهای مناسب برای برنامه‌ریزی هم‌زمان در هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف استفاده از مسائل بهینه‌سازی دوسطحی است. مسئله بهینه‌سازی دوسطحی، نوع خاصی از مسائل بهینه‌سازی است که در آن یک سطح در سطح دیگری تعبیه شده است و ارتباط بین دو سطح از طریق یک پارامتر برقرار می‌شود. مسئله بیرونی معمولاً به‌عنوان بهینه‌سازی سطح بالا و مسئله بهینه‌سازی داخلی معمولاً به‌عنوان بهینه‌سازی سطح پایین شناخته می‌شود. این مسائل شامل دو نوع متغیر است که به آن‌ها متغیرهای سطح بالا و پایین گفته می‌شود. در [۴]، یک مدل دوسطحی برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع پیشنهاد شده است که هدف سطح بالا بیشینه‌سازی سطح رفاه اجتماعی و هدف سطح پایین افزایش مشارکت صاحبان منابع تولید پراکنده در تولید توان الکتریکی است. در [۵]، یک مدل احتمالی دوسطحی برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع پیشنهاد شده است که سطح ریسک اقتصادی مرتبط با منابع تجدیدپذیر انرژی را کمی و کنترل می‌کند. مدل دوسطحی ارائه‌شده در [۶] در حضور منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده‌ها است؛ به‌طوری‌که سطح بالا شامل تصمیم‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت و سطح پایین شامل استراتژی‌های بهره‌برداری کوتاه‌مدت است. در [۷]، یک مدل دوسطحی توزیع ارائه شده است که در سطح بالا شرکت‌های توزیع در مورد استراتژی‌های سرمایه‌گذاری خود تصمیم می‌گیرند که منجر به سیگنال تقاضا برای بخش سطح پایین می‌شود. در [۸]، یک مدل دوسطحی با چند سطح پایین ارائه شده است که سطح بالا بهره‌برداری توسعه و قابلیت اطمینان را لحاظ و سایر عوامل شرکت‌کننده در بهره‌برداری توسعه در سطح پایین انجام می‌شود. در [۹]، یک مدل دوسطحی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با در نظر گرفتن اهداف مختلف اپراتور شبکه توزیع و مالکان پارکینگ خودروهای الکتریکی پیشنهاد شده است. در [۱۰] یک مدل دوسطحی با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در سطح بالا و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری در سطح پایین در حضور عدم قطعیت‌های بار الکتریکی و منابع تجدیدپذیر انرژی آمده است. در [۱۱]، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل مدل دوسطحی با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در هر دو سطح پرداخته شده است. در [۱۲]، برنامه‌ریزی شبکه توزیع یکپارچه در حضور منابع تولید پراکنده، عدم قطعیت‌ها و قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. در [۱۳]، [۱۴]، برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه به‌ترتیب با استفاده از یک روش خطی آمیخته عدد صحیح و یک رویکرد اکتشافی حل شده است. در [۱۵]، [۱۶]، برنامه‌ریزی یکپارچه برای بهبود قابلیت اطمینان به کار گرفته شده است. در [۱۷]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع یکپارچه در حضور منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده

یک‌فاز و سه فاز نشان داده شده‌اند.

$$\max VSI(i+1) = \sum_{i=1}^{NB-1} V_i^4 - 4(P_{i+1}X_i - Q_{i+1}R_i)^2 - 4(P_{i+1}R_i + Q_{i+1}X_i)^2 V_i^2 \quad (1)$$

Subject to:

$$S_{i,j}^S = S_{i,j}^{DT} + V_{i,j} I_{ij}^* \quad \forall i \in \Omega_{PN}; \forall l \in \Omega_{NL} \quad (2)$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,j} \leq V_i^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{PN}; \forall l \in \Omega_{NL} \quad (3)$$

$$I_{ij,l} \leq I_{ij}^{\max} \quad \forall ij \in \Omega_{PF}; \forall l \in \Omega_{NL} \quad (4)$$

$$\sum_{d \in \Omega_{TD}} \sigma_{i,d}^{ND} \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_{DT} \quad (5)$$

$$\min \left( \begin{aligned} & \sum_{ij \in \Omega_{NS}} \sum_{c \in \Omega_{TS}} C_{ij,c}^{NS} \sigma_{ij,c}^{NS} + \sum_{ij \in \Omega_{ES}} \sum_{c \in \Omega_{TS}} C_{ij,c}^{ES} \sigma_{ij,c}^{ES} + \\ & \sum_{i \in \Omega_{NG}} \sum_{g \in \Omega_{TG}} C_{ig}^{NG} \sigma_{i,g}^{NG} + \\ & \sum_{l=1}^{NL} \sum_{ij \in \Omega_{SC}} \sum_{c \in \Omega_{TS}} R_{ij}^c \times \left[ |I_{ij,l}^{abcn}|^2 (\sigma_{ij,c}^{NS} + \sigma_{ij,c}^{ES}) \right] + \\ & \sum_{l=1}^{NL} \sum_{i \in \Omega_{DT}} \sum_{d \in \Omega_{TD}} \left[ S_{i,d}^{fe} + S_{i,d}^{cu} \left( \frac{S_{i,d}^{DT}}{S_{i,d}^{\max}} \right)^2 \right] \end{aligned} \right) \quad (6)$$

Subject to:

$$S_{i,j}^{DT} = S_{i,j}^{SD} - S_{i,j}^G + \sum_{j \in \Omega_{SN}} V_{i,j}^{abcn} \left[ \sum_{c \in \Omega_{TS}} (\sigma_{ij,c}^{NS} + \sigma_{ij,c}^{ES}) I_{ij,l}^{abcn*} \right] \quad (7)$$

$$\forall i \in \Omega_{SN}; \forall l \in \Omega_{NL} \quad (8)$$

$$I_{ij,l}^{abcn} \leq I_{ij,c}^{\max} \quad \forall ij \in \Omega_{SC}; \forall l \in \Omega_{NL}; \forall c \in \Omega_{TS} \quad (8)$$

$$S_{i,d}^{DT} \leq S_{i,d}^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{DT}; \forall l \in \Omega_{NL}; \forall d \in \Omega_{TD} \quad (9)$$

$$S_{i,j}^{DT} = \left[ S_{i,d}^{fe} + S_{i,d}^{cu} \left( \frac{S_{i,d}^{DT}}{S_{i,d}^{\max}} \right)^2 \right] + \sum_{l=1}^{NL} \sum_{ij \in \Omega_{SC}} \sum_{c \in \Omega_{TS}} R_{ij}^c \left[ |I_{ij,l}^{abcn}|^2 \right] + S_{i,j}^{SD} \quad (10)$$

$$\forall ij \in \Omega_{SC}; \forall l \in \Omega_{NL}; \forall i \in \Omega_{DT} \quad (10)$$

$$S_{i,j}^G \leq S_{i,g}^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{NG}; \forall l \in \Omega_{NL}; \forall g \in \Omega_{TG} \quad (11)$$

$$V_{i-abcn}^{\min} \leq V_{i,j}^{abcn} \leq V_{i-abcn}^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{SN}; \forall l \in \Omega_{NL} \quad (12)$$

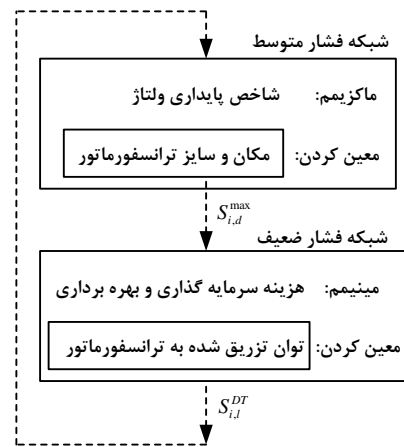
$$\sum_{c \in \Omega_{TS}} (\sigma_{ij,c}^{NS} + \sigma_{ij,c}^{ES}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_{SC} \quad (13)$$

$$\sum_{g \in \Omega_{TG}} \sigma_{i,g}^{NG} \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_{NG} \quad (14)$$

$$\text{Radial distribution network} = 1 \quad (15)$$

در سطح بالا که توسط روابط (۱)-(۵) آمده است، یک شاخص ریاضی به نام شاخص پایداری ولتاژ (VSI) تعریف شده است که طبق رابطه (۱) در شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثبات ریاضی این شاخص در شبکه‌های توزیع در [۱۹] آمده است. در شکل (۲)، نمودار شاخص پایداری ولتاژ در شبکه توزیع به ازای مقادیر مختلف پارامترهای فیدر آمده است. برای عملکرد پایدار یک شبکه، VSI باید در شین‌های شبکه مثبت باشد و بنابراین هرچه میزان آن بالاتر باشد بهتر است [۱۹].

یک تابع هدف و مجموعه محدودیت‌های مربوط به آن تشکیل شده است. یکی از ویژگی‌های اصلی این نوع بهینه‌سازی تضاد (تعارض) بین این دو سطح است که در آن تصمیمات یکی بر تصمیمات دیگری تأثیر می‌گذارد. در روش پیشنهادی در این مقاله، سطح بالا (شبکه فشار متوسط) معیار شاخص پایداری ولتاژ را بیشینه و سطح پایین مسئول برنامه‌ریزی شبکه توزیع فشار ضعیف است. به‌طور کلی، شبکه‌های توزیع فشار متوسط و ضعیف متعلق به یک مالک است و می‌توان تصور کرد که بین عوامل مشارکت‌کننده (در واقع فقط یک عامل) تضادی وجود ندارد. با این حال، تضاد در این کار با توجه به مکان و ابعاد ترانسفورماتورها است که در واقع مسئول انتقال توان از شبکه فشار متوسط به شبکه فشار ضعیف هستند. این وضعیت در جنبه‌های فنی و اقتصادی در برنامه‌ریزی هر دو شبکه منعکس می‌شود. مکان مناسب یک ترانسفورماتور برای یک شبکه فشار ضعیف ممکن است برای شبکه ولتاژ متوسط نامناسب باشد و باعث اندازه نامناسب عناصر الکتریکی آن‌ها شود. از سوی دیگر، مکان ترانسفورماتور (از دیدگاه سیستم فشار متوسط)، می‌تواند بر تلفات فنی در شبکه فشار ضعیف تأثیر بگذارد که باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. به‌طور مشابه، اندازه ترانسفورماتور به‌طور مستقیم بر جنبه‌های فنی هر دو شبکه تأثیر می‌گذارد. مقدار اسمی یک ترانسفورماتور، الزامات فنی را در شبکه توزیع فشار متوسط به‌منظور رعایت جنبه‌های تنظیم ولتاژ تحمیل می‌کند. برای اجتناب از این موقعیت‌ها، مدل دوسطحی پیشنهادی تعامل دو شبکه را به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد و امکان یافتن یک جواب بهینه را فراهم می‌کند که تعادل در برنامه‌ریزی بین دو شبکه را تضمین می‌کند. در یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی، سطح اول اولین حرکت را با پیش‌بینی تصمیم سطح پایین انجام می‌دهد. پس از آن سطح بالا بر اساس حرکت سطح پایین تصمیم می‌گیرد. در شکل (۱)، ساختار به‌کاررفته در این مقاله بین هر دو سطح مشاهده می‌شود. در این شکل، سطح اول یا همان شبکه فشار متوسط مکان و اندازه‌ای را برای ترانسفورماتور (پیشنهاد می‌کند و در ادامه شبکه فشار ضعیف به این استراتژی واکنش نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، شبکه فشار ضعیف با استفاده از حرکت شبکه فشار متوسط برنامه‌ریزی می‌شود که باعث می‌شود مقادیر مختلف توان موردنیاز برای تغذیه بارهای فشار ضعیف تخصیص یابد. هنگامی که مسئله بهینه‌سازی سطح پایین انجام شد، شبکه فشار ضعیف مقدار توان استفاده شده برای هر ترانسفورماتور ( $S_{i,d}^{DT}$ ) را به سطح فشار متوسط بازمی‌گرداند. در این مرحله می‌توان شبکه فشار متوسط را برنامه‌ریزی کرد.

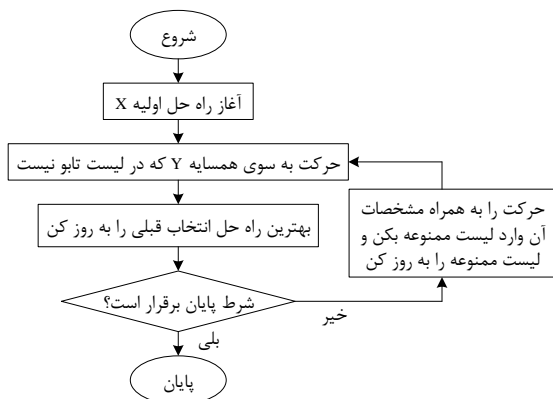


شکل ۱- ساختار مسئله دوسطحی پیشنهادی

### ۳- فرمول‌بندی مسئله

فرمول‌بندی ریاضی مسئله دوسطحی پیشنهادی در روابط (۱)-(۱۵) ارائه شده است که در آن شبکه‌های فشار متوسط و فشار ضعیف به ترتیب با مدل‌های

می‌شود؛ به این معنا که حرکت قبل که به وسیله آن به جواب همسایه حرکت صورت گرفت در فهرست ممنوعه قرار داده می‌شود تا از بازگشت مجدد الگوریتم به آن جواب و ایجاد سیکل جلوگیری شود. در واقع فهرست ممنوعه ابزاری در الگوریتم جستجوی ممنوعه است که توسط آن از قرار گرفتن الگوریتم در بهینه محلی جلوگیری می‌شود. پس از قرار دادن حرکت قبلی در فهرست ممنوعه، تعدادی از حرکت‌هایی که قبلاً در فهرست ممنوعه قرار گرفته بودند از فهرست خارج می‌شوند. حرکت از جواب فعلی به جواب همسایه تا جایی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه (به‌طور مثال محدودیت تعداد حرکت به جواب همسایه) دیده شود. فلوجارت این الگوریتم در شکل (۳) آمده است. به‌منظور کدگذاری مناسب سطح فشار متوسط، یک طرح کدگذاری جدید مطابق شکل (۴) پیشنهاد شده است. این بردار از یک قسمت که محل و ظرفیت ترانسفورماتورها است تشکیل شده است. به روشی مشابه، سطح پایین با استفاده از یک برداری مطابق شکل (۵) که حاوی اطلاعات شبکه ولتاژ پایین است، کدگذاری می‌شود.



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم جستجوی ممنوعه

ترانسفورماتور توزیع

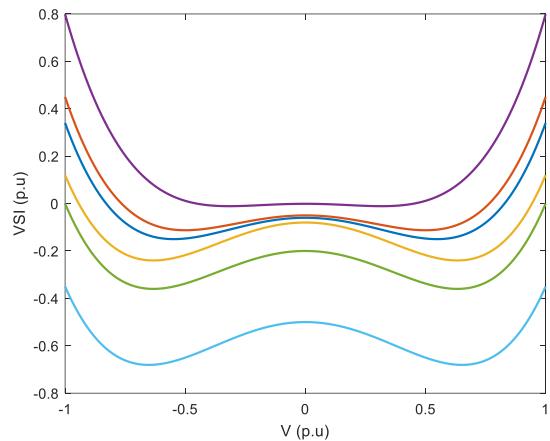
1	...	n5
$\sigma_{1,5}^{max}$	...	$\sigma_{n,5}^{max}$
5	...	1

شکل ۴- کدگذاری سطح فشار متوسط (سطح بالا)

خطوط			شین			تولید پراکنده									
1	...	m1	1	...	m2	a	b	c	...	a	b	c	1	...	m4
$\sigma_{1,1}^{ES}$	$\sigma_{m1,2}^{ES}$	$\sigma_{1,3}^{NS}$	$\sigma_{m2,1}^{NS}$	$\sigma_{1,a}^{SD}$	$\sigma_{1,b}^{SD}$	$\sigma_{1,c}^{SD}$	$\sigma_{m3,a}^{SD}$	$\sigma_{m3,b}^{SD}$	$\sigma_{m3,c}^{SD}$	$\sigma_{1,4}^{NG}$	$\sigma_{m4,2}^{NG}$				
1	...	2	3	...	1	1	3	2	...	2	1	3	4	...	2

شکل ۵- کدگذاری سطح فشار ضعیف (سطح پایین)

این بردار از سه قسمت تشکیل شده است که بخش اول محل و اندازه خطوط موجود و جدید (اندازه  $m_1+m_2$ )، بخش دوم محل بارگذاری در هر فاز (اندازه  $m_3$ ) و بخش سوم شامل مکان و ظرفیت DGها (اندازه  $m_4$ ) است. کدگذاری به‌کاررفته برای هر دو سطح از اعداد صحیح استفاده می‌کند که در آن هر عدد با ظرفیت‌های متفاوتی مرتبط است. صفر نشان می‌دهد که عنصر مربوطه برای نصب پیشنهاد نمی‌شود. در شکل (۵)، اعداد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به اتصال بار به فازهای a، b و c مرتبط هستند. پیکربندی اولیه برای هر دو سطح به این صورت به‌دست می‌آید که ابتدا از ترانسفورماتور شروع می‌شود و در هر مرحله یک انشعاب جدید به شبکه فشار ضعیف متصل می‌شود. هنگامی که یک



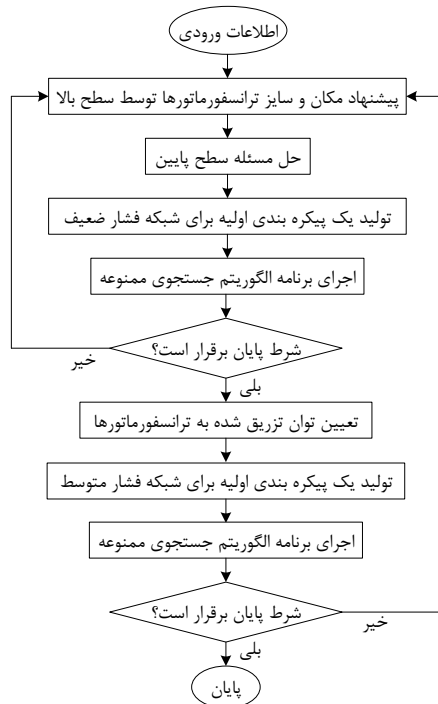
شکل ۲- نمودار شاخص VSI به ازای مقادیر مختلف پارامترهای فیدر

مجموعه‌ای از محدودیت‌ها در روابط (۲)-(۵) برای سطح بالا آمده است به‌طوری که رابطه (۲) تعادل گره‌ای را که توسط قوانین کیرشهف ارائه شده است لحاظ می‌کند. رابطه (۳)، محدودیت ولتاژ در تمام گره‌ها، رابطه (۴) بیانگر محدودیت بهره‌برداری از خطوط است و رابطه (۵) تضمین می‌کند که فقط یک نوع ترانسفورماتور را می‌توان برای نصب در همان مکان انتخاب کرد. سطح پایین توسط روابط (۶)-(۱۵) مدل‌سازی شده است که دارای یک تابع هدف برای به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری دارد. تابع هدف رابطه (۶) دارای پنج عبارت است. عبارت اول و دوم به ترتیب هزینه‌های نصب خطوط جدید و ارتقاء خطوط موجود هستند. عبارت سوم هزینه نصب منابع تولید پراکنده جدید است. عبارت چهارم هزینه بهره‌برداری شبکه (تلفات انرژی در خطوط) و در نهایت عبارت پنجم هزینه بهره‌برداری مربوط به تلفات انرژی در ترانسفورماتورها است. محدودیت‌های سطح پایین در روابط (۷)-(۱۲) آمده است. رابطه (۷)، تعادل گره‌ای را که توسط قوانین کیرشهف ارائه شده است لحاظ می‌کند. رابطه (۸)، حد گرمایی خطوط شبکه فشار ضعیف و رابطه (۹)، محدودیت بهره‌برداری از ترانسفورماتورها است. رابطه (۱۰)، میزان توان تزریق‌شده به ترانسفورماتورها را تعیین می‌کند. رابطه (۱۱)، محدودیت بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده است. رابطه (۱۲) محدودیت ولتاژ در تمام گره‌های شبکه فشار ضعیف است. رابطه (۱۳) تضمین می‌کند که فقط یک نوع سیم می‌تواند بین دو گره نصب شود. رابطه (۱۴) تضمین می‌کند که تنها یک نوع منبع تولید پراکنده می‌تواند در یک گره شبکه نصب شود و در نهایت رابطه (۱۵)، بررسی قید شعاعی بودن شبکه فشار ضعیف را تضمین می‌کند. لازم به ذکر است که در این مقاله از روش موجود در [۲۰] برای ارزیابی قید شعاعی بودن شبکه توزیع استفاده شده است.

#### ۴- روش حل مسئله

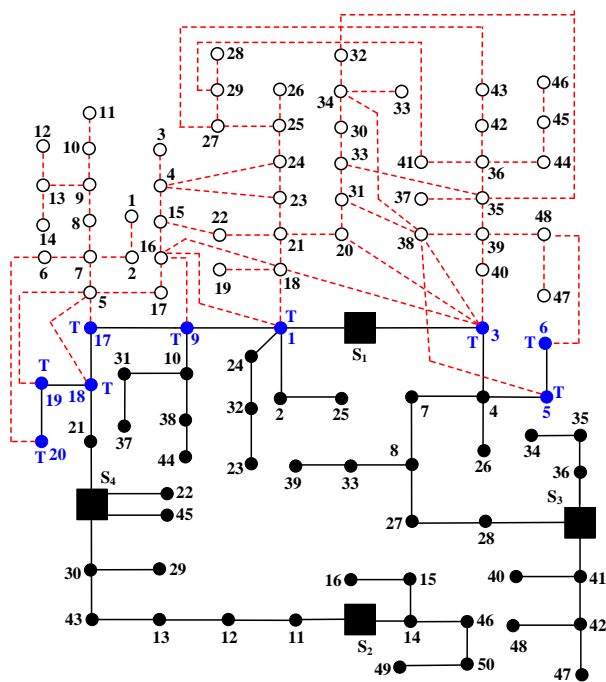
مدل بهینه‌سازی پیشنهادی یک مدل غیرخطی آمیخته عدد صحیح است و برای حل آن از الگوریتم جستجوی ممنوعه (TSA) استفاده شده است. این الگوریتم توسط آقای Glover پیشنهاد شده است [۲۱]. این الگوریتم ابتدا از یک جواب اولیه شروع به حرکت می‌کند. سپس الگوریتم بهترین جواب همسایه را از میان همسایه‌های جواب فعلی انتخاب می‌کند. در صورتی که این جواب در فهرست ممنوعه قرار نداشته باشد، الگوریتم به جواب همسایه حرکت می‌کند؛ در غیر این صورت الگوریتم معیاری به نام معیار تنفس را چک خواهد کرد. بر اساس معیار تنفس اگر جواب همسایه از بهترین جواب یافت شده تاکنون بهتر باشد، الگوریتم به آن حرکت خواهد کرد، حتی اگر آن جواب در فهرست ممنوعه باشد. پس از حرکت الگوریتم به جواب همسایه، فهرست ممنوعه به‌روزرسانی

سفید توخالی با مشخصات جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۶- فلوجارت مراحل انجام کار

نقاط کاندیدا برای نصب ترانسفورماتورها با علامت T و رنگ آبی نشان داده شده است. خطوط خط چین قرمز رنگ کاندیداهای نصب خطوط در سمت فشار ضعیف هستند. در جدول های (۴) تا (۶) به ترتیب اطلاعات مربوط به خطوط کاندیدا، ترانسفورماتورها و منابع تولید پراکنده آمده است. کلیه نقاط شبکه فشار ضعیف کاندیدای نصب منابع تولید پراکنده هستند. همچنین ضریب توان  $(\cos\phi)$  کلیه بارها ۰/۸ لحاظ شده است. حداکثر تنظیم ولتاژ برای هر دو شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف ۱۰٪ است.



شکل ۷- شبکه توزیع مورد مطالعه

انشعاب متصل می شود، محدودیت های بهره برداری ارزیابی می شود. این استراتژی زمانی متوقف می شود که تمام گره ها به شبکه متصل شوند. تأکید می شود که فقط توپولوژی های امکان پذیر در پیکربندی اولیه مجاز هستند. ساختار همسایگی سطح بالایی ولتاژ شین ها است. برای سطح پایین تر معیارهای همسایگی ارتقا و نصب خطوط جدید، تعادل فاز و نصب منابع تولید پراکنده هستند. از ترانسفورماتورها به عنوان معیارهای همسایگی استفاده نمی شوند زیرا پیوند بین هر دو شبکه در مدل هستند. اندازه و محل ترانسفورماتور توسط سطح بالا، باید زمانی که سطح پایین حل می شود یکسان باشد. هنگامی که سطح پایین تر، توان تزریق شده در یک ترانسفورماتور را به سطح بالا برمی گرداند، این مقدار باید زمانی که سطح بالا حل می شود یکسان باشد. پیکربندی ها توسط روش جریمه ها ارزیابی می شوند (پیکربندی های غیر قابل اجرا مجاز هستند اما عملکردهای هدف مربوطه آن ها جریمه می شوند). مجموع تابع هدف به اضافه هزینه های جریمه محدودیت های نقض شده مربوطه را تابع تناسب می گویند که مطابق روابط (۱۶) و (۱۷) هستند.

$$F_{fMV} = Eq.(1) + f_p V_{MV} (\Delta V_{MV}) + f_p I_{MV} (\Delta I_{MV}) + f_p S_{MV} (\Delta S_{MV}) \quad (16)$$

$$F_{fLV} = Eq.(6) + f_p V_{LV} (\Delta V_{LV}) + f_p I_{LV} (\Delta I_{LV}) + f_p S_{LV} (\Delta S_{LV}) \quad (17)$$

که  $f_p I$  و  $f_p V$  به ترتیب جریمه های تخطی از ولتاژ، ظرفیت خط و ظرفیت ترانسفورماتورها هستند. عبارت های زیرنویس شده با  $LV$  و  $MV$  به ترتیب مربوط به شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف هستند. این عوامل مقداری را که هر یک از محدودیت ها نقض شده است توسط عامل  $\Delta$  چند برابر می کند. اگر هیچ محدودیتی نقض نشود،  $\Delta$  صفر است. همان طور که قبلاً ذکر شد، روش زمانی شروع می شود که سطح بالایی مکان و اندازه ترانسفورماتورها ( $S_{id}^{max}$ ) را پیشنهاد کند. این مقادیر به عنوان پارامترهای سطح پایین در نظر گرفته می شوند و با این اطلاعات می توان مسئله سطح پایین را حل نمود. سپس، پیکربندی های اولیه برای هر شبکه سطح پایین به دست می آید و تابع هدف آن ها با استفاده از رابطه (۶) تعیین می شود. پس از آن، جستجوی محلی با ایجاد محله از پیکربندی اولیه آغاز می شود. یک همسایگی کاهش یافته به دست می آید و پیکربندی های آن با استفاده از توابع تناسب ارزیابی می شود. به این ترتیب بهترین پیکربندی انتخاب می شود و به پیکربندی جدید تبدیل می شود. این مراحل با رسیدن به معیار توقف پایان می یابد. بهترین تابع هدف ذخیره می شود و توان تزریق شده به ترانسفورماتورها (تقاضای توان و تلفات توان در ترانسفورماتورها و خطوط شبکه فشار ضعیف) به سطح بالایی ( $S_{id}^{DT}$ ) بازمی گردد. با تعیین مکان، سائز و توان تزریق شده در ترانسفورماتورها مسئله سطح بالا آماده حل شدن است و به همین ترتیب مثل سطح پایین، همان مراحل برای سطح بالا به کار گرفته می شود. در ابتدا، تابع هدف آن با استفاده از رابطه (۱) تعیین و در مرحله بعد، همسایگی کاهش یافته به دست می آید و این پیکربندی ها با استفاده از تابع تناسب ارزیابی می شوند. در نهایت پیکربندی بهینه به عنوان بهترین راه حل انتخاب می شود. مراحل اجرای کار در شکل (۶) نشان داده شده است.

#### ۵- نتایج عددی

برای نشان دادن اثربخشی مدل پیشنهادی، به یک شبکه توزیع نمونه نشان داده شده در شکل (۷) اعمال می شود. قسمت فشار متوسط یک شبکه ۳۳ کیلوولت ۵۴ گره است که از ۵۰ نقطه بار تشکیل و توسط دایره های توپر با مشخصات جدول (۲) نشان داده شده است. مربع های توپر پست های فوق توزیع هستند که با  $S_1, S_2, S_3$  و  $S_4$  نشان داده شده اند. قسمت فشار ضعیف یک شبکه ۴۸ گره ۱۱ کیلوولتی است که از ۴۸ نقطه بار تشکیل شده که با دایره های

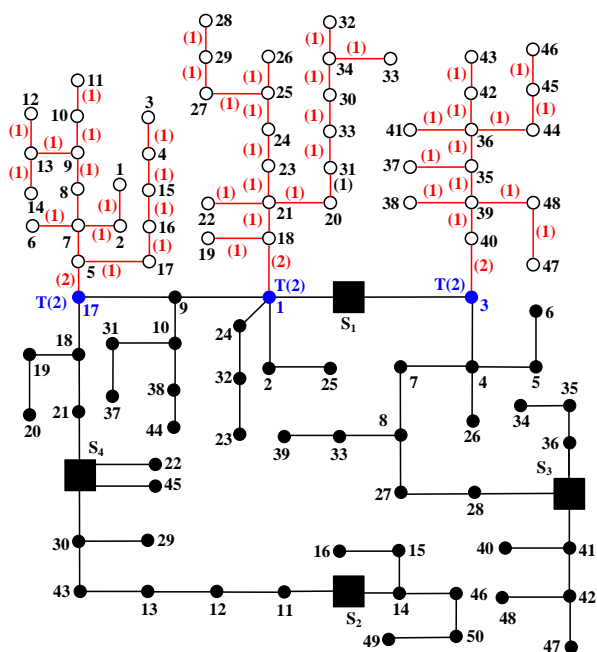
جدول ۶- اطلاعات مربوط به نوع منابع تولید پراکنده

نوع	سایز واحد (مگاوات آمپر)	هزینه سرمایه‌گذاری (هزار دلار)
۱	۱	۵۰۰
۲	۱/۵	۴۵۰
۳	۱	۴۰۰
۴	۰/۸	۴۷۰
۵	۱	۸۰۰
۶	۱	۸۰۰

افق برنامه‌ریزی ۵ سال و منحنی مدت بار در سه سطح بار ۱۰۰، ۶۰ و ۳۰ درصد پیک تقاضا لحاظ شده است. نرخ تورم ۱۰٪ و هزینه انرژی ۰/۱۵ دلار بر کیلووات ساعت است. ضرایب جریمه به ترتیب ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۴۰۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ برای  $f_{PDMV}$ ،  $f_{PDMV}$ ،  $f_{PDMV}$ ،  $f_{PDMV}$ ،  $f_{PDMV}$  هستند. معیار توقف الگوریتم مورداستفاده برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، سه سناریو مختلف به شرح زیر لحاظ می‌شود:

- سناریو اول: مطالعه شبکه‌های فشار متوسط و ضعیف به‌طور مستقل
- سناریو دوم: به‌کارگیری مدل بدون لحاظ کردن منابع تولید پراکنده
- سناریو سوم: به‌کارگیری مدل با لحاظ کردن منابع تولید پراکنده

در همه سناریوها فرض شده که شبکه فشار متوسط به شبکه فوق توزیع متصل است، بنابراین کفایت لازم برای تأمین بار را دارد و توسعه شبکه فقط در سمت فشار ضعیف صورت می‌گیرد. در سناریو اول که شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به‌طور مستقل لحاظ شده‌اند، برنامه‌ریزی به این صورت است که ابتدا فهرستی از ترانسفورماتورها پیشنهاد و سپس یکی از آن‌ها انتخاب و شاخه متصل به آن شناسایی می‌شود و در ادامه شرایط بهره‌برداری بررسی می‌شود. اگر محدودیت‌های بهره‌برداری نقض نشد، توابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفته و این مراحل تا زمانی تکرار می‌شود که همه گزینه‌های لیست ترانسفورماتورهای قابل اتصال بررسی و جواب بهینه توابع هدف حاصل شود. سناریوهای دوم و سوم روش پیشنهادی را اعمال می‌کنند با این تفاوت که در سناریو سوم منابع تولید پراکنده هم اعمال شده‌اند. منابع تولید پراکنده به‌عنوان گره‌های PQ مدل شده‌اند. شکل‌های (۸) تا (۱۰) به ترتیب جواب‌های حاصل از سناریوهای یک تا سه هستند.



شکل ۸- پیکره‌بندی حاصل از سناریو اول

جدول ۲- میزان بار نقاط شبکه فشار متوسط (کیلووات)

گره	بار	گره	بار	گره	بار	گره	بار	گره	بار
۱	۷۰۰	۱۱	۳۰۰	۲۱	۸۰۰	۳۱	۷۰۰	۴۱	۵۰۰
۲	۶۰۰	۱۲	۴۰۰	۲۲	۶۰۰	۳۲	۶۰۰	۴۲	۴۰۰
۳	۵۰۰	۱۳	۴۰۰	۲۳	۴۰۰	۳۳	۵۰۰	۴۳	۵۰۰
۴	۵۰۰	۱۴	۷۰۰	۲۴	۵۰۰	۳۴	۴۰۰	۴۴	۶۰۰
۵	۶۰۰	۱۵	۸۰۰	۲۵	۹۰۰	۳۵	۹۰۰	۴۵	۸۰۰
۶	۷۰۰	۱۶	۹۰۰	۲۶	۵۰۰	۳۶	۳۰۰	۴۶	۸۰۰
۷	۵۰۰	۱۷	۷۰۰	۲۷	۵۰۰	۳۷	۸۰۰	۴۷	۴۰۰
۸	۹۰۰	۱۸	۵۰۰	۲۸	۷۰۰	۳۸	۷۰۰	۴۸	۸۰۰
۹	۵۰۰	۱۹	۶۰۰	۲۹	۸۰۰	۳۹	۷۰۰	۴۹	۵۰۰
۱۰	۹۰۰	۲۰	۸۰۰	۳۰	۹۰۰	۴۰	۴۰۰	۵۰	۸۰۰

جدول ۳- میزان بار نقاط شبکه فشار ضعیف (کیلووات)

گره	بار	گره	بار	گره	بار	گره	بار	گره	بار
۱	۶۲۰	۱۱	۵۳۰	۲۱	۷۲۰	۳۱	۷۰۰	۴۱	۵۸۰
۲	۶۴۰	۱۲	۷۰۰	۲۲	۷۰۰	۳۲	۷۵۰	۴۲	۷۹۰
۳	۷۷۰	۱۳	۷۰۰	۲۳	۷۰۰	۳۳	۷۲۰	۴۳	۷۰۰
۴	۵۲۰	۱۴	۶۰۰	۲۴	۶۸۰	۳۴	۷۴۰	۴۴	۶۸۰
۵	۶۲۰	۱۵	۴۵۰	۲۵	۶۰۰	۳۵	۷۵۰	۴۵	۶۰۰
۶	۴۰۰	۱۶	۷۷۰	۲۶	۴۰۰	۳۶	۶۰۰	۴۶	۶۸۰
۷	۶۰۰	۱۷	۷۵۰	۲۷	۷۴۰	۳۷	۶۰۰	۴۷	۶۲۰
۸	۶۰۰	۱۸	۷۵۰	۲۸	۴۰۰	۳۸	۲۵۰	۴۸	۶۲۰
۹	۶۴۰	۱۹	۶۰۰	۲۹	۴۰۰	۳۹	۴۰۰		
۱۰	۴۰۰	۲۰	۶۰۰	۳۰	۴۰۰	۴۰	۳۵۰		

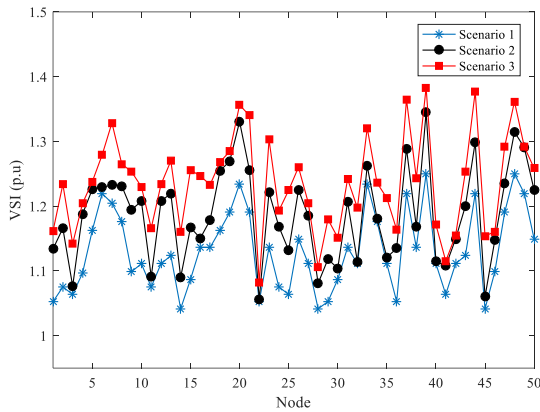
جدول ۴- اطلاعات خطوط قابل نصب در شبکه فشار ضعیف

نوع	مقاومت ( $\Omega/\text{km}$ )	راکتانس ( $\Omega/\text{km}$ )	ظرفیت (A)	هزینه (k\$/km)
۱	۰/۷۵۰۰	۰/۱۷۶۴	۶۱	۱۷
۲	۰/۴۷۹۶	۰/۱۶۷۳	۸۴	۲۲
۳	۰/۳۰۸۰	۰/۱۵۹۶	۱۱۴	۳۰
۴	۰/۱۹۷۲	۰/۱۴۹۶	۱۵۶	۴۲
۵	۰/۱۲۰۸	۰/۱۴۴۲	۲۰۸	۵۴
۶	۰/۰۷۲۳	۰/۱۲۶۲	۳۰۳	۸۵
۷	۰/۰۴۸۷	۰/۱۲۱۷	۴۰۰	۱۲۵
۸	۰/۰۴۰۵	۰/۱۱۹۶	۴۵۳	۱۴۰
۹	۰/۰۳۵۰	۰/۱۱۸۰	۵۰۰	۱۶۵
۱۰	۰/۰۲۴۷	۰/۱۱۴۰	۶۴۵	۲۲۰
۱۱	۰/۰۱۹	۰/۱۱	۷۰۰	۲۷۰
۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۹	۸۵۰	۳۱۰

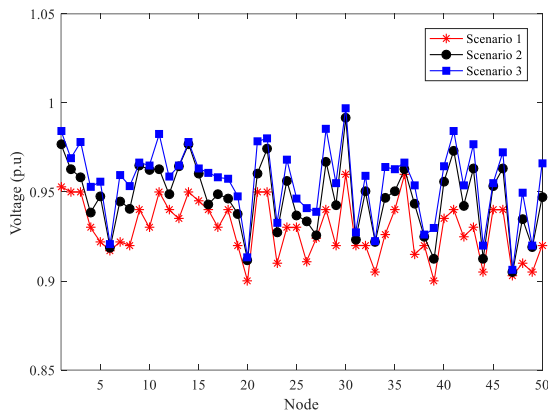
جدول ۵- اطلاعات مربوط به نوع ترانسفورماتورها

نوع	ماکزیمم ظرفیت (مگاوات آمپر)	هزینه (k\$)
۱	۴	۵۰۰
۲	۶	۸۰۰
۳	۸	۱۰۰۰
۴	۱۰	۱۱۰۰

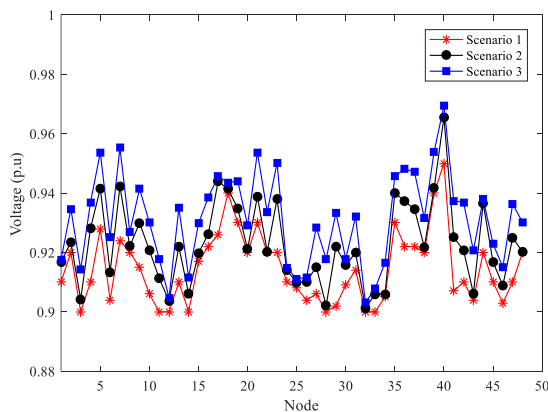
می‌شود و دو سناریو دیگر از مدل دوسطحی استفاده می‌کنند. تفاوت این دو مورد در این است که مورد آخر نفوذ منبع تولید پراکنده در شبکه فشار ضعیف را لحاظ می‌کند.



شکل ۱۱- تابع هدف شاخص پایداری ولتاژ در سناریوهای مختلف



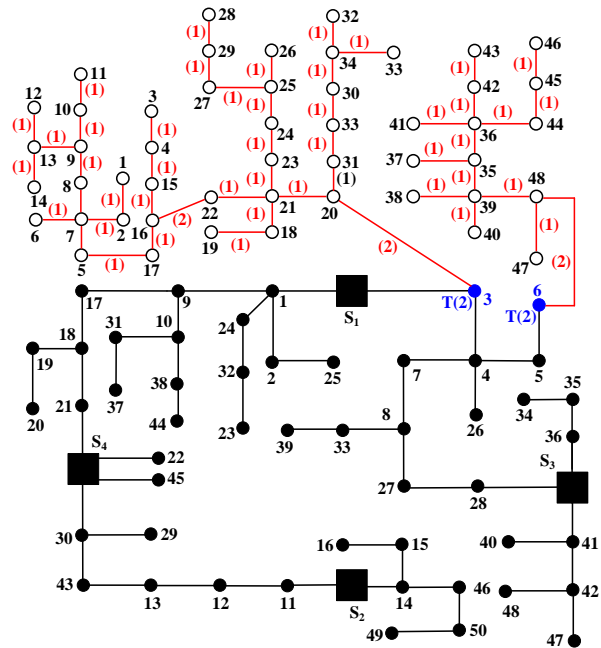
شکل ۱۲- ولتاژ نقاط شبکه فشار متوسط در سناریوهای مختلف



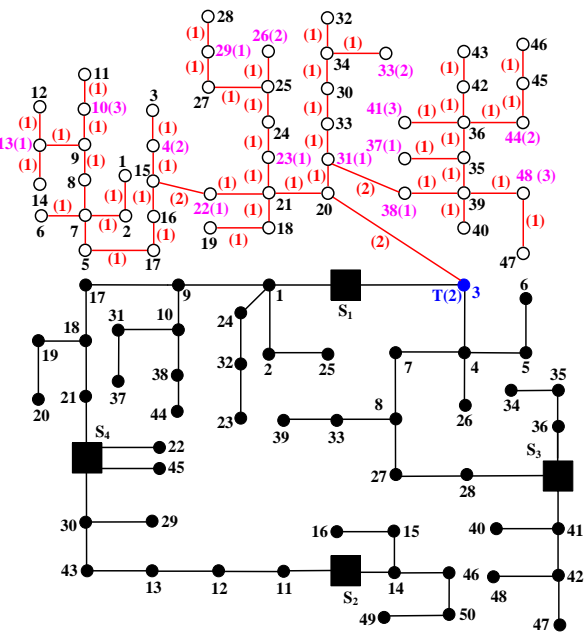
شکل ۱۳- ولتاژ نقاط شبکه فشار ضعیف در سناریوهای مختلف

جدول ۷- هزینه توسعه شبکه فشار ضعیف (میلیون دلار)

	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
ترانسفورماتور	۱/۷۶	۰/۸۸	۰/۸۸
منبع تولید پراکنده	-	-	۷/۱۵
خطوط	۳۱۱/۵۴	۲۹۸/۴۳	۲۸۵/۳۷
تلفات	۱/۸۳۲	۱/۶۵۲	۱/۳۷۹
جمع کل	۳۱۵/۱۳۲	۳۰۰/۹۶۲	۲۹۴/۷۷۹



شکل ۹- پیکره‌بندی حاصل از سناریو دوم



شکل ۱۰- پیکره‌بندی حاصل از سناریو سوم

در این شکل‌ها نقاط اتصال ترانسفورماتورها با رنگ آبی، نقاط اتصال منابع تولید پراکنده با رنگ صورتی و خطوط متصل شده با رنگ قرمز نشان داده شده است. اعداد داخل پرانتز نیز نوع المان موردنظر را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱)، میزان تابع هدف شاخص پایداری ولتاژ شبکه فشار متوسط که همان بیشینه مقدار VSI است آمده است و مشاهده می‌شود در سناریو سوم شاخص پایداری ولتاژ افزایش ملموسی داشته است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب پروفیل ولتاژ شبکه‌ها در سناریوهای مختلف آمده است و مشاهده می‌شود در سناریو سوم پروفیل ولتاژ بهبود یافته‌تر شده است که در واقع نشانی از کاهش تلفات انرژی در این سناریو است. نتایج تلفیقی از جدول (۷) نشان می‌دهد که هزینه کل کمتر در سناریو دوم و سوم به دست می‌آید که مزایای استفاده از روش را نشان می‌دهد. سناریو اول یک روش سنتی است که توسط شرکت‌ها استفاده



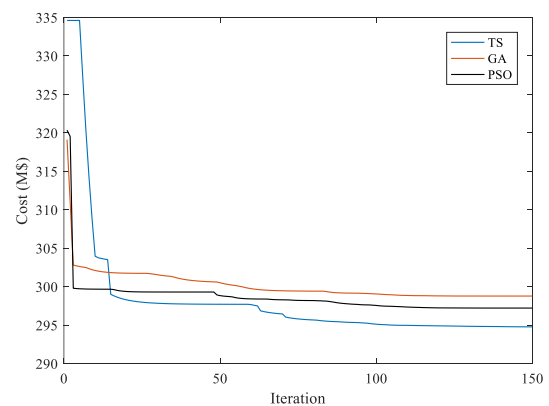
#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل دوسطحی یکپارچه برای شبکه توزیع ارائه شده است. در اکثر مطالعات شبکه‌های توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف به صورت دو شبکه مستقل لحاظ شده و برای هر یک برنامه‌ریزی‌های مجزا را انجام داده‌اند؛ حال آن‌که این دو شبکه مستقل از هم نبوده و اثر تغییر در یک شبکه قطعاً بر شبکه دیگر مؤثر خواهد بود. در این مقاله شبکه توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف به‌عنوان یک سیستم واحد لحاظ شده است. مدل پیشنهادی در سطح بالا برنامه‌ریزی شبکه فشار متوسط و در سطح پایین برنامه‌ریزی شبکه فشار ضعیف را در نظر می‌گیرد. توابع هدف در سطح بالا بیشینه‌سازی شاخص پایداری و ولتاژ و در سطح پایین کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بوده که مقید به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها هستند. علاوه بر این، نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه فشار ضعیف گنجانده شده است. مدل پیشنهادی از تضادی که در برنامه‌ریزی برای هر دو شبکه که عبارت است از جابجایی و سائز ترانسفورماتورها بهره می‌برد و در واقع این تضاد بر جریان‌هایی که در هر دو شبکه در گردش هستند، تأثیر می‌گذارد. زمانی که مدل دوسطحی حل می‌شود، تأثیری بر متغیرهای مرتبط بین هر دو مسئله سطح بالا و پایین وجود دارد که این تأثیر توسط ترانسفورماتورها ارائه می‌شود، زیرا ظرفیت، مکان و حداکثر تقاضای آن‌ها بر حل هر سطح تأثیر می‌گذارد. این جنبه امکان یافتن جواب‌هایی با کیفیت عالی را فراهم می‌کند و نتایج نشان از کارایی مدل و روش حل آن است.

#### نمادها

مجموعه ترانسفورماتورهای موجود	$\Lambda_{DT}$
مجموعه خطوط موجود در شبکه فشار ضعیف	$\Lambda_{ES}$
نقاط متصل شده با نقطه نام در شبکه فشار ضعیف	$\Lambda_{is}$
مجموعه ترانسفورماتورهای جدید	$\Lambda_{ND}$
مجموعه منابع تولید پراکنده جدید	$\Lambda_{NG}$
مجموعه خطوط فشار متوسط	$\Lambda_{NS}$
مجموعه نقاط شبکه فشار متوسط	$\Lambda_{PN}$
خطوط موجود و جدید در شبکه فشار ضعیف	$\Lambda_{SC}$
مجموعه نقاط شبکه فشار ضعیف	$\Lambda_{SN}$
مجموعه نوع ترانسفورماتور	$\Lambda_{TD}$
مجموعه نوع منبع تولید پراکنده	$\Lambda_{TG}$
مجموعه نوع خطوط فشار ضعیف	$\Lambda_{TS}$
هزینه ثابت توسعه خطوط موجود بین نقاط $i$ و $j$ در شبکه فشار ضعیف از نوع $c$	$C_{ij,c}^{ES}$
هزینه ثابت ترانسفورماتور جدید در نقطه $i$ از نوع $d$	$C_{i,d}^{ND}$
هزینه ثابت منبع DG جدید در نقطه $i$ از نوع $g$	$C_{i,g}^{NG}$
هزینه ثابت خط جدید فشار ضعیف بین نقاط $i$ و $j$ از نوع $c$	$C_{ij,c}^{NS}$
حداکثر جریان بین نقاط $i$ و $j$ از خط فشار ضعیف نوع $c$	$I_{ij,c}^{max}$
حداکثر جریان بین نقاط $i$ و $j$ از خط فشار متوسط نوع $p$	$I_{ij,p}^{max}$
مقاومت خط بین نقاط $i$ و $j$ از خط فشار متوسط نوع $p$	$R_{ij}^p$
مقاومت خط بین نقاط $i$ و $j$ از خط فشار ضعیف نوع $s$	$R_{ij}^s$

این سه سناریو در سیستم توزیع یکسانی اعمال شدند، جایی که نتایج حاصل نشان می‌دهد که یک برنامه‌ریزی یکپارچه دوسطحی در مقایسه با یک برنامه‌ریزی سنتی هزینه کمتری را ارائه می‌دهد. مطابق جدول (۷) مشاهده می‌شود، هزینه نصب ترانسفورماتور در سناریو دوم و سوم نسبت به سناریو اول ۵۰٪ کاهش یافته است، هزینه خطوط در سناریو دوم و سوم نسبت به سناریو اول به ترتیب ۴٪ و ۸٪/۴٪ کاهش یافته است، هزینه تلفات در سناریو دوم و سوم نسبت به سناریو اول به ترتیب ۸۳٪ و ۲۴٪/۷۳٪ کاهش یافته است و هزینه کل در سناریو دوم و سوم نسبت به سناریو اول به ترتیب ۵٪ و ۴٪/۵٪ کاهش یافته است. هزینه خطوط، تلفات و هزینه کل در سناریو سوم نسبت به سناریو دوم به ترتیب ۴٪/۴٪، ۱۶٪ و ۲٪ کاهش یافته است. در سناریو اول، مدارهای شبکه‌های اولیه و ثانویه موجود قابلیت شارژ بیشتری دارند و این سناریو توپولوژی تلفات فنی بیشتر از دو سناریو دیگر را به دلیل افزایش جریان‌هایی که از طریق شبکه در گردش است، ارائه می‌دهد. عکس آن در مورد توپولوژی‌های شبکه LV سناریوهای ۲ و ۳ رخ می‌دهد که در آن مدارهایی با بارگذاری مشابهی دارند که باعث تلفات فنی کمتری می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، روش دوسطحی راه‌حلی را پیدا می‌کند که گردش جریان‌ها را در شبکه بهتر توزیع می‌کند. در مورد شبکه‌های فشار ضعیف، در همه موارد نوع مشابهی از ترانسفورماتورهای توزیع وجود دارد و در نتایج حاصل مشخص است که روش دوسطحی امکان نصب مقدار کمتری از ترانسفورماتورها را می‌دهد که سبب می‌شود هزینه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری موردنظر کمتر شود. در سناریوهای ۲ و ۳ که روش دوسطحی مورد استفاده قرار گرفته است، توپولوژی‌های مشابهی علی‌رغم استفاده از منابع تولید پراکنده در سناریو سوم پیدا شده است که تفاوت آن‌ها در تعداد ترانسفورماتورها است که این تفاوت‌ها بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری در شبکه‌های MV و در تلفات فنی در شبکه‌های LV، با گردش جریان‌هایی با مقادیر کمتر در سناریو ۳ نسبت به سناریو ۲، به دلیل استفاده از منابع تولید پراکنده تأثیر می‌گذارند. در سناریو دوم و سوم، هزینه کمتری به‌دست می‌آید زیرا مکان و اندازه ترانسفورماتورها باعث گردش بهتر جریان برق بین هر دو سیستم فشار متوسط و فشار ضعیف می‌شود که باعث کاهش تلفات فنی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در عناصر شبکه می‌شود. علاوه بر این، همان‌طور که انتظار می‌رفت، سناریو ۳ (مدل دوسطحی با منبع تولید پراکنده) بهترین نتایج (کمترین هزینه‌ها) را ارائه کرد که بر ظرفیت‌های عناصر انتخاب‌شده (اندازه‌های کوچک‌تر) تأثیر گذاشت و در نتیجه تلفات فنی کمتری داشت. برای نشان دادن کارایی الگوریتم، مدل موردنظر توسط دو الگوریتم فرا ابتکاری دیگر شامل الگوریتم ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) با کدبندی‌های یکسان حل و نتیجه همگرایی آن‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده که مشاهده می‌شود، الگوریتم به‌کاررفته کارایی بهتری دارد.



شکل ۱۴- مقایسه همگرایی الگوریتم‌های جستجوی ممنوعه، ژنتیک و ازدحام ذرات برای تابع هدف سطح پایین

- [5] M. Moradijoz, M. P. Moghaddam, and M. Haghifam, "A flexible active distribution system expansion planning model: A risk-based approach," *Energy*, vol. 145, pp. 442–457, 2018.
- [6] H. Wang, L. Shi, and Y. Ni, "A bi-level programming model for distribution network expansion planning with distributed generations and energy storage systems," in 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1–5, IEEE, 2018.
- [7] T. Akbari and S. Z. Moghaddam, "Coordinated scheme for expansion planning of distribution networks: A bilevel game approach," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 14, pp. 2839–2846, 2020.
- [8] M. Kabirifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, N. Pourghaderi, and M. Shahidehpour, "Reliability-based expansion planning studies of active distribution networks with multiagents," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4610–4623, 2022.
- [9] M. Moradijoz, M. P. Moghaddam, and MR. Haghifam, "A flexible distribution system expansion planning model: a dynamic bi-level approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5867–5877, 2017.
- [10] A. Rastgou and S. Hosseini-Hemati, "Simultaneous Planning of the Medium and Low Voltage Distribution Networks under Uncertainty: A Bi-Level Optimization Approach", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2022, 2022.
- [11] A. Rastgou, S. Ghasemi, and S. Bahramara, "Providing a bi-level model for medium and low voltage distribution network expansion planning," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 95–110, 2020.
- [12] A. Bagheri, H. Monsef, and H. Lesani, "Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 56–70, 2015.
- [13] P. Paiva, H. Khodr, J. Dominguez-Navarro, J. Yusta, and A. Urdaneta, "Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1134–1143, 2005.
- [14] A. Marcos and J. R. Sanches, "Integrated planning of electric power distribution networks", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 7, no. 2, pp. 203–210, 2009.
- [15] I. Ziari, G. Ledwich, and A. Ghosh, "Optimal integrated planning of mv–lv distribution systems using dpo," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 10, pp. 1905–1914, 2011.
- [16] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, and G. Platt, "Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth", *IEEE transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 757–765, 2012.
- [17] R. Gholizadeh-Roshanagh, S. Najafi-Ravadanegh, and S. H. Hosseinian, "A framework for optimal coordinated primary-secondary planning of distribution systems considering mv distributed generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1408–1415, 2016.
- [18] محمدرضا فلاح زاده، علی زنگنه، «مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاددهی قیمت بهینه تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸، شماره ۴، صفحات ۱۶۹۹–۱۷۰۹، ۱۳۹۷.
- [19] M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 129–135, 2001.
- [20] A. Rastgou, J. Moshtagh, and S. Bahramara, "Improved harmony search algorithm for electrical distribution network expansion planning in the presence of distributed generators," *Energy*, vol. 151, pp. 178–202, 2018.
- [21] Glover F. *Tabu search fundamentals and uses*. Boulder, Colorado: University of Colorado; 1995.
- $S_{i,d}^{cu}$  تلفات مسی یک ترانسفورماتور در نقطه  $i$  از نوع  $d$
- $S_{i,d}^{fe}$  تلفات آهنی یک ترانسفورماتور در نقطه  $i$  از نوع  $d$
- $S_{i,d}^{max}$  بیشترین توان یک ترانسفورماتور از نوع  $d$
- $S_{i,g}$  بیشترین توان یک DG از نوع  $g$
- $S_{i,l}^{SD}$  میزان توان بار در نقطه  $i$  برای سطح بار  $l$
- $V_i^{max}$  بیشترین ولتاژ در نقطه  $i$
- $V_{i-abcn}^{max}$  بیشترین ولتاژ در نقطه  $i$  برای فازهای  $a$  و  $b$  و  $c$
- $V_i^{min}$  کمترین ولتاژ در نقطه  $i$
- $V_{i-abcn}^{min}$  کمترین ولتاژ در نقطه  $i$  برای فازهای  $a$  و  $b$  و  $c$
- $\sigma_{ij,c}^{ES}$  متغیر توسعه خط بین نقاط  $i$  و  $j$  از نوع  $c$  در شبکه فشار ضعیف
- $\sigma_{i,d}^{ND}$  متغیر نصب ترانسفورماتور در نقطه  $i$  از نوع  $d$
- $\sigma_{i,g}^{NG}$  متغیر نصب DG در نقطه  $i$  از نوع  $g$
- $\sigma_{ij,c}^{NS}$  متغیر نصب خط بین نقاط  $i$  و  $j$  از نوع  $c$  در شبکه فشار ضعیف
- $I_{ij,l}$  جریان بین دو نقطه  $i$  و  $j$  برای بار  $l$  در شبکه فشار متوسط
- $I_{ij,l}^{abcn}$  جریان بین دو نقطه  $i$  و  $j$  در سطح بار  $l$  در شبکه فشار ضعیف برای فازهای  $a$  و  $b$  و  $c$
- $S_{i,l}^{DT}$  توان تزریقی به ترانسفورماتور نقطه  $i$  برای سطح بار  $l$
- $S_{i,l}^G$  توان تزریقی از DG نقطه  $i$  برای سطح بار  $l$
- $S_{i,l}^S$  توان تزریقی از پست نقطه  $i$  برای سطح بار  $l$
- $V_{i,l}$  ولتاژ نقطه  $i$  در شبکه فشار متوسط برای سطح بار  $l$
- $V_{i,l}^{abcn}$  ولتاژ نقطه  $i$  در شبکه فشار ضعیف در سطح بار  $l$  در فازهای  $a$  و  $b$  و  $c$

## مراجع

- [۱] عبدالله راستگو، جمال مشتاق، صلاح بهرام‌آرا، «ارائه رویکردی مقاوم و منعطف برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی و منابع تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۹، شماره ۱، صفحات ۱۶۵–۱۸۰، ۱۳۹۸.
- [۲] نبی طاهری، رحمت الله هوشمند، رضا همتی، «برنامه‌ریزی هماهنگ نصب منابع تولید پراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۱، صفحات ۴۳–۵۶، ۱۳۹۳.
- [۳] نبی طاهری، رحمت الله هوشمند، رضا همتی، «برنامه‌ریزی بلندمدت سیستم توزیع در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۶۱–۷۱، ۱۳۹۲.
- [4] M. Kabirifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, N. Pourghaderi, and P. Dehghanian, "A bi-level framework for expansion planning in active power distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 2639–2654, 2021.