

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۵

تخصیص بهینه پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی در سیستم توزیع با در نظر گرفتن الگوی ترافیک شهری

حمید اصغری راد^۱، میثم جعفری نوکندی^{۲*}، سید مهدی حسینی^۳

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

hamid.asgharirad@nit.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

m.jafari@nit.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

mehdi.hosseini@nit.ac.ir

چکیده: پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی به دلیل تجمع تعداد زیادی از خودروها می‌توانند امکان بهره‌گیری مناسب از ظرفیت باتری خودروها را فراهم کنند. با این حال، مکان و اندازه این پارکینگ‌ها، روی وضعیت شبکه توزیع تأثیرگذار خواهد بود. در این تحقیق، مدلی بر اساس برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP) برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن قیود شبکه توزیع و الگوی حرکت خودروها بین نواحی مختلف شهری پیشنهاد شده است. در مدل مورد نظر، اهداف سفرها، تعداد خودروها و زمان ورود و خروج آن‌ها در نواحی مختلف با توجه به نوع سفر در نظر گرفته می‌شوند. محدودیت‌های شبکه توزیع نیز با استفاده از معادلات خطی شده پخش بار لحاظ می‌گردند. هدف این مدل، حداکثرسازی سود مالکان پارکینگ‌هاست. مدل مورد نظر در یک سیستم توزیع با ۳۷ شین که شامل چهار ناحیه مختلف از نظر نوع سفر خودروها می‌باشد، پیاده‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده، کارایی مدل پیشنهادی برای مکان‌یابی پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوی ترافیکی، تبادلات پارکینگ‌ها، جایابی پارکینگ‌ها، خودروهای برقی، چندناحیه‌ای.

۱. مقدمه

خودروهای برقی را حداکثر کند. با این حال، قیود شبکه توزیع در این مدل در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۹] برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای برقی با هدف پیشینه‌سازی سود خودروها و اپراتور ایستگاه شارژ در دو مرحله انجام شده است. خروجی مرحله اول، مقدار بهینه بار ساعتی ایستگاه شارژ است. بر اساس بار به‌دست‌آمده، مکان بهینه ایستگاه شارژ با هدف حداقل‌سازی تلفات، شاخص انحراف ولتاژ^۸ و حداکثرسازی شاخص پایداری ولتاژ^۹ در مرحله دوم به دست آمده است.

علاوه بر بحث مدیریت انرژی خودروهای برقی در پارکینگ‌های شارژ، تحقیقات زیادی نیز بر تعیین مکان و اندازه بهینه پارکینگ‌های شارژ تمرکز کرده‌اند. مرجع [۱۰] مکان‌یابی پارکینگ‌های شارژ با حضور منابع تولید پراکنده (DG^1) و با هدف کاهش هزینه تلفات در شبکه توزیع را انجام داده و نشان می‌دهد که مکان پارکینگ‌ها بستگی به تعداد خودروهای برقی موجود در پارکینگ و نرخ شارژ آن‌ها دارد. در مرجع [۱۱] بهینه‌سازی مکان و ظرفیت پارکینگ‌های شارژ در سیستم توزیع و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای آن‌ها با هدف هموارسازی پروفیل بار شبکه انجام شده است. در مرجع [۱۲]، جایابی پارکینگ خودروهای برقی با هدف پیشینه نمودن سود^{۱۱} به‌دست‌آمده از حضور پارکینگ‌ها، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان ارائه شده است. در مرجع [۱۳] نیز جایابی پارکینگ‌های شارژ در سیستم توزیع با در نظر گرفتن یک مدل دومرحله‌ای و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های تلفات توان، قابلیت اطمینان شبکه و انحراف ولتاژ انجام شده است. در مرحله اول، میزان تبادلات پارکینگ‌ها با بازارهای انرژی و رزرو^{۱۲}، برای حداکثرسازی سود مالکان پارکینگ‌ها مشخص می‌شود و در مرحله دوم، مکان پارکینگ‌ها بر اساس تبادلات برنامه‌ریزی شده در مرحله اول و با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه توزیع تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه در مرحله اول، قیود شبکه توزیع در نظر گرفته نمی‌شود ممکن است تبادلات برنامه‌ریزی شده به شکلی باشد که سیستم توزیع با توجه به محدودیت‌های خود قادر به برآورده کردن آن‌ها نباشد و یا نیازمند صرف هزینه‌های اضافی برای تأمین آن‌ها گردد. در مرجع [۱۴] یک مدل جدید دوسطحی برای برنامه‌ریزی شرکت توزیع پیشنهاد شده که شامل مؤلفه‌های

امروزه به دلیل مزایای ناشی از کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود راندمان انرژی، خودروهای برقی توجهات زیادی را به خود جلب کرده‌اند و در سیستم‌های حمل‌ونقل آینده به تعداد زیاد مورد استفاده قرار خواهند گرفت [۱] و [۲]. با این حال، افزایش نفوذ این خودروها در سیستم، نیازمند برطرف کردن چالش‌های مرتبط با آن‌ها مانند احداث زیرساخت‌های شارژ^۱ و تأثیر بار ناشی از شارژ خودروها بر شبکه توزیع است. دو راهکار اصلی برای شارژ عمومی خودروهای برقی، ایستگاه‌های شارژ سریع^۲ و پارکینگ‌های شارژ^۳ هستند. معمولاً خودروها مدت‌زمان قابل توجهی از روز را در حالت پارک به سر می‌برند و در نتیجه، فرصت ارزشمندی برای مدیریت ظرفیت باتری خودرو در پارکینگ‌ها وجود دارد. از سوی دیگر، با فناوری خودرو به شبکه ($V2G^4$) خودروهای موجود در پارکینگ می‌توانند به‌عنوان منبع توان نیز، انرژی به شبکه تزریق کنند. بنابراین پارکینگ‌های شارژ خودروهای برقی می‌توانند از دیدگاه سیستم توزیع^۵، به‌عنوان بارهای قابل کنترل در نظر گرفته شوند. این ویژگی، مزایای اقتصادی برای مالکان پارکینگ به همراه دارد و می‌تواند موجب بهبود پارامترهای شبکه توزیع شود.

در سال‌های اخیر، مقالات زیادی به برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ و مدیریت انرژی^۶ در پارکینگ‌های خودروهای برقی پرداخته‌اند. مدیریت بهینه برنامه شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌های شارژ هوشمند در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی در مرجع [۳] بررسی شده است. در مرجع [۴]، روشی برای بهره‌برداری بهینه از خودروهای برقی جهت مدیریت انرژی و بهبود کیفیت توان شبکه توزیع ارائه شده است. در مرجع [۵] مدلی برای برنامه‌ریزی بهینه از شبکه توزیع مبتنی بر کاهش محافظه‌کارانه ولتاژ^۷ در حضور خودروهای برقی ارائه شده است. در مرجع [۶]، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ در یک پارکینگ برای کاهش توان پیک سیستم و با در نظر گرفتن خودروهای برقی متفاوت انجام شده است. در مرجع [۷] و [۸] نیز الگوریتم‌هایی برای مدیریت انرژی تعداد زیادی خودروی برقی پیشنهاد شده است، به‌طوری که انرژی متوسط انتقال‌یافته به باتری

1. Charging Infrastructures
2. Fast Charging Station
3. Parking Lots
4. Vehicle to Grid
5. Distribution System
6. Energy Management
7. Conservative Voltage Reduction

8. Voltage Deviation
9. Voltage Stability Index
10. Distributed Generation
11. Profit Maximation
12. Energy and Reserve Markets

بین نواحی مختلف، حداکثر سود مالکان پارکینگ‌ها را به دست می‌آورد. در مدل مورد نظر، اهداف سفرها و الگوی حرکتی آن‌ها و همچنین مدت‌زمان توقف در نواحی لحاظ می‌شود. تفاوت این مقاله با برخی از تحقیقات پیشین از جمله مرجع [۱۳]، در این است که مکان و ظرفیت پارکینگ‌ها و الگوی تبادلات توان آن‌ها با شبکه، در مدلی یک‌مرحله‌ای به دست می‌آید. بنابراین میزان تبادلات پارکینگ‌ها با شبکه، با در نظر گرفتن قيود شبکه توزیع تعیین می‌شود و قابل قبول بودن جواب، تضمین شده است. ضمن آنکه هزینه سرمایه‌گذاری نیز در محاسبه سود مالک پارکینگ لحاظ شده است. همچنین تفاوت کار انجام‌شده در این تحقیق با مرجع [۲۵]، این است که در مرجع [۲۵] با مشخص بودن مکان پارکینگ‌ها، میزان تبادلات آن‌ها با شبکه با توجه به الگوی ترافیک بین ناحیه‌ای تعیین می‌شود. درحالی‌که مقاله حاضر، مکان پارکینگ‌ها و تعداد جایگاه‌های شارژ در هر ناحیه را با توجه به الگوی ترافیکی بین ناحیه‌ای تعیین می‌کند. لذا ارائه مدل یک‌مرحله‌ای برای تعیین مکان و ظرفیت پارکینگ‌ها بر اساس شبکه حمل‌ونقل چندناحیه‌ای، نوآوری مقاله حاضر است.

در ادامه مقاله در بخش دوم، فرضیات اصلی و چهارچوب کلی مسئله توضیح داده شده است. در بخش سوم مدل ریاضی برای مکان‌یابی بهینه پارکینگ‌ها به همراه قیود مسئله آورده شده است. در بخش چهارم، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲. تعریف مسئله و مدل پیشنهادی

۲.۱. الگوی مدل ترافیکی خودروها

پتانسیل پارکینگ‌های شارژ برای مشارکت در بازارهای برق، به‌طور قابل توجهی به تعداد خودروهای حاضر در پارکینگ، ظرفیت باتری‌ها و سطح شارژ آن‌ها ($SOCh$)، مدت توقف خودروها و تمایل مالکانشان به مشارکت در حالت V2G بستگی دارد. تجمیع سطح شارژ همه خودروهای برقی در پارکینگ و یا در کل پارکینگ‌های یک ناحیه، میزان سطح شارژ آن پارکینگ یا ناحیه را مشخص می‌سازد و اغلب به‌صورت درصدی از ظرفیت کل باتری‌های خودروهای موجود بیان می‌شود. عامل مؤثر دیگر در این زمینه، الگوهای مسافرت خودروها در سطح شبکه است. در عمل ممکن است نحوه حرکت خودروها در همه

زیست‌محیطی و فنی در تابع هدف است. حداکثرسازی سود شرکت توزیع برق و سود مالکان پارکینگ‌ها، توابع هدف در هر سطح هستند. میزان تحقق این اهداف، بستگی به بار شبکه، توان خریداری‌شده از شبکه بالادست، توان مبادله‌شده میان پارکینگ‌ها و شبکه و خودروها دارد. محققان دیگری نیز مکان‌یابی پارکینگ‌های شارژ را با اهدافی همچون کاهش تلفات شبکه [۱۵-۱۷]، بهبود قابلیت اطمینان [۱۷-۲۰]، اصلاح انحراف ولتاژ شین‌ها [۱۹] و به‌دست‌آوردن سود اقتصادی در مراجع [۲۰ و ۲۱] انجام داده‌اند. با این حال، الگوی شارژ خودروها در مراجع [۱۶، ۱۷، ۱۹ و ۲۰] بهینه نشده است. در مراجع [۱۵، ۲۱ و ۲۲] نیز الگوی شارژ و مکان بهینه پارکینگ‌ها در فرایندهای بهینه‌سازی جداگانه تعیین شده‌اند که می‌تواند به جواب‌های غیر بهینه برای کل سیستم و مالکان خودروها بینجامد.

اگرچه در بسیاری از تحقیقات گذشته، عملکرد خودروهای برقی، ایستگاه‌های شارژ سریع و پارکینگ‌های شارژ بررسی شده‌اند، تأثیر الگوی ترافیک شهری^۱ بر مکان مناسب پارکینگ‌ها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۲۳]، شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی به‌صورت هم‌زمان و با هدف حداکثرسازی پوشش مسیرهای حرکت خودروها^۲ در شبکه ترافیکی توسط ایستگاه‌های شارژ سریع و حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تلفات انرژی در نظر گرفته شده‌اند. در مرجع [۲۴]، مدلی برای مطالعه هم‌زمان سیستم حمل‌ونقل و انرژی پیشنهاد داده شده و به‌کارگیری خودروهای برقی در کاهش هزینه‌های کل شامل سیستم حمل‌ونقل و انرژی را نشان داده است. برخلاف مراجع قبلی که بیشتر در مورد ایستگاه‌های شارژ سریع انجام شده‌اند، در مرجع [۲۵]، تأثیر الگوی حرکت خودروها بین نواحی مختلف بر حداکثر سود پارکینگ‌های شارژ بررسی شده است. البته در این مقاله، مکان و اندازه پارکینگ‌ها، از قبل معلوم بوده و فقط به مدیریت شارژ خودروهای موجود در آن‌ها پرداخته می‌شود.

الگوی ترافیکی خودروهای برقی، یک راه برای نشان دادن رفتار خودروها در سیستم است. مدل‌سازی الگوی ترافیکی و مشارکت خودروهای برقی در عملکرد سیستم، مدیریت انرژی را انعطاف‌پذیرتر می‌کند. لذا در مقاله حاضر مدلی برای مکان‌یابی بهینه پارکینگ‌های خودروهای برقی در سیستم پیشنهاد شده است که با در نظر گرفتن شبکه حمل‌ونقل چندناحیه‌ای و جابه‌جایی خودروها

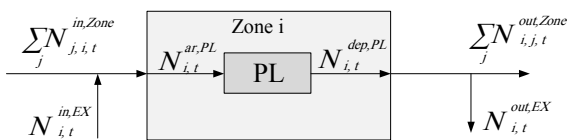
1. Urban Traffic Pattern
2. Maximization Traffic Flow Captured

تعیین می‌کنند. فرض می‌شود خودروها در ناحیه خانگی از طریق شارژرهای خانگی قابل شارژ هستند و به‌طور متوسط با سطح شارژ ۵۰٪ از این ناحیه خارج می‌شوند. اما به‌دلیل عدم وجود پارکینگ‌های شارژ عمومی، نقاط متمرکزی برای شارژ آن‌ها وجود ندارد و لذا بار متناظر با شارژ آن‌ها به‌صورت تناسبی، روی شین‌های موجود در ناحیه تقسیم می‌شوند. اما در نواحی دیگر، پارکینگ‌های شارژ می‌توانند با در نظر گرفتن الگوی ترافیکی نواحی مختلف و قیود شبکه توزیع نصب گردند. همچنین در این مقاله فرض شده است که همه خودروهای وارد شده به هر ناحیه، در پارکینگ‌های آن ناحیه قرار می‌گیرند و در واقع، محدودیتی از نظر تعداد جایگاه‌های شارژ وجود ندارد. اما محل احداث پارکینگ‌ها و تعداد شارژرهای آن‌ها، با هدف حداکثر شدن سود کل پارکینگ‌ها تعیین خواهد شد. در ضمن فرض می‌شود تبادل توان پارکینگ‌ها با شبکه با قیمت ساعتی بازار انرژی انجام می‌شود اما قیمت انرژی فروخته‌شده به خودروها در پارکینگ ($\pi_{i,t}^{G2V}$) کمتر از قیمت بازار است. فروش انرژی به خودروها با قیمت کمتر، به‌عنوان یک استراتژی تشویقی توسط مالکان پارکینگ‌ها اتخاذ می‌شود تا بتوانند حضور خودروهای برقی را در پارکینگ‌ها افزایش دهند.

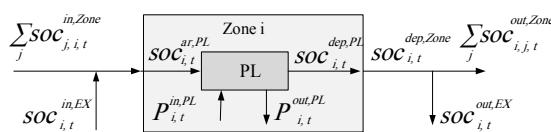
۲.۲. مدل ریاضی مسئله

۲.۲.۱. مدل‌سازی پارکینگ‌ها با توجه به الگوی ترافیکی

در این مقاله، تعداد خودروهای ورودی و خروجی به پارکینگ‌های هر ناحیه و همچنین ظرفیت کل باتری‌های آن‌ها به‌عنوان پارامترهای معلوم در نظر گرفته می‌شوند که مقدار آن‌ها بر اساس مطالعات آماری خودروها در شبکه حمل‌ونقل قابل پیش‌بینی است. شکل (۲)، الگوی ترافیکی ناحیه i با توجه به تعداد خودروهای ورودی و خروجی و همچنین الگوی شارژ خودروها و همچنین تبادلات با شبکه را نشان می‌دهد.



الف. نمودار الگوی ترافیکی ناحیه i

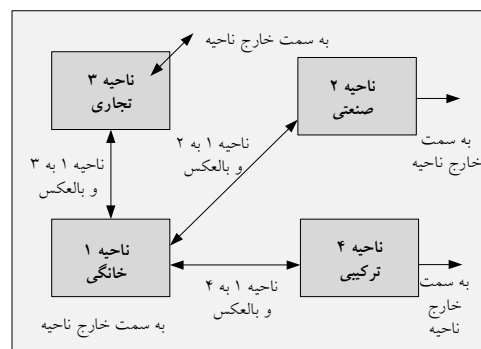


ب. نمودار الگوی شارژ خودروها

شکل (۲): مدل ورود و خروج خودروها و الگوی شارژ آن‌ها در ناحیه

قسمت‌های شبکه حمل‌ونقل یکسان نباشد. با توجه به ویژگی‌هایی که نواحی صنعتی و تجاری^۱ دارند، زمان ورود و خروج و میزان توقف خودروها در آن‌ها متفاوت است. به همین سبب در مقالات متعددی برای مدل‌سازی این تفاوت‌ها از سیستم ترافیکی چندناحیه‌ای استفاده شده است [۱۸ و ۲۵]. لذا در این مقاله نیز فرض شده است که مطابق شکل (۱)، منطقه شهری مورد مطالعه بر اساس اهداف سفر خودروها به چهار ناحیه خانگی^۲، تجاری، صنعتی و مختلط^۳ (ترکیبی از مقاصد تجاری و صنعتی) تقسیم می‌شود. با توجه به تقسیم‌بندی نواحی، سه دسته اصلی برای سفر خودروها در سطح شبکه وجود دارد:

- مسافرت نوع ۱، از ناحیه خانگی به ناحیه تجاری که شامل رفت و برگشت از خانه به محل‌های خرید است.
- مسافرت نوع ۲، از ناحیه خانگی به ناحیه صنعتی که الگوی ترافیکی آن بر اساس ساعت کار شیفتهی مراکز صنعتی است. این نوع مسافرت با میزان تردد کم بوده و بر اساس کارکرد کارخانه‌ها، ۲۴ ساعته است.
- مسافرت نوع ۳ نیز از ناحیه خانگی به ناحیه ترکیبی و بالعکس می‌باشد.



شکل (۱): نحوه حرکت خودروها بین نواحی مختلف

علاوه بر سفرهای گفته‌شده، فرض می‌شود که در هر ناحیه تعدادی خودرو، مقصدی به غیر از نواحی مشخص شده دارند که ناحیه خارجی نامیده می‌شود. بعضی از خودروها نیز ممکن است از ناحیه خارجی به نواحی تعریف‌شده وارد شوند. فرض می‌شود به خودروهای شرکت‌کننده در برنامه V2G هزینه‌ای بابت استهلاک باتری^۴ آن‌ها پرداخت می‌شود. همچنین مالکان خودروهای برقی، حداقل مقداری را برای SOC باتری خود قبل از ترک پارکینگ

1. Commercial and Industrial Zones
2. Residential Zone
3. Complex Zone
4. Battery Depreciation Cost

پارکینگ در ساعت قبل، توان مبادله شده با شبکه، راندمان شارژ و دشارژ^۱ و سطح شارژ خودروهای ورودی به پارکینگ و خروجی از آن بستگی دارد. بر اساس رابطه (۱۱) فرض می شود که سطح شارژ خودروهای خارج شده از پارکینگها متناسب با نسبت خودروهای خارج شده از هر ناحیه به کل خودروهای موجود در پارکینگهای آن است. در روابط (۱۲) و (۱۳) نیز SOC خودروهای خارج شده به سمت سایر نواحی و ناحیه خارجی، متناسب با تعداد خودروهای خروجی به سمت هر ناحیه در نظر گرفته می شود. رابطه (۱۴)، SOC پارکینگ در هر زمان را بین حداقل و حداکثر درصدی از ظرفیت کل پارکینگ محدود می کند:

$$soc_{i,t}^{PL} = SOC_{i,t}^{PL} \Big|_{t=1} + soc_{i,t-1}^{PL} \Big|_{t>1} + P_{i,t}^{PL, in} \cdot \eta_c - P_{i,t}^{PL, out} \cdot \frac{1}{\eta_d} + soc_{i,t}^{ar, PL} - soc_{i,t}^{dep, PL} \quad (10)$$

$$soc_{i,t}^{dep, PL} = soc_{i,t}^{PL} \cdot \left(N_{i,t}^{out, Ex} + \sum_j N_{i,j,t}^{out, zone} \right) / n_{i,t}^{PL} \quad (11)$$

$$soc_{i,j,t}^{out, Zone} = soc_{i,t}^{dep, PL} \cdot N_{i,j,t}^{out, Zone} / n_{i,t}^{dep, PL} \quad (12)$$

$$soc_{i,t}^{out, Ex} = soc_{i,t}^{dep, PL} \cdot N_{i,t}^{out, Ex} / n_{i,t}^{dep, PL} \quad (13)$$

$$soc_i^{EV, min} \cdot c_{i,t}^{PL} \leq soc_{i,t}^{PL} \leq soc_i^{EV, max} \cdot c_{i,t}^{PL} \quad (14)$$

مطابق روابط (۱۵) و (۱۶)، توان ورودی به پارکینگ به حاصل ضرب تعداد کل خودروهای موجود در پارکینگ و نرخ شارژ آنها محدود می شود. حداکثر توان خروجی پارکینگ نیز به حاصل ضرب تعداد کل خودروها و نرخ دشارژ آنها و همچنین الزام SOC خودروها در زمان خروج به یک حداقل مقدار از قبل مشخص (ضریب \emptyset_i^{PL})، محدود می شود. بر اساس رابطه (۱۷) نیز مجموع توان خروجی و رزرو برنامه ریزی شده باید کمتر از حداکثر ظرفیت دشارژ پارکینگ و SOC قابل استفاده پارکینگ باشد.

$$P_{i,t}^{PL, in} \leq \Gamma_i^{PL} \cdot n_{i,t}^{PL} \quad (15)$$

$$P_{i,t}^{PL, out} \leq \min \{ \Gamma_i^{PL} \cdot n_{i,t}^{PL}; soc_{i,t}^{PL} \cdot \phi_i^{PL} \} \quad (16)$$

$$P_{i,t}^{PL, out} + r_{i,t}^{PL, out} \leq \min \{ \Gamma_i^{PL} \cdot n_{i,t}^{PL}; soc_{i,t}^{PL} \cdot K_i^{PL} \} \quad (17)$$

۲.۲.۲. تابع هدف و قیود مسئله جایابی پارکینگها

سود کل پارکینگها از تفاضل درآمد و هزینه کل آنها حاصل می شود و بر اساس تابع هدف زیر نمایش داده می شود:

$$Maximize \ profit^{PL} = N_d \cdot \sum_i \sum_t (Revenue_{i,t}^{PL}) - cost^{PL} \quad (18)$$

$$Revenue_{i,t}^{PL} = Revenue_{i,t}^{EMI} + Revenue_{i,t}^{RMI} + Revenue_{i,t}^{POI} \quad (19)$$

$$cost^{PL} = \sum_i c_i^{ins} + \sum_t c_t^{loss} \quad (20)$$

$$Revenue_i^{EMI} = (P_{i,t}^{PL, out} - P_{i,t}^{PL, in}) \cdot \pi_i^E \quad (21)$$

در شکل (۲-ب)، سطح شارژ (SOC) کل خودروهای ورودی به ناحیه مورد نظر، برابر با مجموع SOC خودروهای ورودی از دیگر ناحیه هاست. همچنین تبادل توان میان پارکینگهای ناحیه و شبکه، باعث تغییر سطح شارژ خودروهای موجود در پارکینگ می شود. SOC خودروها هنگام ترک یک ناحیه به عنوان SOC ورودی ناحیه دیگر محسوب می شود. در ادامه، مدل ریاضی برای تحلیل رفتار پارکینگها ارائه می شود.

مطابق رابطه (۱)، مدت زمان متوسط سفر از ناحیه i به j با توجه به سرعت خودروها و طول مسیر تعیین می شود. لذا خودرویی که از ناحیه i در زمان t حرکت می کند، مطابق رابطه (۲) با از دست دادن مقداری از انرژی باتری خود، پس از مدت زمان $\alpha_{i,j}$ به ناحیه j می رسد. روابط (۳) و (۴) نیز نشان می دهند که SOC خودروهای ورودی و خروجی ناحیه نمی تواند از ظرفیت کل باتری خودروها در آن ناحیه تجاوز کند.

$$\alpha_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{S_{i,j}} \quad (1)$$

$$soc_{i,j,t}^{in, zone} = soc_{i,j,t}^{out, zone} - N_{i,j,t}^{out, zone} \cdot L_{i,j} \cdot P_{i,j}^{Fuel} \quad (2)$$

$$soc_{i,j,t}^{in, zone} \leq C_{i,j,t}^{in, zone} \quad (3)$$

$$soc_{i,j,t}^{out, zone} \leq C_{i,j,t}^{out, zone} \quad (4)$$

تعریف پارامترهای روابط فوق و سایر روابط مقاله، در بخش فهرست علائم و اختصارات در انتهای مقاله آمده است. مطابق رابطه (۵)، تعداد کل خودروهایی که به پارکینگهای هر ناحیه می رسند، مساوی تعداد خودروهایی است که از نواحی دیگر و ناحیه خارجی وارد آن ناحیه می شوند. رابطه (۶) این مسئله را برای خودروهای خروجی از پارکینگها بیان می کند. تعداد خودروهای موجود در پارکینگ از رابطه (۷) و SOC خودروهای ورودی به پارکینگ در هر زمان توسط رابطه (۸) محاسبه می شود. رابطه (۹) نیز نشان می دهد که مجموع تعداد خودروهای پارک شده در شینهای هر ناحیه برابر کل خودروهای آن ناحیه است:

$$n_{i,t}^{ar, PL} = N_{i,t}^{in, EX} + \sum_j N_{j,i,t}^{in, zone} \quad (5)$$

$$n_{i,t}^{dep, PL} = N_{i,t}^{out, EX} + \sum_j N_{i,j,t}^{out, zone} \quad (6)$$

$$n_{i,t}^{PL} = N_{i,t}^{PL} \Big|_{t=1} + n_{i,t-1}^{PL} \Big|_{t>1} + n_{i,t}^{ar, PL} - n_{i,t}^{dep, PL} \quad (7)$$

$$soc_{i,t}^{ar, PL} = SOC_{i,t}^{in, Ex} + \sum_j soc_{j,i,t}^{in, zone} \quad (8)$$

$$\sum_b \sum_k u_{b,k,t}^{PL} = n_{i,t}^{PL} \quad (9)$$

مطابق رابطه (۱۰)، سطح شارژ پارکینگ در هر ساعت به SOC

سالیانه از ضریب برگشت سرمایه (CRF[†]) استفاده می‌شود [۲۷]:

$$CRF = \frac{d}{(1 - (1 + d)^{-n})} \quad (28)$$

که n تعداد سال‌های برگشت سرمایه و d نرخ کاهش سالیانه سرمایه است.

در این مقاله فرض شده است اگر در اثر حضور پارکینگ‌ها تلفات شبکه نسبت به حالت اولیه آن تغییر کند، پرداخت هزینه متناظر با این تفاوت تلفات بر عهده مالکان پارکینگ است. بنابراین اگر باعث افزایش تلفات شبکه شوند، سود آن‌ها کم می‌گردد. برای محاسبه تلفات انرژی از رابطه (۲۶) استفاده می‌شود. هزینه افزایش تلفات سیستم در اثر حضور پارکینگ‌ها برابر تلفات با وجود خودروهای الکتریکی منهای تلفات سیستم بدون وجود خودروها ضرب در قیمت انرژی در بازه زمانی مورد نظر است که در رابطه (۲۷) نشان داده شده است. در حقیقت با توجه به تفاوت بودن قیمت انرژی در زمان‌های مختلف، این مسئله در تلفات سیستم منظور شده است. برای محاسبه تابع تلفات انرژی، معادلات پخش بار AC خطی شده بر روی شبکه توزیع شعاعی حل می‌شود. به منظور انتخاب یک مکان برای نصب پارکینگ از رابطه (۲۹) استفاده می‌شود.

$$s_i^{PLA} \leq Can_b^{PLA} \quad (29)$$

تعداد پارکینگ نصب‌شده در هر شین با یک مقدار حداقل و حداکثر می‌تواند محدود شود که رابطه (۳۰) نشان‌دهنده این مطلب است.

$$s_i^{PLA} \cdot ns_b^{PLA, \min} \leq ns_b^{PLA} \leq s_i^{PLA} \cdot ns_b^{PLA, \max} \quad (30)$$

مطابق رابطه (۳۱) در هر زمان، مجموع متغیر باینری $u_{b,k,t}^{PL}$ که نشان‌دهنده اشغال شدن جایگاه k ام در پارکینگ شارژ موجود در هر شین در زمان t است، نمی‌تواند از تعداد جایگاه‌های نصب‌شده در آن شین بیشتر باشد. مطابق رابطه (۳۲)، تعداد کل ایستگاه‌های توزیع شده بر روی شین‌های هر ناحیه باید مساوی تعداد کل ایستگاه‌های نصب‌شده در ناحیه مورد نظر باشد.

$$\sum_{k \in (i \neq 1)} u_{b,k,t}^{PL} \leq ns_b^{PLA} \quad (31)$$

$$\sum_b ns_{b,i}^{PLA} = NS_i^{PL} \quad (32)$$

با رابطه (۳۳) نیز می‌توان تعداد پارکینگ‌های نصب‌شده در هر ناحیه را به یک مقدار حداقل و حداکثر محدود کرد.

$$\min_i^{PL} \leq \sum_b s_{b,i}^{PLA} \leq \max_i^{PL} \quad (33)$$

$$Revenue_{i,t}^{RMI} = re_{i,t}^{PL, out} \cdot \pi_i^R + re_{i,t}^{PL} \cdot \rho_{i,t}^{del} \cdot \pi_i^E \quad (22)$$

$$- re_{i,t}^{PL} \cdot \rho_{i,t}^{del} \cdot FOR_i^{PL} \cdot \pi_i^{con} - re_{i,t}^{PL} \cdot \rho_{i,t}^{del} \cdot \pi_i^{V2G} \quad (23)$$

$$Revenue_{i,t}^{POI} = n_{i,t}^{PL} \cdot \pi_i^{Tariff} - (P_{i,t}^{PL, out} + re_{i,t}^{PL} \cdot \rho_{i,t}^{del}) Cd \quad (23)$$

$$+ P_{i,t}^{PL, in} \cdot \pi_i^{V2G} - P_{i,t}^{PL, out} \cdot \pi_i^{V2G} \quad (23)$$

$$c_i^{ins} = \sum_{b|b \in zone(i)} (s_b^{PLA} \cdot c^{fix} \cdot CRF) + c_i^{var} \quad (24)$$

$$c_i^{var} = \sum_{b|b \in zone(i)} (A \cdot c^{lmd} \cdot CRF + c^{eq} \cdot CRF + c^M) \cdot ns_b^{PLA} \quad (25)$$

$$loss_t = \sum_i R_{b,b'} (i_{b,b'})^2 \quad (26)$$

$$c_t^{loss} = N_d \cdot \sum_i (loss_t - loss_{0,t}) \cdot \pi_i^E \quad (27)$$

که $Revenue_i^{EMI}$ ، درآمد حاصل از تبادل انرژی پارکینگ‌ها با شبکه را نشان می‌دهد. $Revenue_i^{RMI}$ درآمد حاصل از فروش رزرو و فراخوانی آن در زمان پیشامدهای احتمالی را نشان می‌دهد. در این قسمت، جریمه‌ای بابت ناموفق بودن پارکینگ در تحویل رزرو تعهدشده منظور می‌گردد. FOR_i^{PL} نرخ خروج اجباری است که نشان‌دهنده احتمال ناتوانی پارکینگ برای ارسال توان به شبکه بالادست می‌باشد. $Revenue_i^{POI}$ درآمد ناشی از فروش انرژی به مالکان خودروهای برقی و هزینه شامل خرید انرژی از مالکان خودروهای الکتریکی، تعرفه استفاده از پارکینگ و هزینه استهلاک باتری است که بر اساس توان گرفته‌شده از باتری‌ها و فروخته‌شده به بازارهای انرژی و رزرو محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه یک منحنی متوسط به‌عنوان میانگین پارامترهای ورودی مسئله در ۲۴ ساعت (شامل قیمت‌های ساعتی برق و مقدار بار و تعداد خودروها) برای همه روزها فرض شده است، درآمد روزانه که از رابطه (۱۸) به دست می‌آید، در تعداد روزهای سال (Nd) ضرب می‌شود تا درآمد کل در طول یک سال را نشان دهد. البته این فرض را می‌توان با در نظر گرفتن چند دوره زمانی در طول یک سال تعمیم داد.

هزینه‌های سیستم که در این مطالعه منظور شده، شامل هزینه نصب و هزینه تلفات سیستم^۱ می‌باشد. c_i^{ins} شامل هزینه‌های ثابت و متغیر^۲ برای نصب پارکینگ شارژ در ناحیه i می‌باشد. هزینه ثابت شامل هزینه‌های اخذ مجوز ساخت و هزینه‌های شهرداری برای نصب پارکینگ است. هزینه متغیر شامل هزینه خرید زمین مورد نیاز برای نصب پارکینگ، هزینه‌های تعمیر و نگهداری^۳ و هزینه خرید تجهیزات شارژ است که همه آن‌ها، وابسته به تعداد نقاط شارژ در هر پارکینگ هستند. برای تبدیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری به هزینه

1. Loss Cost
2. Fixed and Variable Cost
3. Maintenance Costs

4. Capital Recovery Factor

۳.۲.۲. قیود پخش بار

برای در نظر گرفتن تأثیر مکان احداث پارکینگ‌ها بر پخش بار شبکه توزیع باید تأثیر پارکینگ‌ها بر بار الکتریکی نقاط مختلف شبکه مشخص شود. سهم مورد انتظار هر جایگاه شارژ از توان ورودی به ناحیه و یا خروجی از آن، مطابق روابط (۳۴) تا (۳۷) محاسبه می‌شود. طبق رابطه (۳۸) چون ناحیه اول دارای شارژ خانگی است و خاصیت V2G برای آن فرض نشده، توان خروجی به سمت شبکه صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{i,t}^{PL,in} = \sum_{b|b \in zone(i)} P_{b,t}^{PLA,in} \quad (34)$$

$$P_{i,t}^{PL,out} = \sum_{b|b \in zone(i)} P_{b,t}^{PLA,out} \quad (35)$$

$$P_{b,t}^{PLA,in} \leq \Gamma_i^{PL} \cdot \sum_k U_{b,k,t}^{PL} \quad (36)$$

$$P_{b,t}^{PLA,out} \leq \Gamma_i^{PL} \cdot \sum_k U_{b,k,t}^{PL} \quad (37)$$

$$P_{i,t}^{PL,out} \Big|_{i=1} = 0 \quad (38)$$

معادله تعادل توان اکتیو و راکتیو^۱ در شین b در رابطه (۳۹) و (۴۰) نشان داده شده است. معادله پخش توان نشان داده شده در رابطه (۴۱) غیرخطی است اما توسط روش گفته شده در مرجع [۱۳] قابل خطی سازی است.

$$P_{b,t}^{Sys,in} \Big|_{b=1} + P_{b,t}^{PLA,out} - P_{b,t}^{PLA,in} - \sum_l (P_{b,b',t}^{line} + R_{b,b'} \cdot (i_{b,b',t})^2) = P_{b,t}^D \quad (39)$$

$$Q_{b,t}^{Sys,in} - \sum_l (q_{b,b',t}^{line} + X_{b,b'} \cdot (i_{b,b',t})^2) = Q_{b,t}^D \quad (40)$$

$$V_{b,t}^2 - 2(R_{b,b'} \cdot P_{b,b',t}^{line} + X_{b,b'} \cdot q_{b,b',t}^{line}) - Z_{b,b'}^2 \cdot i_{b,b',t}^2 = V_{b',t}^2 \quad (41)$$

$$(i_{b,b',t})^2 = \frac{(P_{b,b',t}^{line})^2 + (q_{b,b',t}^{line})^2}{(V_{b',t})^2} \quad (42)$$

$$V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \quad (43)$$

$$I_L^{\min} \leq i_{i,t} \leq I_L^{\max} \quad (44)$$

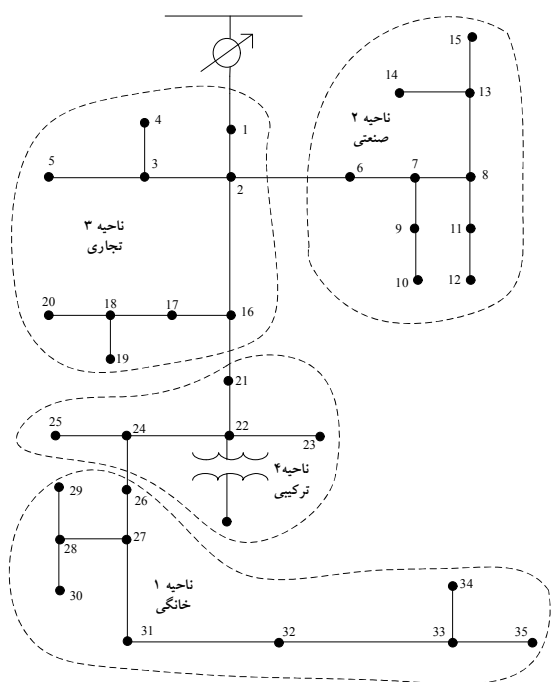
۳. نتایج عددی

مدل پیشنهادی برای جایابی پارکینگ‌های خودروهای برقی در شبکه شعاعی ۳۷ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است [۲۸]. بار پیک این شبکه ۲/۵ MW بوده و آرایش آن و محدوده نواحی چهارگانه در شکل (۳) نشان داده شده است. فرض شده که در همه پارکینگ‌ها، فقط از یک نوع شارژر با نرخ شارژ ۱۱kW استفاده می‌شود. برای ناحیه ۱ که ناحیه خانگی بوده و فاقد پارکینگ‌های شارژ است، خودروها از شارژر خانگی با نرخ ۳kW استفاده می‌کنند [۲۹ و ۳۰].

منحنی قیمت‌های ساعتی انرژی و زرو [۱۳] و بار روزانه [۲۹] در شکل (۴) نشان داده شده است. در این مقاله، قیمت V2G و G2V^۲ به میزان ۰/۰۲ \$/kWh کمتر از قیمت انرژی شبکه و قیمت π_t^{con} مقدار ۲۰٪ بیشتر از قیمت انرژی شبکه در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱): اطلاعات پارکینگ‌های شارژ

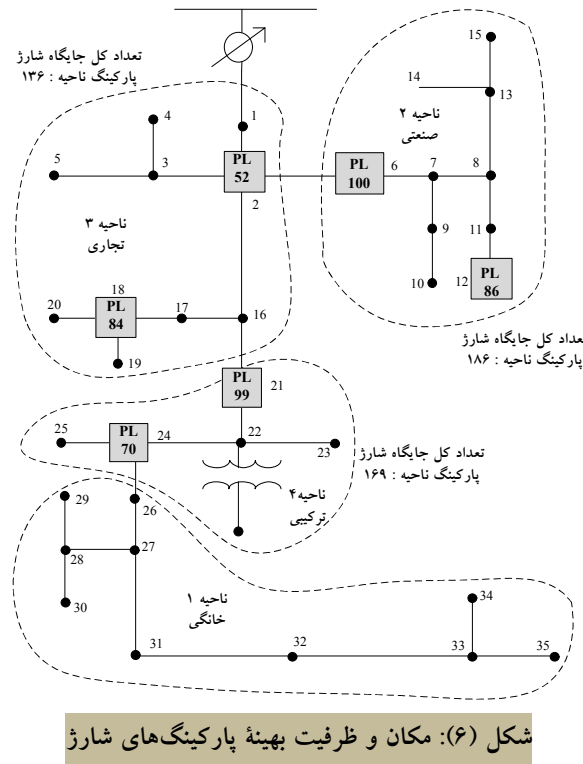
| پارامتر | مقدار | مرجع |
|-------------------------------------|------------------------------------|------|
| η_d و η_c | ۰/۹، ۰/۹ | [۳۲] |
| FOR | ۰/۰۲ | [۳۲] |
| $soc_i^{EV,min}$, $soc_i^{EV,max}$ | ٪۹۰، ٪۱۵ | [۳۲] |
| ϕ_i^{PL} | ۰/۳ | [۳۲] |
| K_i^{PL} | ۰/۷ | [۳۲] |
| C_d | ۰/۰۷۵ (دلار بر کیلووات ساعت) | [۲۷] |
| A | ۲۵ (متر مربع) | [۲۶] |
| c^{land} | ۴۰۷ (دلار بر متر مربع) | [۳۴] |
| c^{fix} | ۱۸۰۰۰ (دلار) | [۳۳] |
| c^M | ۳۰ (دلار به‌ازای هر جایگاه شارژ) | [۳۳] |
| c^{eq} | ۲۰۰۰ (دلار به‌ازای هر جایگاه شارژ) | [۳۳] |
| $P_{i,j}^{Fuel}$ | ۰/۲ (کیلووات ساعت بر کیلومتر) | [۳۵] |
| d | ٪۱۰ | [۲۷] |
| n | ۵ (سال) | [۲۷] |



شکل (۳): شبکه شعاعی ۳۷ شینه IEEE

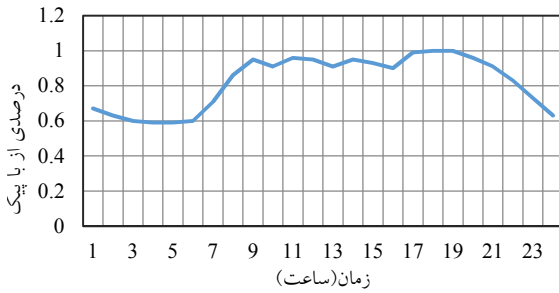
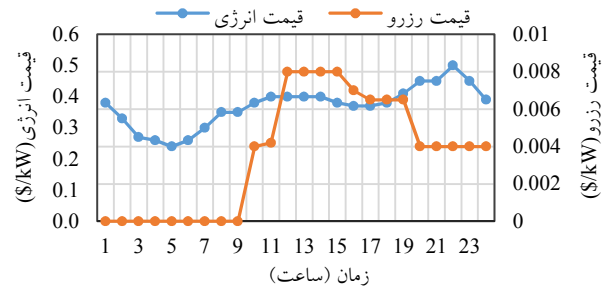
ترک می‌کنند و در انتهای روز به خانه برمی‌گردند. همچنین فرض می‌شود که کارخانه‌ها در محیط‌های صنعتی برای سه شیفت کار می‌کنند. در ناحیه تجاری به دلیل جابه‌جایی‌های بالا، ساعات ورود و خروج خودروها نسبت به انواع دیگر مسافرت‌ها گسترش بیشتری دارد.

نتایج مربوط به مکان احداث پارکینگ‌های شارژ و تبادلات انرژی خودروها در شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است. با حل مسئله، تعداد نقاط شارژ هر ناحیه با توجه به خودروهای داخل پارکینگ، برای ناحیه ۲، تعداد ۱۸۶ جایگاه، ناحیه ۳، ۱۳۶ جایگاه و برای ناحیه ۴، تعداد ۱۶۹ جایگاه به دست می‌آید. در ناحیه ۲، به دلیل جابه‌جایی کم و مدت‌زمان ماندن طولانی‌تر به دلیل انجام کار شیفتی، تعداد نقاط شارژ پارکینگ نسبت به نواحی ۳ و ۴ بیشتر است. با حل مدل پیشنهادی، مکان و ظرفیت بهینه پارکینگ‌ها مطابق شکل (۶) به دست آمده است.



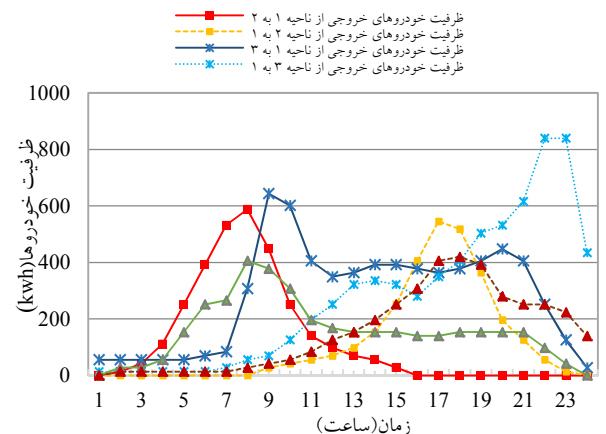
نتایج تبادلات انرژی خودروها در هر ناحیه در شکل (۷) نشان داده شده است. خودروها در ساعات اولیه روز هنگامی که قیمت انرژی پایین است شارژ می‌شوند، درحالی‌که بیشتر در ساعات انتهایی روز که قیمت انرژی بالاتر است، انرژی به شبکه تزریق می‌شود.

تبادلات رزرو کل پارکینگ‌ها در هر ناحیه در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در ناحیه ۳ که خودروها



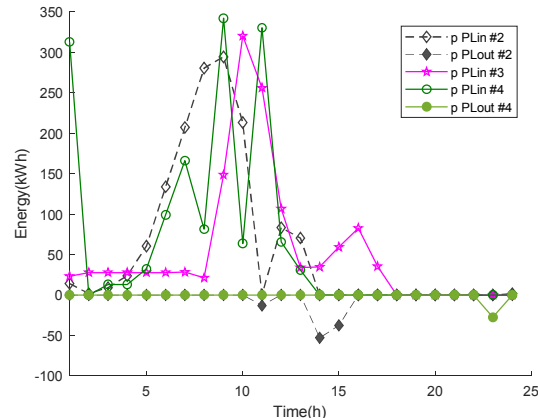
شکل (۴): قیمت انرژی و تغییرات بار

مقادیر سایر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) آمده است. مدل مورد نظر به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) بوده و با حل‌کننده CPLEX12 در محیط نرم‌افزار GAMS حل شده است. الگوی ورود و خروج خودروها با استفاده از اطلاعات مرجع [۲۵] با فواصل زمانی یک‌ساعته مدل می‌شود. حرکت خودروها بین نواحی مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است.

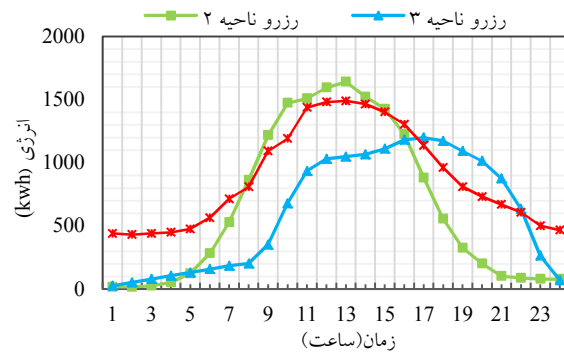


مطابق شکل خودروها ناحیه خانگی را در ساعات اولیه روز

مدت طولانی تری در پارکینگ‌ها توقف می‌کنند، تأمین رزرو با الگوی یکنواخت‌تری صورت می‌گیرد.

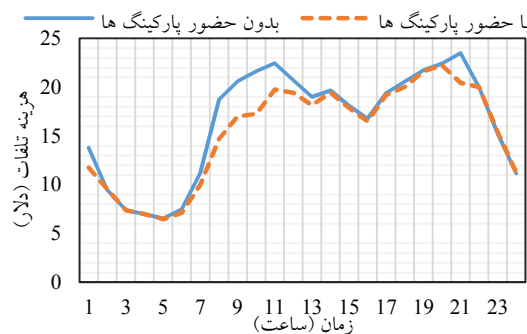


شکل (۷): تبادلات انرژی مربوط به نواحی ۲، ۳ و ۴



شکل (۸): تبادلات رزرو مربوط به ناحیه ۲، ۳ و ۴

هزینه تلفات انرژی سیستم نیز در شکل (۹) نشان داده شده است. به دلیل آنکه هزینه تلفات، جزئی از تابع هدف بوده و کاهش آن باعث افزایش سود مالکان پارکینگ‌ها می‌شود، مکان‌یابی مناسب پارکینگ‌های شارژ در سیستم، تلفات را در بعضی زمان‌ها تا میزان حداکثر ۴/۳۸٪ کاهش می‌دهد.



شکل (۹): تلفات انرژی سیستم

جدول (۲) اطلاعات مربوط به مؤلفه‌های مختلف سود و هزینه در تابع هدف را نشان می‌دهد. منفی بودن درآمد ناشی از تبادلات بازار انرژی نشان می‌دهد که با توجه به قیمت انرژی شبکه و

هزینه‌های در نظر گرفته شده، مالکان پارکینگ برای افزایش درآمد در بیشتر ساعات‌ها اقدام به خرید انرژی از شبکه و فروش آن به خودروهای موجود در پارکینگ می‌کنند. ملاحظه می‌شود بیشترین سود از طریق شرکت در بازار رزرو به دست می‌آید. در ضمن مشاهده می‌شود با توجه به تعداد خودروهای موجود در هر ساعت، مالکان پارکینگ‌ها درآمد قابل توجهی را از تعرفه پارک خودروها به دست می‌آورند.

جدول (۲): مؤلفه‌های سود و هزینه در تابع هدف (هزار دلار)

| ناحیه | ۲ | ۳ | ۴ |
|---|---------|---------|---------|
| درآمد ناشی از تبادلات انرژی با شبکه بالادست | -۱۵۳/۴۲ | -۱۶۷/۹۷ | -۱۹۷/۰۳ |
| درآمد ناشی از تبادلات بازار رزرو | ۲۴۰/۶ | ۲۳۲/۴۸ | ۳۱۹/۲۵ |
| درآمد ناشی از تبادلات پارکینگ و خودروها | ۱۲۳/۳۹ | ۱۳۸/۶۹ | ۱۵۸/۳۷ |
| درآمد ناشی از تعرفه پارکینگ | ۱۳۳/۲۲ | ۱۲۱/۷۶ | ۱۷۶/۰۷ |
| هزینه استهلاک باتری خودروها | ۷/۷۳ | ۴/۹۲ | ۶/۵۲ |
| هزینه کل نصب (ثابت و متغیر) | ۵۶۳/۴ | ۳۷۰/۳ | ۵۲۷/۳ |
| هزینه کل | ۱۴۶۱ | | |
| درآمد کل | ۴۹۸۰ | | |
| سود پارکینگ | ۳۵۲۰ | | |

۴. ارزیابی تأثیر حضور پارکینگ‌های شارژ بر شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع

یکی از مسائلی که می‌تواند در بحث جایابی پارکینگ‌های شارژ اهمیت داشته باشد، موضوع پایداری ولتاژ شبکه توزیع است که نباید در معرض تهدید قرار گیرد. لذا برای اطمینان از اینکه پایداری ولتاژ شبکه در حضور پارکینگ‌ها تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، در این قسمت از مقاله، شاخص پایداری ولتاژ شبکه قبل و بعد از حضور پارکینگ‌ها محاسبه و در شکل (۱۰) آمده است. شاخص پایداری ولتاژ برای هر شین از رابطه زیر تعیین می‌شود [۳۶]:

$$SI_i^b = |V_{b,i}^b|^4 - 4 \cdot [(p_i^b + p_{b,i}^{PLA, in} - p_{b,i}^{PLA, out}) \cdot R_{b,i} + q_i^b \cdot X_{b,i}] \cdot |V_{b,i}^b|^2 - 4 \cdot [(p_i^b + p_{b,i}^{PLA, in} - p_{b,i}^{PLA, out}) \cdot R_{b,i} + q_i^b \cdot X_{b,i}]^2 \quad (45)$$

با توجه به تفاوت شاخص پایداری ولتاژ هر شین در ساعات‌های مختلف، در شکل (۱۰) کمترین مقدار شاخص پایداری ولتاژ هر شین در میان همه ساعات‌ها آورده شده است. باید توجه کرد که در این مقاله، بهبود شاخص پایداری ولتاژ به‌عنوان تابع هدف و یا قید در نظر گرفته نشده بود. با این حال، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که شاخص پایداری ولتاژ در حضور پارکینگ‌ها افت چندانی نداشته و در نتیجه ولتاژ شبکه در شرایط تهدید قرار نگرفته است. نکته جالب آن است که به دلیل تبادل توان پارکینگ‌ها با شبکه و تغییر بار ساعتی شین‌ها، دوره زمانی که در آن

ظرفیت باتری خودروها در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t $C_{i,j}^{PL}$

هزینه‌های خرید و نگهداشت هر جایگاه شارژ (دلار) C^{eq} و C^M

احتمال عدم موفقیت پارکینگ‌های ناحیه i در تحویل رزرو فراخوانی شده FOR_i^{PL}

مسافت طی شده توسط خودروها برای رسیدن از ناحیه i به ناحیه j (km) $L_{i,j}$

مصرف انرژی خودرو در مسافت از ناحیه i به ناحیه j (kWh/km) $P_{i,j}^{Fuel}$

سرعت مسافت خودروها در حرکت از ناحیه i به ناحیه j (km/h) $S_{i,j}$

راندمان شارژ و دشارژ در جایگاه شارژ (%) η_c و η_d

حداقل SOC مورد نیاز خودرو هنگام خروج از ناحیه i (kWh) ϕ_i^{PL}

نرخ شارژ و دشارژ جایگاه‌های شارژ در ناحیه i (kW) Γ_i^{PL}

SOC قابل استفاده در پارکینگ طبق قرارداد با خودروها (%) K_i^{PL}

تعداد خودروهای واردشده از ناحیه خارجی به ناحیه i $N_{i,t}^{in,EX}$

تعداد خودروهای خروجی از ناحیه i به ناحیه خارجی $N_{i,t}^{out,EX}$

تعداد خودروهای واردشده به ناحیه i از ناحیه j در زمان t $N_{j,i,t}^{in,zone}$

تعداد خودروهای خروجی از ناحیه i به سمت ناحیه j $N_{i,j,t}^{out,zone}$

مقاومت، راکتانس و امپدانس خط بین شین‌ها (پریونیت) $R_{b,b'}, X_{b,b'}, Z_{b,b'}$

حداقل SOC قابل قبول خودروهای موجود در ناحیه i $SOC_i^{EV,min}$

حداکثر SOC قابل قبول خودروهای موجود در ناحیه i $SOC_i^{EV,max}$

قیمت انرژی و رزرو در بازار برق در ساعت t (\$/kWh) π_t^E, π_t^R

قیمت انرژی در زمان پیشامد احتمالی در ساعت t (\$/kWh) π_t^{con}

تعرفه استفاده از پارکینگ (دلار بر ساعت) π^{Tariff}

قیمت خرید و فروش انرژی از خودروها (\$/kWh) π_t^{V2G}, π_t^{G2V}

احتمال فراخوانی رزرو خریداری شده از ناحیه i در ساعت t $P_{i,t}^{Ad}$

حداکثر و حداقل ولتاژ مجاز شین b (پریونیت) v_b^{max}, v_b^{min}

حداکثر و حداقل جریان مجاز خط L (پریونیت) I_L^{min}, I_L^{max}

ظرفیت باتری خودروهای واردشده به ناحیه j از ناحیه i در زمان t (kWh) $C_{i,j,t}^{in,zone}$

ظرفیت باتری خودروهای خارج شده از ناحیه i به سمت ناحیه j در زمان t (kWh) $C_{i,j,t}^{out,zone}$

پارامتر باینری که یک بودن آن نشان می‌دهد شین b کاندیدای احداث پارکینگ است. Can_b^{PLA}

شاخص پایداری ولتاژ شین b در زمان t SI_t^b

متغیرها

هزینه‌های مربوط به پارکینگ ناحیه i در زمان t (دلار) $cost_{i,t}^{PL}$

هزینه نصب پارکینگ‌های ناحیه i (دلار) C_i^{ins}

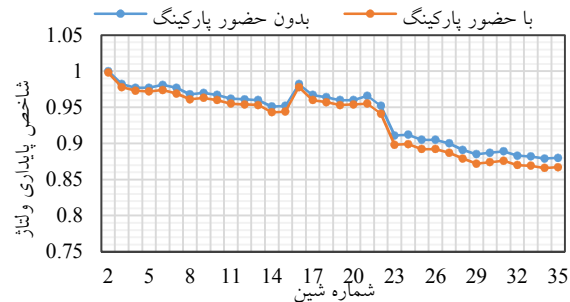
هزینه تلفات انرژی در شبکه توزیع در زمان t (دلار) C_t^{loss}

هزینه زمین برای نصب جایگاه شارژ (دلار بر متر مربع) C^{land}

هزینه ثابت مورد نیاز برای احداث پارکینگ (دلار) C^{fix}

هزینه متغیر مورد نیاز برای احداث پارکینگ در شین b (دلار) C_i^{var}

پایین‌ترین مقدار شاخص پایداری ولتاژ رخ می‌دهد، تغییر یافته است. زمانی که پارکینگ‌ها در شبکه حضور ندارند، شین ۳۴ دارای کمترین شاخص پایداری ولتاژ به میزان ۰/۸۷۹ در ساعت ۱۹ یعنی ساعت پیک بار سیستم است. این در حالی است که با حضور پارکینگ‌های شارژ، کمترین شاخص پایداری ولتاژ در همین شین و به میزان ۰/۸۶۶ اما در ساعت ۹ رخ می‌دهد.



شکل (۱۰): شاخص پایداری ولتاژ

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدلی برای مکان‌یابی بهینه پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی در سیستم با در نظر گرفتن رفتار ترافیکی خودروهای الکتریکی بین نواحی مختلف پیشنهاد شد. نتایج تبدلات انرژی خودروها در هر ناحیه نشان می‌دهد خودروها بیشتر در ساعات اولیه روز هنگامی که قیمت انرژی پایین است شارژ می‌شوند. همچنین مالکان پارکینگ‌ها بیشترین سود خود را با شرکت در بازار رزرو به دست می‌آورند. در ضمن، با توجه به طولانی‌تر بودن زمان توقف خودروها در پارکینگ‌های ناحیه صنعتی، تبدلات رزرو الگوی یکنواخت‌تری دارد. این مطالعه، دید بهتری برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری نصب پارکینگ‌های شارژ بر اساس الگوی ترافیکی خودروهای نواحی را در اختیار قرار می‌دهد. لذا تصمیم‌گیری بر اساس این مدل می‌تواند برای ارزیابی اقتصادی نصب پارکینگ‌های شارژ با در نظر گرفتن اثرات خودروها روی شبکه به کار رود.

فهرست علائم و اختصارات

| شاخص‌ها | توضیح |
|-----------|--|
| t | شاخص زمان |
| i,j | شاخص ناحیه‌ها |
| b | شاخص شین‌های شبکه توزیع |
| l | شاخص خطوط شبکه |
| k | شاخص جایگاه‌های شارژ |
| پارامترها | |
| A | فضای مورد نیاز برای نصب هر جایگاه شارژ (متر مربع) |
| C_d | هزینه استهلاک باتری خودروها به سبب عملکرد V2G (دلار) |

| | | | |
|---|--------------------------|---|----------------------------|
| زررو فراخوانی شده از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW) | $r_{i,t}^{PL,out}$ | تلفات شبکه توزیع در زمان t با حضور پارکینگ‌ها (kW) | $loss_t$ |
| سطح شارژ خودروهای موجود در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh) | $soc_{i,t}^{PL}$ | تلفات شبکه توزیع در زمان t بدون حضور پارکینگ‌ها (kW) | $loss_{0,t}$ |
| سطح شارژ خودروهای وارد شده به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh) | $soc_{i,t}^{ar,PL}$ | حداکثر و حداقل تعداد پارکینگ قابل نصب در ناحیه i | \min_i^{PL}, \max_i^{PL} |
| سطح شارژ خودروهای خارج شده از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kWh) | $soc_{i,t}^{dep,PL}$ | تعداد خودروهای ورودی به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t | $n_{i,t}^{ar,PL}$ |
| سطح شارژ خودروهای وارد شده از ناحیه خارجی به ناحیه i در زمان t (kWh) | $soc_{i,t}^{in,Ex}$ | تعداد خودروهای خروجی از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t | $n_{i,t}^{dep,PL}$ |
| سطح شارژ خودروهای خارج شده از ناحیه i به سمت ناحیه خارجی در زمان t (kWh) | $soc_{i,t}^{out,Ex}$ | تعداد خودروهای موجود در پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t | $n_{i,t}^{PL}$ |
| سطح شارژ خودروهای وارد شده از ناحیه j به ناحیه i در زمان t (kWh) | $soc_{i,j,t}^{in,zone}$ | تعداد جایگاه‌های شارژ در پارکینگ نصب شده در شین b | ns_b^{PLA} |
| سطح شارژ خودروهای خارج شده از ناحیه i به سمت ناحیه j در زمان t (kWh) | $soc_{i,j,t}^{out,zone}$ | حداقل تعداد جایگاه شارژ قابل نصب در پارکینگ شین b | $ns_b^{PLA,min}$ |
| متغیر باینری که یک بودن آن نشان می‌دهد شین b برای احداث پارکینگ انتخاب شده است. | si_b^{PLA} | حداکثر تعداد جایگاه شارژ قابل نصب در پارکینگ شین b | $ns_b^{PLA,max}$ |
| ولتاژ شین b و جریان تزریقی به شین b در زمان t (پرینیت) | $V_{b,t}, i_{b,t}$ | تعداد کل جایگاه‌های شارژ در پارکینگ‌های ناحیه i | NS_i^{PL} |
| | | توان حقیقی مورد تقاضا در شین b در ساعت t (kW) | $p_{b,t}^D$ |
| | | توان راکتیو مورد تقاضا در شین b در ساعت t (kVar) | $q_{b,t}^D$ |
| | | توان حقیقی ورودی از شبکه بالادست به سیستم در شین b | $p_{b,t}^{Sys,in}$ |
| | | توان راکتیو ورودی از شبکه بالادست به سیستم در شین b | $q_{b,t}^{Sys,in}$ |
| | | توان حقیقی عبوری از خط بین شین b و b' در زمان t (kW) | $p_{b,b',t}^{line}$ |
| | | توان راکتیو عبوری از خط بین شین b و b' در زمان t (kW) | $q_{b,b',t}^{line}$ |
| | | سود پارکینگ‌های شارژ (\$)) | $profit^{PL}$ |
| | | توان ورودی به پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW) | $P_{i,t}^{PL,in}$ |
| | | توان خروجی از پارکینگ‌های ناحیه i در زمان t (kW) | $P_{i,t}^{PL,out}$ |
| | | توان ورودی به پارکینگ موجود در شین b در زمان t (kW) | $P_{b,t}^{PLA,in}$ |
| | | توان خروجی از پارکینگ موجود در شین b در زمان t (kW) | $P_{b,t}^{PLA,out}$ |

مراجع

- [1] Amirioun, M. H. and Kazemi, A., "A New Model Based on Optimal Scheduling of Combined Energy Exchange Modes for Aggregation of Electric Vehicles in a Residential Complex", Energy, Vol. 69, pp. 186-198, May. 2014.
- [۲] اجتهد، سید حسین، خوبی آرانی، سعید، حلویایی نیاسر، ابوالفضل، حاجی‌زاده، امین، «مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با استفاده از کنترل کننده فازی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال ششم، شماره سوم، صفحه ۳۴-۴۵، پاییز ۱۳۹۵.
- [3] Razipour, R., Moghaddas-Tafreshi, S. M. and Farhadi, P., "Optimal Management of Electric Vehicles in an Intelligent Parking Lot in the Presence of Hydrogen Storage System", Energy Storage, Vol. 22, pp. 144-152, 2019.
- [4] Pirouzi, S., Aghaei, J., Niknam, T., Farahmand, H. and Korpås, M., "Exploring Prospective Benefits of Electric Vehicles for Optimal Energy Conditioning in Distribution Networks", Energy, Vol. 157, pp. 679-689, 2018.
- [۵] رضایی، پوریا، تلاوت، وحید، گلشن نواز، سجاد، حمیدی، امیر، «بررسی تأثیر کاهش محافظه‌کارانه ولتاژ بر برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور خودروهای الکتریکی»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال هشتم، شماره ۲، صفحه ۲۶-۳۷، تابستان ۱۳۹۷.
- [6] Ioakimidis, Ch. S., Dimitrios, T., Rycerski, P. and Konstantinos N. G., "Peak Shaving and Valley Filling of Power Consumption Profile in Non-Residential Buildings Using an Electric Vehicle Parking Lot", Energy, Vol. 148, pp. 148-158, 2018.
- [7] Honarmand, M., Zakariazadeh, A. and Jadid, Sh., "Optimal Scheduling of Electric Vehicles in an Intelligent Parking Lot Considering Vehicle-to-Grid Concept and Battery Condition", Energy, Vol. 65, pp. 572-579, 2014.
- [8] Faridimehr, S., Venkatachalam, S. and Chinnam, R. B., "A Stochastic Programming Approach for Electric Vehicle Charging Network Design", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 1870 - 1882, 2018.
- [۹] حسین‌زاده، پویا، گرگانی فیروزجاه، خلیل، شیخ الاسلامی، عبدالرضا، «برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی با هدف پیشینه‌سازی سود خودروها و اپراتور ایستگاه در شرایط عدم قطعیت»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال نهم، شماره ۳، صفحه ۲-۱۳، پاییز ۱۳۹۸.
- [10] Moradijooz, M., Ghazanfarimeymand, A., Moghaddam, M. P. and Haghifam, M. R., "Optimum Placement of Distributed Generation and Parking Lots for Loss Reduction in Distribution Networks", IEEE Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, pp. 1-5, 2012.

- [11] Mazidi, M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M. and Rastegar, M., "Optimal Allocation of PHEV Parking Lots to Minimize Distribution System Losses", IEEE Eindhoven PowerTech, pp. 1-6, 2015.
- [۱۲] شمس‌الدینی لری، سمیه، عبداللهی، امیر، هژبری، حسین، «جایابی احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال نهم، شماره ۳، صفحه ۲۶-۳۹، پاییز ۱۳۹۸.
- [13] Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Shafie-Khah, M., Contreras, J. and Catalão, J. P., "Allocation of Plug-in Vehicles' Parking Lots in Distribution Systems Considering Network-Constrained Objectives", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 5, pp. 2643-2656, 2014.
- [14] Sadati, S. M. B., Moshtagh, J., Shafie-khah, M., Rastgou, A. and Catalão, J. P., "Bi-level Model for Operational Scheduling of a Distribution Company that Supplies Electric Vehicle Parking Lots", IEEE Electric Power Systems Research, Vol. 174, pp. 105875, 2019.
- [15] El-Zonkoly, A. and Dos Santos Coelho, L., "Optimal Allocation, Sizing of PHEV Parking Lots in Distribution System", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 67, pp. 472-477, 2015.
- [16] Amini, M. H., Moghaddam, M. P. and Karabasoglu, O., "Simultaneous Allocation of Electric Vehicles' Parking Lots and Distributed Renewable Resources in Smart Power Distribution Networks", Sustainable Cities and Society, Vol. 28, pp. 332-342, 2017.
- [17] Rahmani-Andebili, M., Shen, H. and Fotuhi-Firuzabad, M., "Planning and Operation of Parking Lots Considering System, Traffic, and Drivers Behavioral Model", IEEE Transactions on Systems, Cybernetics: Systems, Vol. 49, No. 9, pp. 1879 - 1892, 2018.
- [18] Rahmani-Andebili, M. and Venayagamoorthy, G. K., "SmartPark Placement and Operation for Improving System Reliability and Market Participation", Electric Power Systems Research, Vol. 123, pp. 21-30, 2015.
- [19] Aghaebrahimi, M. R., Ghasemipour, M. M. and Sedghi, A., "Probabilistic Optimal Placement of EV Parking Considering Different Operation Strategies", 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 108-114, 2014.
- [20] Amini, M. H. and Islam, A., "Allocation of Electric Vehicles' Parking Lots in Distribution Network", In ISGT IEEE, pp. 1-5, 2014.
- [21] Kazemi, M. A., Sedighzadeh, M., Mirzaei, M. J. and Homaei, O., "Optimal Siting and Sizing of Distribution System Operator Owned EV Parking Lots", Applied Energy, Vol. 179, pp. 1176-1184, 2016.
- [22] Mirzaei, M. J., Kazemi, A. and Homaei, O., "A Probabilistic Approach to Determine Optimal Capacity and Location of Electric Vehicles Parking Lots in Distribution Networks", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 5, pp. 1963-1972, 2015.
- [23] Yao, W., Zhao, J., Wen, F., Dong, Zh., Xue, Y., Xu, Y. and Meng, K., "A Multi-Objective Collaborative Planning Strategy for Integrated Power Distribution and Electric Vehicle Charging Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 4, pp. 1811-1821, 2014.
- [24] Wu, D. and Aliprantis, D. C., "Modeling Light-Duty Plug-in Electric Vehicles for National Energy and Transportation Planning", Energy Policy, Vol. 63, pp. 419-432, 2013.
- [25] Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Chicco, G. and Catalão, J. P., "Effects of Pev Traffic Flows on the Operation of Parking Lots and Charging Stations", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1521-1530, 2017.
- [26] Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A. and Kazemi-Karegar, H., "Optimal Fast Charging Station Placing and Sizing", Applied Energy, Vol. 125, pp. 289-299, 2014.
- [27] Kempton, W. and Tomić, J., "Vehicle-to-Grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue", Journal of power sources, Vol. 144, No. 1, pp. 268-279, 2005.
- [28] Kersting, W. H., "Radial Distribution Test Feeders", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 975-985, 1991.
- [29] Briones, A., Francfort, J., Heitmann, P., Schey, M., Schey, S. and Smart, J., *Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow Regulations and Building Codes Review by the AVTA*, Idaho National Lab., Idaho Falls, ID, USA, 2012.
- [30] Yunus, K. J., *Plug-in Electric Vehicle Charging Impacts on Power Systems*, Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2010.
- [31] Wang, M. Q. and Gooi, H. B., "Spinning Reserve Estimation in Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1164-1174, 2011.
- [32] Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Shafie-khah, M., Catalão, J. P. and Contreras, j., "PEV Parking Lot Behavior Equilibria in Energy and Reserve Markets", IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2015.
- [33] Cities, C., *Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging Station Hosts*, US Department of Energy Publication No. DOE/GO-102012-3275, 2012.
- [34] Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z. and Song, Y., "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.
- [35] Pasaoglu, G., Fiorello, D., Zani, L., Martino, A., Zubaryeva, A. and Thiel, C., *Projections for Electric Vehicle Load Profiles in Europe Based on Travel Survey Data*, Joint Research Centre of the European Commission: Petten, The Netherlands, 2013.
- [36] Moradi, M. H. and Abedini, M., "A Combination of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Optimal DG Location and Sizing in Distribution Systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 34, pp. 66-74, 2012.