

Optimal Allocation of Electric Vehicle charging Parking Lots in the Distribution System with Reliability Evaluation

Mohammad Reza Fadavi Amiri^{1*}, Yaser Barari²

1. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Shomal University, Amol, Iran. *Corresponding Author, fadavi@shomal.ac.ir
2. MSc, Electrical Engineering, Aryan Institute of Science & Technology, Babol, Iran.

Abstract

Introduction: The increase in the number of PEVs in recent years requires solving the challenges related to them, such as providing charging and discharging infrastructure and managing load changes caused by charging cars on the distribution network. PEVs spend a significant amount of time in the parking mode. Therefore, the use of electric energy stored in PEVs batteries using the vehicle-to-grid capability plays a significant role in solving the challenges of the distribution network in the coming years. Charging parked PEVs during off-peak periods and discharging them during peak times is an interactive strategy between electric vehicles and the distribution network in order to improve or solve challenges. As a result of these mutual effects, in the planning and management of the charging of these PEVs, the indicators of the distribution network such as energy losses, voltage profile, reliability, etc..., are always considered. Therefore, it is very important to allocate a suitable PL based on technical and economic issues. Reducing the unsupplied energy in the distribution network, by using the energy stored in the batteries of PEVs, increases the reliability of the network.

Method: In this research, a model based on mixed-integer linear programming is proposed to determine optimal location and capacity of PEV's parking lots with the aim of maximizing the profit of PL owners. Also, a method for measuring the reliability of the distribution network has been proposed. In the proposed model, the goals of trips, the number of PEVs and their arrival and departure times in different areas, based on the type of trip, are taken into account. The constraints of the distribution network are also taken into account using linearized equations for distribution power flow. The suggested model has been implemented in a distribution system with 37 buses, which includes four different areas in terms of the type of vehicle travel.

Results: The results show the effectiveness of the proposed model for locating electric vehicle's PLs and measuring the reliability of the network.

Discussion: Three case studies were evaluated in this paper. In the first case study, the state of losses and the reliability of the network under test, along with verification, have been checked before the parking lot is set up; In the second case study, the primary goal of the presented model is to maximize the profit of the parking lot investor, and in this case, the maximum profit that can be obtained is calculated as 3.735 million dollars, and also in the second step, the reliability of the network is measured under The study found that the parking lots in the system were effective in increasing the reliability of the network by 1.4%. In the third case study, it has been determined that moving the location of the parking lots can have a positive effect on the reliability of the network.

Keywords: Charging parking, parking placement, electric vehicle, reliability, mixed integer linear programming (MILP).



تخصیص بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی در سیستم توزیع با ارزیابی قابلیت اطمینان

دوره پنجم، تابستان ۱۴۰۳
شماره دوم، صص: ۳۳-۴۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

محمد رضا فدوی امیری^{۱*}، یاسر براری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شمال، آمل، ایران (نویسنده مسئول). fadavi@shomal.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، مؤسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان، بابل، ایران.

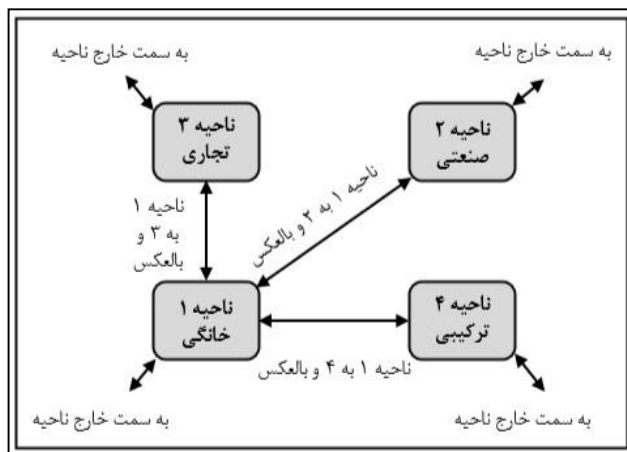
y.barari@aryan.ac.ir

چکیده: افزایش تعداد خودروهای برقی در سالیان اخیر، مستلزم رفع چالش‌های مرتبط با آن‌ها مانند فراهم‌نمودن زیرساخت‌های شارژ و دشارژ و مدیریت تغییرات بار ناشی از شارژ خودروها بر شبکه توزیع می‌باشد. اکثر خودروها در بیشتر اوقات شبانه‌روز به شکل پارک‌شده می‌باشند؛ بنابراین بهره‌برداری از انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری خودروها با استفاده از قابلیت خودرو به شبکه، در سال‌های آتی نقش به‌سزایی در رفع چالش‌های شبکه توزیع دارد. شارژ خودروهای پارک‌شده در زمان کم‌باری و دشارژ آن‌ها در زمان پرباری، راهبرد تعاملی بین خودرو برقی و شبکه توزیع، در جهت بهبود یا رفع چالش‌ها است. در نتیجه این تأثیرات متقابل، در برنامه‌ریزی و مدیریت شارژ این خودروها، شاخص‌های شبکه توزیع مانند تلفات انرژی، پروفیل ولتاژ، قابلیت اطمینان و... همواره مورد توجه می‌باشد. از این‌رو، جایابی و تعیین ظرفیت مناسب پارکینگ، با در نظر گرفتن عوامل فنی و اقتصادی، بسیار مهم است. در این پژوهش، مدلی براساس برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح، به منظور جایابی و تعیین ظرفیت بهینه پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی با هدف پیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذار پارکینگ‌ها ارائه، همچنین روشی برای سنجش تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی، مقاصد سفرها، تعداد خودروها و ساعات ورود و خروج آن‌ها در نواحی مختلف، بر اساس نوع سفر لحاظ می‌گردد. محدودیت‌های شبکه توزیع نیز با استفاده از معادلات خطی شده پخش بار در نظر گرفته می‌شوند. مدل ارائه‌شده در یک سیستم توزیع با ۳۷ شین که شامل چهار ناحیه مختلف از نظر نوع سفر خودروها می‌باشد، پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل، کارایی مدل ارائه‌شده برای مکان‌یابی پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی و تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پارکینگ شارژ، جایابی پارکینگ، خودروی برقی، قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP).

۱. مقدمه

آلودگی‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در دهه‌های گذشته، کره زمین را با معضلات زیست‌محیطی چشمگیری روبه‌رو کرده‌است. این امر موجب توجه دولت‌ها به جایگزینی خودروهای بنزینی با خودروهای برقی (EV^۱) در ابعاد گسترده شده‌است [۱]. با پذیرش خودرو برقی به عنوان عضو مشترک سیستم حمل و نقل و سیستم الکتریکی، هر دو سیستم با فرصت‌ها و چالش‌های جدیدی مواجه می‌شوند؛ لذا به نظر می‌رسد تأمین رضایت در هر دو سیستم، مستلزم رسیدن به نقطه بهینه‌ای با حفظ قابلیت اطمینانی قابل قبول است. از روش‌هایی که می‌توان در جهت بهبود عملکرد ایمن سیستم توزیع (با نفوذ بالای خودروهای برقی) به کار برد، جابه‌جایی زمان شارژ خودروها به زمان کم‌باری است؛ کاهش تلفات انرژی و صرفه‌جویی ۵ تا ۳۵ درصدی در هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز، با این راه‌کار انجام می‌پذیرد [۲]. فناوری خودرو به شبکه (V2G^۲) همچنین در پی حضور ماشین‌های برقی ارائه گردید. با توجه به زمان پارک بالای اکثر خودروها در پارکینگ، اگر این مراکز، مجهز به تکنولوژی V2G باشند، می‌توان با مدیریت ظرفیت باتری خودروها، از این انرژی بهره‌مند شد. با در نظر گرفتن اثربخشی خودروهای برقی در شبکه قدرت، توسعه سیستم‌های توزیع، رابطه تنگاتنگی با به‌کارگیری انرژی الکتریکی ذخیره‌ای در باتری ماشین‌هایی که به شبکه متصل‌اند دارد؛ همچنین خودروهای متصل به شبکه هنگام قطع جریان برق می‌توانند قابلیت اطمینان شبکه را نیز (با تزریق توان به شبکه) افزایش دهند. در شکل (۱) انواع سفرها در این مدل نمایش آمده‌است.



شکل ۱: انواع سفر خودروها در نواحی مختلف [۳]

وجود تکنولوژی V2G در پارکینگ‌ها موجب می‌شود تا خودرو برقی در شبکه توزیع گونه نوینی از مخازن انرژی توزیع شده (DER^۳) به حساب آید؛ بدین ترتیب در برنامه‌ریزی آن‌ها، شاخص‌های سیستم توزیع مانند تلفات، پایداری و لتاژ، قابلیت اطمینان و ... در نظر گرفته می‌شود [۳].

۲. مفاهیم کلی مرتبط با خودروهای برقی

خودروی برقی، خودرویی است که نیروی محرکه مورد نیاز آن از حداقل یک موتور الکتریکی فراهم می‌شود [۴]. در سالیان اخیر، ظهور باتری‌هایی با ظرفیت بالا و همچنین ضرورت کاهش گازهای گلخانه‌ای به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و به‌علاوه، دغدغه‌هایی در خصوص هزینه تأمین و تجدیدنپذیر بودن سوخت‌های فسیلی، موجب شد تا انقلابی در صنعت خودروسازی صورت پذیرد. به دلیل آلودگی کمتر و بازدهی بیشتر خودروهای برقی، از آن‌ها با عنوان خودروهای سبز یا وسایل نقلیه دوستدار محیط زیست یاد می‌شود. با وجود این که انرژی مورد نیاز جهت شارژ این وسایل نقلیه از طریق نیروگاه‌ها که قسمت گسترده‌ای از آن‌ها از سوخت‌های فسیلی تغذیه می‌شوند، فراهم می‌گردد؛ اما پژوهش‌های انجام‌شده مشخص نموده است که آلاینده‌های ناشی از به‌کارگیری خودروهای برقی، بسیار کمتر از آلاینده‌های حاصل از خودروهای احتراقی می‌باشد؛ پذیرش نقش این خودروها در سیستم ترافیکی و شبکه توزیع، در درجه اول، مستلزم تأمین انرژی محرکه آن‌هاست. پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی (EVPL^۴) یکی از این مراکزند که صاحب خودرو می‌تواند خودروی خود را در آنجا شارژ کند. از سوی دیگر، با توجه به دور بودن بیشتر مراکز تولید برق از حوزه‌های شهری، آلاینده‌های ناشی از آن‌ها، در مقایسه با خودروهای احتراقی، ساکنان شهرهای بزرگ را کمتر متأثر می‌سازد [۵ و ۶].

تولید خودروهای برقی با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌ها، در انواع متفاوت انجام می‌پذیرد. خودروهای برقی را بر مبنای قابلیت اتصال به شبکه، می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد:

- خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه
- خودروهای برقی غیرقابل اتصال به شبکه

شارژ خودروهای الکتریکی به دو روش کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۷]:

۱- شارژ کنترل شده (CCM^۵)

در این روش، شارژ و نحوه زمان‌بندی آن، به‌طور مستقیم و توسط یک عامل کنترل‌کننده تعیین می‌شود.

۲- شارژ کنترل نشده (UCM^۶)

شارژ خودروها در این حالت، به صورت دلخواه و بدون هیچ محدودیت و کنترلی، توسط کاربر انجام می‌شود.

۳. پیشینه پژوهش

به دلیل اینکه وسایل نقلیه برقی، جایگزین امیدبخشی برای جلوگیری از افزایش آلاینده‌های هوا و مصرف جهانی سوخت‌های فسیلی در شبکه‌های هوشمند آتی ارائه می‌دهند، پژوهش‌ها و مقالات بسیاری در زمینه برنامه‌ریزی و طراحی بهینه (جایابی و تعیین ظرفیت) پارکینگ خودروهای برقی با در نظر داشتن عوامل متعددی مانند اهداف شبکه توزیع همچون تلفات، پایداری و لتاژ، قابلیت اطمینان، الگوی بار سیستم

بهینه‌سازی نرخ رسیدن خودروها به پارکینگ به منظور تعیین ظرفیت بهینه است. الگوی ورود خودروها به پارکینگ از فرآیند پواسن و خدمات‌رسانی به آن‌ها، از توزیع نمایی تبعیت کند. هدف اول در این پژوهش، ارائه مدلی به منظور تخصیص بهینه پارکینگ و هدف دوم بهینه‌سازی نرخ رسیدن خودروها به ایستگاه، جهت تعیین ظرفیت بهینه است. جهت پیاده‌سازی مدل و مشخص نمودن ظرفیت پارکینگ، از مدل صف مارکوف استفاده شده است. در بهینه‌سازی تقاضای کاربر، بهینه‌سازی رفاه اجتماعی و بهینه‌کردن اندازه تجهیزات نیز لحاظ گردیده است که نهایتاً ظرفیت بهینه پارکینگ تعیین می‌گردد. بر اساس نتایج این پژوهش با بیشتر شدن نرخ شارژ، هزینه اتلاف وقت، کاهش یافته؛ با این وجود، هزینه کلی پارکینگ، در ابتدا کمتر ولی در ادامه، بیشتر می‌شود [۱۲].

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۲ یک مدل دو لایه‌ای اتفاقی برای تخمین میزان تقاضای بار برای شارژ باتری خودروها در نظر گرفته شده است. این مدل شامل یک لایه ترافیکی برای نشان دادن توزیع فضایی زمانی خودروها و یک لایه الکتریکی برای نمایش میزان تقاضای بار برای شارژ باتری خودروها می‌باشد. یک مدل مارکوف دینامیکی پنهان، برای تفسیر حرکت خودروها در نظر گرفته شده است [۱۳].

تعیین مکان بهینه پارکینگ با در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی، حائز اهمیت است. از طرفی، سیستم توزیع، تدریجاً با تقاضای زیاد شارژ خودروهای برقی روبه‌رو خواهد گردید که این موضوع، چالش به‌مخاطره-افتادن قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق را به همراه دارد. به این علت که قابلیت اطمینان می‌تواند یک عامل محدودکننده اساسی در عملکرد سیستم توزیع باشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود که در این پژوهش‌ها مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه پارکینگ خودروهای الکتریکی، همراه با ارائه شاخصی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان نبوده، که در این مقاله به این موضوع پرداخته شده و حل مسأله بهینه‌سازی مربوطه، با برنامه‌ریزی خطی انجام گرفته است.

مدل‌سازی با هدف بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار پارکینگ انجام گرفته است. همچنین نوآوری پژوهش ارائه رابطه جدیدی برای سنجش تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد.

۴. معرفی مدل پیشنهادی برای جایابی پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی

در این بخش، مدل تک‌مرحله‌ای جهت مشخص نمودن مکان و ظرفیت پارکینگ‌ها، با وجود شبکه ترافیکی چندناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود. بار حاصل از شارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌های خودروها، امکان ایجاد چالش قابلیت اطمینان در سیستم توزیع برق را به همراه خواهد داشت. فرضیات در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- در مطالعات پخش بار، از معادلات پخش بار خطی شده بهره گرفته شده است.

توزیع یا الگوی ترافیک شهری، رفاه مالکان خودرو و مانند این‌ها، با به‌کارگیری روش‌های گوناگون از قبیل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی تجمع ذرات، برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته و تکنیک‌های دیگر، جهت جایابی و تعیین ظرفیت بهینه پارکینگ خودروهای برقی و با هدف بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار یا کمینه‌سازی هزینه از دید بهره‌بردار سیستم توزیع، و یا به شکل ترکیبی از این دو صورت گرفته است.

در سال ۲۰۱۵ یک مدل چندهدفه، به منظور تخصیص بهینه پارکینگ خودروهای برقی، با هدف کمینه‌سازی هزینه شبکه توزیع پیاده شده است. به علاوه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جمعیت زنبور عسل، کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات استفاده شده است. سیستم مطالعاتی با توجه به مقاصد سفر خودروها به دو ناحیه مسکونی و تجاری تفکیک شده و دو نوع پارکینگ تجاری و مسکونی، بر اساس مکان احداث پارکینگ‌ها در نظر گرفته شده تا با برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها بتوان از شبکه در ساعات اوج بار، پشتیبانی کرد. لذا بهره‌گیری از پارکینگ خودروهای الکتریکی، موجب کمتر شدن توان تزریقی از شبکه و نهایتاً پایین آمدن هزینه کل شبکه توزیع و نیز تلفات، می‌شود [۸].

در پژوهشی دیگر یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه برای پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی، با دو هدف کمینه‌سازی هزینه‌های احداث و بهره‌برداری شبکه توزیع و بهینه‌سازی میزان سالیانه پوشش جریان ترافیکی خودروها پیاده شده است؛ به علاوه از مدل تصادفی پیشنهادی، دو متغیر زمان شروع شارژ و مدت زمان اجرای فرآیند شارژ جهت لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های مربوط به بار ناشی از شارژ باتری خودروها نیز استفاده شده است [۹].

در سال ۲۰۱۹ پژوهشی انجام شده که در آن ابتدا از تئوری زنجیره سفر برای تشریح چگونگی حرکت خودروها استفاده و بر اساس توزیع استاتیکی جریان ترافیک، یک مدل شبه‌دینامیکی برای نشان دادن تأثیر ترافیک شهری در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از زنجیره مونت کارلو تأثیر عدم قطعیت رفتار مالکان خودروها محاسبه شده است. در این مورد مطالعاتی، تأثیر نفوذ گسترده خودروها، آستانه دشارژ و ظرفیت باتری‌ها بر قابلیت اطمینان شبکه توزیع و همچنین خودروها مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰].

سال ۲۰۱۹ مطالعه‌ای در خصوص پتانسیل مشارکت پارکینگ‌ها برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آینده صورت گرفت. در این پژوهش شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن مدل اتفاقی برای SOC خودروها و همچنین در دست داشتن داده‌های خروج اجزا و قطعی بار محاسبه و برای ارزیابی کلی، یک الگوریتم ترکیبی بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو به کار گرفته شد [۱۱].

در پژوهشی در سال ۲۰۲۲ دو نوع پارکینگ شارژ برای مکان‌های تجاری، منظور گردیده است؛ در نوع اول جایگاه‌های شارژ با هدف کار یا پارکینگ خودروها راه‌اندازی شده که خودرو می‌تواند ساعتی بلااستفاده باقی‌بماند و در نوع دوم مراکزی مانند بیمارستان یا مراکز خرید می‌باشند، که خودرو ساعات کمتری در آن‌ها توقف دارد. هدف دوم،

- در صورت عدم امکان تأمین بار یک شین توسط یک پارکینگ، امکان تأمین بار شینه‌های بعدی در آن مسیر، بررسی نمی‌شود. در این پژوهش، تابع هدف، جابجایی و مشخص کردن ظرفیت بهینه پارکینگ‌های خودروهای برقی، با هدف بیشینه‌سازی سود مالک پارکینگ‌ها در مدت‌زمان دوره برنامه‌ریزی است که این سود، به صورت معادل یکنواخت سالانه، یعنی سود معادل به‌ازای ۳۶۵ روز، در نظر گرفته شده است. تفاضل مجموع درآمدها در تمام الگوهای تردد خودروها، در تمام نواحی شبکه و در تمام زمان‌ها، از هزینه کل آن‌ها، برابر سود کل پارکینگ‌ها خواهد بود، تابع هدف مطابق رابطه (۱) ارائه می‌گردد:

$$\text{Maximize profit}^{PL} = N_d \cdot \sum_i \sum_t (\text{Revenue}_{i,t}^{PL}) - \text{cost}^{PL} \quad (1)$$

در رابطه بالا، d نرخ تنزیل و n تعداد سال‌های برگشت سرمایه است.

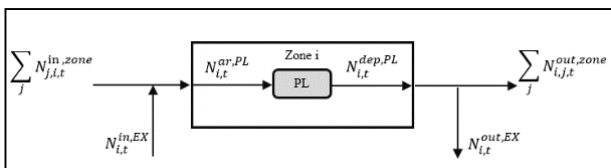
معادلات پخش بار AC خطی شده، به منظور محاسبه تابع تلفات انرژی، بر روی شبکه توزیع شعاعی حل می‌شود. همچنین روابط ۲ و ۳ نیز برای از دست رفتن بار در نظر گرفته شده‌اند.

$$\text{loss}_t = \sum_i R_i (i_{i,t})^2 \quad (2)$$

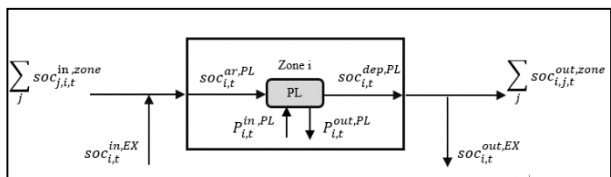
$$\text{cost}^{loss} = N_d \cdot \sum_p \sum_t (\text{loss}_t - \text{loss}_{0,t}) \cdot \pi_t^E \quad (3)$$

۱.۴. قیود مسئله

تعداد خودروهای ورودی به پارکینگ‌های هر ناحیه و خروجی از آن‌ها و نیز ظرفیت کلی باتری‌های خودروهای الکتریکی به صورت پارامترهای معلوم لحاظ می‌گردند، که این مقادیر بر اساس داده‌های تاریخی و آماری در شبکه حمل و نقل مدل‌سازی گردیده است. شکل (۲) و (۳) این الگوها را نمایش می‌دهند.



شکل ۲: نمودار الگوی ورود و خروج خودروها در ناحیه i [۳]



شکل ۳: نمودار الگوی شارژ خودروها در ناحیه i [۳]

- در تعیین بار سیستم توزیع، عدم قطعیت، لحاظ شده و الگوی حضور خودروها در پارکینگ‌ها نیز بر حسب داده‌های تاریخی مشخص می‌گردد.

- در صورتی که در پی حضور پارکینگ‌ها، تلفات سیستم توزیع نسبت به حالت اولیه آن افزایش یابد؛ پرداخت هزینه مربوط به عهده مالک پارکینگ‌ها است.

- هزینه استهلاک باتری به تمامی خودروهای شرکت‌کننده در برنامه V2G پرداخت می‌گردد.

- قبل از ترک پارکینگ، صاحبان خودروهای برقی، مقدار کمینه‌ای را برای SOC باتری خودروی خود، مشخص می‌کنند.

- احتمال فراخوانی رزرو ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است برای محاسبه دقیق‌تر، باید مسأله به صورت برنامه‌ریزی تصادفی حل شود.

- در خصوص خودروهای پارک شده در ناحیه خانگی، به علت نبود پارکینگ‌های شارژ عمومی، مکان متمرکز جهت شارژ آن‌ها وجود نداشته و بنابراین بار متناظر با میزان شارژ آن‌ها به نسبت، روی باس‌های موجود در ناحیه تقسیم می‌گردند؛ با این حال پارکینگ‌های شارژ می‌توانند در دیگر نواحی با لحاظ کردن الگوی ترافیکی ناحیه‌های مختلف و قیود شبکه توزیع راه‌اندازی شوند.

- کلیه خودروهای وارد شده به هر ناحیه، در پارکینگ‌های احداث شده در آن ناحیه، پارک کرده و بنابراین محدودیتی از نظر تعداد جایگاه‌های شارژ وجود نخواهد داشت

- مبادله توان پارکینگ‌ها با شبکه، بر اساس قیمت ساعتی بازار انرژی، انجام می‌شود؛ با این وجود، قیمت انرژی فروخته شده به خودروها در پارکینگ ($\pi_{i,t}^{G2V}$)، کمتر از قیمت بازار است. (فروش انرژی به خودروها با قیمت کمتر، به صورت یک طرح تشویقی، جهت افزایش حضور خودروهای برقی در پارکینگ‌ها، توسط مالکان پارکینگ‌ها، در نظر گرفته می‌شود).

- تعداد خودروهای ورودی به پارکینگ‌های هر ناحیه و خارج شده از آن‌ها، به صورت پارامترهای معلوم در نظر گرفته می‌شود، که این تعداد بر پایه مطالعات آماری خودروها مدل می‌گردد؛ به علاوه ظرفیت کلی باتری‌های خودروها، به شکل پارامترهای معلوم لحاظ می‌شود.

- حوزه شهری تحت مطالعه، بر اساس مقاصد سفر خودروها، به چهار ناحیه خانگی، صنعتی، تجاری، و ترکیبی (ترکیبی از مقاصد تجاری و صنعتی) تقسیم می‌گردد.

- برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه توزیع، در ابتدای تمامی شاخه‌ها، سکیونر در نظر گرفته شده است.

- با توجه به میزان بار شبکه و سطح شارژ پارکینگ‌ها، در صورتی که پیشامد احتمالی در ساعات ۱۲ تا ۱۵ رخ دهد، امکان تغذیه بار شبکه توسط پارکینگ‌ها، وجود خواهد داشت.

- بار شبکه به صورت کنترل نشده فرض می‌گردد.

از رابطه (۴) برای برگزیدن نقطه احداث پارکینگ استفاده می‌شود.

$$si_b^{PLA} \leq Can_b^{PLA} \quad (۴)$$

به منظور ایجاد محدودیت کمینه و بیشینه در نصب پارکینگ‌ها در هر ناحیه، از رابطه (۵) استفاده شده است.

$$\min_i^{PL} \leq \sum_b si_{b,i}^{PLA} \leq \max_i^{PL} \quad (۵)$$

تعداد توان اکتیو و راکتیو در باس مورد نظر b ، در روابط (۶) و (۷) کنترل می‌گردد.

$$p_{b,t}^{Sys.in} |_{b=1} + p_{b,t}^{PLA.out} - p_{b,t}^{PLA.in} - \sum_i (p_{i,t}^{line} + R_i(i_{i,t})^2) = p_{b,t}^D \quad (۶)$$

$$q_{b,t}^{Sys.in} - \sum_i (q_{i,t}^{line} + X_i(i_{i,t})^2) = q_{b,t}^D \quad (۷)$$

در ادامه، محاسبات به منظور محاسبه شاخص مربوط به سنجش تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع، انجام خواهد شد. نرخ وقوع خرابی در شاخه l ، در هر ساعت، از رابطه (۸) حاصل می‌شود [۱۴].

$$p_l = \frac{\lambda_l}{8760} \quad (۸)$$

شکل (۴) نشان‌دهنده روند محاسبه شاخص قابلیت اطمینان است:

گام	روند کار
۱	محاسبه احتمال وقوع خرابی در شاخه l ، در هر ساعت
۲	محاسبه بیشینه انرژی قابل تأمین توسط پارکینگ، با توجه به حداقل سطح شارژ خودرو در زمان خروج از پارکینگ و سطح شارژ لحظه‌ای پارکینگ
۳	محاسبه انرژی مورد نیاز کوچکترین جزیره شامل پارکینگ در مدت زمان بازیابی (۲)
۴	محاسبه توان لحظه‌ای مورد نیاز کوچکترین جزیره شامل پارکینگ
۵	بررسی امکان تأمین توان و انرژی مورد نیاز کوچکترین جزیره شامل پارکینگ
۶	محاسبه امید ریاضی میزان انرژی تأمین شده توسط کلیه پارکینگ‌ها در ساعات تأمین بار

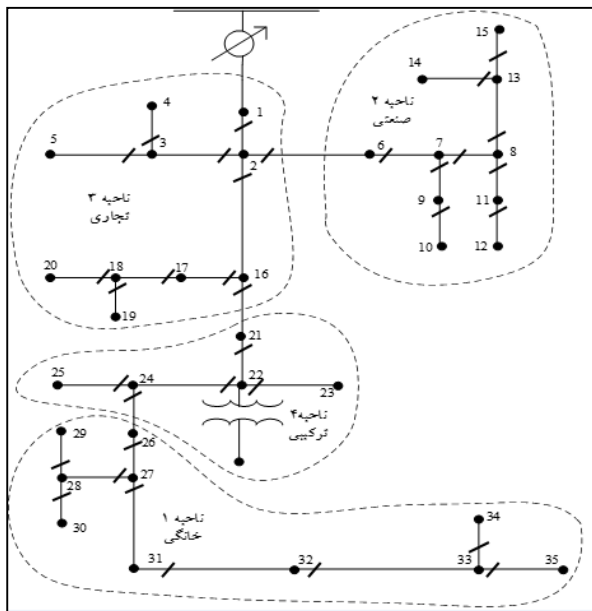
شکل ۴: روند محاسبه شاخص تأثیر خودرو برقی روی قابلیت اطمینان شبکه

مکان‌یابی پارکینگ‌های خودروهای برقی مستلزم مدل‌سازی دقیق تمامی عوامل تأثیرگذار و مرتبط با آن است؛ بنابراین در این بخش مدلی با هدف مکان‌یابی و معین کردن گنجایش بهینه پارکینگ‌های خودروهای برقی و در نهایت جایابی پارکینگ‌ها و محاسبه سنجش تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع، به همراه قیود به-کاررفته در مسأله بهینه‌سازی و دیگر عوامل قابل توجه، ارائه گردید.

۵. پیاده‌سازی مدل پیشنهادی و نتایج حاصل

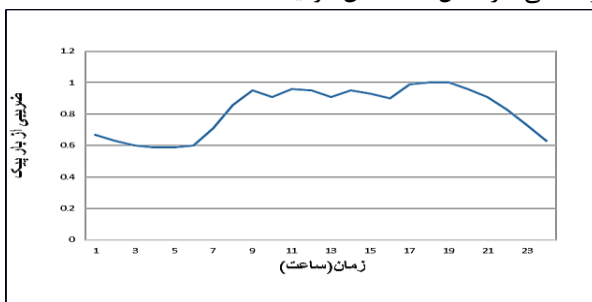
مدل ارائه شده به منظور مکان‌یابی پارکینگ‌های خودروهای برقی، به شکل یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح بوده و در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است. مدل پیشنهادی در شبکه شعاعی ۳۷ شینه IEEE پیاده‌سازی شده که آرایش مربوطه و حدود ناحیه‌های مختلف در آن مشخص شده است [۱۵]. سطح ولتاژ شبکه تحت مطالعه ۴/۸ KV و بیشینه بار آن ۲/۵ MW می‌باشد؛ مفروض است که در ناحیه ۱ که با کاربری غالب مسکونی بوده و بدون پارکینگ‌های شارژ است، خودروها از شارژرهای خانگی با نرخ شارژ ۳kW/h بهره‌می‌برند و در پارکینگ‌های دیگر ناحیه‌ها، صرفاً از شارژرهایی با نرخ شارژ ۱۱kW/h استفاده می‌شود [۱۶].

در شکل (۵) شبکه مورد مطالعه، با جانمایی سکسپونرها (در ابتدای تمامی خطوط)، نمایش داده شده است.



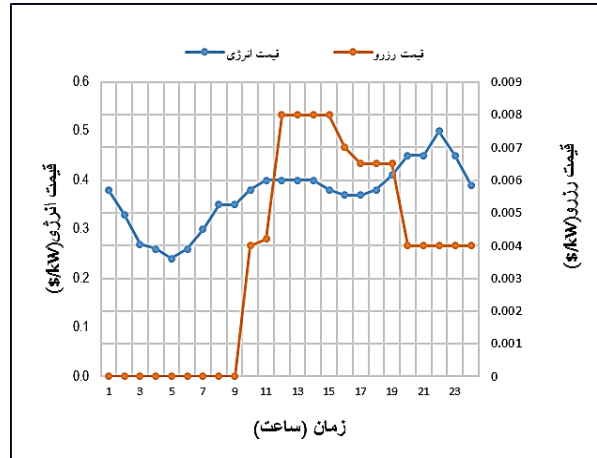
شکل ۵: شبکه شعاعی ۳۷ شینه

مقادیر بار ساعات مختلف شبانه‌روز و نرخ‌های قیمتی انرژی و رزرو در ساعات مختلف، با توجه به داده‌های آماری پیاده‌سازی شده که مقادیر بار ساعتی، در شکل ۶ مشخص گردیده است [۱۶].



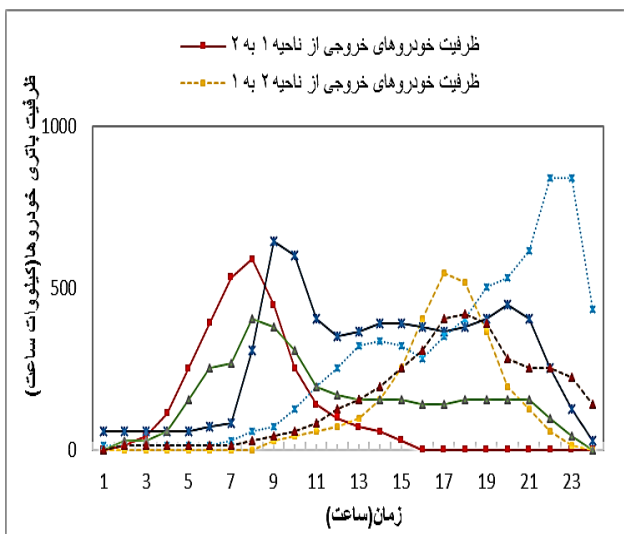
شکل ۶: منحنی تغییرات بار ساعتی [۱۶]

بعلاوه، نمودار قیمت انرژی و رزرو در ساعات مختلف، همانند شکل ۷ است [۳].



شکل ۷: قیمت ساعتی انرژی و رزرو در بازار [۳]

در این مطالعه، قیمت V2G و G2V به اندازه $0.2 \$/kWh$ پایین تر از قیمت انرژی شبکه توزیع و قیمت $\pi_{p,t}^{con}$ به میزان ۲۰ درصد، بالاتر از قیمت انرژی شبکه لحاظ می‌گردد (فروختن انرژی به خودروهای برقی با قیمت ارزانتر، به صورت یک راهبرد ترغیب‌کننده به وسیله مالک پارکینگ و با هدف افزایش حضور خودروهای برقی در پارکینگ، به کار گرفته می‌شود). الگوی تردد خودروها، با بهره‌گیری از داده‌ها با فاصله‌های زمانی ساعتی، مدل‌سازی می‌گردد. تردد بین ناحیه‌ها به نسبت ظرفیت باتری خودروهای وارد و خارج شده ناحیه‌ها، در شکل (۸) لحاظ گردیده است. مطابق شکل زیر مشاهده می‌گردد که الگوی ورود و خروج و شارژ و دشارژ خودروهای یک ناحیه مشابه است [۳] و [۱۷].



شکل ۸: ظرفیت باتری خودروهای ورودی و خروجی نواحی مختلف [۱۷]

با توجه به شکل مشهود است که خودروها ناحیه مسکونی را در ساعت‌های ابتدایی روز ترک کرده و در پایان روز باز خواهند گشت؛ به علاوه مفروض است که واحدهای صنعتی در سه شیفت فعال می‌باشند. در محدوده تجاری، به علت تردد بیشتر، زمان‌های ورود و خروج خودروها، در مقایسه با دیگر انواع سفرها، همراه با گستردگی بیشتری است.

۶. مطالعات موردی انجام شده در پژوهش

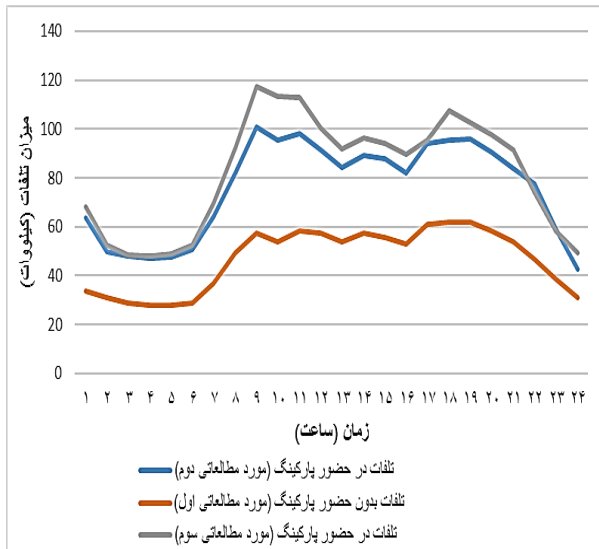
در این بخش مطالعات در چند حالت زیر در نظر گرفته شده است:

- مورد مطالعاتی اول: محاسبه تلفات و شاخص مربوط به ارزیابی میزان تأثیر عدم حضور خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع، و صحت‌سنجی نتایج.
- مورد مطالعاتی دوم: تعیین مکان و ظرفیت بهینه پارکینگ-های شارژ خودروهای برقی مطابق مدل پیشنهادی و محاسبه میزان تلفات، درآمد یا هزینه و شاخص مربوط به ارزیابی میزان تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع با حضور پارکینگ‌ها.
- مورد مطالعاتی سوم: تغییر مکان پارکینگ‌ها (با همان ظرفیت قبلی) و بررسی مجدد میزان تلفات، درآمد یا هزینه و شاخص مربوط به ارزیابی میزان تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع. در مورد مطالعاتی اول، نتیجه صحت‌سنجی مدل پیشنهادی برای محاسبه شاخص مربوط به ارزیابی میزان تأثیر عدم حضور خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر به میزان $0.167/1000$ کیلووات ساعت و معادل تقریبی $0.01/1000$ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مورد با بهره‌گیری از روش پیشنهادی برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان، میزان انرژی غیرقابل-تأمین (بدون حضور پارکینگ‌ها) یا به عبارتی امید ریاضی انرژی تأمین-نشده (بدون حضور پارکینگ‌ها) با انرژی حاصل از رابطه مربوط به شاخص ENS مقایسه گردیده است.

در مورد مطالعاتی دوم، تعیین مکان و ظرفیت بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی، با هدف بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذار پارکینگ و مطابق مدل ارائه شده انجام شده است. با شبیه‌سازی مسأله، مکان و ظرفیت بهینه پارکینگ‌ها، مؤلفه‌های درآمد، هزینه پارکینگ‌ها و تلفات شبکه مورد مطالعه و نهایتاً شاخص مربوط به ارزیابی میزان تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع، محاسبه گردیده است.

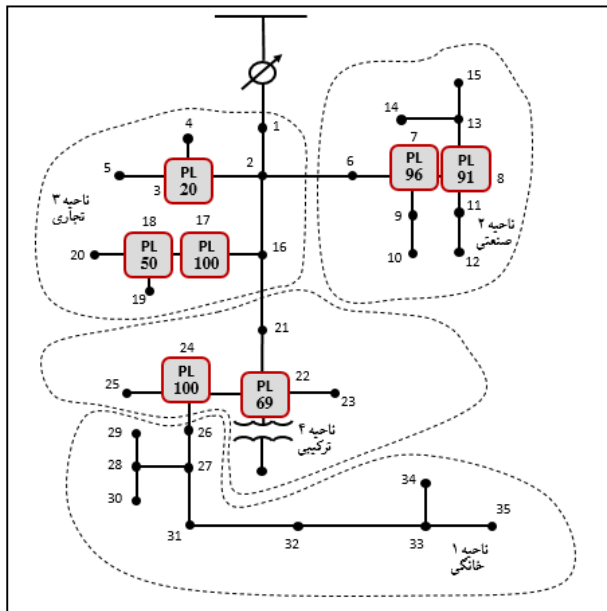
با لحاظ نمودن تأثیر حضور پارکینگ‌ها در شبکه، بیشترین میزان تلفات مربوط به ساعت ۹ با $100,659$ کیلووات و سپس ساعت ۱۹ با $95,809$ کیلووات است و مجموع تلفات در یک شبانه‌روز، به میزان $1820,442$ کیلووات ساعت می‌باشد که این میزان، نسبت به مورد اول (بدون حضور پارکینگ‌ها)، به میزان $698,003$ کیلووات ساعت (۶۲ درصد)، بیشتر می‌باشد که این به دلیل تأثیر بار ناشی از حضور پارکینگ-های خودروهای برقی می‌باشد؛ همچنین جابجایی ساعت تلفات اوج، از

موردی که پارکینگ‌ها حضور دارند (موارد مطالعاتی دوم و سوم) نسبت به موردی که پارکینگ‌ها حضور ندارند (مورد اول)، از ساعات انتهایی روز (۱۸ و ۱۹) به ساعات ابتدایی روز (۹ و ۱۰)، تغییر یافته و این به دلیل افزایش بار شبکه و ناشی از بار تعداد زیاد خودروهای در حال شارژ پارکینگ‌ها در این ساعات می‌باشد.



شکل ۱۰: منحنی تلفات توان در شبکه مورد نظر در مورد مطالعاتی اول تا سوم

در شکل ۱۱، مکان جدید پارکینگ‌های شارژ در نواحی صنعتی، تجاری و ترکیبی، نشان داده شده است.



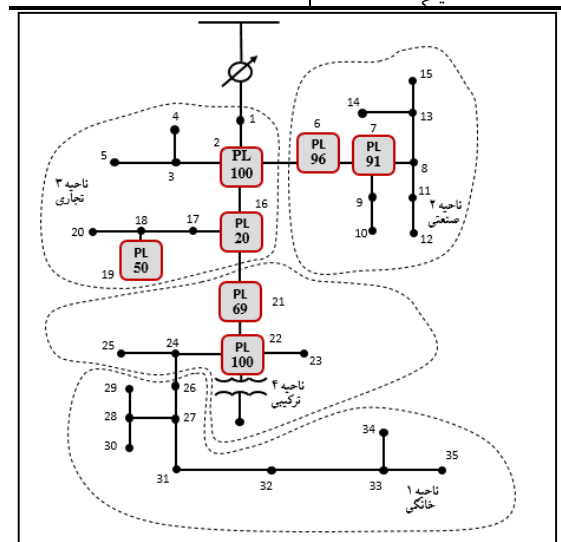
شکل ۱۱: مکان و تعداد ایستگاه‌های شارژ پارکینگ‌ها در مورد مطالعاتی سوم

ساعت ۱۸ و ۱۹ در مورد مطالعاتی اول به ساعت ۹ در مورد مطالعاتی دوم، ناشی از تأثیر خودروهای حاضر در مورد دوم و این ساعت و نقش بیشتر آن در ایجاد تلفات، نسبت به دیگر بارها می‌باشد.

با توجه به پاسخ حاصل از حل مسأله بهینه‌سازی، مکان و ظرفیت بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی، در شکل (۹) نشان داده شده است؛ به علاوه، تعداد جایگاه‌های شارژ هر ناحیه نیز در جدول (۱) آمده است. ملاحظه می‌شود که مطابق فرض در نظر گرفته شده در ناحیه خانگی، پارکینگ شارژ و جایگاه شارژ عمومی، موجود نمی‌باشد.

جدول ۱: مجموع جایگاه‌های شارژ هر ناحیه در مورد مطالعاتی دوم

مجموع تعداد جایگاه‌های	نواحی
-	ناحیه اول خانگی
۱۸۷ جایگاه	ناحیه دوم صنعتی
۱۷۰ جایگاه	ناحیه سوم تجاری
۱۶۹ جایگاه	ناحیه چهارم

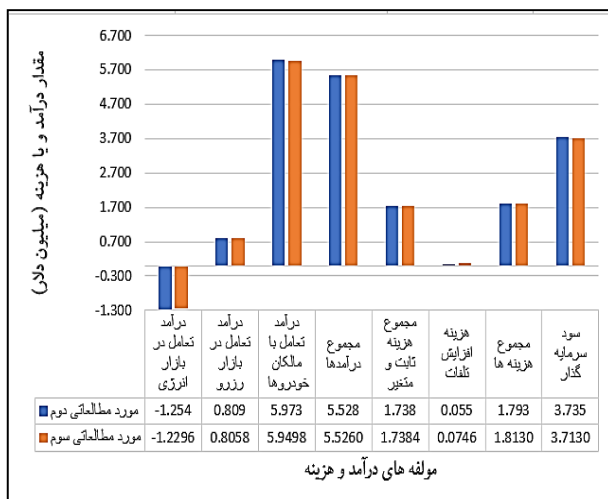


شکل ۹: مکان و تعداد ایستگاه‌های شارژ پارکینگ‌ها در مورد مطالعاتی دوم

در مورد مطالعاتی سوم، پس از تغییر مکان پارکینگ‌ها (با فرض عدم تغییر تعداد جایگاه‌های هر ناحیه)، مؤلفه‌های درآمد، هزینه پارکینگ‌ها و تلفات شبکه مورد مطالعه و نهایتاً شاخص پیشنهادی قابلیت اطمینان، مجدداً محاسبه گردیده است.

در شکل (۱۰) میزان تلفات در موارد مطالعاتی اول، دوم و سوم، به نمایش گذاشته شده است. در مورد مطالعاتی سوم، بیشترین میزان تلفات در ساعت ۹ و به میزان ۱۱۷/۱۵ کیلووات می‌باشد؛ به علاوه مجموع تلفات در یک شبانه‌روز در این مورد مطالعاتی، به میزان ۱۹۷۳/۳۸۳ کیلووات-ساعت بوده که این عدد، به اندازه ۱۵۲/۹۵۱ کیلووات-ساعت و معادل ۸ درصد نسبت به تلفات مورد مطالعاتی دوم و به اندازه ۸۵۰/۹۴۴ کیلووات-ساعت و معادل ۷۵ درصد نسبت به تلفات مورد مطالعاتی اول، افزایش داشته است. لازم به ذکر است که زمان رخداد بیشترین تلفات در

با توجه به نمودار شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که در مورد مطالعاتی سوم نیز، به دلیل به صرفه نبودن قیمت بازار انرژی، سرمایه‌گذار تمایل چندانی برای حضور در این بازار نداشته و مطابق رابطه مربوطه، درآمد حاصله، منفی خواهد بود. با توجه به افزایش میزان تلفات، هزینه افزایش تلفات در مورد سوم نیز، بیشتر از مورد دوم می‌باشد. نهایتاً با در نظر داشتن این موضوع که حل مسأله بهینه‌سازی در مورد مطالعاتی دوم، با هدف بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار انجام شده است، بنابراین بدیهی است که با تغییر این حالت بهینه (در خصوص مکان پارکینگ‌ها)، انتظار می‌رود که میزان سود در مورد مطالعاتی سوم کاهش یابد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود سود سرمایه‌گذار در حالت سوم نسبت به حالت دوم، به میزان ۰/۰۲ میلیون دلار و معادل ۰/۵۹ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۱: مقادیر مؤلفه‌های درآمد و هزینه در مورد مطالعاتی سوم

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، جایابی و تعیین ظرفیت بهینه پارکینگ‌های خودروهای برقی در شبکه، با استفاده از مدل خطی آمیخته با عدد صحیح، با لحاظ نمودن الگوی حرکت خودروها بین ناحیه‌های چهارگانه (با کاربری مختلف)، پیشنهاد شده است. سپس قابلیت اطمینان سیستم توزیع با بهره‌گیری از شاخص پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف این مدل، بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار پارکینگ و کاهش تلفات ناشی از احداث پارکینگ در شبکه و نهایتاً ارزیابی میزان تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع با حضور پارکینگ‌ها با شاخص پیشنهادی می‌باشد. پیاده‌سازی مدل مربوط به مسأله بهینه‌سازی در نرم‌افزار GAMS به وسیله حل‌کننده CPLEX انجام شده و پیاده‌سازی الگوریتم ارزیابی قابلیت اطمینان در نرم‌افزار MATLAB اجرا شده است.

سه مورد مطالعات مورد ارزیابی قرار گرفت. در مورد مطالعاتی اول، وضعیت تلفات و قابلیت اطمینان شبکه تحت آزمایش، به همراه صحت‌سنجی، پیش از راه‌اندازی پارکینگ، بررسی شده است؛ در مورد

مطالعاتی دوم، هدف اولیه مدل ارائه شده، بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار پارکینگ‌ها بوده که در این حالت، بهینه سود قابل حصول، به میزان ۳/۷۳۵ میلیون دلار محاسبه گردیده و همچنین در گام دوم سنجش قابلیت اطمینان شبکه تحت مطالعه، که مشخص گردیده که پارکینگ‌های موجود در سیستم در این حالت، به میزان ۱/۴ درصد در افزایش قابلیت اطمینان شبکه، موثر بوده‌اند. در مورد مطالعاتی سوم مشخص گردیده است که با جایجائی مکان راه‌اندازی پارکینگ‌ها می‌توان تأثیر مثبتی روی قابلیت اطمینان شبکه داشت؛ از نتایج مطالعات انجام شده در این مورد می‌توان به کاهش سود سرمایه‌گذار به میزان ۰/۵۹ درصد و رشد ۱/۳۶ درصدی شاخص قابلیت اطمینان نسبت به مورد دوم اشاره نمود، بنابراین بهره‌گیری از این مدل می‌تواند جهت ارزیابی اقتصادی نصب پارکینگ‌های شارژ و نیز ارزیابی میزان تأثیر خودروهای برقی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع با حضور پارکینگ‌ها به کار رود.

با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان به صورت هدف دوم در مدل مورد نظر، موجب می‌گردد که سود سرمایه‌گذار و قابلیت اطمینان شبکه، در نقطه بهینه‌ای به مقدار حداکثر برسد؛ به علاوه در صورتی که پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی دارای منابع تولید انرژی تجدیدپذیر باشند؛ قادر خواهند بود به بهبود قابلیت اطمینان شبکه کمک کنند. همچنین بر اساس تجربیات حاصل، موارد زیر به عنوان پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شوند.

- ۱- تخصیص بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان، به عنوان یکی از مؤلفه‌های تابع هدف و یا یکی از توابع هدف مسأله دوهدفه (با اهداف حداکثرسازی سود سرمایه‌گذار و نیز قابلیت اطمینان سیستم).
- ۲- تخصیص بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر، با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان.

مراجع

[1] Mozaffari, M. Abyaneh, H. A. Jooshaki, M. Moeini-Aghtaie, M. (2020). Joint expansion planning studies of EV parking lots placement and distribution network. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(10), 6455-6465.

[2] Fernandez, L. P. San Román, T. G. Cossent, R. Domingo, C. M. Frias, P. (2010). Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. IEEE transactions on power systems, 26(1), 206-213.

[3] Neyestani, N. Damavandi, M. Y. Shafie-Khah, M. Contreras, J. Catalão, J. P. (2014). Allocation of plug-in vehicles' parking lots in distribution systems considering network-constrained objectives. IEEE Transactions on Power Systems, 30(5), 2643-2656.

[4] Fox, G. H. (2013). Electric vehicle charging stations: Are we prepared. IEEE Industry Applications Magazine, 19(4), 32-38.

[5] Guille, C. Gross, G. (2009). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. Energy policy, 37(11), 4379-4390.

[6] Sabzevari, K. (2022). Power Sharing Between Islanded Microgrid Inverters by Modifying the Droop Control Method,

C_d	هزینه استهلاک باتری خودروها به دلیل عملکرد V2G (دلار بر کیلووات ساعت)
$C_{i,t}^{PL}$	ظرفیت باتری خودروها در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kwh)
C^M, C^{eq}	هزینه‌های خرید و نگهداشت هر جایگاه شارژ (دلار)
C^{land}	هزینه زمین برای نصب جایگاه شارژ ($\$/m^2$)
C^{fix}	هزینه ثابت مورد نیاز برای احداث پارکینگ (دلار)
$C_{i,j,t}^{in,zone}$	ظرفیت باتری خودروهای وارد شده در ساعت t به ناحیه j از ناحیه i در زمان t (kWh)
$C_{i,j,t}^{out,zone}$	ظرفیت باتری خودروهای خارج شده از ناحیه i به سمت ناحیه j در زمان t (kWh)
Can_b^{PLA}	پارامتر یابری که یک بودن آن، نشان می‌دهد شین b کاندیدای احداث پارکینگ می‌باشد
FOR_i^{PL}	احتمال عدم موفقیت پارکینگ‌های ناحیه i در تحویل رزرو فراخوانی شده
I_L^{min}, I_L^{ma}	حداقل و حداکثر جریان مجاز خط L (پریونیت)
$L_{i,j}$	مسافت طی شده توسط خودروها برای رسیدن از ناحیه i به ناحیه j (km)
L_b	توان اکتیو متوسط هر شین (کیلووات)
L	تعداد خطوط شبکه
min_i^{PL}, ma	حداقل و حداکثر تعداد پارکینگ قابل نصب در ناحیه i
m	تعداد کلیه مشترکین
n	تعداد سالهای برگشت سرمایه
$n_{i,t}^{pl}$	تعداد کلیه خودروهای پارک شده در پارکینگ‌ها در ساعت t و ناحیه i
N_l	تعداد مشترکینی که بر اثر خرابی خط l ام دچار قطعی برق شده‌اند
N_b	تعداد مشترکین هر شین
$N_{i,t}^{in,EX}$	تعداد خودروهای وارد شده از ناحیه خارجی به ناحیه i در زمان t
$N_{i,t}^{out,EX}$	تعداد خودروهای خروجی از ناحیه i به ناحیه خارجی در زمان t
$N_{i,j,t}^{in,zone}$	تعداد خودروهای وارد شده به ناحیه i از ناحیه j در زمان t
$N_{i,j,t}^{out,zone}$	تعداد خودروهای خروجی از ناحیه i به سمت ناحیه j در زمان t
N_x	تعداد مشترکینی که متأثر از قطعی m/x می‌باشند
$n_b^{PLA,min}$	شین حداقل تعداد جایگاه شارژ قابل نصب در پارکینگ b
$n_b^{PLA,max}$	حداکثر تعداد جایگاه شارژ قابل نصب در پارکینگ شین b
$p_{i,j}^{fuel}$	صرف انرژی خودرو در مسافت از ناحیه i به j (kWh/km)
$p_{b,t}^D$	توان حقیقی مورد تقاضا در شین b در ساعت t (kW)
P_x	توان از دست‌رفته در خاموشی m/x
$q_{b,t}^D$	توان راکتیو مورد تقاضا در شین b در ساعت t (kVar)
$R_{b,b'}, X_{b,b'}$	مقاومت، راکتانس و امپدانس خط بین شین b و b' (پریونیت)
r_i	مدت زمان بازیابی شبکه (ساعت)
$soC_i^{EV,min}$	حداقل SOC قابل قبول خودروهای موجود در ناحیه i (kwh)
$soC_i^{EV,max}$	حداکثر SOC قابل قبول خودروهای موجود در ناحیه i (kwh)
$S_{i,j}$	سرعت مسافت خودروها در حرکت از ناحیه i به ناحیه j (km/h)
v_b^{min}, v_b^m	حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز شین b (پریونیت)
U	در دسترس ناپذیری سیستم (h)
U_x	زمان قطعی m/x (h)
η_d, η_c	بازده شارژ و دشارژ در جایگاه شارژ (%)
ϕ_i^{PL}	حداقل SOC مورد نیاز خودرو هنگام خروج از ناحیه i (%)
Γ_i^{PL}	نرخ شارژ و دشارژ جایگاه‌های شارژ در ناحیه i (kW/h)
κ_i^{PL}	SOC قابل استفاده در پارکینگ طبق قرارداد با خودروها (%)
π_t^E, π_t^R	قیمت انرژی و رزرو در بازار برق در ساعت t ($\$/kW$)
π_t^{con}	نرخ جریمه در زمان عدم موفقیت پارکینگ‌ها در تأمین رزرو مورد نیاز در ساعت t ($\$/kW$)
π^{Tariff}	تعرفه استفاده از پارکینگ ($\$/h$)
π_t^{V2G}, π_t^{G2V}	قیمت خرید و فروش انرژی از خودروها در ساعت t ($\$/kW$)
$\rho_{i,t}^{del}$	احتمال فراخوانی رزرو خریداری شده از ناحیه i در ساعت t
λ_l	نرخ خرابی خطوط شبکه (خرابی بر سال)
ρ_l	احتمال خرابی خطوط (خرابی بر ساعت)
X	تعداد کل قطعی‌های شبکه

Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS), Issue 4, Vol. 3.

[7] Karfopoulos, E. L. Hatzigiorgiou, N. D. (2012). A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles. IEEE Transactions on Power Systems, 28(2), 1196-1204.

[8] El-Zonkoly, A. dos Santos Coelho, L. (2015). Optimal allocation, sizing of PHEV parking lots in distribution system. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 67, 472-477.

[9] Gholami, Kh. Karimi, Sh. Anvari-Moghaddam, (2022). Am. Multi-objective Stochastic Planning of Electric Vehicle Charging Stations in Unbalanced Distribution Networks Supported by Smart Photovoltaic Inverters, Sustainable Cities and Society, Volume 84, 2022, 104029, ISSN2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104029>.

[10] Zhang, Q. Zhu, Y. Wang, Z. Su, Y. Li, C. (2019). Reliability assessment of distribution network and electric vehicle considering quasi-dynamic traffic flow and vehicle-to-grid. IEEE Access, 7, 131201-131213.

[11] Zeng, B. Gao, Y. Zhu, Z. (2019). Assessing Impacts of EV Parking Lots on Distribution System Reliability with Consideration of User Behavioral Uncertainties. Journal of Electrical Systems, 15(3), 346-358.

[12] Bayram, I. S. Devetsikiotis, M. Jovanovic, R. (2022). Optimal design of electric vehicle charging stations for commercial premises. International Journal of Energy Research, 46(8), 10040-10051.

[13] Xu, P. Zhang, J. Gao, T. Chen, S. Wang, X. Jiang, H. Gao, W. (2022). Real-time fast charging station recommendation for electric vehicles in coupled power-transportation networks: A graph reinforcement learning method. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 141, 108030.

[14] Guner, S. Ozdemir, A. (2020). Reliability improvement of distribution system considering EV parking lots. Electric Power Systems Research, 185, 106353.

[15] Kersting, W. H. (1991). Radial distribution test feeders. IEEE Transactions on Power Systems, 6(3), 975-985.

[16] Briones, A. Francfort, J. Heitmann, P. Schey, M. Schey, S. Smart, J. (2012). Vehicle-to-grid (V2G) power flow regulations and building codes review by the AVTA. Idaho National Lab. Idaho Falls, ID, USA, 1.

[17] Asghari rad, H., Jafari Nokandi, M., & Hosseini, S. M. (2023). Optimal Allocation of Electric Vehicles' Parking Lots in Distribution Systems Considering Urban Traffic. Energy Engineering and Management, 11(2), 70-81. doi: 10.22052/11.2.3

فهرست نمادها و نشانه‌ها:

شاخص‌ها

c	شاخص تعداد مشترکین
t	شاخص زمان
i, j	شاخص ناحیه‌ها
b	شاخص شین‌های شبکه توزیع
l	شاخص خطوط شبکه
k	شاخص جایگاه‌های شارژ
x	شاخص تعداد قطعی‌های شبکه

پارامترها

A	فضای مورد نیاز برای نصب هر جایگاه شارژ (متر مربع)
-----	---

متغیرها

$P_{b,t}^{PLA,out}$	توان خروجی از پارکینگ موجود در شین b در زمان t (kW)	$cos t_{i,t}^{PL}$	هزینه‌های مربوط به پارکینگ ناحیه i در زمان t (دلار)
$q_{b,b',t}^{line}$	توان راکتیو عبوری از خط بین شین b و b' در زمان t (kW)	c_i^{ins}	هزینه نصب پارکینگ‌های ناحیه i (دلار)
$re_{i,t}^{PL,out}$	رزرز فراخوانی شده از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW)	c_t^{loss}	هزینه تلفات انرژی در شبکه توزیع در زمان t (دلار)
$re_{i,t}^{PL}$	رزرز پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW)	c_i^{var}	هزینه متغیر مورد نیاز برای احداث پارکینگ در شین b (دلار)
$SOC_{i,t}^{PL}$	سطح شارژ خودروهای موجود در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh)	$E_{PL,L,t}$	انرژی تأمین شده توسط کلیه پارکینگ‌ها (کیلووات ساعت)
$SOC_{i,t}^{ar,PL}$	سطح شارژ خودروهای وارد شده به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh)	ENS	مقدار انرژی تأمین نشده (کیلووات ساعت)
$SOC_{i,t}^{dep,PL}$	سطح شارژ خودروهای خارج شده از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh)	E_{pl}^{max}	حداکثر انرژی قابل تحویل توسط پارکینگ (کیلووات ساعت)
$SOC_{i,t}^{in,Ex}$	سطح شارژ خودروهای وارد شده از ناحیه خارجی به ناحیه i در زمان t (kWh)	E_{istand}	انرژی نیاز کوچک‌ترین جریزه شامل پارکینگ در مدت زمان رفع خطا (کیلووات ساعت)
$SOC_{i,t}^{out,Ex}$	سطح شارژ خودروهای خارج شده از ناحیه i به سمت ناحیه خارجی در زمان t (kWh)	E_{assist}	امید ریاضی انرژی تأمین شده توسط کلیه پارکینگ‌ها (کیلووات-ساعت)
$SOC_{i,j,t}^{in,zone}$	سطح شارژ خودروهای وارد شده از ناحیه j به ناحیه i در زمان t (kWh)	$loss_t$	تلفات شبکه توزیع در زمان t با حضور پارکینگ‌ها (kW)
$SOC_{i,j,t}^{out,zone}$	سطح شارژ خودروهای خارج شده از ناحیه i به ناحیه j در زمان t (kWh)	$loss_{0,t}$	تلفات شبکه توزیع در زمان t بدون حضور پارکینگ‌ها (kW)
$SOC_{i,t}^{dep,zone}$	سطح شارژ خودروهای خارج شده از ناحیه i در زمان t (kWh)	$n_{i,t}^{ar,PL}$	تعداد خودروهای ورودی به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t
$SOC_{i,t}^{PL}$	سطح شارژ پارکینگ در زمان t (kWh)	$n_{i,t}^{dep,PL}$	تعداد خودروهای خروجی از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t
si_b^{PLA}	متغیر باینری که یک بودن آن، نشان می‌دهد شین b برای احداث پارکینگ انتخاب شده است.	$n_{i,t}^{PL}$	تعداد خودروهای موجود در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t
$V_{b,t}, i_{b,t}$	ولتاژ شین b و جریان تزریقی به شین b در زمان t (پرینیت)	ns_b^{PLA}	تعداد جایگاه‌های شارژ در پارکینگ نصب شده در شین b
$u_{b,k,t}^{PL}$	متغیر باینری که یک بودن آن، نشان می‌دهد جایگاه شارژ k از پارکینگ موجود در شین b در زمان t توسط خودرویی اشغال شده است.	NS_i^{PL}	تعداد کل جایگاه‌های شارژ در پارکینگ‌های ناحیه i
		$p_{b,t}^{Sys,in}$	توان حقیقی ورودی از شبکه بالادست به سیستم در شین b (kW)
		$q_{b,t}^{Sys,in}$	توان راکتیو ورودی از شبکه بالادست به سیستم در شین b ($kvar$)
		$p_{b,b',t}^{line}$	توان حقیقی عبوری از خط بین شین b و b' در زمان t (kW)
		$profit^{PL}$	سود پارکینگ‌های شارژ ($\$$)
		$P_{pl,t}^{max}$	حداکثر توان قابل تزریق در هر پارکینگ در هر ساعت (کیلووات)
		$p_{i,t}^{PL,in}$	توان ورودی به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW)
		$p_{i,t}^{PL,out}$	توان خروجی از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW)
		$P_{b,t}^{PLA,in}$	توان ورودی به پارکینگ موجود در شین b در زمان t (kW)

- 4 Electric Vehicles Parking Lot
- 5 Controlled charging mode
- 6 Uncontrolled charging mode

- 1 Electric vehicle
- 2 Vehicle to Grid
- 3 Distributed energy resources