Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article (2025) 4(2):88-102

Planning the Development of Fast Charging Stations Considering the Multi-Stage Expansion of the Urban Distribution Network by the Linear Programming Method

Moaiad Mohseni[1], *PhD*, Atiyeh Golmohamadi [2], *M.Sc.*, Mohammad Amin Bahramian [3,4], *M.Sc.*, Reza Mohammadi Nik [5], *M.Sc.* Vahid Davatgaran [6], *Assistant Professor*

[1] *Khuzestan Regional Electric Company, Ahvaz, Iran*
[2] *Department of Electrical Engineering, Tehran Center Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[3] *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran*
[4] *Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak, Iran*
[5] *Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran*
[6] *Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran*

Abstract:

In recent years, global warming and climate change have been one of the most controversial and challenging issues for governments, companies and international conventions. The main cause of this warming is the upward trend of population growth in the last few decades and then the increase in the use of fossil fuels for energy production and transportation. Therefore, most of the governments in their grand plans are required to remove fossil fuel vehicles and replace them with electric vehicles. Therefore, with the increase in the use of electric vehicles in cities, the discussion of planning for electric power consumption by them and their correct placement, their number and location has become an important issue for operators and designers. In this article, in order to plan the development of the distribution network in the presence of electric vehicle charging stations and renewable production sources, a solution method based on integer linear programming is used. The purpose of this problem is to reduce the costs of building the network, substations, charging stations, building renewable resources, capacitor banks and buying electricity from the network in the long term. The proposed method has been implemented on an 18-bus network in three scenarios, and the results show that the presence of electric vehicle charging stations in the network can be beneficial to some extent and increase reliability and reduce network costs.

Keywords: Distribution network, Electric vehicle, Fast charging station, Network development, Renewable resources.

Received: 08 May 2024
Revised: 01 July 2024
Accepted: 13 August 2024
Corresponding Author: Dr. Vahid Davatgaran, vdavatgaran@tvu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1122160

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن گسترش چند مرحله‌ای شبکه توزیع شهری توسط روش برنامه‌ریزی خطی

موید محسنی[1]، دکتری، عطیه گل محمدی[2]، *کارشناسی ارشد* ، محمد امین بهرامیان[3,4]، *کارشناسی ارشد*،
رضا محمدی نیک [5]، *کارشناسی ارشد*، وحید دواتگران [6]، *استادیار*

۱- شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان، اهواز، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران
۳- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
۴- پژوهشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه اراک، اراک، ایران
۵- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۶- گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده: در سال‌های اخیر گرمایش کره زمین و تغییرات اقلیمی یکی از بحث برانگیزترین و پرچالش‌ترین زمینه‌های مسائل برای دولت‌ها، شرکت‌ها و کنوانسیون های بین المللی بوده است. که عامل اصلی این گرمایش ابتدا روند صعودی افزایش جمعیت در چند دهه اخیر و سپس افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی و حمل و نقل بوده است. لذا، اکثر دولت‌ها در برنامه‌ریزی‌های کلان خود الزام به حذف خودروهایی با سوخت فسیلی و جایگزینی آن‌ها با خودروهای برقی را دارند. از این رو، با افزایش استفاده از خودروهای برقی در شهرها، بحث برنامه‌ریزی برای مصرف توان الکتریکی توسط آن‌ها و جانمایی صحیح آن‌ها تعداد و مکان آن‌ها به مسأله مهمی برای بهره‌برداران و طراحان تبدیل شده است. در این مقاله به منظور برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی و منابع تولید تجدیدپذیر یک روش حل مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده شده است. تابع هدف این مسئله سعی بر کاهش هزینه‌های احداث شبکه، پست‌ها، ایستگاه‌های شارژ، احداث منابع تجدیدپذیر، بانک‌های خازنی و خرید برق از شبکه در چشم‌انداز بلند مدت دارد. روش پیشنهادی روی یک شبکه ۱۸ شینه در سه سناریو اجرا شده که نتایج نشان می‌دهد حضور ایستگاه‌های شارژ خودرو برقی در شبکه تا حدی می‌تواند سودمند باشد و باعث افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های شبکه گردد.

واژه های کلیدی: ایستگاه شارژ سریع، توسعه شبکه، خودروی برقی، شبکه توزیع، منابع تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳
نویسنده‌ی مسئول: دکتر وحید دواتگران، vdavatgaran@tvu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1122160

۱- مقدمه

یکی از پر چالش‌ترین و حساس‌ترین نگرانی‌های امروز نسل بشر و دولت‌ها، مسئله گرمایش کره زمین و تولید آلاینده‌های زیست محیطی است. که این چالش ارتباط مستقیم با تولید انرژی و مصرف سوخت‌های فسیلی دارد. یکی از عوامل اصلی تولید این آلاینده‌ها خودروها و نیروگاه‌های سنتی هستند. از طرفی در دهه‌هایی نیز توسعه غیرکارشناسی، ناهماهنگ و نامتناسب شبکه نیز از عوامل دیگر تأثیرگذار بر این مشکل بوده است. در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع تاکنون تحقیقات و مقاله‌های متنوعی ارائه شده است. تلاش های فراوانی جهت دسته بندی تحقیقات نیز صورت گرفته است که نمونه‌ای از آن‌ها در قالب مقالات [۵-۱] ارائه شده است.

در زمینه ادغام برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با مساله جایابی تحقیقات ارزشمندی ارائه شده است. به طور مثال، مرجع [۶] به جایابی بهینه ادوات ذخیره ساز انرژی[۱] و تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی های نو در شبکه‌های توزیع پرداخته است که به صورت برنامه ریزی مخروطی چندمرحله ای تصادفی مدل شده است و دسترسی به جواب بهینه آن تضمین شده است. در مرجع [۷] جایابی ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی[۲] در مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مدل شده است و از دیدگاه فنی و اقتصادی مختلفی بررسی شده است. اثرات ادغام دو روش منجر به بهبود تلفات و پروفیل ولتاژ شبکه شده و از دیدگاه اقتصادی هزینه کل سیستم کاهش یافته است. مساله به صورت بهینه سازی محدب مدل شده است. در مرجع [۸] ادغام جایابی پارکینگ های شارژ خودروی برقی[۳] و منابع تولید پراکنده در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است. سه مورد به عنوان علل اصلی این ادغام بیان شده است: بهره گیری از منابع انرژی پاک، تامین قابل اطمینان بار شبکه، و توسعه پایدار شبکه‌های توزیع. مساله به صورت بهینه سازی دو مرحله ای ارائه شده است با ترکیب الگوریتم ژنتیک[۴] و ازدحام ذرات حل شده است و نتایج نشان از گسترش هرچه بیشتر خودروی برقی توسط این روش دارد. در مرجع [۹] نیز مدلی تصادفی-احتمالاتی (ترکیب توزیع احتمال و توابع عضویت فازی) برای جایابی پارکینگ خودروی برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است و از روش بهینه‌سازی مبتنی بر پارتو برای حل مساله استفاده شده است. شبکه مورد بررسی نیز شبکه ۲۴ شینه غربالی شهر قلعه گنج کرمان انتخاب شده است که کاهش هزینه سرمایه گذاری بر ایستگاه شارژ را در کنار تامین بیشتر انرژی مورد نیاز رانندگان خودرو را به همراه داشته است.

در مرجع [۱۰] سیستم‌های ذخیره ساز اضطراری در مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ادغام شده است که به صورت برنامه ریزی چندمرحله ای غیرخطی آمیخته عدد صحیح با هدف پیک سایی مدل شده است و با الگوریتم ازدحام ذرات[۵] حل شده است که کاهش هزینه را در کنار بهبود وضعیت بارگذاری خطوط و افت ولتاژها را در پی داشته است. در مرجع [۱۱] نصب پانل های خورشیدی با مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع ادغام شده است و از دیدگاه فنی و اقتصادی در حضور عدم قطعیت بار و تولیدات پراکنده بررسی شده است. از روش های ابتکاری برای حل آن بهره گرفته شده است به طوری که انعطاف شبکه در مقابل رشد سالیانه بار افزایش یافته است. در مرجع [۱۲] ادغام ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی با برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته است که در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه در آمده است. نتایج نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی قادر به برقراری مصالحه ای میان اهداف فنی و اقتصادی است. این چارچوب می تواند در قالب یک نهاد هماهنگ ساز شارژ نیز در زمینه حمل و نقل شهری مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۱۳] ادغام مدیریت شارژ هماهنگ خودروهای برقی با برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع ارائه شده است. از یک استراتژی مبتنی بر سناریو برای ادغام خودروها در شبکه استفاده شده است به طوری که هم پیک بار شبکه محدود گردد و هم با کمترین هزینه توسعه اجرا گردد. در مرجع [۱۴] برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور سطح نفوذ بالای توربین های بادی ارائه شده است که به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح در آمده است. در زمینه مدل سازی برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع نیز تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است.

در مرجع [۱۵] مدل تصادفی برنامه‌ریزی محدب آمیخته عدد صحیح ارائه شده است که در آن کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز در مساله در نظرگرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که هم مساله ی زیست محیطی بهبود پیدا کرده و هم در هزینه های توسعه شبکه کاهش صورت می گیرد. بنابراین این طرح مشوق گسترش تولیدات بادی می باشد. در مرجع [۱۶] یک چارچوب بهینه‌سازی مقاوم برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع با در نظرگیری عدم قطعیت بار ارائه شده است. نتایج حاکی از کاهش پرشدگی خطوط شبکه، کاهش تلفات، بهبود قابلیت اطمینان و به تعویق اندازی توسعه خطوط شبکه توزیع است. در مرجع [۱۷] مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح با در نظرگیری شاخص های قابلیت اطمینان شبکه در توسعه شبکه‌های توزیع ارائه شده است که فرم خطی از

قیود قابلیت اطمینان را دربر دارد. در مرجع [۱۸] مدل برنامه‌ریزی چندهدفه از مساله در سیستم‌های توزیع تماما تجدیدپذیر ارائه شده است که در آن هدف برقراری مصالحه میان منافع فنی و اقتصادی است با روش مبتنی بر پارتو حل شده است. این روش منجر به تسهیل گسترش نیروگاه-های خورشیدی شده است. در مرجع [۱۹] مدل منعطف برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در قالب روش دینامیکی دو مرحله ای درآمده است. تاثیر شارژ هماهنگ خودروهای برقی در پارکینگ های شارژ و میزان تناقض میان اهداف صاحب پارکینگ و شرکت بهره بردار شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۲۰] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح دو مرحله ای منعطف دیگری برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع فعال در حضور تولیدات پراکنده و ذخیره‌ساز ارائه شده است که مبتنی بر ریسک اقتصادی می باشد و منجر به جواب‌هایی با کمترین میزان ریسک شده است. در مرجع [۲۱] مدل برنامه‌ریزی مخروطی آمیخته عددصحیح دومرحله ای تصادفی ارائه شده است که در آن عدم قطعیت بار و منابع توربین بادی مدنظر قرار گرفته است. مزیت این روش نزدیکی مساله به دنیای واقعی از طریق مدل سازی صحیح عدم قطعیت بیان شده-است. محدودیت این روش نیز پایین بودن راندمان محاسباتی مساله بیان شده است.

در مرجع [۲۲] مدل غیر محدب و غیرخطی برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در آن عدم قطعیت باد، خودورهای برقی و برنامه پاسخ گویی بار در نظر گرفته شده است که با الگوریتم بهبود یافته زنبور عسل حل شده است. نتایج حاکی از کاهش تلفات و هزینه هستند. در مرجع [۲۳] مدل برنامه‌ریزی دوسطحی مقاوم شبکه‌های توزیع فعال ارائه شده است که در آن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر انرژی در نظر گرفته شده است. مدل به فرم برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دو آمیخته عدد صحیح است. عدم قطعیت نیز از جمله اساسی ترین موضوعات برنامه ریزی توسعه شبکه توزیع است. در مرجع [۲۴] عدم قطعیت بار، خودروهای برقی و منابع تجدیدپذیر در مساله برنامه‌ریزی چند مرحله ای توسعه شبکه‌های توزیع فعال درنظرگرفته شده است یک ماتریس عدم قطعیت برای نمایش همبستگی میان عدم قطعیت بار، خودروهای برقی و منابع تجدیدپذیر تشکیل شده است. در مرجع [۲۵] تحلیل ادغام عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر انرژی در قالب یک بهینه سازی چندهدفه برداری خطی عدد صحیح انجام شده است تا موجب گسترش سطح نفوذ منابع تجدیدپذیر در شبکه شود. در مرجع [۲۶] یک مدل چندهدفه مخروطی مرتبه دوم برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور عدم قطعیت رندوم ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد اختصاص تصادفی وزن سناریوها منجر به هزینه های کمتر بهره برداری شده قابلیت اطمینان و پایداری شبکه را نیز افزایش می‌دهد. در مرجع [۲۷] عدم قطعیت خودروهای برقی در مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع مدل شده است که از روش تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده نموده است. مساله به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل شده است که منجر به کاهش پرشدگی خطوط شده است و بهبود قابلیت اطمینان شبکه شده است. در مرجع [۲۸] مدیریت عدم قطعیت رفتار رانندگان خودروهای برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در نظرگرفته شده است که منجر به مشارکت بیشتر آن‌ها در برنامه ی پاسخ گویی بار شده است. در مرجع [۲۹] برنامه‌ریزی چهار مرحله ای توسعه شبکه‌های توزیع با در نظرگیری عدم قطعیت بازار برق[۶] شبکه بالادستی و اثرات آن بر قیمت گذاری هماهنگ یا ناهماهنگ برق در شبکه پایین دستی و برنامه پاسخ گویی بار مورد بررسی قرار گرفته است که موجب صرفه جویی انرژی شده است. در مرجع [۳۰] مساله برنامه‌ریزی سه مرحله ای و دینامیکی شبکه توزیع در شبکه‌های برق خصوصی مورد بررسی قرار گرفته است که با روش تجزیه بندرز[۷] حل شده است.

۱-۱- سهم تحقیقاتی

بر اساس مرور تحقیقات ارائه شده در زمینه ی برنامه‌ریزی مدرن شبکه‌های توزیع می توان استنباط نمود که با افزایش سطح نفوذ منابع مختلف در شبکه‌های توزیع از قبیل تولیدات تجدیدپذیر، خودروهای برقی و ... برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع با تحولات و چالش های جدیدی مواجه شده است. بحث قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، قیود امنیت شبکه و بهره برداری اقتصادی از شبکه‌های توزیع در سال های اخیر توجه فراوانی را به خود معطوف ساخته است. بنابراین در این مقاله با در نظرگیری عوامل مختلف به برنامه‌ریزی همزمان توسعه شبکه‌های توزیع و ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی پرداخته شده است. همچنین مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع یکی از اساسی ترین اقدامات بهره برداران شبکه برای رشد بار در سال‌های آتی به شمار می‌آید که معمولاً با هدف کاهش هزینه های نصب و احداث تجهیزات شبکه و با رعایت قیود حاکم بر محدودیت های فنی بهره برداری از شبکه انجام می شود. در برنامه‌ریزی پیشنهادی این مقاله نیز معمولاً چندین نوع خط برای احداث و یا تقویت پیشنهاد می‌شود. همچنین امکان تقویت و یا

احداث پست های جدید نیز وجود دارد. قیود حاکم بر برنامه‌ریزی توسعه ی شبکه‌های توزیع نیز اطمینان از رعایت بهره برداری در حد مجاز از پست های توزیع و فیدرها و شرط برقراری توازن میان تولید و تقاضای انرژی را تضمین می‌کنند. رشد خودروهای برقی در سال های اخیر، برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع را تحت تاثیر خود قرار داده است. از طرف دیگر مدیریت شارژ خودروهای برقی می تواند به گونه ای هماهنگ با برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع صورت گیرد تا هم بر شاخص های اقتصادی و هم بر شاخص های فنی تاثیر مثبتی گذارد. بنابراین هدف از این مقاله ارائه ی مدلی برای برنامه‌ریزی توسعه ی شبکه‌های توزیع در حضور خودروهای برقی در شبکه توزیع است. به نوعی تاثیر شارژ هماهنگ خودروهای برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع بیان خواهد شد.

۱-۲- نوآوری‌ها

نوآوری های این مقاله را میتوان در مدل سازی مقاوم و همزمان برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع و ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی دانست که توسط روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح[۸] حل می‌شود و توسط دو جعبه‌ابزار نرم افزار متلب به نام یالمیپ[۹] و موسِک[۱۰] به خوبی بهینه شده است. در نظرگیری افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی و تعیین وضعیت احداث یا تقویت پست های شبکه، ایستگاه شارژ خودروی برقی، نصب بانک های خازنی، و واحدهای تولید پراکنده از دیگر خلاقیت های این تحقیق محسوب می شود. در نظرگیری قیود مبتنی بر شانس نیز از دیدگاه ریاضی حایز اهمیت بالایی است که تاثیر آن در برخی از شبکه‌های استاندارد توزیع مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

سایر بخش های مقاله نیز بدین صورت سازماندهی شده است که در بخش ۲ مدل سازی مساله هماهنگ سازی برنامه ریزی توسعه شبکه و توسعه ایستگاه‌های شارژ ارائه میگردد. همچنین در بخش ۲ توصیف مدل پیشنهادی ارائه شده و در بخش ۳ شبیه‌سازی‌ها انجام شده و در بخش ۴ خلاصه نتایج ارائه می‌گردد.

۲- مدل سازی مساله

تابع هدف کمینه‌سازی کل هزینه توسعه شبکه توزیع است که مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\min \sum_{u} \frac{IC + IS + ICB + IDG + ICS + EC + OS}{(1+\tau)^{-(u-1)K}} \qquad (۱)$$

در جدول (۱) واژنامه روابط معرفی شده است.

جدول (۱): واژه نامه.

هزینه نوع هادی جایگزین شده	$c^{c}_{ij,a,b}$
هزینه نوع پست جایگزین شده	$c^{s}_{s,h,t}$
هزینه نصب کل خازن	c^{cb}
هزینه نصب هر ماژول از خازن‌ها	c^{mod}
هزینه سرمایه‌گذاری هر تولید پراکنده	c^{dg}_{g}
هزینه سرمایه‌گذاری بر ایستگاه شارژ	c^{cs}
هزینه سرمایه‌گذاری بر شارژرها	c^{c}_{e}
هزینه انرژی منتقل شده توسط پست	c^{e}
هزینه بهره‌برداری پست	c^{v}_{s}
حداکثر تعداد شارژر برای نصب	$\overline{C_p}$
هزینه انرژی تولیدی تولیدات پراکنده g	c^{edg}_{g}
انرژی مورد نیاز خودروی نوع v	E^{req}_{v}
تعداد خازن های نصب شده نوع u در شینه i	$n^{cbi}_{i,u}$
تعداد واحدهای خازنی مورد بهره برداری استاندارد در شینه i در زمان u	$n^{cbo}_{i,u}$
تعداد ایستگاه‌های شارژ نوع e خودرو در شینه p و زمان e	$n^{chi}_{p,e,u}$

$n_{i,e,u}^{cho}$	تعداد شارژهای یک ایستگاه شارژ که مورد بهره برداری قرار گرفته اند
$n_{e,v,u}^{ev}$	تعداد خودروهای نوع v که با شارژ e در زمان u متصل شده اند.
$N_{v,u}^{EV}$	تعداد خودروهای برقی نوع v در زمان u
IC	هزینه سرمایه‌گذاری انشعابات
ICB	هزینه سرمایه گذاری بانک خازنی
IDG	هزینه سرمایه‌گذاری بر تولیدات پراکنده
IS	هزینه سرمایه‌گذاری پست
$I_{ij,a,u}^{sqr}$	مجذور جریان عبوری از خط ij نوع a در زمان u
$\overline{I_a}$	محدوده جریان عبوری از خط نوع a
$P_{s,u}^{S}$	توان عبوری از پست
$P_{m,u}^{DG}$	توان تولیدی تولید پراکنده
$P_{i,u}^{S}$	تقریب مجذور توان اکتیو پست
$P_{ij,a,u}$	توان اکتیو عبوری از خط ij نوع a در زمان u
$Q_{i,u}^{S}$	تقریب مجذور توان راکتیو پست
$Q_{ij,a,u}$	توان راکتیو عبوری از خط ij نوع a در زمان u
$Q_{i,u}^{D}$	توان راکتیو بار قرار گرفته در شینه i در زمان u
Q^{cb}	توان راکتیو هر بانک خازنی
$Q_{i,g,u}^{DG}$	توان راکتیو هر تولید پراکنده در گره i و زمان u
R_a	مقاومت خط نوع a نسبت به طول آن خط
$\overline{V}$	محدوده بالای ولتاژ
$\underline{V}$	محدوده پایین ولتاژ
$V_{j,u}'$	ولتاژ تخمین زده شده در گره i
$x_{ij,a,b,u}^{cir}$	متغیر باینری بیانگر وضعیت سرمایه گذاری بر خط واصل دوگره ij، که قبلا در وضعیت a بوده و هادی نوع b در زمان u جایگزین آن شده است.
$x_{s,h,t,u}^{sub}$	متغیر باینری سرمایه گذاری بر پست گره s که قبلا در وضعیت h بوده و با نوع t در زمان u جایگزین شده است.
$x_{i,u}^{cb}$	متغیر باینری نصب بانک خازنی نوع u در شینه i
$x_{m,g,u}^{dg}$	متغیر باینری نصب واحد تولید پراکنده نوع g در شینه m در زمان u
$x_{p,u}^{cs}$	متغیر باینری نصب ایستگاه شارژ در زمان u در شینه p
$y_{ij,a,u}^{cir}$	وضعیت اتصال انشعاب نوع a واصل دو شینه ij در زمان u
Z_a	امپدانس خط نوع a نسبت به طول آن خط
l_{ij}	طول خط واصل دو گره ij
α	تعداد ساعات یک سال
$1-\epsilon$	ضریب اعتماد
K	طول دوره برنامه‌ریزی بر حسب سال
τ	نرخ بهره

که تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را به همراه هزینه‌های تلفات در بر می‌گیرد. به طور جزئی‌تر می توان گفت که تابع هدف شامل موارد زیر می باشد:

الف) هزینه سرمایه گذاری مدارات انشعابات (سرمایه‌گذاری روی خطوط) که از حاصل‌ضرب سه پارامتر طول خط، قیمت نوع خط، و وضعیت احداث آن بدست می‌آید، که مطابق با رابطه (۲) است:

$$IC = \sum_{ij}\sum_{a}\sum_{b} c^{c}_{ij,a,b} x^{cir}_{ij,a,b} l_{ij} \quad (۲)$$

ب) هزینه سرمایه گذاری پست که نتیجه حاصل‌ضرب دو عبارت نرخ سرمایه‌گذاری پست و وضعیت احداث آن می‌باشد ، که مطابق با رابطه (۳) است [۳۱]:

$$IS = \sum_{s}\sum_{h}\sum_{t} c^{s}_{s,h,t} x^{sub}_{s,h,t,u} \quad (۳)$$

ج) هزینه بانک‌های خازنی که شامل دو هزینه یکی هزینه احداث بانک و دیگری هزینه نصب هر ماژول از آن خازن می‌باشد، که مطابق با رابطه (۴) است:

$$ICB = \sum_{i}\left(c^{cb} x^{cb}_{i,u} + c^{\mathrm{mod}} n^{cbi}_{i,u}\right) \quad (۴)$$

د) هزینه واحدهای تولید پراکنده که صرفا شامل نرخ احداث آن واحد تولید پراکنده و وضعیت احداث می‌باشد، که مطابق با رابطه (۵) است [۳۲]:

$$IDG = \sum_{m}\sum_{g} c^{dg}_{g} x^{dg}_{m,g,u} \quad (۵)$$

این مجموعه معادلات بر اساس متغیرهایی نوشته شده اند که بیانگر متغیرهای تصمیم گیری مربوط به سرمایه گذاری هستند. بنابراین از متغیرهای باینری سرمایه گذاری تشکیل شده اند که وضعیت احداث یا تقویت تجهیزات و نوع آن را بیان می کند. به همین ترتیب هزینه های مربوط به پست نیز توسط متغیر باینری بیانگر احداث یا تقویت محاسبه میشود. هزینه مدار شکن ها نیز بستگی به متغیر تصمیم گیری دارد که دو دسته متغیرهای باینری (مانند وضعیت نصب) و متغیرهای عدد صحیح (مانند تعداد واحدها) را شامل می‌شود.هزینه سرمایه گذاری بر واحدهای تولید پراکنده نیز به همین ترتیب خواهد بود.

ه) هزینه مربوط به ایستگاه شارژ: این هزینه نیز تابعی از متغیرهای باینری (مربوط به جایابی) و عدد صحیح (تعداد شارژرها) است، که مطابق با رابطه (۶) است [۳۳].

$$ICS = \sum_{p}\sum_{e}\left(c^{cs} x^{cs}_{p,u} + c^{c}_{e} n^{chi}_{p,e,u}\right) \quad (۶)$$

(و) هزینه‌های مربوط به انرژی. این هزینه همان مبلغ خریداری شده انرژی از شبکه بالادستی است و هزینه تولید توان توسط واحد تولیدات پراکنده است، که مطابق با رابطه (۷) است [۳۴,۳۵]:

$$EC = \alpha\phi_{l}\left(\sum_{s} c^{e} P^{S}_{s,u} + \sum_{m}\sum_{g} c^{edg}_{g} P^{DG}_{m,u}\right)\zeta(\tau, K) \quad (۷)$$

(ز) هزینه مربوط به بهره برداری از پست. در واقع هزینه توان ظاهری که توسط پست تامین شده است. این هزینه در اینجا صرف نظر شده است چون نسبت به هزینه احداث پست رقم بسیار ناچیزی می باشد ، که مطابق با رابطه (۸) است:

$$OS = 0 \quad (۸)$$

قیود بسیاری برای مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع وجود دارد که رعایت آن‌ها در مساله الزامی بوده و منجر به دستیابی به جواب‌های درست و منطقی می‌شود که در ادامه این معادلات ارائه خواهد شد.

برقراری توازن میان توان اکتیو که در سمت راست این معادله بارهای مصرفی مربوط به بار سنتی و بار خودروی برقی قرار دارد. در سمت چپ این معادله نیز توان تولیدی در هر شینه، و مجموعه توان ورودی از خطوط متصل بدان شینه منهای تلفات قرار گرفته است ، که مطابق با رابطه (۹) است [۳۶].

$$\sum_{kj}\sum_{a} P_{kj,a,u} - \sum_{ij}\sum_{a}\left(P_{ij,a,u} + R_{a} l_{ij} I^{sqr}_{ij,a,u}\right) + P^{S}_{i,u} + \sum_{g} P^{DG}_{i,g,u} = P^{D}_{i,u} + \sum_{e} n^{cho}_{i,e,u} P^{ch}_{e} \quad (۹)$$

برقراری توان توان راکتیو. دقت شود که تولیدات پراکنده در اینجا قادر به تولید توان راکتیو نیز هستند و به عبارت دیگر، تمامی تولیدات پراکنده از نوع ضریب توان ثابت درنظر گرفته شده اند، که مطابق با رابطه (۱۰) است [۳۷].

$$\sum_{kj}\sum_{a}Q_{kj,a,u}-\sum_{ij}\sum_{a}\left(Q_{ij,a,u}+X_a l_{ij} I_{ij,a,u}^{sqr}\right)+Q_{i,u}^{S} \\ +n_{i,u}^{bco}Q^{cb}+\sum_{g}Q_{i,g,u}^{DG}=P_{i,u}^{D} \qquad (۱۰)$$

محاسبه دامنه جریان عبوری از خط. در مورد رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان می‌توان از تعریف توان عبوری از خطوط استفاده کرد که این رابطه علامت پریم بالای ولتاژ نشان دهنده‌ی حدسی از ولتاژ آن شینه است تا مساله خاصیت خطی بودن خود را حفظ نماید ، که مطابق با رابطه (۱۱) است.

$$V_{j,u}^{'2}I_{ij,a,u}^{sqr}=f\left(P_{ij,a,u},\overline{VI}_a,\Gamma\right)+f\left(Q_{ij,a,u},\overline{VI}_a,\Gamma\right), \quad \forall ij,a,u \qquad (۱۱)$$

محاسبه افت ولتاژ ایجاد شده در خط. در مورد این رابطه میتوان گفت که معمولا در شبکه‌های توزیع افت ولتاژ رابطه‌ای با توان اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۱۲) دارد. در برخی از تحقیقات حتی مشاهده می‌شود که از ترم ضرب شده در امپدانس نیز صرف نظر می‌شود [۳۸].

$$\left|V_{i,u}^{sqr}-V_{j,u}^{sqr}-\sum_{a}\left[\begin{array}{l}2\left(R_a P_{ij,a,u}+X_a Q_{ij,a,u}\right)l_{ij}+\\ Z_a^2 l_{ij}^2 I_{ij,a,u}^{sqr}\end{array}\right]\right| \\ \le\left(\overline{V}^2-V^2\right)\sum_{a}\left(1-y_{ij,a,u}^{cir}\right) \quad \forall ij,u \qquad (۱۲)$$

نکته قابل توجه دیگری که در مورد رابطه (۱۲) وجود دارد این است که زمانی خطی احداث نشده باشد، که همواره این رابطه برقرار است اما اگر خطی احداث شده باشد، حاصل قدر مطلق کوچکتر مساوی صفر خواهد شد و چون حاصل قدر مطلق همواره عددی نامنفی است، پس باید عبارت داخل قدر مطلق در این حالت صفر شده باشد که این امر موجب همگرایی مساله به رابطه افت ولتاژ در شبکه شعاعی می‌شود.

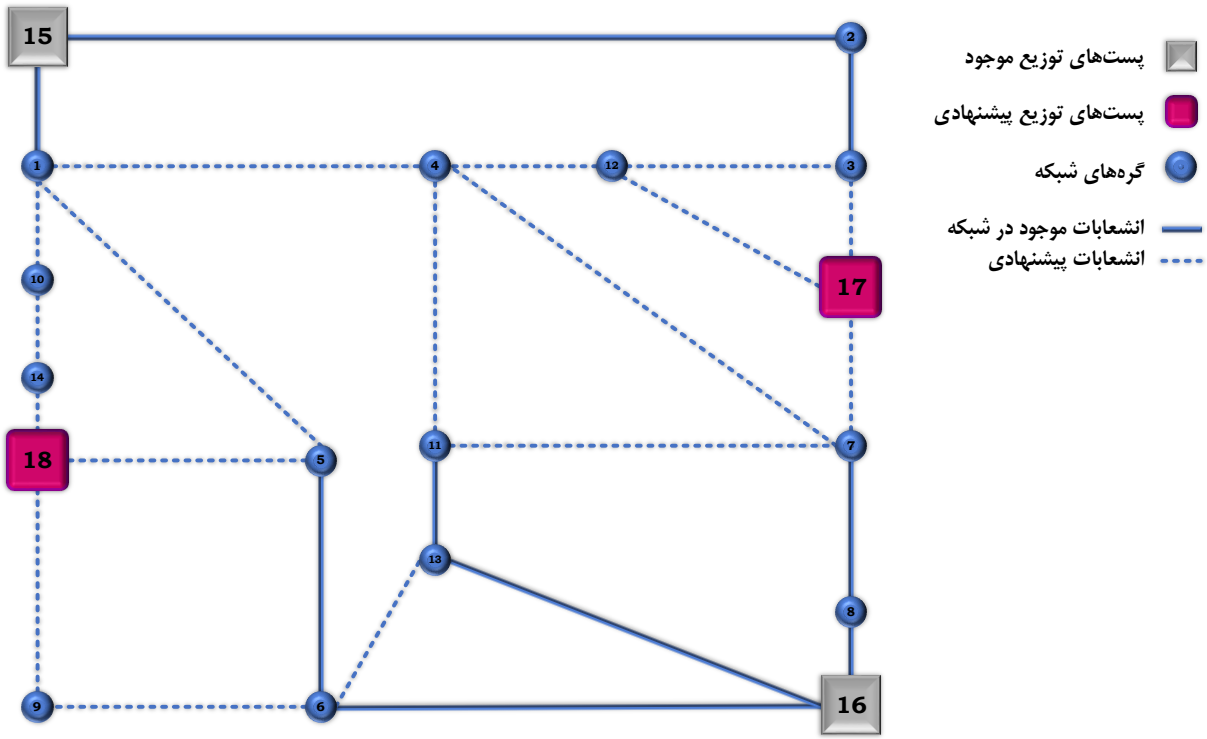
(ب) قیود کاری.

محدودیت ولتاژ شینه ها. ولتاژ شینه‌ها همواره باید در محدوده مجاز از قبل تعیین شده قرار گرفته باشد ، که مطابق با رابطه (۱۳) است [۳۹].

$$V^2\le V_{i,u}^{sqr}\le\overline{V}^2,\forall i,u \qquad (۱۳)$$

۳- مورد مطالعه و شبیه‌سازی

شبکه مورد بررسی در این مقاله شبکه ۱۸ شینه است که ساختار اولیه آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): پیکربندی شبکه توزیع ۱۸ شینه.

اطلاعات فنی و اقتصادی خودروهای برقی و ایستگاه شارژ، هزینه احداث یا تقویت پست و انشعابات مطابق مرجع [۳۰] انتخاب شده است. لازم به ذکر است که پست‌های نوع یک دارای ظرفیت ۸ مگاولت آمپر بوده و ظرفیت پست‌های نوع ۲ برابر ۱۲ مگاولت آمپر می‌باشد. همچنین هزینه بهره‌برداری از پست برابر صفر در نظرگرفته شده است. انشعاب نوع یک دارای ظرفیت ۱۹۷ آمپر بوده و انشعاب نوع دو دارای ظرفیت ۳۱۴ آمپر است.

چنین فرض شده است که ۲۰ درصد از خودروها در خانه شارژ می شوند و ۸۰ درصد آن ها در مکان های عمومی شارژ می شوند. هزینه بهره برداری از ایستگاه شارژ در حدود ۱۰ درصد هزینه احداث ایستگاه شارژ در نظرگرفته شده است.در این مقاله به منظور تحلیل برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع و ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی دو مورد مطالعاتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است که عبارتند از:

- مورد۱: برنامه‌ریزی قطعی شبکه توزیع بدون حضور ایستگاه‌های شارژ
- مورد۲: برنامه‌ریزی قطعی شبکه توزیع با حضور ایستگاه‌های شارژ

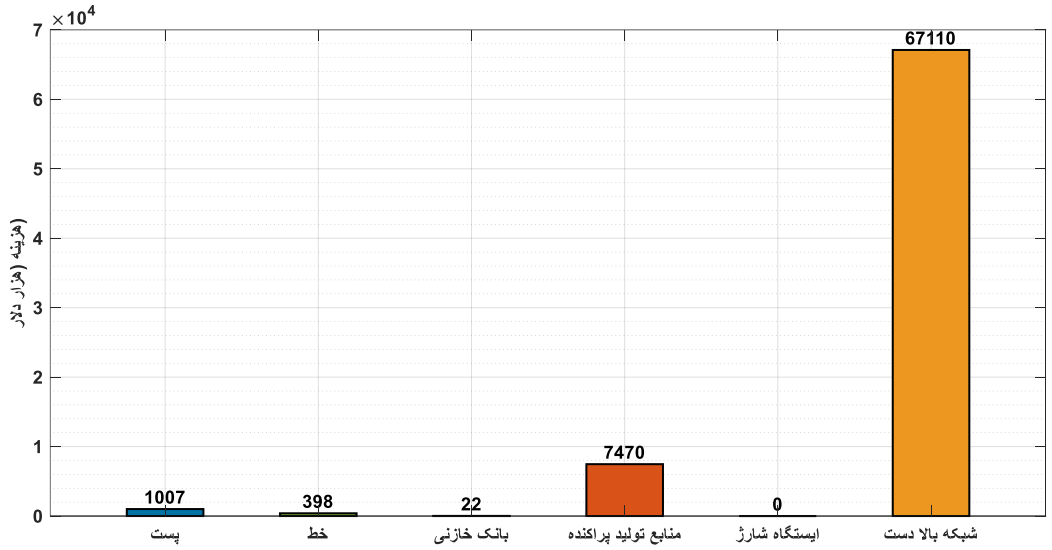
از مقایسه میان مورد اول و دوم، اهمیت درنظرگیری ایستگاه‌های شارژ در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های شبکه توزیع مشخص خواهد شد. در مورد مطالعاتی اول فرض شده است که تمامی خودروهای برقی تنها در خانه شارژ و هیچ گونه علاقه ای به شارژ در ایستگاه‌های شارژ عمومی وجود نداشته باشد. در چنین حالتی، ساعات پیک شبکه را می‌توان به عنوان بدترین شرایط بهره برداری از شبکه توزیع در نظرگرفت. نتایج مربوط به توسعه شبکه توزیع در این حالت در قالب جدول (۲) ارائه شده است که در آن وضعیت احداث هر یک از تجهیزات در هر یک از مراحل برنامه‌ریزی شبکه به خوبی نمایش داده شده است. همچنین هزینه کل مربوط به تاسیس هر یک از تجهیزات نیز در ستون آخر این جدول به نمایش درآمده است.

جدول (۲): نتایج مربوط به توسعه مورد ۱.

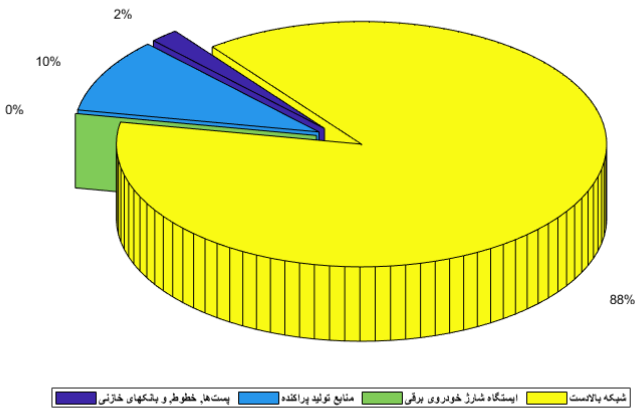
تجهیزات	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	هزینه (هزار دلار)
پست ها	۲۱ و ۱۶	۱۸	۱۷	۱۰۰۷
خطوط	نوع۱ ۱-۴	۵-۱۸ ۹-۱۸	۳-۱۲	۳۹۸

	نوع۲	۳-۱۶ ۱۴-۱۸ ۱۰-۱۴ ۱-۲۱	۳-۱۷ ۷-۱۷	
بانک های خازنی	شینه ۱، ۳، ۷ و ۱۱	شینه ۱۰	شینه ۱۲	۲۲
تولیدات پراکنده	شینه ۱ و ۷	شینه ۳	شینه ۱۰ و ۱۱	۷۴۷۰
ایستگاه‌های شارژ	توسعه نیافته است	توسعه نیافته است	توسعه نیافته است	صفر
هزینه تامین انرژی				۶۷۱۱۰

در این مورد مطالعاتی چون خودروهای برقی در خانه شارژ شده اند، مجموع بار سنتی و خودروهای برقی شبکه در تمامی شینه ها افزایش نشان داده است و بنابراین نیاز به سرمایه گذاری برای توسعه شبکه توزیع می-باشد. هزینه های مربوط به احداث پست، توسعه تولیدات پراکنده، هزینه انرژی خریداری شده از شبکه بالادستی در مراحل مختلف برنامه‌ریزی در این حالت بیشترین میزان هزینه های برنامه‌ریزی را به خود اختصاص داده اند. در شکل (۲) سهم هر یک از تجهیزات در هزینه کل برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در قالب نمودار دایره ای نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، سهم ۸۸ درصدی هزینه ها مربوط به تامین انرژی از شبکه بالادستی بوده و تنها در حدود ۱۰ درصد بر روی تامین هزینه های برق از تولیدات پراکنده سرمایه گذاری شده است. بنابراین تمرکز بر روی توسعه برخی از پست های شبکه قرار داشته است که در حدود ۱ درصد هزینه ها را شامل شده است و سهم سایر بخش ها کمتر از یک درصد بوده است. همانطور که در جدول (۲) هم مشاهده می شود، تمامی پست های شبکه در مراحل گوناگون برنامه‌ریزی به تدریج احداث شده اند تا بیشترین میزان برق مبادله با شبکه بالادستی بدست آید. هرچه از هزینه های سرمایه گذاری اولیه تولیدات پراکنده کاسته شود، مسلما زمینه برای نفوذ هرچه بیشتر این منابع در شبکه نیز پدید خواهد آمد.



(الف)



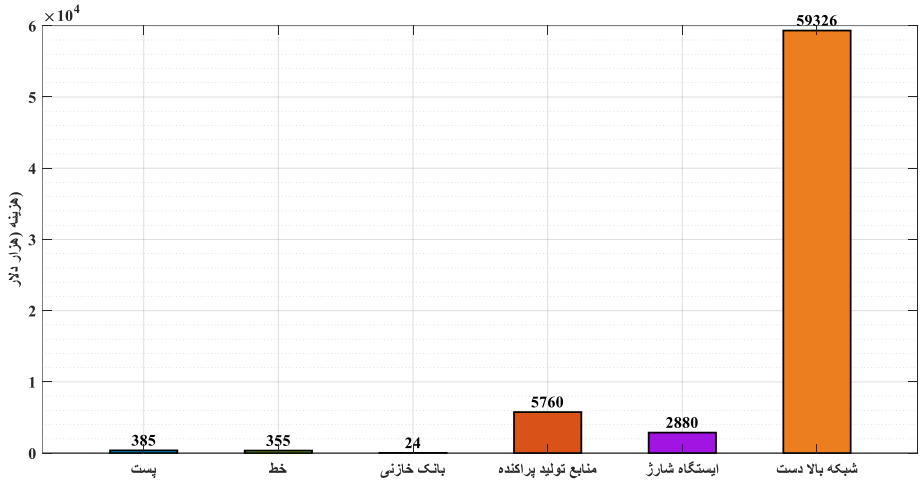
(ب)

شکل (۲): سهم هر یک از انواع سرمایه گذاری در مورد ۱ (الف) نمودار میله‌ای (ب) نمودار دایره‌ای.

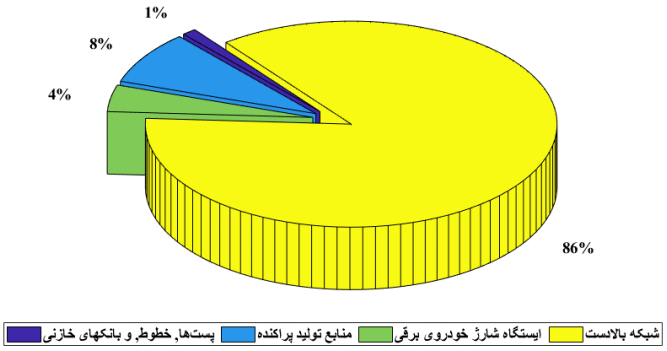
در مورد مطالعاتی شماره ۲ برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع در حضور ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی انجام شده است. ادغام ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی با مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع منجر به تغییرات قابل توجهی در نتایج مساله شده است که در جدول (۳) نشان داده شده است. در این مورد مطالعاتی خودروهای برقی تنها در برخی از گره های شبکه تمرکز یافته اند (که همان نقاط نصب ایستگاه‌های شارژ است). به طور کلی مورد شماره ۲، کاهش حدود ۳ درصدی هزینه های کل توسعه را نسبت به مورد شماره ۱ نشان می‌دهد که این خود مزیت اقتصادی روش برنامه‌ریزی همزمان پیشنهادی می باشد. در این مورد، نتایج ساخت و توسعه تجهیزات شبکه در مراحل مختلف برنامه‌ریزی نسبت به مورد ۱ متفاوت است. به طور کلی تعداد پست های ساخته شده در این روش کمتر از روش شماره ۱ است همچنین خطوط متفاوتی تقویت یا احداث شده اند. ظرفیت خطوط نصب شده در مورد ۲ کمتر از ظرفیت این خطوط در مورد شماره ۱ است. از دیدگاه وضعیت تولیدات پراکنده و بانک های خازنی نیز نتایج متفاوتی حاصل شده است. در این حالت تنها نیاز به توسعه ۳ واحد تولید پراکنده بوده است در صورتی که در مورد ۱ حدود ۵ تولید پراکنده احداث گشته است.

جدول (۳): نتایج مربوط به توسعه مورد ۲.

تجهیزات	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	هزینه (هزار دلار)
پست ها	۱۵ و ۱۶	-	۱۷	۳۸۵
خطوط	نوع۱ ۳-۱۲ ۴-۱۲	۱-۱۰ ۶-۹	۱۰-۱۴ ۴-۱۱	۳۵۵
	نوع۲	۱-۱۵ ۱۳-۱۶	۷-۱۷ ۳-۱۷	
بانک های خازنی	۱، ۲، ۶، ۷ و ۱۱	۱۰	-	۲۴
تولیدات پراکنده	۳ و ۷	۱۰	-	۵۷۶۰
ایستگاه‌های شارژ	شینه ۳	شینه ۸	شینه ۱۰ و ۱۱	۲۸۸۰
هزینه تامین انرژی				۵۹۳۲۶



(الف)



(ب)

شکل (۳): سهم هر یک از انواع سرمایه گذاری در مورد ۲ (الف) نمودار میله‌ای (ب) نمودار دایره ای.

توزیع هزینه های توسعه شبکه نیز در این حالت با مورد شماره ۱ متفاوت است و نمودار دایره ای آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده شده است، نسبت به مورد شماره ۱ از سهم ۸۸ درصدی تامین برق از شبکه سراسری کاسته شده است و در مورد ۲ به سهم ۸۶ درصدی رسیده است که این امر نشان دهنده ی کاهش اهمیت تامین برق از شبکه سراسری می باشد. همچنین از سهم ۱۰ درصدی تامین توان توسط تولیدات پراکنده مورد ۱ کاسته شده است و در مورد ۲ سهم تولیدات تجدید پذیر نیز به حدود ۸ درصد رسیده است و در عوض سهم ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی از مقدار صفر به مقدار ۴ درصد رسیده است. علت اصلی این تفاوت ها، متمرکز شدن توزیع بار در برخی از شینه های شبکه بوده است که لزوم توسعه شبکه در همان شینه ها را نشان می‌دهد. با دقت در جدول (۳) به خوبی می توان دریافت که توسعه شبکه بیشتر در اطراف شینه های مربوط به شارژ خودروهای برقی انجام شده است (شینه ۳، ۸، ۱۰ و ۱۱). به طور مثال بانک های خازنی در شینه های ۱۰ و۱۱، تولیدات پراکنده در شینه های ۳ و ۱۰، خطوط ۳-۱۲، ۱۰-۱، ۱۴-۱۰، ۱۱-۴ و ۳-۱۷ توسعه یافته اند که دقیقا در مجاورت مکان های شارژ خودروهای برقی قرار دارند.

٤- نتیجه‌گیری

در نظرگیری بهینه‌سازی ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع موجب تغییر نتایج بدست آمده از ساختار مدار شده به طوری که هزینه های مربوط به برنامه‌ریزی را کاهش می‌دهد. همچنین عدم در نظرگیری عدم قطعیت در مساله منجر به جواب هایی می شود که از نظر اقتصادی هزینه های کمتری را در بر دارند اما از دیدگاه قابلیت اطمینان نمی توان به این نتایج تکیه کرد. در صورتی که بار و یا خودروهای برقی در شرایط خاصی قرار گیرند دیگر جواب های برنامه‌ریزی قطعی نمی تواند امنیت شبکه را تامین کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به خوبی قادر به حفظ قیود امنیتی مربوط به ظرفیت خطوط شبکه و ظرفیت پست های شبکه می باشد. در واقع همواره این دو پارامتر در محدوده مجاز مطلوب خود قرار خواهند داشت. استخراج مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح خود یکی از مزایای روش پیشنهادی است که حل آن را توسط جعبه ابزارهای قدرتمند آکادمیک بهینه‌سازی فراهم کرده و امکان اثبات همگرایی به جواب بهینه سراسری و ... نیز در آن میسر است.

مراجع

[1] F. Shahnia, A. Arefi, and G. Ledwich, *Electric distribution network planning*. 2018.

[2] S. S. Tanwar and D. K. Khatod, "A review on distribution network expansion planning", in *12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3), INDICON 2015*, 2016. doi: 10.1109/INDICON.2015.7443851.

[3] A. R. Jordehi, "How to deal with uncertainties in electric power systems? A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96. 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.056.

[4] J. Haas *et al.*, "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems – a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80. 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.201.

[5] Q. Cui, Y. Weng, and C. W. Tan, "Electric Vehicle Charging Station Placement Method for Urban Areas", *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 6, 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2907262.

[6] M. H. Amini, M. P. Moghaddam, and O. Karabasoglu, "Simultaneous allocation of electric vehicles" parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution networks", *Sustain Cities Soc*, vol. 28, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2016.10.006.

[7] A. Nasri, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Hadi Amini, "Probabilistic-possibilistic model for a parking lot in the smart distribution network expansion planning", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 13, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.0366.

[8] H. Saboori, R. Hemmati, and V. Abbasi, "Multistage distribution network expansion planning considering the emerging energy storage systems", *Energy Convers Manag*, vol. 105, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.055.

[9] F. Eldali, S. Suryanarayanan, and M. E. Samper, "Risk-adjusted cost ratios for quantifying improvements in wind power forecasting", in *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019*, 2019. doi: 10.1109/PTC.2019.8810537.

[10] Y. Xiang, W. Yang, J. Liu, and F. Li, "Multi-objective distribution network expansion incorporating electric vehicle charging stations", *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 11, 2016, doi: 10.3390/en9110909.

[11] W. Yao, C. Y. Chung, F. Wen, M. Qin, and Y. Xue, "Scenario-based comprehensive expansion planning for distribution systems considering integration of plug-in electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2403311.

[12] S. Zolfaghari Moghaddam, "Generation and transmission expansion planning with high penetration of wind farms considering spatial distribution of wind speed", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.007.

[13] J. M. Home-Ortiz, O. D. Melgar-Dominguez, M. Pourakbari-Kasmaei, and J. R. S. Mantovani, "A stochastic mixed-integer convex programming model for long-term distribution system expansion planning considering greenhouse gas emission mitigation", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 108, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.12.042.

[14] B. Jeddi, V. Vahidinasab, P. Ramezanpour, J. Aghaei, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Robust optimization framework for dynamic distributed energy resources planning in distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 110, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.026.

[15] M. Jooshaki, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Farzin, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "A milp model for incorporating reliability indices in distribution system expansion planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2892625.

[16] J. Haas, W. Nowak, and R. Palma-Behnke, "Multi-objective planning of energy storage technologies for a fully renewable system: Implications for the main stakeholders in Chile", *Energy Policy*, vol. 126, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.11.034.

[17] M. Moradijoz, M. P. Moghaddam, and M. R. Haghifam, "A flexible active distribution system expansion planning model: A risk-based approach", *Energy*, vol. 145, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.160.

[18] J. M. H. Ortiz, M. Pourakbari-Kasmaei, J. López, and J. R. S. Mantovani, "A stochastic mixed-integer conic programming model for distribution system expansion planning considering wind generation", *Energy Systems*, vol. 9, no. 3, 2018, doi: 10.1007/s12667-018-0282-z.

[19] C. Rathore and R. Roy, "Impact of wind uncertainty, plug-in-electric vehicles and demand response program on transmission network expansion planning", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 75, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.040.

[20] M. Wu, L. Kou, X. Hou, Y. Ji, B. Xu, and H. Gao, "A bi-level robust planning model for active distribution networks considering uncertainties of renewable energies", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.09.032.

[21] A. Ehsan and Q. Yang, "Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations - Part I: Uncertainty modeling and problem formulation", *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 2, 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2915338.

[22] F. Ugranlı, "Analysis of renewable generation"s integration using multi-objective fashion for multistage distribution network expansion planning", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.002.

[23] S. Xie *et al.*, "multi-objective active distribution networks expansion planning by scenario-based stochastic programming considering uncertain and random weight of network", *Appl Energy*, vol. 219, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.023.

[24] P. M. De Quevedo, G. Munoz-Delgado, and J. Contreras, "Impact of Electric Vehicles on the Expansion Planning of Distribution Systems Considering Renewable Energy, Storage, and Charging Stations", *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2752303.

[25] J. Aghaei, A. E. Nezhad, A. Rabiee, and E. Rahimi, "Contribution of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in power system uncertainty management", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.207.

[26] S. Qaeini, M. S. Nazar, M. Yousefian, A. Heidari, M. Shafie-Khah, and J. P. S. Catalaõ, "Optimal expansion planning of active distribution system considering coordinated bidding of downward active microgrids and demand response providers", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 8, 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6006.

[27] G. Muñoz-Delgado, J. Contreras, and J. M. Arroyo, "Distribution System Expansion Planning Considering Non-Utility-Owned DG and an Independent Distribution System Operator", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2897869.

[28] 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 and Energy Systems*, vol. 73, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.03.010.

[29] N. Amjady, A. Attarha, S. Dehghan, and A. J. Conejo, "Adaptive Robust Expansion Planning for a Distribution Network with DERs", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2741443.

[30] A. Tabares, J. F. Franco, M. Lavorato, and M. J. Rider, "Multistage Long-Term Expansion Planning of Electrical Distribution Systems Considering Multiple Alternatives", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2448942.

[31] S. M. Sadeghi, M. Daryalal, and M. Abasi, "Two-stage planning of synchronous distributed generations in distribution network considering protection coordination index and optimal operation situation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 11, 2022, doi: 10.1049/rpg2.12526.

[32] M. Abasi, M. F. Nezhadnaeini, M. Karimi, and N. Yousefi, "A novel metaheuristic approach to solve unit commitment problem in the presence of wind farms", *Revue Roumaine des Sciences Techniques Serie Electrotechnique et Energetique*, vol. 60, no. 3, 2015.

[33] J. Ebrahimi and M. Abasi, "Design of a Power Management Strategy in Smart Distribution Networks with Wind Turbines and EV Charging Stations to Reduce Loss, Improve Voltage Profile, and Increase Hosting Capacity of the Network", *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, Mar. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.1.1.

[34] B. Boroomandnasab and M. H. Zolfaghari, "Optimization CIGS/CIGS Tandem Solar Cells by Adjusting Layer Thickness Using Silvaco-Tcad", *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 48–54, Mar. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.1.48.

[35] B. Arandian, "Utilizing Hybrid Sine Cosine Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Energy Management in the Residential building with Renewable Energy Resources and Corresponding Uncertainties", *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 66–79, Mar. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.1.65.

[36] J. Ebrahimi, M. Abedini, and M. M. Rezaei, "Optimal scheduling of distributed generations in microgrids for reducing system peak load based on load shifting", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100368.

[37] M. Abasi, A. T. Farsani, A. Rohani, and M. A. Shiran, "Improving Differential Relay Performance during Cross-Country Fault Using a Fuzzy Logic-based Control Algorithm", in *2019 IEEE 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation, KBEI 2019*, 2019. doi: 10.1109/KBEI.2019.8734991.

[38] S. Darvish Kermani, M. Fayazi, J. Barati, and M. Joorabian, "Percentage of Islanding and Peninsulating Detection in Large Microgrids with Renewable Energy Resources with Multiple Connection Points to Different Grids", *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 2, pp. 1–14, Jun. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.2.1.

[39] J. Ebrahimi, M. Abedini, M. M. Rezaei, and M. Nasri, "Optimum design of a multi-form energy in the presence of electric vehicle charging station and renewable resources considering uncertainty", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100375.

زیرنویس‌ها

[1] Energy Storage
[2] Charge Station
[3] EV
[4] GA
[5] PSO
[6] Power Market
[7] Benders Decomposition
[8] MILP
[9] YALMIP
[10] MOSEK