

برنامه‌ریزی تصادفی ایستگاه‌های شارژ سریع با استفاده از یک الگوریتم هم‌تکاملی

افشین پهلوان‌حسینی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمدصادق سپاسیان^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهیدبهشتی- تهران- ایران - apahlavanhoseini@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهیدبهشتی- تهران- ایران - m_sepasian@sbu.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر خودروهای الکتریکی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای استفاده مناسب از خودروهای الکتریکی تعیین مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ ضروری است. در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع به صورت یک مسأله غیرخطی آمیخته به عدد صحیح مدل سازی می‌شود. در روش ارائه شده، امکان بازآرایی شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای برنامه‌ریزی نصب ایستگاه‌های شارژ سریع، عدم قطعیت‌های مرتبط با سطح بار معمولی شبکه، بار ایستگاه‌های شارژ و قیمت انرژی در نظر گرفته شده است. در روش ارائه شده از یک روش مبتنی بر سناریو برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های مذکور استفاده شده است. به علاوه امکان بازآرایی شبکه توزیع به عنوان ابزاری کمکی جهت بهبود توابع هدف شرکت توزیع در نظر گرفته شده است. در انتها، کارایی روش ارائه شده با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع، بازآرایی شبکه توزیع، عدم قطعیت.

Stochastic planning of fast charging stations using a coevolutionary algorithm

Afshin Pahlavanhoseini¹, PhD student; Mohammad Sadegh Sepasian², Associate professor

1-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: apahlavanhoseini@gmail.com

2-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: m_sepasian@sbu.ac.ir

Abstract: In recent years, electric vehicles have attracted significant attention. For proper use of electric vehicles, determining the location and size of charging stations is essential. In this paper, the problem of fast charging station planning is modeled as a mixed integer nonlinear programming (MINLP). In the proposed method, network reconfiguration possibility is considered. In addition, for the installation planning of fast charging stations, the uncertainties associated with the conventional load level, the charging stations load level and the price of energy are considered. In the proposed method, a scenario-based approach is used to consider the above-mentioned uncertainties. In addition, network reconfiguration is considered as a tool to optimize the objective functions of distribution company. Finally, the efficiency of the proposed method is demonstrated by numerical results.

Keywords: Fast charging station planning, network reconfiguration, uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۵ و ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

نام نویسنده مسئول: محمدصادق سپاسیان

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر میزان توجه به خودروهای الکتریکی^۱ افزایش یافته است. مسائل اقتصادی و نگرانی‌های زیست‌محیطی [۱] باعث استفاده بیشتر از خودروهای الکتریکی، که دارای بازده بالا و هزینه‌های بهره‌برداری پایین هستند [۲]، شده‌است. سیستم‌های شارژ سریع اهمیت به‌سزایی در پذیرش عمومی خودروهای الکتریکی دارند. با افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص برنامه ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع انجام گرفته‌است [۱۸-۳]. خلاصه‌ای از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع در جدول ۱ نشان داده شده‌است. برای حل مسأله در بعضی از کارها [۳-۶]، [۱۲، ۱۳]، [۱۸-۱۷] از روش‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و در تعدادی از پژوهش‌ها [۸-۱۱]، [۱۶] از روش‌های چندهدفه استفاده شده‌است. در پژوهش‌های قبلی توابع هدف مختلفی از جمله هزینه سرمایه‌گذاری [۳-۶]، [۱۵-۸]، کاهش تلفات [۵-۳]، [۹-۸]، [۱۲-۱۱]، بهبود پروفیل ولتاژ [۹]، [۱۲]، افزایش سود ناشی از فروش انرژی در ایستگاه‌های شارژ [۴] و بیشینه‌کردن خودروهای الکتریکی که توسط ایستگاه‌های شارژ قابل شارژ هستند [۹] در نظر گرفته شده‌است. در مراجعی هزینه‌های مرتبط با صاحبان خودروهای الکتریکی نیز مدنظر قرار گرفته‌است. به‌عنوان نمونه در [۵] میزان تلفات انرژی خودروها برای رسیدن به ایستگاه‌های شارژ و در [۶] زمان صرف‌شده خودروها برای رسیدن به ایستگاه‌های شارژ جزء توابع هدف مسأله می‌باشد. در مرجع [۸] برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع و سیستم‌های شارژ خودروهای الکتریکی به‌صورت هم‌زمان انجام‌شده و در آن هزینه توسعه شبکه نیز در نظر گرفته شده‌است. برای حل مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع از روش‌های مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک [۵]، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات [۶]، روش تکامل تفاضلی بهبودیافته [۴]، آنترابی متقاطع [۹] استفاده شده‌است. سایر روش‌های مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده‌است. در [۳] ابتدا مکان‌های بهینه برای ایستگاه‌های شارژ با توجه به شعاع سرویس‌دهی آن‌ها با استفاده از یک روش دومرحله‌ای غربالگری^۲ مشخص شده‌است. سپس ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ با توجه به هزینه‌های مرتبط با استفاده از یک الگوریتم اصلاح‌شده اولیه-دونقطه داخلی^۳ مشخص شده‌است. در [۱۰] با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و با در نظر گرفتن معیارهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی محل ایستگاه‌های شارژ مشخص شده‌است. در [۱۱] توابع هدف شرکت توزیع و حمل‌ونقل شهری به‌صورت مستقل در نظر گرفته شده‌است. ظرفیت ایستگاه‌های شارژ با استفاده از تئوری صف^۴ محاسبه شده‌است. در نهایت راه‌حل بهینه با استفاده از تئوری چانه‌زنی به دست آمده‌است.

دو نوع کلید در شبکه‌های توزیع وجود دارد: کلیدهای در حالت عادی باز^۵ و کلیدهای در حالت عادی بسته^۶. آرایش شبکه توزیع را می

توان با بازکردن یک کلید در حالت عادی بسته و بستن یک کلید در حالت عادی باز تغییر داد. ذکر این نکته ضروری است که در حالتی این تغییرات قابل قبول است که قیود شبکه مخصوصاً قید شعاعی بودن شبکه برآورده شود. در مطالعات گذشته هدف اصلی بازآرایی شبکه توزیع، کاهش تلفات اکتیو بوده‌است [۱۹، ۲۰]. همچنین، بازآرایی جهت اهداف دیگری از جمله بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان [۲۱] و متعادل کردن بار [۲۲] استفاده شده‌است. روش‌های مختلفی از جمله طرح پخش بهینه^۷ [۲۳]، شبکه عصبی^۸ [۱۹]، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات^۹ [۲۱] و سیستم‌های خبره^{۱۰} [۲۴] جهت حل مسأله بازآرایی استفاده شده‌است. در این مقاله، از بازآرایی شبکه توزیع جهت بهینه‌کردن تابع هدف در حل مسأله جایابی ایستگاه‌های شارژ سریع استفاده شده‌است.

با مرور کارهای گذشته در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ (جدول ۱)، مشخص می‌شود علیرغم اهمیت قابل توجه عدم قطعیت‌های مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ، تعداد محدودی از کارها بر روی این عدم قطعیت‌ها تمرکز کرده‌اند. در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو^{۱۱} ارائه شده‌است که در آن عدم قطعیت‌های مرتبط با مقدار بار معمولی، مقدار بار ایستگاه شارژ و قیمت انرژی در نظر گرفته می‌شود. مقدار بار ایستگاه‌های شارژ به نسبت بار بزرگی در شبکه توزیع محسوب می‌شود. برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ بدون استفاده از یک ابزار کمکی جهت برآورده کردن قیود شبکه باعث می‌شود بسیاری از گزینه‌هایی که منجر به مقدار تابع هدف مناسبی می‌شوند، به علت این که قیود مسأله مخصوصاً قید ولتاژ را برآورده نمی‌کنند، نتوانند به‌عنوان پاسخ مسأله انتخاب شوند. در کارهای گذشته از ابزار مناسبی برای کاهش تأثیر بار ایستگاه‌های شارژ بر روی شبکه استفاده نشده‌است. در این مقاله بازآرایی شبکه توزیع به‌عنوان ابزاری کمکی برای تأمین قیود مسأله جهت بهبود توابع هدف شرکت توزیع در نظر گرفته شده‌است. به‌علاوه واضح است یکی از مهم‌ترین عواملی که بر تصمیم‌گیری افراد در خصوص این‌که به کدام ایستگاه شارژ مراجعه کند میزان فاصله ایستگاه‌های شارژ از آن‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که معمولاً افراد جهت استفاده از ایستگاه‌ها به نزدیک‌ترین ایستگاه مراجعه می‌کنند. در این مقاله، از الگوریتم دیجکسترا^{۱۲} برای تعیین فاصله ایستگاه‌های شارژ از خودروها و تعیین اندازه این ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. به‌گونه‌ای که در مناطق با تعداد خودروهای بیشتر، ظرفیت ایستگاه‌های شارژ بزرگ‌تر خواهد بود. همچنین برای حل مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ از یک الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی^{۱۳} استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- یک روش مبتنی بر سناریو برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ ارائه می‌شود که در آن عدم قطعیت‌های مرتبط با بار معمولی شبکه، بار ایستگاه‌های شارژ و قیمت انرژی در نظر گرفته می‌شود.

کارهای مهم
برنامه‌ریزی

روش حل*	سیستم شارژ		عدم قطعیت			بازآرایی	مدل ریاضی			مدل تابع هدف		ردیف
	ایستگاه شارژ سریع	پارکیگ‌های عمومی	قیمت انرژی	بار ایستگاه شارژ	بار معمولی		NLP	MINLP	MILP	چندهدفه	تک‌هدفه	
1	✓						✓			✓	3	
2	✓			✓			✓			✓	4	
3	✓						✓			✓	5	
4	✓	✓					✓			✓	6	
5	✓			✓	✓		✓		✓		11	
6	✓	✓					✓		✓		8	
7	✓						✓		✓		9	
8	✓						✓		✓		10	
9	✓						✓			✓	12	
10	✓							✓		✓	13	
11	✓			✓							14	
12	✓			✓	✓		✓			✓	15	
13	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	این مقاله	

جدول ۱: خلاصه‌ای از
انجام‌شده در زمینه
ایستگاه‌های شارژ

1. Modified Primal-Dual Interior Point Algorithm (MPDIPA)
2. Modified Differential Evolution
3. Genetic Algorithm
4. Voronoi Diagram Together with Particle Swarm Optimization Algorithm
5. It is explained in the paper
6. Decomposition Based Multi-Objective Evolutionary
7. Cross-Entropy
8. TOPSIS, Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
9. Genetic Algorithm based Improved Particle Swarm Optimization (GAIPSO)
10. CPLEX
11. Shared Nearest Neighbor (SNN) Clustering algorithm, the queuing theory
12. Stochastic mixed-integer second order cone programming (SOCP)
13. CGA using Dijkstra's algorithm

از الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی و هم‌چنین نحوه به‌دست‌آوردن ظرفیت ایستگاه‌های شارژ با استفاده از الگوریتم دیجکسترا ارائه شده‌است و قسمت پایانی این بخش به تشریح الگوریتم حل مسأله اختصاص یافته‌است. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه تست در بخش ۴ تحلیل شده‌است. در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری مسأله ارائه شده‌است.

۲- مدل‌سازی عدم قطعیت

در این مقاله، عدم قطعیت‌های مربوط به بار ایستگاه‌های شارژ، بار معمولی و قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست در نظر گرفته شده‌است. این مقادیر دارای عدم قطعیت با یک روش مبتنی بر سناریو بررسی می‌شوند که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

- برای حل مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ از یک الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی استفاده می‌شود.
- برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن امکان بازآرایی شبکه انجام می‌شود.
- از الگوریتم دیجکسترا برای تعیین اندازه ایستگاه‌های شارژ بر اساس اطلاعات ترافیکی استفاده می‌شود.

ساختار مقاله به این شرح می‌باشد: در بخش ۲ نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت و هم‌چنین روش تولید سناریوها و کاهش آن‌ها ارائه شده‌است. در بخش ۳ فرمول‌بندی و روش حل مسأله بیان شده‌است. در این بخش پس از مشخص کردن توابع هدف و قیود مسأله، خلاصه‌ای

انرژی خریداری شده از شبکه بالادست از سطح بار پیروی می کند [۲۷]، [۲۸]. در نتیجه، فرض می شود قیمت انرژی مانند مقدار بار از یک توزیع نرمال حول مقدار میانگین تبعیت می کند (شکل ۱).

۲-۳-۲-۱ مدل سناریوهای ترکیبی

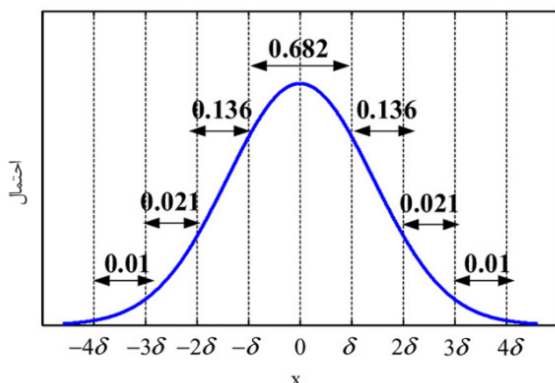
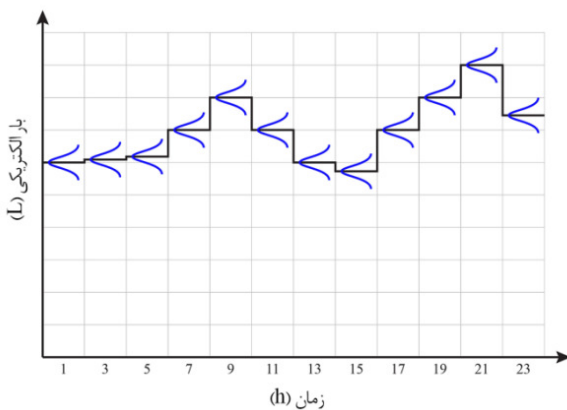
۲-۳-۱-۱ تولید سناریو

همان طور که ذکر شد در این مقاله عدم قطعیت های مربوط به بار معمولی، بار ایستگاه شارژ و قیمت انرژی در نظر گرفته شده است. یک بردار خاص برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت ها در ساعت h به شرح معادله (۴) است:

$$S_{h,sc} = [P_{h,sc}^D P_{h,sc}^{FCS} EP_{h,sc}^{EP}] \quad (4)$$

در معادله (۴)، $P_{h,sc}^D$ بار الکتریکی باس های شبکه در ساعت h و سناریوی sc است؛ $P_{h,sc}^{FCS}$ نشان دهنده بار ایستگاه های شارژ در ساعت h و سناریوی sc است؛ و $EP_{h,sc}$ قیمت انرژی الکتریکی در ساعت h و سناریوی sc را نشان می دهد. احتمال هر سناریو در ساعت h و سناریوی sc با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$prob_{h,sc} = (prob_{h,sc}^D)(prob_{h,sc}^{FCS})(prob_{h,sc}^{EP}) \quad (5)$$



شکل ۱: منحنی مربوط به عدم قطعیت بار شبکه

$$(L_h = \bar{L}_h + x)$$

۲-۳-۲-۲ کاهش تعداد سناریوها

حل مسأله باتوجه به تعداد بالای سناریوهای تولید شده بسیار زمان بر خواهد بود. لذا از یک روش کاهش سناریو [۲۹] برای تبدیل مجموعه

۲-۱-۲ مدل سازی عدم قطعیت بار ایستگاه های شارژ

فرض می شود زمان رسیدن خودروهای الکتریکی به ایستگاه های شارژ و زمان خدمت دهی در این ایستگاه ها به ترتیب از تابع توزیع پواسن و تابع توزیع نمایی پیروی می کنند [۲۵، ۱۰]. همچنین خودروها براساس زمان رسیدن به ایستگاه، شارژ می شوند. در نتیجه می توان از نظریه صف $M/M/s$ استفاده نمود [۱۰]. براساس سیستم صف $M/M/s$ احتمال این که در ساعت h تعداد n خودرو در ایستگاه k ام باشند برابر است با:

$$P_{k,h,n} = \begin{cases} \frac{P_{k,h}^0}{n!} (N_k \rho_{k,h})^n & \text{if } 0 < n < N_k \\ \frac{P_{k,h}^0}{N_k!} (N_k)^{N_k} (\rho_{k,h})^n & \text{if } N_k \leq n \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{k,h}^0 = \left[\sum_{i=1}^{N_k-1} \left(\frac{(N_k \rho_{k,h})^i}{i!} \right) + \frac{(N_k \rho_{k,h})^{N_k}}{N_k! (1 - \rho_{k,h})} \right]^{-1} \quad (2)$$

از معادلات (۱) و (۲) برای تولید سناریوهای مربوط به بار الکتریکی ایستگاه های شارژ استفاده می شود. لازم به ذکر است درحالی که تعداد خودروها در ایستگاه شارژ بیشتر از اندازه ایستگاه باشد، خودروهای مازاد بر ظرفیت در صف قرار می گیرند و بار ایستگاه شارژ برابر بیشینه ظرفیت ایستگاه در نظر گرفته می شود. نرخ مشغول بودن تجهیزات ایستگاه شارژ k ام در ساعت h است که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$\rho_{k,h} = \frac{\lambda_{FCS_{k,h}}}{N_k \mu} \quad (3)$$

نرخ متوسط رسیدن خودروهای الکتریکی به ایستگاه شارژ k ام در ساعت h است که با استفاده از مقادیر متوسط به دست آمده در مرجع [۲۶] و با توجه به اندازه هر ایستگاه به دست می آید.

۲-۲-۲ مدل سازی عدم قطعیت بار معمولی و قیمت انرژی

مقدار بار الکتریکی و قیمت انرژی در محیط تجدید ساختار یافته دارای عدم قطعیت بوده و به هم وابسته می باشند. افزایش (کاهش) بار باعث افزایش (کاهش) قیمت انرژی می شود.

فرض می شود مقدار قیمت انرژی و بار شبکه مطابق شکل ۱ به صورت نرمال در محدوده مقادیر میانگینشان توزیع شده اند. نمودار بالا در این شکل نشان دهنده نحوه در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در ۲۴ ساعت شبانه روز است. در این شکل سطح بار در هر ساعت با استفاده از مشکی و منحنی مربوط به توزیع احتمال بار در هر ساعت با استفاده از منحنی های آبی رنگ نشان داده شده است. همچنین در نمودار پایین δ نشان دهنده انحراف معیار تابع توزیع نرمال مذکور می باشد. جهت به دست آوردن سناریوهای مربوط به بار معمولی شبکه، هر توزیع نرمال به ۷ قسمت تقسیم شده است. احتمال هر کدام از این قسمت ها در شکل ۱ نشان داده شده است. اگرچه مقدار میانگین قیمت انرژی به مقدار بار وابسته است، اما می توان فرض نمود در هر سطح بار، تغییر قیمت و بار در حول مقدار میانگین متناظر آن ها مستقل است. فرض می شود قیمت

۳- فرمول‌بندی و روش حل مسأله

۳-۱- توابع هدف و قیود

توابع هدف و قیود مسأله به شرح معادلات (۸) تا (۱۷) است. لازم به ذکر است برای هزینه سرمایه‌گذاری ایستگاه‌های شارژ از رابطه ارائه شده در [۸] استفاده شده است.

$$\min TC = IC + LC \quad (۸)$$

$$IC = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\varepsilon)^{n^{FCS}} - 1} \sum_{k \in \Omega^{FCS}} u_k (c^{CHF} N_k + c_k^{LS} N_k + c_k^F) \quad (۹)$$

$$LC = d^{annual} \sum_{h \in H} \sum_{sc \in \Omega^S} prob_{h,sc} \cdot EP_h \cdot P_{h,sc}^{Loss} \quad (۱۰)$$

$$P_{h,sc}^{Loss} = \sum_{ij \in \Omega^I} G_{ij} (V_{i,h,sc}^2 + V_{j,h,sc}^2 - 2V_{i,h,sc} V_{j,h,sc} \cos \theta_{ij}) \quad (۱۱)$$

$$P_{i,h,sc}^g = P_{i,h,sc}^d + P_{i,h,sc}^{FCS} + V_{i,h,sc} \sum_{j \in \Omega^b} V_{j,h,sc} (G_{ij} \cos \theta_{ij,h,sc} + B_{ij} \sin \theta_{ij,h,sc}) \quad (۱۲)$$

$$\forall i \in \Omega^b, \forall sc \in \Omega^S, \forall h \in H$$

$$Q_{i,h,sc}^g = Q_{i,h,sc}^d + Q_{i,h,sc}^{FCS} + V_{i,h,sc} \sum_{j \in \Omega^b} V_{j,h,sc} (G_{ij} \sin \theta_{ij,h,sc} - B_{ij} \cos \theta_{ij,h,sc}) \quad (۱۳)$$

$$\forall i \in \Omega^b, \forall sc \in \Omega^S, \forall h \in H$$

$$V_i^{min} \leq V_{i,h,sc} \leq V_i^{max} \quad (۱۴)$$

$$\forall i \in \Omega^b, \forall sc \in \Omega^S, \forall h \in H$$

$$|S_{ij,h,sc}| \leq S_{ij}^{max} \quad \forall i \in \Omega^b, \forall sc \in \Omega^S, \forall h \in H \quad (۱۵)$$

$$N_{loop} = N_{branch} - N_{bus} + 1 \quad (۱۶)$$

$$N^{min} \leq N_k \leq N^{max} \quad \forall k \in \Omega^{FCS} \quad (۱۷)$$

معادله (۸) تابع هدف مسأله را نشان می‌دهد که شامل هزینه سالانه سرمایه‌گذاری و تلفات انرژی می‌باشد. معادلات (۹) و (۱۰) به ترتیب نشان‌دهنده هزینه سرمایه‌گذاری سالانه برای نصب ایستگاه‌های شارژ و هزینه تلفات هستند. هزینه سرمایه‌گذاری ایستگاه‌های شارژ به سه بخش تقسیم شده است. دو هزینه اول در معادله (۹) متناسب با اندازه ایستگاه شارژ هستند: c^{CHF} ، که وابسته به مکان نیست، هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات ایستگاه شارژ مثل ترانسفورماتور، کابل و... می‌باشد.

سناریوهای تولیدی به یک مجموعه با تعداد سناریوی کمتر استفاده شده است. این روش، که فلوچارت آن در شکل ۲ نشان داده شده است، به صورت خلاصه به شرح زیر است:

۱- فاصله بین هر جفت از سناریوها ($d(sc, sc')$) را محاسبه کن.

۲- اولین سناریوی مجموعه جدید را با استفاده از رابطه (۶) به دست بیاور.

$$sc_1 = arg \left\{ \min_{sc' \in \Omega^I} \sum_{sc \in \Omega^I} Prob_{sc} d(sc, sc') \right\} \quad (۶)$$

$$\Omega^S = \{sc_1\}, \Omega^J = \Omega^I - \Omega^S$$

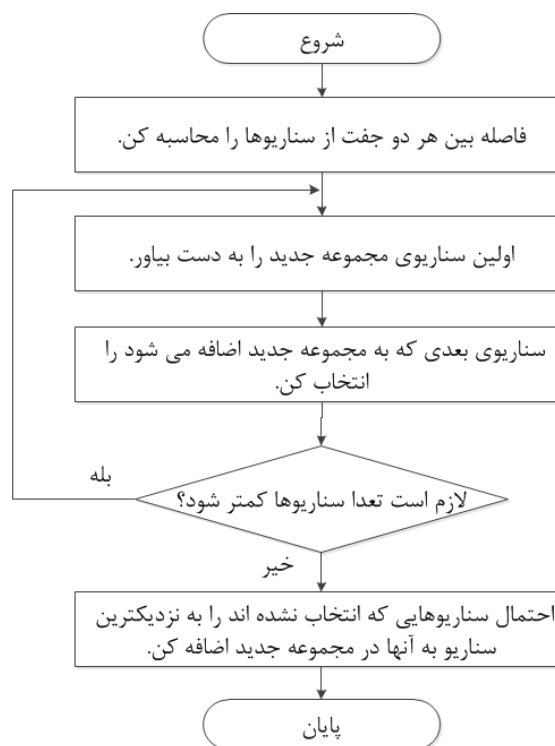
۳- سناریوی بعدی که به Ω^S اضافه می‌شود را به کمک معادله (۷) انتخاب کن.

$$sc_n = arg \left\{ \min_{sc' \in \Omega^I} \sum_{sc \in \Omega^I - \{sc'\}} Prob_{sc} \min_{sc'' \in \Omega^S \cup \{sc'\}} d(sc, sc'') \right\}$$

$$\Omega^S = \Omega^S \cup \{sc_n\}, \Omega^J = \Omega^I - \Omega^S \quad (۷)$$

۴- در صورتی که تعداد سناریوهای جدید برابر با یک مقدار از پیش تعیین شده است، ادامه بده؛ در غیر این صورت به قدم دوم برو.

۵- احتمال سناریوهایی که انتخاب نشده‌اند را به نزدیک‌ترین سناریو به آنها در مجموعه جدید اضافه کن.



شکل ۲: فلوچارت روش کاهش تعداد سناریوها

$$x'_i = \begin{cases} x_i + \Delta(t, Ub - x_i) & \text{if } \tau = 1 \\ x_i - \Delta(t, Lb - x_i) & \text{if } \tau = 0 \end{cases} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) x'_i و x_i به ترتیب مقادیر انتخاب شده و برآیند در عمل گر جهش هستند. t شماره نسل در الگوریتم ژنتیک هم تکاملی است. تابع $\Delta(t, y)$ یک مقداری در بازه $[0, y]$ را به دست می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش t مقدار تابع به سمت صفر میل می‌کند. این مشخصه باعث می‌شود که الگوریتم فضای جستجو را در تکرارهای اولیه به صورت خطی و در تکرارهای بعدی به صورت محلی جستجو کند. در واقع این روند باعث می‌شود که نتیجه نسبت به حالت استفاده از عملگر جهش تصادفی نزدیک‌تر به حالت بهینه باشد. تابع Δ به صورت معادله (۲۰) تعریف می‌شود [۳۰].

$$\Delta(t, y) = y(1 - \sigma^{(1-\frac{t}{T})^\delta}) \quad (20)$$

که در آن σ یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ ، T حداکثر تعداد نسل‌ها و σ یک پارامتر سیستمی است که میزان وابستگی به شماره نسل‌ها را مشخص می‌کند. σ در این مقاله، ثابت و برابر ۱ فرض شده است.

۳-۳- تعیین اندازه ایستگاه‌های شارژ با استفاده از الگوریتم دیجکسترا

پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه در یک گراف یکی از مسائل معروف بهینه‌سازی است. مسأله کوتاه‌ترین مسیر، پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر و کمترین فاصله بین دو نقطه در یک گراف است. الگوریتم دیجکسترا یک روش برای یافتن کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه ارائه می‌دهد. این الگوریتم به صورت خلاصه در جدول ۲ توضیح داده شده است [۳۱].

جدول ۲: الگوریتم دیجکسترا

ورودی: گراف با ضرایب وزنی $E(G) \rightarrow \mathbb{R}_+$ و $s \in V(G)$	
خروجی: کوتاه‌ترین مسیرها و طول آنها از s به هر $v \in V(G)$ تمام $d(v)$	
و $p(v)$ ها برای تمام $v \in V(G)$ محاسبه می‌شود؛ که $d(v)$ طول کوتاه‌ترین مسیر $s - v$ و $p(v)$ مسیر آن می‌باشد.	
مقداردهی‌های زیر را انجام بده:	
۱ $d(v) = \infty$ for $v \in (V(G) - \{s\})$	
$d(s) = 0$	
$R = \phi$	
۲ $v \in (V(G) - R)$ را طوری به دست بیاور که داشته باشیم:	
$d(v) = \min d(w), w \in (V(G) - R)$	
۳ $R = R \cup \{v\}$ قرار بده.	
برای تمام $w \in (V(G) - R)$ که $(v, w) \in E(G)$ مراحل زیر را انجام بده.	
۴ در صورتی که $l(w) > l(v) + c((v, w))$ باشد آن گاه قرار بده:	
$l(w) = l(v) + c((v, w))$ and $p(w) = v$;	
۵ در صورتی که $R \neq V(G)$ به مرحله ۲ برو. در غیر این صورت به مرحله ۶ برو.	
۶ پایان	

c_k^{LS} مربوط به هزینه‌های وابسته به مکان مانند قطعه زمین مورد نیاز برای نصب ایستگاه شارژ است. c_k^F در معادله (۹) که وابسته به اندازه ایستگاه شارژ نیست نشان‌دهنده هزینه‌های ثابت است [۸]. در معادله (۹) ضریب $\frac{\epsilon(1+\epsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\epsilon)^{n^{FCS}-1}}$ ضریب بازگشت سرمایه برای نصب ایستگاه‌های شارژ و u_k متغیر تصمیم‌گیری باینری مربوط به نصب یا عدم نصب ایستگاه شارژ در محل کاندید k ام می‌باشد. معادله (۱۱) هزینه تلفات انرژی را در ساعت h و سناریوی sc نشان می‌دهد. معادلات (۱۲) تا (۱۷) نشان‌دهنده قیود در نظر گرفته شده هستند. معادلات (۱۲) و (۱۳) قید پخش بار و معادلات (۱۴) و (۱۵) به ترتیب مربوط به حدود ولتاژ و قید توان عبوری از خطوط می‌باشد. شعاعی بودن شبکه با استفاده از قید (۱۶) تضمین می‌شود. معادله (۱۷) قید مربوط به اندازه ایستگاه‌های شارژ است.

۳-۲- الگوریتم ژنتیک هم تکاملی

برای حل مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک هم تکاملی استفاده شده است. در الگوریتم‌های ژنتیک، هر کروموزوم نشان‌دهنده یک راه‌حل ممکن برای مسأله است. کروموزوم‌ها از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می‌شوند. مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. با تأثیر عمل‌گرهای ژنتیکی بر روی یک جمعیت، نسل 14 بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عمل‌گرهای اصلی الگوریتم‌های ژنتیکی تزیوج 15 و جهش 16 هستند. عملگر تزیوج بر روی یک زوج کروموزوم از نسل والدین عمل کرده و یک زوج کروموزوم جدید تولید می‌کند. لازم به ذکر است تزیوج معمولاً بر روی همه زوج کروموزوم‌های انتخاب شده برای جفت‌گیری به کار برده نمی‌شود. معمولاً یک احتمال تزیوج برای هر زوج کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که به این مقدار، نرخ تزیوج یا احتمال تزیوج گفته می‌شود. در صورتی که بر روی یک زوج کروموزوم تزیوج صورت نگیرد، فرزندان با تکرار نمودن والدین تولید می‌شوند. پس از اتمام عمل تزیوج، عملگر جهش انجام می‌شود. این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به طور تصادفی انتخاب نموده و سپس محتوای آن ژن را تغییر می‌دهد. در این مقاله برای عملگر تزیوج از یک عملگر تقاطع ترکیبی استفاده شده است. در این عملگر فرزند به طور تصادفی از تابع تکرار معادله ۱۸ به دست می‌آید [۳۰].

$$[x_i - \tau(y_i - x_i), y_i + \tau(y_i - x_i)] \quad (18)$$

متغیرهای تصمیم‌گیری x_i, y_i, τ به عنوان پدر و مادر از راه‌حل‌های برتر انتخاب شده‌اند. τ نیز یک عدد تصادفی بین صفر و یک است که در این جا، جهت برقراری تعادل در فضای جستجو برابر 0.5 در نظر گرفته شده است.

جهت کاهش واگرایی ناشی از استفاده از عملگر جهش تصادفی، از یک عملگر جهش غیرخطی دینامیکی استفاده شده است که به صورت معادله (۱۹) تعریف می‌شود [۳۰].

۵- تعدادی از خودروهای الکتریکی را به ایستگاه FCS_k^{CV} اختصاص داده به طوری که ظرفیت این ایستگاه برابر حد بیشینه ایستگاه شارژ شود. خودروهای باقیمانده از گره (های) TN_k^f را به بقیه ایستگاه‌های شارژ اختصاص داده، ظرفیت جدید مابقی ایستگاه‌ها را محاسبه کن و به مرحله ۳ برو.

۶- در صورتی که اندازه ایستگاه شارژ کوچک‌تر از حد پایین اندازه ایستگاه‌های شارژ است مشابه آن چه برای حد بالای اندازه ایستگاه شارژ در مراحل ۴ و ۵ انجام شد انجام ده.

۷- سناریوهای لازم برای بار ایستگاه‌های شارژ، بار معمولی و قیمت انرژی را تولید کن.

۸- تعداد سناریوها را به یک تعداد از پیش تعیین شده کاهش ده.
 ۹- یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها برای الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی تولید کن.

۱۰- برای هر کروموزوم، قیود مسئله را چک کن. در صورتی که قیدی نقض شده‌است، یک جریمه برای تابع هدف در نظر بگیر. تابع هدف را برای هر کروموزوم محاسبه کن.

۱۱- شرایط خروج از الگوریتم را بررسی کن. در صورتی که تعداد تکرارها کمتر از بیشینه تعداد مشخص شده برای تکرارهاست به مرحله ۱۲ برو؛ در غیر این صورت به مرحله ۱۳ برو.

۱۲- عمل‌گرهای ترویج و جهش را انجام ده و به مرحله ۱۰ برو.

۱۳- بهترین جواب به‌دست‌آمده از ترکیب باس‌های مختلف را به‌روزرسانی کن.

۱۴- بررسی کن آیا ترکیب دیگری از باس‌های کاندید باقیمانده است یا خیر. در صورتی که ترکیب دیگری باقی نمانده‌است نتایج را نمایش ده؛ در غیر این صورت به مرحله ۱ برو.

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی روش ارائه‌شده از سیستم ۳۳ باس IEEE استفاده شده‌است (شکل ۴). این شبکه از پست موجود در باس ۱ تغذیه می‌شود. سطح ولتاژ این شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت است. در جدول ۳ مشخص شده‌است که هر کلید کدام باس‌ها را به یک‌دیگر متصل می‌کند. سایر اطلاعات این شبکه در [۳۳] موجود است. باس‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۲ به‌عنوان باس‌های کاندید برای نصب ایستگاه شارژ انتخاب شده‌اند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ در هر یک از این نقاط در جدول ۴ ارائه شده‌است [۸]. برای مباحث ترافیکی از شبکه معروف سوفالز^{۱۷} استفاده شده‌است [۳۴]. این شبکه ۲۴ ناحیه، ۲۴ گره و ۷۶ راه ارتباطی دارد (شکل ۵). اطلاعات این شبکه در [۳۴] ذکر شده‌است.

برای محاسبه اندازه ایستگاه‌های شارژ فرض می‌شود خودروهای الکتریکی برای شارژ باتری خودروها به نزدیک‌ترین ایستگاه مراجعه می‌کنند [۶]. از الگوریتم دیجکسترا برای مشخص کردن نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ به هر یک از گره‌های ترافیک استفاده شده‌است. هم‌چنین برای محاسبه ظرفیت کل موردنیاز ایستگاه‌های شارژ از روش ارائه‌شده در [۳۲] استفاده شده‌است. با در اختیار داشتن تعداد خودروهای الکتریکی که به هر ایستگاه شارژ مراجعه می‌کنند و ظرفیت کل مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ، ظرفیت هر ایستگاه شارژ به راحتی مشخص می‌شود.

۴-۳- روش حل مسئله

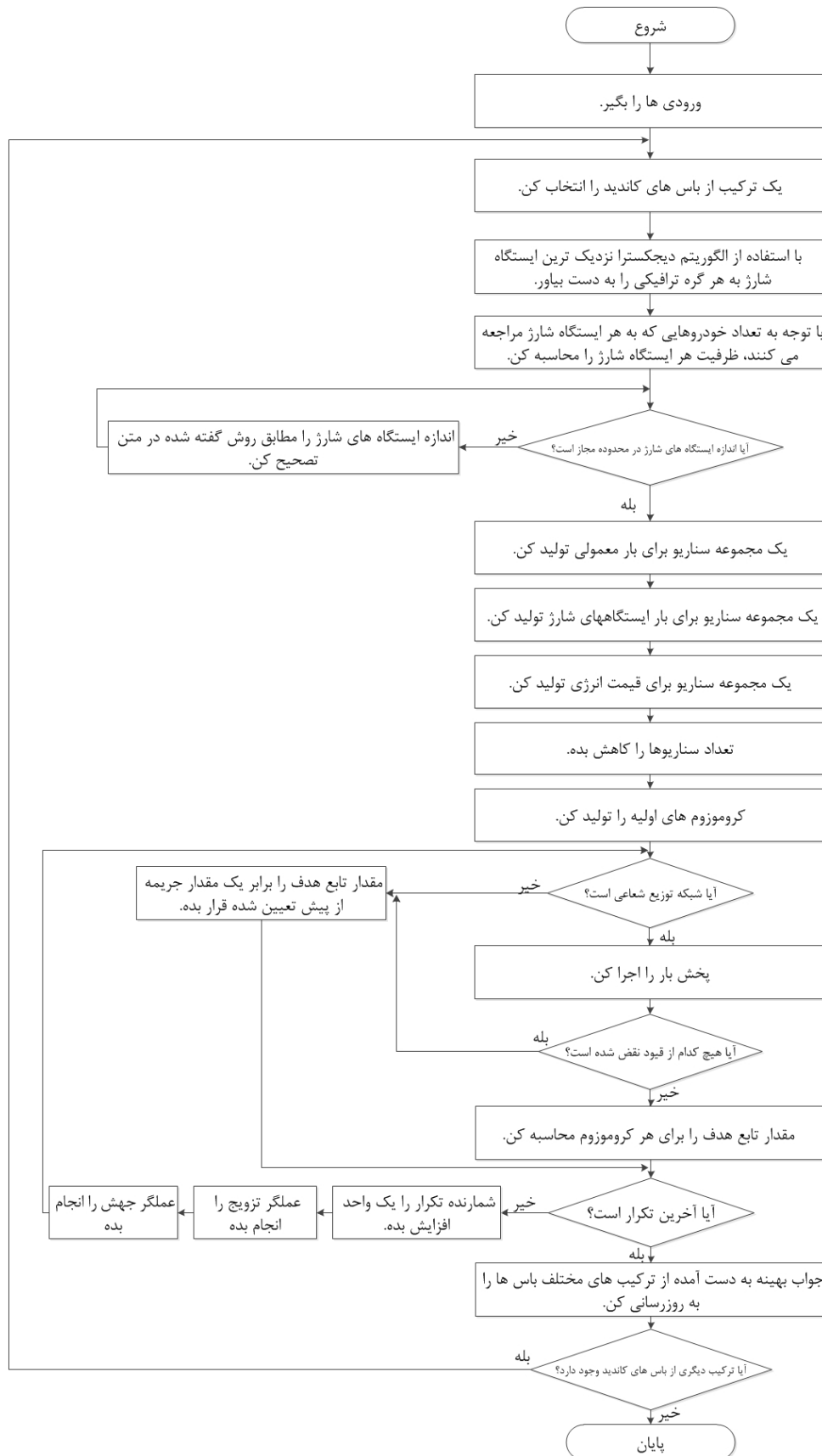
برای حل مسئله، لازم است مقادیر سه متغیر کنترلی مشخص شوند: محل نصب ایستگاه‌های شارژ، اندازه ایستگاه‌های شارژ در هر نقطه و وضعیت کلیدها. مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ خارج از حلقه الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی مشخص می‌شوند. کلیدهایی که لازم است باز باشند توسط الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی مشخص می‌شوند. هر کروموزوم کلیدهایی که باید باز باشند را نشان می‌دهد. زمانی که کلیدهایی که باید باز باشند مشخص شدند، وضعیت سایر کلیدها به‌طور خودکار مشخص می‌شود. تعداد کلیدهای باز برابر است با $N_{branch} - N_{bus} + 1$ و بنابراین تعداد متغیرهای هر کروموزوم برابر با این مقدار است. لازم به ذکر است متغیرهای کروموزوم‌ها عددی بین ۱ و شماره بالاترین کلید را اختیار می‌کنند. هم‌چنین کروموزوم‌هایی قابل قبول هستند که با بازبودن کلیدهایی که شماره‌شان در آن کروموزوم ذکر شده شبکه شعاعی باشد. الگوریتم حل مسئله که به طور خلاصه در شکل ۳ نشان داده شده‌است، به شرح زیر است:

۱- تعداد N^{FCS} از باس‌های کاندید شبکه را برای نصب ایستگاه شارژ انتخاب کن.

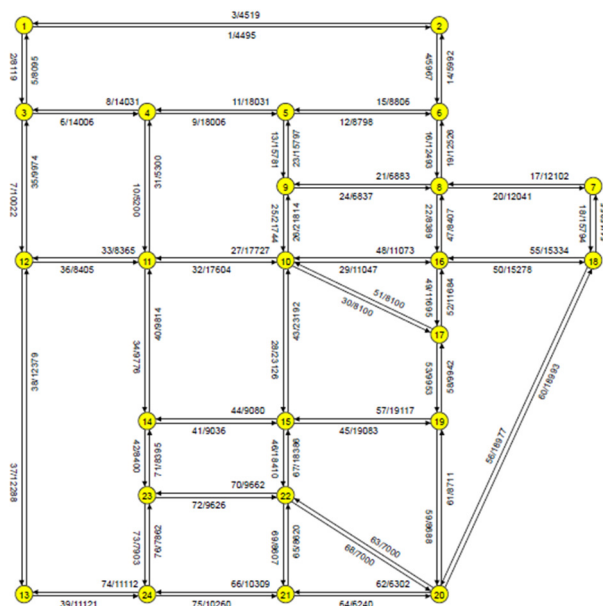
۲- مشخص کن نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ به هر یک از گره‌های ترافیکی کدام است و با توجه به آن، اندازه هر ایستگاه شارژ را محاسبه کن.

۳- اندازه به‌دست‌آمده برای هر ایستگاه شارژ (N_k) را با حد بیشینه اندازه ایستگاه مقایسه کن. در صورتی که اندازه هر کدام از ایستگاه‌های شارژ بزرگتر از حد بالای ظرفیت ایستگاه‌های شارژ است به مرحله ۴ برو؛ در غیر این صورت، به مرحله ۶ برو.

۴- از بین گره‌های ترافیکی که به ایستگاه با ظرفیت خارج از محدوده FCS_k^{CV} تعلق دارند دورترین گره (TN_k^f) به آن ایستگاه خاص را انتخاب کن. در صورتی که با حذف این گره ظرفیت آن ایستگاه خاص به محدوده مجاز می‌رسد به مرحله ۵ برو در غیر این صورت مرحله ۴ را تکرار کن.



شکل ۳: الگوریتم حل مسأله



شکل ۵: شبکه تست ترافیک [۳۴]

جدول ۴: هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ

مکان‌های کاندید	۱	۲	۳	۴	۵
شماره باس	۵	۱۰	۲۰	۲۵	۳۲
گره ترافیکی	۱۲	۳	۱۰	۱۵	۱۸
c_i^{CHF} [10^4 US\$]	۸/۰	۸/۰	۸/۰	۸/۰	۸/۰
c_i^{LS} [10^4 US\$]	۴/۰	۴/۲	۳/۲	۳/۶	۴/۰
c_i^F [10^4 US\$]	۴۰	۴۲	۳۲	۳۶	۳۸

جدول ۵: پارامترهای الگوریتم ژنتیک هم‌تکمالی

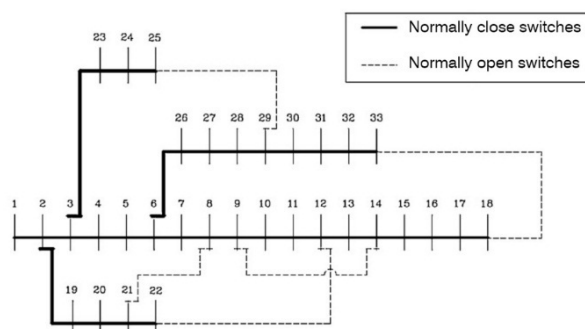
احتمال جهش	احتمال تزیج	تعداد تکرار	اندازه جمعیت
۰/۳	۰/۷	۷۰	۴۰

جدول ۶: قیمت انرژی در طول روز

زمان در روز	قیمت (\$/kWh)
پرباری (۲۰-۱۴)	۰/۵
میان‌باری (۷-۱۴ و ۲۰-۲۲)	۰/۲
کم‌باری (سایر زمان‌ها)	۰/۱۵

جدول ۷: خلاصه نتایج برای سناریوهای بدون بازآرایی و با بازآرایی

روش	بدون بازآرایی			با بازآرایی		
	۵	۲۰	۲۵	۵	۲۰	۲۵
مکان (باس)	۵	۲۰	۲۵	۵	۲۰	۲۵
اندازه	۶	۷	۹	۶	۷	۹
کلیدهای باز	۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷			۷-۱۱-۲۲-۲۴-۲۷		
هزینه سرمایه‌گذاری (10^5 US\$)	۳/۶۳			۳/۶۳		
هزینه تلفات (10^5 US\$)	۲/۴۵			۱/۷۷		
هزینه کل (10^5 US\$)	۶/۰۸			۵/۴		
تفاوت هزینه تلفات (10^5 US\$)	۰/۶۸			۰/۶۸		
تفاوت هزینه تلفات (%)	۳۸/۴۱			۳۸/۴۱		
تفاوت هزینه کل (10^5 US\$)	۰/۶۸			۰/۶۸		
تفاوت هزینه کل (%)	۱۲/۵۹			۱۲/۵۹		



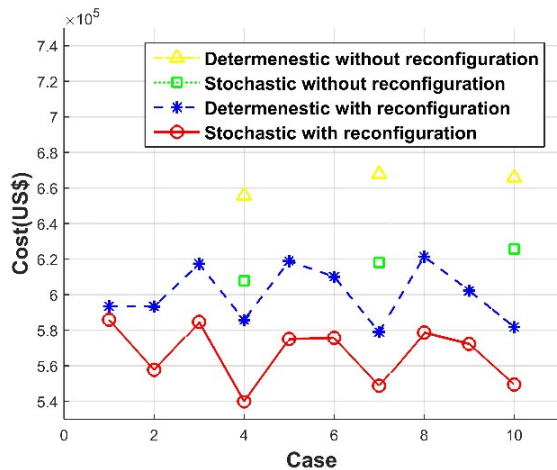
شکل ۴: شبکه IEEE ۳۳ باسه

جدول ۳: محل کلیدهای شبکه

شماره کلید	باس‌های اتصال‌دهنده	شماره کلید	باس‌های اتصال‌دهنده
۱	۲-۱	۲۰	۲۱-۲۰
۲	۳-۲	۲۱	۲۲-۲۱
۳	۴-۳	۲۲	۲۳-۲۳
۴	۵-۴	۲۳	۲۴-۲۳
۵	۶-۵	۲۴	۲۵-۲۴
۶	۷-۶	۲۵	۲۶-۲۶
۷	۸-۷	۲۶	۲۷-۲۶
۸	۹-۸	۲۷	۲۸-۲۷
۹	۱۰-۹	۲۸	۲۹-۲۸
۱۰	۱۱-۱۰	۲۹	۳۰-۲۹
۱۱	۱۲-۱۱	۳۰	۳۱-۳۰
۱۲	۱۳-۱۲	۳۱	۳۲-۳۱
۱۳	۱۴-۱۳	۳۲	۳۳-۳۲
۱۴	۱۵-۱۴	۳۳	۲۱-۸
۱۵	۱۶-۱۵	۳۴	۱۴-۹
۱۶	۱۷-۱۶	۳۵	۲۲-۱۲
۱۷	۱۸-۱۷	۳۶	۳۳-۱۸
۱۸	۱۹-۲۰	۳۷	۲۹-۲۵
۱۹	۲۰-۱۹		

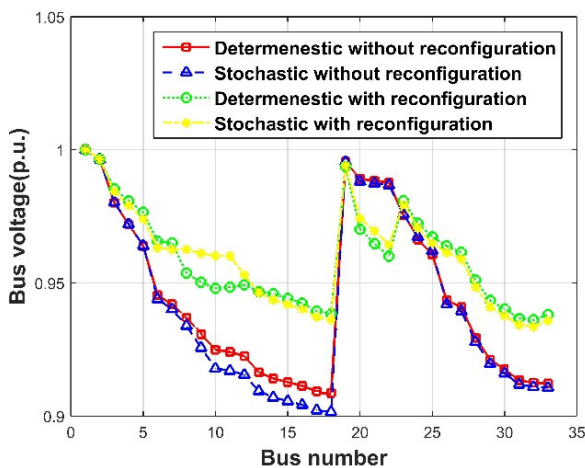
بر طبق استاندارد IEC 61851، ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی ۲۰ کیلووات‌ساعت و توان شارژ هر نازل برابر ۴۴ کیلووات در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین بر طبق استاندارد IEC 61851-1، سطح شارژ ۳ برای ایستگاه‌های شارژ سریع انتخاب شده‌است. پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک هم‌تکمالی در جدول ۵ نشان داده شده‌است. به علاوه، برای قیمت انرژی از تعرفه سه نرخه زمان استفاده شامل زمان‌های پرباری، میان‌باری و کم‌باری (جدول ۶) استفاده شده‌است [۴].

جواب بهینه مسأله و مقدار تابع هدف در نقطه بهینه در جدول ۷ ارائه شده‌است. با در نظر گرفتن امکان بازآرایی هزینه کل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته‌است. وقتی امکان بازآرایی شبکه وجود دارد هزینه تلفات و هزینه کل به ترتیب ۳۸/۴۱٪ و ۱۲/۵۹٪ کاهش یافته‌است.



شکل ۶: مقدار بهینه تابع هدف برای ترکیب‌های مختلف از باس‌های کاندید

ولتاژ باس‌های شبکه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار شکل نشان می‌دهد که استفاده از بازآرایی در برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ باعث بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود. کمترین مقدار ولتاژ برای حالت بدون بازآرایی در باس ۱۸ است؛ زیرا باس ۱۸ در انتهای یک فیدر بلند است که بارهای زیادی را تغذیه می‌کند. در نتیجه جریان قابل توجهی از این فیدر عبور کرده و این جریان باعث افت ولتاژ بیشتر می‌شود. وضعیت باس ۳۳ هم مشابه باس ۱۸ است و مقدار ولتاژ این باس هم پایین است؛ اما وقتی از بازآرایی استفاده می‌شود این افت ولتاژها مدیریت می‌شوند. این موضوع با تغییر وضعیت کلیدها که خود باعث تغییر طول فیدرها و مقدار جریان آن‌ها می‌شود انجام می‌شود.



شکل ۷: پروفیل ولتاژ در جواب بهینه سناریوهای مختلف

در پایان، نتایج روش ارائه شده با نتایج به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات مقایسه شده است. تعداد تکرارها و جمعیت ذرات به ترتیب برابر ۷۰ و ۴۰ می‌باشد. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات مشابه [۶] در نظر گرفته شده است. مسأله ۲۰ مرتبه اجرا شده است. مقادیر متوسط و مدت زمان اجرا در جدول ۹ نشان داده شده است.

در قسمت بعد نتایج شبیه‌سازی به دو روش قطعی و تصادفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این مرحله در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حل مسأله با دو روش مذکور منجر به پاسخ بهینه و مقدار بهینه تابع هدف متفاوتی می‌شود. هزینه تلفات و هزینه کل در دو روش مذکور به ترتیب ۲۰/۱۹٪ و ۷/۲۲٪ نسبت به یکدیگر تفاوت دارد. جواب‌های مسأله در حل به روش قطعی لزوماً جواب بهینه نیست و مقدار تابع هدف نسبت به مقدار تابع هدف در روش تصادفی متفاوت است. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذکر شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

در قسمت بعد، نتایج به دست آمده برای ترکیب‌های مختلف از باس‌های کاندید برای چهار سناریو ارائه شده است:

۱- بدون در نظر گرفتن بازآرایی و عدم قطعیت

۲- بدون در نظر گرفتن بازآرایی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت

۳- با در نظر گرفتن بازآرایی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت

۴- با در نظر گرفتن عدم قطعیت و امکان بازآرایی

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است زمانی که امکان بازآرایی شبکه وجود نداشته باشد برای بسیاری از ترکیب‌های باس‌های کاندید به علت نقض قیود شبکه پاسخی وجود ندارد. لذا دامنه‌ای که باید پاسخ در آن انتخاب شود در حالت بدون بازآرایی بسیار محدودتر است و در نتیجه در حالت بدون بازآرایی هزینه نهایی بیشتر می‌شود. در اینجا در حالت بدون بازآرایی برای هر دو سناریوی قطعی و تصادفی فقط سه ترکیب از ۱۰ ترکیب از باس‌های کاندید منجر به پاسخ می‌شود و در بقیه موارد حداقل یک قید نقض شده است. هم‌چنین از روی شکل ۶ مشخص است که مقدار تابع هدف در برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به قطعی کمتر است.

جدول ۸: خلاصه نتایج برای سناریوهای قطعی و تصادفی

روش	قطعی			تصادفی		
	۱۰	۲۰	۲۵	۵	۲۰	۲۵
مکان (باس)	۶	۹	۷	۶	۷	۹
اندازه	۷-۹-۱۴-۳۲-۳۷			۷-۱۱-۳۲-۳۴-۳۷		
کلیدهای باز	۳/۶۵			۳/۶۳		
هزینه سرمایه‌گذاری ($10^5 US\$$)	۲/۱۴			۱/۷۷		
هزینه تلفات ($10^5 US\$$)	۵/۷۹			۵/۴		
تفاوت هزینه تلفات ($10^5 US\$$)	۰/۳۷					
تفاوت هزینه تلفات (%)	۲۰/۱۹					
تفاوت هزینه کل ($10^5 US\$$)	۰/۳۹					
تفاوت هزینه کل (%)	۷/۲۲					

$\rho_{k,h}$ نرخ مشغول بودن تجهیزات ایستگاه شارژ k ام در ساعت h

$\lambda_{FCS_{k,h}}$ نرخ متوسط رسیدن خودروهای الکتریکی به ایستگاه شارژ k ام در ساعت h

μ نرخ متوسط خدمت‌رسانی ایستگاه‌های شارژ

$Prob_{h,sc}$ احتمال سناریو sc ام در ساعت h

$P_{k,h}^0$ احتمال این که در ساعت h ، هیچ خودرویی در ایستگاه k ام نباشد

$P_{k,h,n}$ احتمال این که در ساعت h ، تعداد n خودرو در ایستگاه k ام باشند

۳. هزینه‌ها

C^{CHF} هزینه مربوط به تجهیزات موردنیاز برای احداث ایستگاه شارژ

C_k^F هزینه ثابت در باس k

C_k^{LS} هزینه وابسته به مکان و اندازه ایستگاه شارژ در باس k

IC هزینه سرمایه‌گذاری

LC هزینه تلفات

TC هزینه کل

۴. پارامترهای شبکه

L_h مقدار بار شبکه در ساعت h

\bar{L}_h مقدار متوسط بار شبکه در ساعت h

$P_{i,h,sc}^d$ بار باس i در ساعت h و سناریوی sc بدون در نظر گرفتن بار ایستگاه‌های شارژ

$P_{k,h}^{FCS}$ توان مصرفی ایستگاه k ام در ساعت h

$P_{i,h,sc}^g$ میزان تولید در باس i در ساعت h و سناریوی sc

$P_{h,sc}^{Loss}$ کل تلفات شبکه در ساعت h و سناریوی sc

$\theta_{ij,h,sc}$ اختلاف فاز باس‌های i و j در ساعت h و سناریوی sc

S_{ij}^{max} ظرفیت توان ظاهری فیدر ij

V_i ولتاژ باس i

V_i^{min}, V_i^{max} حدود پایین و بالای ولتاژ

۵. سایر پارامترها و متغیرها

N_{branch} تعداد خطوط شبکه

N_{bus} تعداد باس‌های شبکه

N^{FCS} تعداد ایستگاه‌های شارژ

N_k اندازه ایستگاه شارژ k ام

N_{loop} تعداد حلقه‌های شبکه

N^{max} حد بالای اندازه ایستگاه شارژ

همان‌طور که مشاهده می‌شود حل مسأله به روش ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی منجر به پاسخ بهینه‌تر نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات شده‌است. هم‌چنین مدت زمان حل مسأله نیز در روش ارائه‌شده نسبت به روش الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات کمتر بوده‌است.

جدول ۹: مقایسه روش ارائه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات

روش حل	هزینه کل ($10^5 US\$$)	مدت زمان اجرا (ثانیه)
الگوریتم هم‌تکاملی	۵/۴	۳۸۸۰
الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات	۵/۷۹	۴۷۰۶
تفاوت (%)	۷/۲	۲۱/۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن امکان بازآرایی شبکه ارائه شده‌است. در این مقاله اندازه و مکان نصب ایستگاه‌های شارژ و هم‌چنین کلیدهای در حالت عادی باز به نحوی مشخص شده‌اند که مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و تلفات انرژی حداقل شود. در این روش عدم قطعیت‌های مربوط به بار معمولی شبکه، بار ایستگاه‌های شارژ و قیمت انرژی در نظر گرفته شده‌است. مسأله براساس یک روش مبتنی بر سناریو و با استفاده از الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی حل شده‌است. با توجه به بالابودن تعداد سناریوها از یک روش کاهش سناریو برای کاهش عملیات محاسباتی استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان روش مناسبی برای برنامه‌ریزی نصب ایستگاه‌های شارژ استفاده شود. هم‌چنین در نظر گرفتن بازآرایی شبکه در حین برنامه‌ریزی نه تنها تلفات و هزینه کل را کاهش می‌دهد بلکه باعث بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود.

فهرست علائم

۱. مجموعه‌ها

Ω^b مجموعه باس‌های شبکه

Ω^f مجموعه فیدرهای شبکه

Ω^{FCS} مجموعه نقاط کاندید برای نصب ایستگاه شارژ

Ω^J مجموعه اولیه سناریوها

Ω^S مجموعه سناریوهای انتخاب‌شده پس از کاهش سناریوها

H مجموعه بازه‌های زمانی (۲۴ ساعت)

۲. پارامترهای مرتبط با عدم قطعیت

خودروی برقی به صورت همزمان با استفاده از الگوریتم بهینه سازی GA-PSO» نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۵، شماره ۴، صفحه ۲۵۸-۲۶۸، ۱۳۹۶.

[۱۷] راضیه آقاپور و محمدصادق سپاسیان، «ارائه یک مدل احتمالاتی برای جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع»، نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۶، شماره ۱۲، صفحه ۱۱-۲۴، ۱۳۹۶.

[۱۸] مهران آزاد و محسن قاینی، «ارائه روش جدید برای جایابی ایستگاه‌های شارژ سریع خودرو برقی در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، فصل نامه عصر برق، سال ۴، شماره ۷، صفحه ۲۰-۱۶، ۱۳۹۶.

- [19] H. Kim, Y. Ko, and K. H. Jung, "Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp.1356-1366, 1993.
- [20] R.S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S.V. Narasimham, "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 317-325, 2013.
- [21] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M.R. Akbari-Zadeh, and B. Dehghan, "Stochastic framework for reliability enhancement using optimal feeder reconfiguration," Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 25, no. 5, pp. 901-910, 2014.
- [22] M. A. Kashem, V. Ganapathy, and G. B. Jasmon, "Network reconfiguration for load balancing in distribution networks," IET Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, no. 6, pp. 563-567, 1999.
- [23] S. K. Goswami, and S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, 1992.
- [24] D. Shirmohammadi, and H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, 1989.
- [25] S. Bae, and A. Kwasinski, "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 394-403, 2012.
- [26] G. Celli, G.G. Soma, F. Pilo, F. Lacu, S. Mocci, and N. Natale, "Aggregated electric vehicles load profiles with fast charging stations," Power Systems Computation Conference (PSCC), pp. 1-7, 2014.
- [27] 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. 1, no. 73, pp. 56-70, 2015.
- [28] H. Shayeghi, and A. Bagheri, "Dynamic sub-transmission system expansion planning incorporating distributed generation using hybrid DCGA and LP technique," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 48, pp. 111-122, 2013.
- [29] A.J. Conejo, M. Carrión, and J.M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*, Springer, 2010.
- [30] S. X. Zhang, C. Y. Chung, K. P. Wong and H. Chen, "Analyzing two-settlement electricity market equilibrium by coevolutionary computation approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 3, pp. 1155-1164, 2009.
- [31] K. Bernhard, and J. Vygen, *Combinatorial optimization: Theory and algorithms*, Springer, 2012.
- [32] L. Feng, G. Shaoyun, and H. Liu, "Electric vehicle charging station planning based on weighted voronoi diagram," Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012.
- [33] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, 1989.
- [34] Transportation Network Test Problems, Available at: <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks/tree/master/SiouxFalls>, Accessed: May 11, 2019.

حد پایین اندازه ایستگاه شارژ
 N^{min}
 u_k متغیر تصمیم‌گیری باینری برای نصب ایستگاه شارژ

مراجع

- [۱] جمشید آقایی، سید احسان باقری، سجاد شفیعی، طاهر نیک‌نام و سید محسن باقری، «بررسی پاسخ‌گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۱-۲۰، ۱۳۹۶.
- [۲] جابر پولادی، محمدباقر بناء شریفیان، و سودابه سلیمانی، «مدل‌سازی احتمالاتی تقاضای شارژ خودروهای برقی تجمیع‌شده در شبکه توزیع خانگی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۳۶۹-۱۳۵۷، ۱۳۹۶.
- [3] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no.1, pp. 102-110, 2013.
- [4] Y. Zheng, Z.Y. Dong, Y. Xu, K. Meng, J.H. Zhao, and J. Qiu, "Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no.1, pp. 221-229, 2014.
- [5] P. Sadeghi-Barzani, A. Rajabi-Ghahnavieh, and H. Kazemi-Karegar, "Optimal fast charging station placing and sizing," Applied Energy, vol. 125, pp. 289-299, 2014.
- [6] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu, and Y. Song, "An Integrated Planning Framework for Different Types of PEV Charging Facilities in Urban Area," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.7, no.5, pp. 2273-2284, 2015.
- [7] A.Y. Lam, Y.W. Leung, and X. Chu, "Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2846-2856, 2014.
- [8] W. Yao, J. Zhao, F. Wen, Z. Dong, Y. Xue, Y. Xu, and K. Meng, "A Multi-objective Collaborative Planning Strategy for Integrated Power Distribution and Electric Vehicle Charging Systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 29, no.4, pp. 1811-1821, 2014.
- [9] G. Wang, Z. Xu, F. Wen, and K.P. Wong, "Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no.4, pp. 2363-2372, 2013.
- [10] S. Guo, and H. Zhao, "Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective," Applied Energy, vol. 158, pp. 390-402, 2015.
- [11] Y. Xiang, J. Liu, R. Li, F. Li, C. Gu, and S. Tang, "Economic Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering Traffic Constraints and Load Profile Templates," Applied Energy, vol. 178, pp. 647-659, 2016.
- [12] A. Awasthi, K. Venkitesamy, S. Padmanaban, R. Selvamuthukumar, F. Blaabjerg, and A.K. Singh, "Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm," Energy, vol. 15, no. 133, pp. 70-78, 2017.
- [13] H. Zhang, S. Moura, Z. Hu, and Y. Song, "PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2595-2605, 2016.
- [14] X. Dong, Y. Mu, H. Jia, J. Wu, and X. Yu, "Planning of Fast EV Charging Stations on a Round Freeway," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no.4, pp. 1452-1461, 2016.
- [15] H. Zhang, S.J. Moura, Z. Hu, W. Qi, and Y. Song, "A Second Order Cone Programming Model for Planning PEV Fast-Charging Stations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no.3, pp. 2763-2777, 2017.
- [۱۶] محمدحسن مرادی، مصطفی رضایی مظفر و پرهام محمدعلیزاده، «جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ»

زیر نویس ها

¹⁰ Expert systems¹¹ Scenario-based¹² Dijkstra's algorithm¹³ Coevolutionary genetic algorithm (CGA)¹⁴ Generation¹⁵ Crossover¹⁶ Mutation¹⁷ Sioux falls¹ Electric vehicles² Screening³ Primal- dual interior point⁴ Queuing theory⁵ Normally open⁶ Normally closed⁷ Optimum flow pattern⁸ Neural network⁹ Particle swarm optimization