

جایابی احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت

سمیه شمس‌الدینی لری^۱، امیر عبداللهی^{۲*}، حسین هژبری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

s.shamsaldini@chmail.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

a.abdollahi@uk.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

hhojabri@uk.ac.ir

چکیده: در این مقاله از پارکینگ خودروهای برقی با قابلیت تحویل توان به شبکه، به عنوان یکی از دستاوردهای شبکه قدرت هوشمند استفاده شده است. خودروهای برقی با توجه به شرایط بهره‌برداری می‌توانند به عنوان بار و یا منبع تولید توان محسوب شوند. به منظور بهره‌برداری بهینه از شبکه قدرت، جایابی این واحدهای نوین همانند دیگر تولیدات پراکنده در شبکه قدرت ضروری است. روش پیشنهاد شده در این مقاله برای جایابی پارکینگ خودروهای برقی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی است که هدف پیشینه نمودن سود به دست آمده از حضور پارکینگ‌هاست. کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان دو مؤلفه اصلی تشکیل‌دهنده تابع هدف مسئله جایابی مدنظر، در نظر گرفته شده‌اند. به دلیل عدم قطعیت پارکینگ خودروهای برقی در اتصال به شبکه، مدل‌سازی این واحدها به منظور تعیین مکان و اندازه بهینه آن‌ها در شبکه توزیع ضروری می‌نماید. از این رو در این مقاله با استفاده از زنجیره مارکوف توان تولیدی ناوگان خودروهای برقی مدل شده است. آنالیز مدل مارکوف بر اساس داده‌های سفر مسافران از جمله زمان شروع و پایان سفر آن‌هاست. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نصب پارکینگ خودروهای برقی به عواملی از جمله سطح نفوذ خودروهای برقی و قیمت انرژی الکتریکی بستگی دارد. چنانچه مشوق‌های کافی برای مالکان خودروهای برقی در نظر گرفته شود، مکان و اندازه بهینه پارکینگ خودروهای برقی سود قابل قبولی برای شرکت‌های توزیع به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پارکینگ خودروهای برقی، زنجیره مارکوف، بهینه‌سازی چندهدفه، قابلیت اطمینان، عدم قطعیت.

خودروهای برقی است. پیش از این، روش‌های مختلفی برای مدل کردن عدم قطعیت خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۲] یک مدل ریاضی برای عدم قطعیت $V2G$ بیان شده است که با تزریق توان راکتیو توسط پارکینگ خودروهای برقی در تمام فیدرهای شبکه و با در نظر گرفتن الگوهای بارگذاری مختلف، به بررسی اثر کاهش تلفات در شبکه پرداخته است و بدین ترتیب محل بهینه پارکینگ خودروهای برقی به دست آمده است. در مرجع [۱۳] یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برای جایابی مکان و اندازه پارکینگ خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. توان خودروهای برقی در مرجع [۱۳] یک مدل ساده شده است که در این مدل، خودروهای برقی در زمان‌هایی که قیمت برق پایین است، اقدام به شارژ باتری‌هایشان می‌کنند و در زمان‌هایی که قیمت برق زیاد است، به شبکه توزیع توان تحویل می‌دهند. همچنین مدل‌سازی عدم قطعیت خودروهای برقی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو [۱۴] و تابع چگالی احتمال [۱۵] انجام شده است.

در مقاله حاضر، جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی در سیستم‌های قدرت هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله برای تعیین اندازه و مکان بهینه پارکینگ خودروهای برقی یک تابع چندهدفه معرفی شده است که به منظور مدل کردن عدم قطعیت خودروهای برقی، از زنجیره مارکوف بهره‌گیری شده است. زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی یک سری زمانی نمونه احتمالی و یک فرایند که از یک حالت به حالت دیگر در طول زمان تغییر می‌کند کاربرد دارد. مدل‌سازی زنجیره مارکوف در این مقاله برای ساعات پرباری و کم‌باری منحنی بار انجام شده است. به بیان دیگر، مدل‌سازی ناوگان خودروهای برقی دارای چند حالت توان خروجی با در نظر گرفتن عدم قطعیت خودروهای برقی با استفاده از زنجیره مارکوف انجام شده است. در ادامه مقاله، تابع هدف جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی از دید شرکت توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. سود حاصل از کاهش تلفات و سود قابلیت اطمینان، دو مؤلفه اصلی تابع هدف مسئله پیشنهادی هستند. درآمد حاصل از تأمین پیک بار توسط پارکینگ خودروهای برقی، هزینه تأسیس پارکینگ، هزینه شارژ خودروهای موجود در پارکینگ خودروهای برقی به منظور تأمین پیک بار و هزینه شارژ خودروهای برقی به منظور راندگی هدف‌های دیگر تابع هدف جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی هستند. نتایج حاصل از این مدل برای ساعات پرباری و کم‌باری با استفاده از تابع چندهدفه به منظور جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی بر روی یک سیستم ۹ شینه استاندارد اجرا شده است. از الگوریتم ژنتیک (GA^3) به منظور حل مسئله جایابی بهینه پارکینگ

بهره‌برداران شبکه توزیع تلاش می‌کنند تا انرژی را با قابلیت اطمینان بالا و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی به مصرف‌کنندگان تحویل دهند. برای این منظور شرکت‌ها از تکنولوژی‌های متفاوتی مانند منابع تولید پراکنده (DG^1)، خازن‌گذاری و جبران‌کننده‌های توان راکتیو استفاده می‌کنند. منابع تولید پراکنده از نظر اقتصادی سود قابل توجهی برای شرکت‌های توزیع دارند [۱ و ۲]. این سود هنگامی بیشینه می‌شود که اندازه و مکان بهینه DG تعیین گردد. بنابراین جایابی بهینه DG یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در طراحی شبکه توزیع بایستی در نظر گرفته شود. شاخص قابلیت اطمینان و تلفات دو هدف اصلی در این راستا هستند که به منظور تعیین اندازه و مکان بهینه DG استفاده می‌شود [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر، کاهش سوخت‌های فسیلی موجب شده تا خودروهای برقی به عنوان منابع مؤثری در شبکه قدرت استفاده شوند [۵]. خودروهای برقی در طول یک روز، زمان قابل توجهی در حال پارک هستند که بنابراین از آن‌ها می‌توان به عنوان ذخیره‌کننده‌های انرژی در شبکه استفاده کرد. از خودروهای برقی به عنوان بارهای قابل کنترل نیز نام برده می‌شود. به عبارت دیگر، آن‌ها می‌توانند به عنوان یک باتری عمل کنند تا انرژی را در طول دوره زمانی کم‌باری ذخیره و در زمان‌های پرباری و زمان‌هایی که قیمت انرژی الکتریکی بالاست، انرژی ذخیره‌شده را به شبکه تحویل دهند. توان خروجی خودروهای برقی محدود است. از این رو، زمانی که به عنوان منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع توان استفاده می‌شوند، فرایند شارژ و دشارژ آن‌ها بایستی کنترل شود [۶-۸]. جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی، به عنوان یک نوع جدید از منابع تولید پراکنده ($V2G^2$)، باید مورد توجه قرار گیرد. نفوذ بالای دستگاه‌های ذخیره‌ساز و خودروهای برقی متصل شده به شبکه، به دلیل شارژ تصادفی و مدیریت‌نشده، اثرات مخربی مانند هزینه‌های بهره‌برداری اضافی و حتی به خطر افتادن قابلیت اطمینان شبکه قدرت به همراه دارد [۹]. به هر حال اگر شارژ و دشارژ خودروهای برقی مدیریت شود باعث بهبود بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از شبکه قدرت می‌گردد [۱۰]. بنابراین، جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی همانند DG ها می‌تواند موجب کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود پروفیل ولتاژ و سود اقتصادی پیوسته و فراوانی برای شرکت‌های توزیع شود. مطالعات گوناگونی درباره خودروهای برقی و نحوه اتصالشان به سیستم قدرت انجام گرفته است. در تعدادی از این مطالعات، اتصال خودروهای برقی وابسته به برنامه شارژ و تعرفه‌های انرژی الکتریکی هستند [۱۱]. یکی از نکات مهم، عدم قطعیت

خودروهای برقی استفاده شده است.

می شود:

$$P_{V2G}^{\alpha} = \frac{T_{V2G}^{\alpha}}{T_{V2G}^s} \quad \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، T_{V2G}^s کل زمان مشاهده است که از رابطه (۵) به دست می آید:

$$T_{V2G}^s = \sum_{\alpha=1}^{N_{V2G}^{step}} T_{V2G}^{\alpha} \quad (5)$$

فرکانس رخداد حالت α برای توان ناوگان خودروهای برقی از رابطه (۶) به دست می آید:

$$f_{V2G}^{\alpha} = P_{V2G}^{\alpha} (\lambda_{V2G}^{+\alpha} + \lambda_{V2G}^{-\alpha}) = p_{V2G}^{\alpha} \lambda_{V2G}^{\alpha} \quad \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (6)$$

به طور کلی، اگر بخواهیم N_{V2G}^{step} پله گسسته برای توان ناوگان خودروهای برقی با بیشینه توان C_{V2G}^{max} منظور شود، آنگاه طبق رابطه (۷) مقدار توان های واقعی به پله های محدود و گسسته تقسیم می شوند:

$$C_{V2G}^{\alpha} = (\alpha - 1) \frac{C_{V2G}^{max}}{N_{V2G}^{step} - 1} \quad \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (7)$$

بر اساس خوشه بندی کردن اطلاعات [۲۰]، هریک از توان های واقعی می توانند در پله های گسسته طبق رابطه (۸) دسته بندی شوند:

$$If \quad C_{V2G}^{\alpha} - \frac{1}{2} \frac{C_{V2G}^{max}}{N_{V2G}^{step} - 1} \leq C_{V2G}^{real} \leq C_{V2G}^{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{C_{V2G}^{max}}{N_{V2G}^{step} - 1} \quad (8)$$

$$then \quad C_{V2G}^{real} \rightarrow C_{V2G}^{\alpha}$$

زنجیره مارکوف برای N_{V2G}^{step} حالت گسسته توان ناوگان خودروهای برقی، در شکل (۱) نشان داده شده است. نرخ های انتقال نشان داده شده در شکل (۱)، در ماتریس λ_{V2G}^t آورده شده است. محاسبه این ماتریس با استفاده از رابطه (۱) و با فرض N_{V2G}^{step} حالت مارکوف برای ناوگان خودروهای برقی به دست آمده است.

$$\lambda_{V2G}^t = \begin{matrix} & \begin{matrix} state 1 & state 2 & \dots & state N_{V2G}^{step} \end{matrix} \\ \begin{matrix} state 1 \\ state 2 \\ \vdots \\ state N_{V2G}^{step} \end{matrix} & \begin{pmatrix} \lambda_{V2G}^{11} & \lambda_{V2G}^{12} & \dots & \lambda_{V2G}^{1N_{V2G}^{step}} \\ \lambda_{V2G}^{21} & \lambda_{V2G}^{22} & \dots & \lambda_{V2G}^{2N_{V2G}^{step}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \lambda_{V2G}^{N_{V2G}^{step}1} & \lambda_{V2G}^{N_{V2G}^{step}2} & \dots & \lambda_{V2G}^{N_{V2G}^{step}N_{V2G}^{step}} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

با استفاده از روابط (۱) تا (۶) می توان احتمال و فرکانس هر حالت و نیز نرخ خروج از هر حالت شکل (۱) را برای هر ساعت محاسبه کرد. بدین ترتیب جدول $COPT^t$ کامل برای توان ناوگان خودروهای برقی برای ساعت t ، $COPT_{V2G}^t$ نامیده می شود که در جدول (۱)

ادامه مباحث مطرح شده در مقاله بدین صورت طبقه بندی شده است: در بخش دوم، مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف تشریح شده است. بخش سوم به فرمول بندی مسئله جایابی پارکینگ خودروهای برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارکینگ خودروهای برقی اختصاص یافته و نتایج شبیه سازی در بخش چهارم آورده شده است. نتیجه گیری در بخش پنجم ارائه شده است.

۲. مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی با استفاده

از تئوری زنجیره مارکوف

الگوهای رانندگی ماهیت تصادفی دارند و از این رو توان تولیدی ناوگان خودروهای برقی دارای عدم قطعیت است. هر پدیده فیزیکی که به صورت تصادفی و پیوسته در زمان اتفاق می افتد می تواند از نظر ریاضیاتی به صورت یک متغیر تصادفی مدل شود. این پدیده یک فرایند تصادفی با یک پارامتر پیوسته (زمان) و یک فضای حالت پیوسته (مقادیر سری زمانی پدیده) نامیده می شود. در دنیای واقعی، چنین پدیده هایی به صورت فرایندهایی با یک فضای حالت گسسته و پارامترهای گسسته مدل می شوند. زنجیره مارکوف به منظور مدل سازی یک فرایند تصادفی گسسته، به صورت انتقال هایی میان حالات مختلف یک فرایند به کار می رود. این حالت ها، حالت های مارکوف نامیده می شوند و هریک از آن ها توصیف کننده یکی از وضعیت های فرایند است [۱۶ و ۱۷]. در صورتی که سری زمانی یک فرایند تصادفی، تابع شرایط زمانی نباشد و حجم داده ها به مقدار کافی موجود باشد (مثلاً چندین سال)، می توان از زنجیره مارکوف برای مدل سازی فرایند استفاده کرد [۱۸].

بر اساس مرجع [۱۹]، نرخ انتقال بین دو حالت توان ناوگان خودروهای برقی را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\lambda_{V2G}^{\alpha\beta} = \frac{N_{V2G}^{\alpha\beta}}{T_{V2G}^{\alpha}} \quad \forall \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (1)$$

نرخ انتقال ناوگان خودروهای برقی از حالت α به حالات بالاتر و پایین تر به ترتیب با $\lambda_{V2G}^{-\alpha}$ و $\lambda_{V2G}^{+\alpha}$ نمایش داده می شود که به صورت زیر قابل ارائه است:

$$\lambda_{V2G}^{+\alpha} = \sum_{\beta \geq \alpha}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{\alpha\beta} \quad \forall \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (2)$$

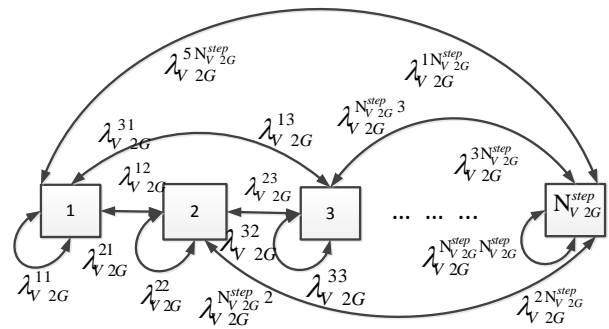
$$\lambda_{V2G}^{-\alpha} = \sum_{\beta \leq \alpha}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{\alpha\beta} \quad \forall \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}^{step}\} \quad (3)$$

احتمال حالت α توان ناوگان خودروهای برقی با رابطه (۴) بیان

نشان داده شده است.

خودروهای برقی دریافت نمی‌کند. همچنین هزینه استهلاک خودروهای برقی به مالکان خودروهای برقی پرداخت می‌شود. این فرضیات به‌عنوان تشویق‌هایی برای مالکان خودرو برقی در نظر گرفته می‌شود تا خودروهایشان را در ساعات پیک برق در پارکینگ خودروهای برقی پارک کنند.

• همه خودروهای برقی با نرخ بیشینه، شارژ و دشارژ می‌شوند.



۱.۳. تابع هدف و قیود مسئله

تابع هدف مسئله جایابی پارکینگ خودروهای برقی به‌صورت رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$Max \left\{ \begin{aligned} & \sum_{n=1}^{N_{V2G}} [w_1 \times R_{V2G}^n - (w_2 \times CF_{cap}^n + \\ & w_3 \times CF_{driving}^n + w_4 \times CF_{V2G}^n)] + \\ & \sum_{j=1}^J [w_5 \times DC_{loss}^{n,j} + w_6 \times DC_{NS}^{n,j}] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

مکان و ظرفیت پارکینگ خودروهای برقی به‌گونه‌ای باید تعیین شود که تابع هدف بیان‌شده در رابطه (۹) بیشینه گردد و همزمان قیود بهره‌برداری که در ادامه توضیح داده می‌شوند برقرار بمانند. در رابطه (۹) w_1, w_2, \dots, w_6 ضرایب وزنی تابع هدف هستند. در ادامه، مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده تابع هدف مسئله جایابی ارائه شده‌اند.

۱.۱.۳. درآمد و هزینه‌های ناوگان خودروهای برقی

درآمدی که از پارکینگ خودروهای برقی به دست می‌آید، وابسته است به توان تولیدی ناوگان خودروهای برقی، احتمال حضور ناوگان خودروهای برقی در آن ساعت در پارکینگ، مدت زمانی که توان به شبکه فرستاده می‌شود و نوع بازار برقی که توان ناوگان خودروهای برقی در آن فروخته می‌شود. بخشی از پیک بار می‌تواند به‌وسیله ناوگان خودروهای برقی تأمین شود که ارزان‌تر از خرید توان از بازارهای عمده‌فروشی است. بنابراین هزینه‌های صرفه‌جویی‌شده از تأمین بار به‌وسیله توان تولیدی پارکینگ خودروهای برقی به‌جای خرید از بازارهای عمده‌فروشی از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$R_{V2G}^n = \sum_{\alpha=1}^{N_{V2G}^{step}} \sum_{k=1}^{N_{V2G}^f} \sum_{t=1}^T [P_{tp}^t \times C_{park}^{n,\alpha,k,t} \times p^{n,\alpha,k,t} \times t_{disp}^n] \quad (10)$$

هزینه نصب پارکینگ خودروهای برقی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های خرید انرژی به‌منظور رانندگی و به‌منظور مشارکت در تأمین پیک بارند که به‌ترتیب توسط رابطه‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) توصیف می‌شوند.

شکل (۱): مدل مارکوف N_{V2G}^{step} حالت توان ناوگان خودروهای برقی

جدول (۱): $COPT_{V2G}^t$

α	C_{V2G}^α (MW)	P_{V2G}^α	$\lambda_{V2G}^{+\alpha}$ (occ/ hr)	$\lambda_{V2G}^{-\alpha}$ (occ/ hr)	f_{V2G}^α (occ/ hr)
۱	C_{V2G}^1	$\frac{T_{V2G}^1}{T_{V2G}^s}$	$\sum_{\beta \geq 1}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{1\beta}$	$\sum_{\beta \leq 1}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{1\beta}$	$P_{V2G}^1 \lambda_{V2G}^1$
۲	C_{V2G}^2	$\frac{T_{V2G}^2}{T_{V2G}^s}$	$\sum_{\beta \geq 2}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{2\beta}$	$\sum_{\beta \leq 2}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{2\beta}$	$P_{V2G}^2 \lambda_{V2G}^2$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
α	C_{V2G}^α	$\frac{T_{V2G}^\alpha}{T_{V2G}^s}$	$\sum_{\beta \geq \alpha}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{\alpha\beta}$	$\sum_{\beta \leq \alpha}^{N_{V2G}^{step}} \lambda_{V2G}^{\alpha\beta}$	$P_{V2G}^\alpha \lambda_{V2G}^\alpha$

۳. فرمول‌بندی مسئله جایابی پارکینگ خودروهای

برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

جایابی پارکینگ خودروهای برقی در این مقاله به‌صورت مسئله بهینه‌سازی است که هدف در آن بیشینه کردن سود به‌دست‌آمده از نصب پارکینگ خودروهای برقی از دید شرکت توزیع است. درآمد حاصل از به‌کارگیری خودروهای برقی به‌عنوان ذخیره‌ساز در شبکه توزیع، هزینه تأسیس پارکینگ، هزینه شارژ خودروهای موجود در پارکینگ، هزینه شارژ خودروها به‌منظور رانندگی، سود ناشی از کاهش تلفات و سود ناشی از افزایش قابلیت اطمینان مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده تابع هدف مسئله جایابی هستند. از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به‌منظور حل بهینه این تابع چندهدفه استفاده می‌شود. برای جایابی پارکینگ خودروهای برقی بعضی از فرضیات در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است:

- شرکت توزیع برق مسئول تأمین تقاضای مشترکین، نصب پارکینگ خودروهای برقی و شارژ و دشارژ خودروهای برقی در نظر گرفته شده است.
- فرض شده است که شرکت توزیع برق هزینه‌ای بابت شارژ

را که در مدت زمان مورد مطالعه تأمین نمی‌شود، بررسی قرار می‌کند:

$$C_{NS}^{n,j} = \left[\sum_{b=1}^B C_{inj}^j \times \gamma^b \times L^b \times \left[\sum_{res=1}^{N_{res}} P^{res} \times t^{res} + \sum_{rep=1}^{N_{rep}} P^{rep} \times t^{rep} \right] \right] + C_{Equ} \quad (19)$$

سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان از رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$DC_{NS}^{n,j} = C_{NS}^{n,j} - C_{NSV2G}^{n,j} \quad (20)$$

۴.۱.۳. حد انتقال از باس c به باس d

توان ظاهری عبوری از خطوط انتقال بایستی کمتر از بیشینه توان مجاز باشد.

$$P(c,d) \leq P_{max}^{(c,d)} \quad (21)$$

۵.۱.۳. حدود دامنه ولتاژ

ولتاژ همه باس‌ها باید در محدوده ولتاژ استاندارد باشد.

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (22)$$

۶.۱.۳. حد ظرفیت پارکینگ خودروهای برقی

با توجه به تعداد ناوگان خودروهای برقی موجود در آن منطقه و عوامل دیگر، بیشینه ظرفیت پارکینگ از یک حد خاصی نمی‌تواند فراتر رود. این قید در رابطه (۲۳) نشان داده شده است:

$$CP^n \leq CP_{max}^n \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N_{V2G}\} \quad (23)$$

۴. مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش، به ارائه نتایج شبیه‌سازی روی یک سیستم توزیع ۹ شینه پرداخته می‌شود. این نتایج در چند سناریو با هم مقایسه می‌شوند. شبکه مورد مطالعه در شکل (۲) و مشخصات مربوط به آن در جداول (۲)، (۳) و (۴) آورده شده است [۲۱]. سیستم تست شامل ایستگاه ۱۳۲-۳۳kV است که هشت نقطه بار را تغذیه می‌کند. اطلاعات مربوط به شارژ اولیه خودروها به منظور رانندگی و جایابی پارکینگ‌ها در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است [۱۳].

برای جایابی پارکینگ خودروی برقی در شبکه توزیع مورد مطالعه، معیارهای زیر در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند:

- خودروهای برقی موظف‌اند ۲۰٪ ظرفیت باتری‌شان را در ساعات کم‌باری از شبکه دریافت و در دو ساعت پرباری، در هر ساعت ۱۰٪ ظرفیت باتری‌شان را به شبکه تحویل دهند.
- بار شبکه در سه سطح کم‌باری، میان‌باری و پرباری در نظر گرفته شده است.

$$CF_{cap}^n = C_{ac} \times N_{V2G}^f \quad (11)$$

$$CF_{driving}^n = \sum_{t=1}^T \left[\frac{P_{roff}^t}{\mu_{conv}} \times C_{parkch}^{n,t} \times t_{sharj}^n \right] \quad (12)$$

$$CF_{V2G}^n = \sum_{\alpha=1}^{N_{V2G}^{step}} \sum_{k=1}^{N_{V2G}^f} \sum_{t=1}^T \left[P_{tpe}^t \times C_{park}^{n,\alpha,k,t} \times p^{n,\alpha,k,t} \times t_{disp}^n \right] \quad (13)$$

در معادله (۱۳)، P_{tpe}^t شامل هزینه خرید انرژی و هزینه استهلاک تجهیزات است که از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$P_{tpe}^t = \frac{P_{roff}^t}{\mu_{conv}} + C_d \quad (14)$$

زمان مورد نیاز برای شارژ کامل ناوگان خودروهای برقی تابعی از حالت اولیه شارژ (SOC^1) باتری خودرو است که از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$t_{sharj}^n = \frac{[1 - (SOC_0^n) \times ES^n]}{\sum_{\alpha=1}^{N_{V2G}^{step}} [C_{park}^{n,\alpha} \times p^{n,\alpha}]} \quad (15)$$

۲.۱.۳. تلفات شبکه توزیع

پارکینگ خودروهای برقی که به شبکه متصل شده، با توجه به توان و مکان پارکینگ تأثیرات مختلفی بر میزان تلفات شبکه خواهد داشت. سود به دست آمده از کاهش تلفات طبق رابطه (۱۶) به دست می‌آید. مقدار این سود با توجه به مقدار توان تحویل داده شده به شبکه، توان خریداری شده از شبکه و قیمت برق در هر لحظه می‌تواند مثبت و یا منفی باشد.

$$DC_{loss}^{n,j} = price^j \times (loss^{n,j} - loss_{V2G}^{n,j}) \quad (16)$$

تلفات شبکه بدون حضور پارکینگ خودروهای برقی و با حضور پارکینگ خودروهای برقی از رابطه (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند:

$$loss^{n,j} = \sum_{b=1}^B [R^b \times (I^{b,j})^2 \times t_{sharj}^n] \quad (17)$$

$$loss_{V2G}^{n,j} = \sum_{b=1}^B [R^b \times (I_{V2G}^{b,j})^2 \times t_{disp}^n] \quad (18)$$

۳.۱.۳. قابلیت اطمینان شبکه توزیع

یکی دیگر از اهداف در نظر گرفته شده، تعیین اندازه و مکان پارکینگ خودروهای برقی به منظور حفظ قابلیت اطمینان سیستم در یک سطح قابل قبول است. شاخص انرژی تأمین نشده (ENS^1) به عنوان شاخص قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. این شاخص، انرژی کل شبکه

1. State of Charge
2. Energy Not Supplied

جایابی احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۳۱

جدول (۴): مشخصات خطوط شبکه توزیع

طول خط (km)	اندوکتانس (Ω)	مقاومت (Ω)	خطوط	
			به باس	از باس
۱/۵	۱/۵	۱/۴	۳	۱
۵/۵	۵/۵	۲/۷۸	۷	۳
۴	۴	۲	۲	۱
۵/۵	۵/۵	۲/۸	۶	۲
۱/۷	۱/۷	۱/۷	۵	۱
۴	۴	۲/۱	۹	۵
۴/۵	۴/۵	۲/۲۶	۴	۱
۵	۵	۲/۴	۸	۴

جدول (۵): شارژ اولیه ناوگان خودروهای برقی به تفکیک درصد

خودروهای مورد مطالعه

شارژ اولیه	۰/۳	۰/۴۵	۰/۷
خودروهای برقی (درصد)	٪۲۵	٪۲۵	٪۵۰

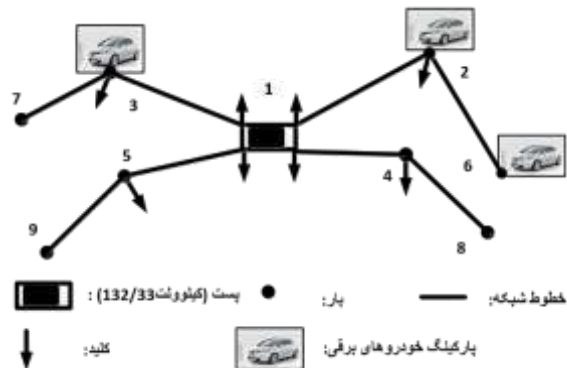
جدول (۶): اطلاعات مورد نیاز برای جایابی پارکینگ خودروهای برقی

هزینه استهلاک تجهیزات (USD\$/kWh)	۰/۲۲۵
هزینه سرمایه‌ای سالانه (USD\$/ year for each vehicle)	۳۰۴
بازده اینورتر	۰/۸۵
قیمت انرژی در زمان‌های کم‌باری (USD\$/ kWh)	۰/۰۵
قیمت انرژی در زمان‌های پرباری (USD\$/ kWh)	۰/۵

۱.۴ مدل مارکوف ناوگان خودروهای برقی

برای اطلاعات خودروهای برقی از داده‌های سایت ^۱NHTS [۲۲] از تاریخ ۲۰۰۸/۰۴ تا ۲۰۰۹/۰۳ استخراج شده است. داده‌های خام یک‌ساله به صورت روزانه، هفتگی و ماهانه مرتب شده است. در داده‌ها هر حرکت خودرو آغاز سفر و رسیدن آن به مقصد پایان سفر است. در این مقاله در مرتب کردن داده‌ها حداقل بازه یک‌ساعته در نظر گرفته شده است. برای مثال، اگر خودرویی سفر خود را در ساعت ۷:۲۰ شروع کرده و ساعت ۷:۵۰ به مقصد رسیده است، این حالت به صورت یک سفر بین ساعت ۷ تا ۸ در نظر گرفته شده است و خودرو در این بازه در دسترس نیست. تعداد کل خودروها در هر ناوگان ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده است.

- در شبیه‌سازی، پارکینگ خودروهای برقی به عنوان یک شین با توان راکتیو صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالت شارژ توان اکتیو مثبت و در طول دشارژ توان اکتیو منفی در نظر گرفته شده است.
- در شبکه مورد مطالعه شین‌های ۲، ۳ و ۶ به عنوان شین‌های کاندید متصل به پارکینگ خودروهای برقی در نظر گرفته شده‌اند.
- بیشینه ظرفیت باتری‌های خودروهای برقی برابر با ۴۰ kWh در نظر گرفته شده است.
- ضرایب وزنی مسئله بهینه‌سازی به صورت یکسان و برابر در نظر گرفته شده‌اند.



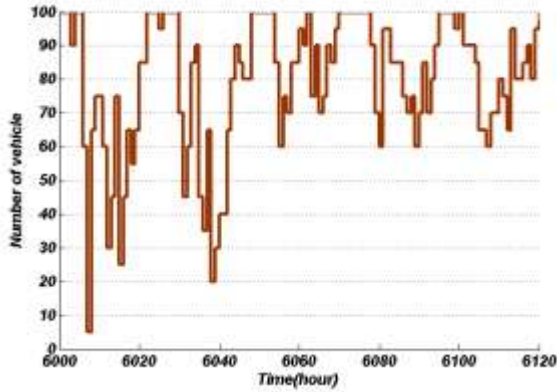
شکل (۲): شبکه مورد مطالعه

جدول (۲): مشخصات بار شبکه توزیع

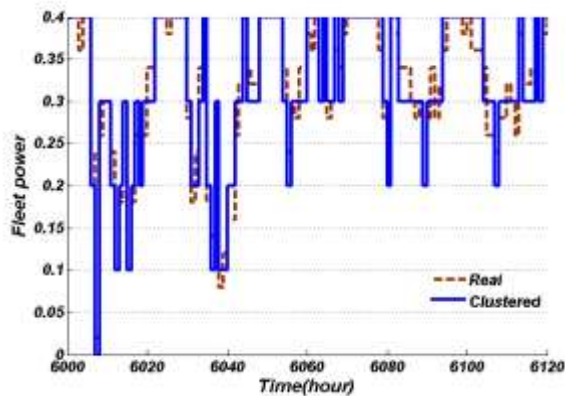
ردیف	سطح بار	مدت زمان (h/year)	قیمت (\$/ MWh)
۱	کم‌باری	۲۱۹۰	۳۵
۲	میان‌باری	۴۷۴۵	۴۹
۳	پرباری	۱۸۲۵	۷۰

جدول (۳): داده‌های بار شبکه توزیع

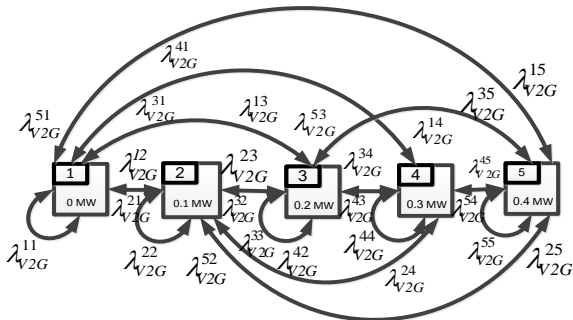
خطوط	بار ماکزیمم در سطح ۱ (MW)	بار ماکزیمم در سطح ۲ (MW)	بار ماکزیمم	
			در سطح ۳ (MW)	از باس
۱	۵	۶	۸	۳
۳	۷/۵	۸/۸	۹/۲	۷
۱	۸/۳	۱۱/۲	۹	۲
۲	۴	۵	۷	۶
۱	۷/۵	۸/۸	۹/۲	۵
۵	۷/۳	۱۰/۲	۸	۹
۱	۶	۷	۹	۴
۴	۷/۵	۸/۷	۹/۲	۸



شکل (۴): تعداد خودروهای پارک شده در پارکینگ



شکل (۵): توان ناوگان خودروهای برقی



شکل (۶): مدل مارکوف ۵ حالتی برای توان ناوگان خودروهای برقی

بدین ترتیب برای ساعات ۱۳ و ۴، جدول $COPT_{V2G}^t$ محاسبه و نتایج در جدول (۷) و (۸) نشان داده شده است.

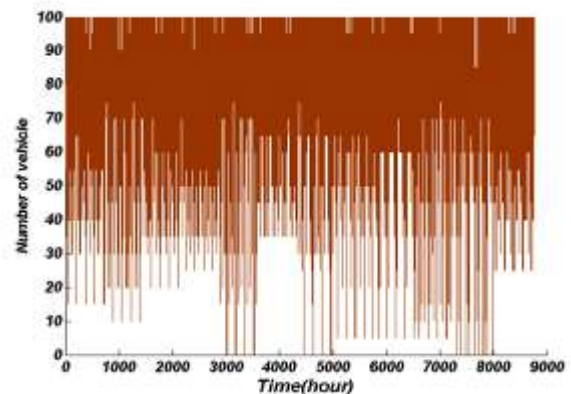
جدول (۷): $COPT_{V2G}^{13}$

α	C_{V2G}^α (MW)	P_{V2G}^α	$\lambda_{V2G}^{+\alpha}$ (occ/hr)	$\lambda_{V2G}^{-\alpha}$ (occ/hr)	f_{V2G}^α (occ/hr)
۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۱	۰/۰۶۰۴	۱	۰	۰/۰۶۰۴
۳	۰/۲	۰/۳۴۸۹	۰/۵۸۲۷	۰/۰۰۷۹	۰/۲۰۶۰
۴	۰/۳	۰/۵۶۰۴	۰/۴۵۱۴	۰/۰۱۹۶	۰/۲۶۳۹
۵	۰/۴	۰/۰۳۳	۰	۱	۰/۰۳۳

شکل (۳) تغییرات ساعتی تعداد خودروهای پارک شده در پارکینگ مربوط به ناوگان ۱۰۰ خودرویی به مدت یک سال را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در بیشتر ساعات، خودروهای برقی در پارکینگ در حالت پارک‌اند. به منظور تحلیل بهتر، تعداد خودروهای برقی پارک شده در پارکینگ برای ۱۲۰ ساعت در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) نیز توان تولیدی کلاستر شده ناوگان خودروهای برقی را برای ۱۲۰ ساعت متوالی نشان می‌دهد که از شکل (۳) گرفته شده است. با استفاده از زنجیره مارکوف، ۵ پله گسسته برای توان ناوگان خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. توان‌های به دست آمده از ناوگان خودروهای برقی با حداکثر توان تولیدی ۰/۴ MW، حالات گسسته ۰ MW، ۰/۱ MW، ۰/۲ MW، ۰/۳ MW و ۰/۴ MW هستند که با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شده‌اند. برای کلاستر کردن توان‌های واقعی به توان‌های گسسته، از رابطه (۸) استفاده شده است. در این صورت، مدل مارکوف توان ناوگان خودروهای برقی مطابق شکل (۶) به دست می‌آید. نرخ‌های انتقال، در شکل (۶) برای ساعت نمونه پیک (ساعت ۱۳) و کم‌باری (ساعت ۴) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده‌اند و در ماتریس λ_{V2G}^{13} و λ_{V2G}^4 نشان داده شده است.

$$\lambda_{V2G}^{13} = \begin{matrix} & \begin{matrix} state 1 & state 2 & state 3 & state 4 & state 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} state 1 \\ state 2 \\ state 3 \\ state 4 \\ state 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.0079 & 0.4094 & 0.5197 & 0.0630 \\ 0 & 0.1029 & 0.3485 & 0.5295 & 0.0196 \\ 0 & 0 & 0.3333 & 0.6667 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$\lambda_{V2G}^4 = \begin{matrix} & \begin{matrix} state 1 & state 2 & state 3 & state 4 & state 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} state 1 \\ state 2 \\ state 3 \\ state 4 \\ state 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9973 \end{pmatrix} \end{matrix}$$



شکل (۳): داده‌های ساعتی تعداد خودروهای پارک شده در پارکینگ

جایابی احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۳۳

خودروهای برقی با هم برابر است ولی سود حاصل از کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار در سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی بیشتر شده است. در سطح نفوذ ۲۰٪ خودروهای برقی، تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی نسبت به حالت‌های قبل افزایش پیدا کرده اما سود حاصل از کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. بنابراین سود کلی تابعی از سطح نفوذ خودروهای برقی موجود در پارکینگ است. بنابراین باید مشوق‌های کافی برای مالکان خودروهای برقی در نظر گرفته شود تا خودروهایشان را در ساعات پیک بار در پارکینگ خودروهای برقی پارک کنند.

جدول (۹): نتایج شبیه‌سازی سناریو ۱

سطح نفوذ خودروهای برقی	شماره شین‌های کاندید	۲	۳	۶
۱۰۰٪	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۴	۱۹	۱۱
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۱۴۲۵۱		
	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۳۳۰۶۳۰		
	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۱۳۷۵۳۰۰		
۸۰٪	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۴	۱۹	۱۱
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۱۳۳۱۸		
	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۲۶۴۵۰۰		
	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۱۰۹۷۶۰۰		
۲۰٪	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۹	۱۲	۲۰
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۶۱۸۷		
	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۸۹۵۷۰		
	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۳۰۶۴۰۰		
سود نهایی (دلار)	۴۰۲۱۶۰			

جدول (۸): $COPT_{V2G}^4$

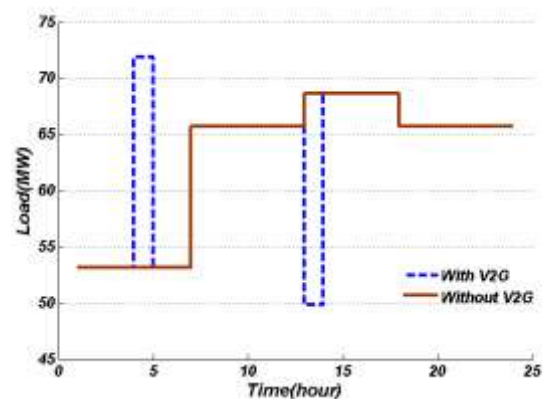
α	C_{V2G}^α (MW)	P_{V2G}^α	$\lambda_{V2G}^{+\alpha}$ (occ/hr)	$\lambda_{V2G}^{-\alpha}$ (occ/hr)	f_{V2G}^α (occ/hr)
۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۱	۰	۰	۰	۰
۳	۰/۲	۰	۰	۰	۰
۴	۰/۳	۰	۰	۰	۰
۵	۰/۴	۱	۰/۹۹۷۳	۰	۰/۹۹۷۳

به‌منظور آنالیز نتایج شبیه‌سازی، سه سناریو در نظر گرفته شده است که در ادامه بررسی می‌شوند.

۲.۴. سناریو اول

محدودیت خطوط و ترانسفورماتورها از یک سو و مسائل مربوط به مدیریت پارکینگ موجب می‌شود تأسیس تنها یک پارکینگ بزرگ برای شارژ و دشارژ خودروهای برقی امکان‌پذیر نباشد. از این رو در این قسمت سه شین (۲، ۳ و ۶) از شبکه برای نصب پارکینگ کاندید شده‌اند.

در این سناریو، پارکینگ خودروهای برقی با سطوح نفوذ مختلف ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۲۰٪ خودروهای برقی به‌مدت زمان یک سال در یک ساعت پرباری (ساعت ۱۳) و یک ساعت کم‌باری (ساعت ۴) به شبکه متصل شده است. سطح نفوذ ۱۰۰٪ به معنای مشارکت همه خودروهای برقی است که در آن ساعت در پارکینگ پارک شده‌اند. منحنی بار شبکه بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای برقی و با در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای برقی، با سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی در شکل (۷) نشان داده شده است.

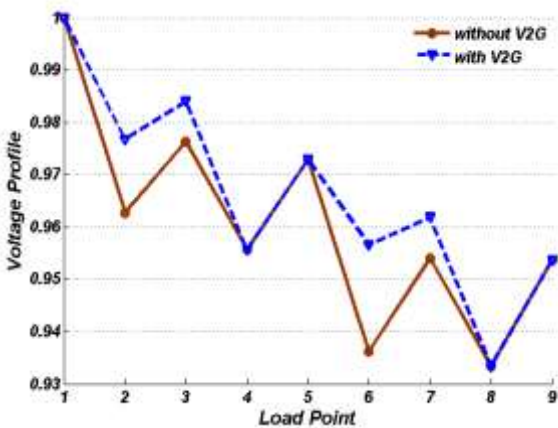


شکل (۷): منحنی بار شبکه در یک ساعت پرباری و یک ساعت کم‌باری

سود نهایی از جایابی پارکینگ خودروهای برقی با فرض سطوح نفوذ ۱۰۰٪ و ۸۰٪ به‌ترتیب برابر ۱۷۲۰۲۰۰ دلار و ۱۳۷۵۴۰۰ دلار است. بنابراین سود نهایی در مقایسه با هنگامی که سطح نفوذ خودروها ۱۰۰٪ بوده، کاهش یافته است. جدول (۹) جزئیات مسئله بهینه‌سازی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در سطوح نفوذ ۱۰۰٪ و ۸۰٪ تعداد بهینه ناوگان

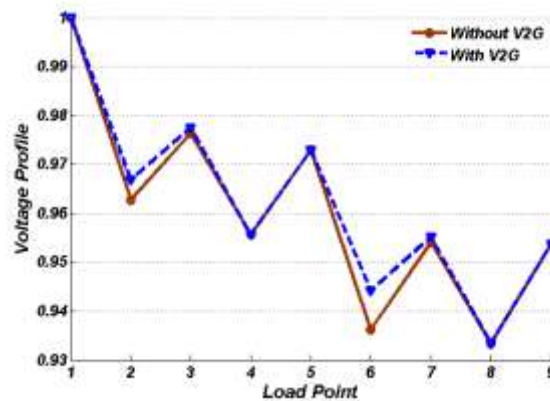
۲ را نشان می‌دهد. در سطح نفوذ ۱۰۰٪ و ۸۰٪ تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی با هم برابر است ولی سود کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار در سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی بیشتر شده است. اگر خودروهای برقی با سطح نفوذ ۲۰٪ فرض شود، تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی نسبت به حالت‌های قبل افزایش پیدا کرده اما سود حاصل از کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. همان گونه که از نتایج سناریوها مشخص است اگر از پارکینگ خودروهای برقی برای دو ساعت پرباری و دو ساعت کم‌باری استفاده شود، سود حاصل از کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سناریوی اول افزایش یافته است. تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی در سناریوی اول و دوم با سطوح نفوذ مختلف خودروهای برقی با هم یکسان‌اند که این نتایج نشان می‌دهد که اگر پارکینگ خودروهای برقی در ساعات زیاده‌تری به شبکه متصل شود، بدون آنکه اندازه پارکینگ خودروهای برقی تغییری نکند سود اقتصادی فراوانی برای شرکت توزیع برق دارد.

بهبود پروفیل ولتاژ، در پیک بار و با سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی که پارکینگ خودروهای برقی توان به شبکه توزیع تحویل می‌دهد، در سناریوی دوم همانند سناریوی اول در بعضی از شین‌ها اتفاق افتاده، اما در این سناریو به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سناریوی اول افزایش یافته که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ در دو ساعت پرباری و دو ساعت کم‌باری

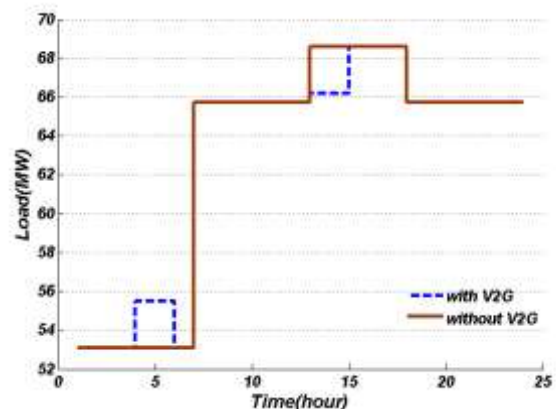
بهبود پروفیل ولتاژ در پیک بار و با سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی که پارکینگ خودروهای برقی توان به شبکه توزیع تحویل می‌دهد، در شکل (۸) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است بهبود پروفیل ولتاژ در بعضی از شین‌ها اتفاق افتاده است.



شکل (۸): پروفیل ولتاژ در یک ساعت پرباری و یک ساعت کم‌باری

۳.۴. سناریو دوم

در این سناریو پارکینگ خودروهای برقی با سطوح نفوذ مختلف خودروهای برقی در دو ساعت پرباری (۱۳ و ۱۴) و دو ساعت کم‌باری (۴ و ۵) به شبکه متصل شده است. منحنی بار شبکه بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای برقی و با در نظر گرفتن خودروهای برقی، با سطح نفوذ ۱۰۰٪ خودروهای برقی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): منحنی بار در دو ساعت پرباری و دو ساعت کم‌باری

جایابی پارکینگ خودروهای برقی با فرض سطوح نفوذ ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۲۰٪ خودروهای برقی انجام شده است. سود نهایی به دست آمده از جایابی پارکینگ خودروهای برقی با سطح نفوذ ۱۰۰٪ و ۸۰٪ به ترتیب برابر ۶۹۵۲۵۰۰ و ۵۵۶۷۰۰۰ دلار است. سود نهایی در مقایسه با هنگامی که سطح نفوذ خودروها ۱۰۰٪ بوده، کاهش یافته است. جدول (۱۰) جزئیات مسئله بهینه‌سازی مورد مطالعه در سناریو

جایابی احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۳۵

(۹)، (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد اگر تعداد پارکینگ خودروهای برقی در یک شبکه افزایش یابد، سود حاصل از کاهش تلفات، سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان و سود حاصل از تأمین پیک بار به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

جدول (۱۱): نتایج شبیه‌سازی سناریو ۳

شماره شین‌های کاندید	۲	سطح نفوذ خودروهای برقی
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۸	%۱۰۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۶۸۴۱	
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۱۱۶۹۷۰	
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۵۶۲۶۳۰	
سود نهایی (دلار)	۶۸۶۴۴۰	
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۸	%۸۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۶۰۴۶	
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۹۳۵۷۳	
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۴۴۹۰۱۰	
سود نهایی (دلار)	۵۴۸۶۳۰	
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۸	%۲۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۱۹۵۰	
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۲۳۳۹۳	
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۱۰۸۱۴۰	
سود نهایی (دلار)	۱۳۳۴۸۰	

جدول (۱۰): نتایج شبیه‌سازی سناریو ۲

شماره شین‌های کاندید	۲	۳	۶	سطح نفوذ خودروهای برقی
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۴	۱۹	۱۱	%۱۰۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۵۹۰۹۲			
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۱۳۵۲۰۰۰			
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۵۵۴۱۵۰۰			
سود نهایی (دلار)	۶۹۵۲۵۰۰			
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۴	۱۹	۱۱	%۸۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۵۴۸۷۰			
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۱۰۸۱۶۰۰			
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۴۴۳۰۵۰۰			
سود نهایی (دلار)	۵۵۶۷۰۰۰			
تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۹	۱۲	۲۰	%۲۰
سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۲۵۲۳۱			
سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۳۶۶۲۷۰			
سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۱۲۷۲۲۰۰			
سود نهایی (دلار)	۱۶۶۳۷۰۰			

۴.۴. سناریو سوم

در این سناریو، جایابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی بر روی شین ۲ و شین ۳ انجام شده است.

در این سناریو پارکینگ خودروهای برقی با سطوح نفوذ مختلف ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۲۰٪ خودروهای برقی به مدت زمان یک سال در یک ساعت پرباری (ساعت ۱۳) و یک ساعت کم‌باری (ساعت ۴) به شبکه متصل شده است.

جدول (۱۱) و (۱۲) جزئیات مسئله بهینه‌سازی مورد مطالعه در سناریو ۳ را به ترتیب با یک شین و دو شین نشان می‌دهد. مقایسه جداول

می‌کنند که نصب پارکینگ خودروهای برقی با سطح نفوذ بالا، اگر در ساعات پیک به شبکه متصل شوند، سود قابل ملاحظه‌ای برای شرکت‌های توزیع دارد و پروفیل ولتاژ را به خوبی بهبود می‌بخشد. هر گونه تغییر در ظرفیت باتری خودروهای برقی، قیمت برق، سطح نفوذ خودروهای برقی و ضرایب وزنی مسئله بهینه‌سازی منجر به تغییر در نتایج می‌شود. برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر، اندازه باتری خودروهای برقی و بازده اینورترها به دقت باید مشخص باشد.

فهرست علائم

B	تعداد خطوط شبکه
b	مجموعه اندیس‌های شین‌های شبکه
c	مجموعه اندیس‌های شین‌های شبکه
C_{V2G}^α	توان مرتبط با حالت α یک ناوگان از خودروهای برقی
C_{inj}^j	قیمت انرژی تأمین‌نشده در سطح بار j
C_{V2G}^{max}	بیشینه توان ناوگان خودروهای برقی
C_{V2G}^{real}	توان واقعی ناوگان خودروهای برقی
$C_{park}^{n,\alpha}$	توان تولیدی پارکینگ n در حالت α ناوگان خودروهای برقی
$C_{park}^{n,\alpha,k,t}$	توان تولیدی پارکینگ n در حالت α در زمان t به ازای k ناوگان خودروهای برقی
$C_{parkch}^{n,t}$	توان مورد نیاز برای شارژ ناوگان خودروهای برقی از پارکینگ n
C_{ac}	هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه ناوگان خودروهای برقی
C_d	هزینه استهلاک تجهیزات
C_{Equ}	هزینه انرژی تأمین‌نشده و خرابی تجهیزات دیگر به جز خطوط شبکه
$C_{NS}^{n,j}$	هزینه انرژی تأمین‌نشده بدون حضور پارکینگ n خودروهای برقی و در سطح بار j
$C_{NSV2G}^{n,j}$	هزینه انرژی تأمین‌نشده با حضور پارکینگ n خودروهای برقی و در سطح بار j
CF_{cap}^n	هزینه سرمایه‌گذاری پارکینگ n خودروهای برقی
$CF_{driving}^n$	هزینه انرژی خریداری‌شده برای شارژ خودروهای برقی به منظور رانندگی از پارکینگ n
CF_{V2G}^n	هزینه انرژی خریداری‌شده برای شارژ خودروهای برقی برای تأمین بار در ساعات پیک بار از پارکینگ n
CP^n	ظرفیت پارکینگ n

جدول (۱۲): نتایج شبیه‌سازی سناریو ۳			
سطح نفوذ خودروهای برقی	شماره شین‌های کاندید	۳	۲
٪۱۰۰	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۹	۱۹
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۱۱۲۵۷	
	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۲۱۷۳۰۰	
	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۱۱۷۸۰۰	
٪۸۰	سود نهایی (دلار)	۱۴۱۶۳۰۰	
	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۹	۱۹
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۱۰۰۶۱	
	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۱۷۳۸۴۰	
٪۲۰	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۹۴۷۹۰۰	
	سود نهایی (دلار)	۱۱۳۱۸۰۰	
	تعداد بهینه ناوگان خودروهای برقی	۱۹	۱۹
	سود حاصل از کاهش تلفات (دلار)	۳۳۱۹	
٪۲۰	سود حاصل از افزایش قابلیت اطمینان (دلار)	۴۳۴۶۰	
	سود حاصل از تأمین پیک بار (دلار)	۲۲۸۳۰۰	
	سود نهایی (دلار)	۲۷۵۰۸۰	

۵. نتیجه‌گیری

مقاله حاضر یک تابع چندهدفه به منظور جایابی پارکینگ خودروهای برقی در سیستم توزیع برای تأمین بار در ساعات پیک برق ارائه کرده است. مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد شده با مدل‌سازی ناوگان خودروهای برقی با استفاده از زنجیره مارکوف، ظرفیت و محل بهینه پارکینگ خودروهای برقی را در ساعات پیک تقاضا تعیین می‌کند. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی کمک می‌کند تا سود کلی از دید شرکت توزیع برق، بیشینه شود. به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی از داده‌های پایه و قیمت‌های بازار برق در این مقاله استفاده شده است. نتایج تأیید

بارهایی که در طول تعمیرات خطا تأمین نمی‌شوند.	P^{rep}	بیشینه ظرفیت پارکینگ n	CP_{max}^n
بارهایی که در طول خطا تأمین نمی‌شوند.	P^{res}	مجموعه اندیس‌های خطوط شبکه	d
احتمال رخداد حالت α در مدل ناوگان خودروهای برقی	P_{V2G}^α	سود به دست آمده از کاهش تلفات در پارکینگ n و با سطح بار j	$DC_{loss}^{n,j}$
قیمت انرژی الکتریکی در سطح بار j	$price^j$	سود به دست آمده از افزایش قابلیت اطمینان در پارکینگ n و با سطح بار j	$DC_{NS}^{n,j}$
مقاومت خط b شبکه	R^b	فرکانس رخداد حالت α در مدل ناوگان خودروهای برقی	f_{V2G}^α
درآمد کلی پارکینگ n خودروهای برقی	R_{V2G}^n	ظرفیت باتری خودروهای برقی در پارکینگ n	ES^n
مجموعه اندیس‌های تعداد شین‌های ایزوله در طول تعمیر خطا	rep	جریان خط b بدون خودروهای برقی در سطح بار j	$I^{b,j}$
مجموعه اندیس‌های تعداد شین‌های ایزوله در طول خط شارژ اولیه خودروهای برقی در پارکینگ n	SOC_0^n	جریان خط b با خودروهای برقی در سطح بار j	$I_{V2G}^{b,j}$
مدت زمان متصل شدن پارکینگ به شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته	T	تعداد سطوح بار	J
اندیس زمان	t	مجموعه اندیس‌های سطوح بار	j
مدت زمان تحویل توان به شبکه توسط پارکینگ n	t_{disp}^n	مجموعه اندیس‌های ناوگان خودروهای برقی	k
مدت زمان شارژ ناوگان خودروهای برقی توسط پارکینگ n به منظور راندگی	t_{sharj}^n	طول خطوط شبکه	L^b
مدت زمان تعمیر خطا	t^{rep}	تلفات شبکه بدون حضور پارکینگ n در سطح بار j	$loss^{n,j}$
مدت زمان خطا و سویچینگ	t^{res}	تلفات شبکه با حضور پارکینگ n در سطح بار j	$loss_{V2G}^{n,j}$
کل زمان مشاهدات	T_{V2G}^S	مجموعه اندیس‌های تعداد پارکینگ‌ها	n
مدت زمان ماندن ناوگان خودروهای برقی در حالت α	T_{V2G}^α	تعداد پارکینگ‌های خودروهای برقی	N_{V2G}
بیشینه ولتاژ شبکه	V_{max}	تعداد ناوگان خودروهای برقی در یک پارکینگ	N_{V2G}^f
کمینه ولتاژ شبکه	V_{min}	تعداد شین‌های ایزوله در طول تعمیر خطا	N^{rep}
شاخص حالات دسته‌بندی شده یک ناوگان از خودروهای برقی	α	تعداد شین‌های ایزوله در طول خطا	N^{res}
نرخ انتقال ناوگان خودروهای برقی از حالت α به β	$\lambda_{V2G}^{\alpha\beta}$	تعداد کل حالات دسته‌بندی شده یک ناوگان از خودروهای برقی	N_{V2G}^{step}
نرخ خروج از حالت α به حالات بالاتر در مدل ناوگان خودروهای برقی	$\lambda_{V2G}^{+\alpha}$	تعداد کل مشاهده انتقال از حالت α به β	$N_{V2G}^{\alpha\beta}$
نرخ خروج از حالت α به حالات پایین‌تر در مدل ناوگان خودروهای برقی	$\lambda_{V2G}^{-\alpha}$	توان اکتیو عبوری از خطوط c و d	$P(c,d)$
نرخ خروج از حالت α در مدل ناوگان خودروهای برقی	λ_{V2G}^α	بیشینه توان اکتیو عبوری از خطوط c و d	$P_{max}^{(c,d)}$
بازده اینورتر	μ_{conv}	قیمت بازار برق در زمان‌های پیک	P_{mp}^t
نرخ خرابی بخشی از خط b	γ^b	هزینه خرید انرژی و هزینه استهلاک تجهیزات به منظور تأمین پیک بار در زمان t	P_{pe}^t
		قیمت بازار الکتریکی در زمان‌های کم‌باری در زمان t	P_{roff}^t
		احتمال توان تولیدی پارکینگ n و در حالت α	$p^{n,\alpha}$
		احتمال توان تولیدی پارکینگ n در حالت α در زمان t به ازای k ناوگان خودروهای برقی	$p^{n,\alpha,k,t}$

- [1] Aman, M. M., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., Bakar, A. H. A., "Optimal Placement and Sizing of a DG Based on a New Power Stability Index and Line Losses", Int Journal Electr Power Energy Syst, Vol. 43, pp. 1296–1304, 2012.
- [2] Moradi, M. H., Abedeni, M., "A Combination of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Optimal DG Location and Sizing in Distribution Systems", Int Journal Electr Power Energy Syst, Vol. 34, pp. 66–74, 2012.
- [3] Hong, Y., Ho, S. Y., "Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power System, Vol. 25, pp. 1062–1069, 2005.
- [4] Khalesi, N., Rezaei, N., Haghifam, M. R., "DG Allocation with Application of Dynamic Programming for Loss Reduction and Reliability Improvement", Int Journal Electr Power Energy Syst., Vol.33, pp.288-295, 2011.
- [5] Ghanbarzadeh, T., Teimourzadeh Baboli, P., Rostami, M., Parsa Moghaddam, M., Sheikh-El-Eslami, MK. "Wind Farm Power Management by High Penetration of PHEV", IEEE power and energy society general meeting, pp. 1-5, 2011.
- [6] Peterson, B., Whitacre, JF., "The Economics of Using Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Packs for Grid Storage", Journal of Power Sources, Vol. 195, pp. 2377-2384, 2010.
- [7] Han, S., Sezaki, K., "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation", IEEE Trans Smart Grid, Vol. 1, pp. 65–72, 2010.
- [8] Sortomme, E., El-Sharkawi, MA., "Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services", IEEE Trans Smart Grid, Vol. 3, pp. 351-359, 2012.
- [9] Hashemi-Dezaki, H., Hamzeh, M., Askarian-Abyaneh, H., Haeri-Khiavi, H., "Risk Management of Smart Grids Based on Managed Charging of PHEVs and Vehicle-to-Grid Strategy Using Monte Carlo Simulation", Energy Conversion and Management, Vol. 100, pp. 262–276, 2015.
- [10] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., "Integrated Operation of Electric Vehicles and Renewable Generation in a Smart Distribution System, " Energy Conversion and Management, Vol. 89, pp. 99–110, 2015
- [11] Sousa, T., Morais, H., vale, Z., Farai, P., Soares, J., "Intelligent Energy Resource Management Considering Vehicle-to-Grid: A Simulated Annealing Approach", IEEE Trans Smart Grid Vol. 3, pp. 535–542, 2012
- [12] Uwokwe, C.C., Satish, M., Ivan, S., Renato, R., "A Nomogram for Estimating Energy Loss in a Distribution Network Due to Penetration of V2G", IEEE Conference Publications, pp.476-481, 2013.
- [13] Moradigaz, M., Parsa Moghaddam, M., Haghifam, M. R., Alishahi, E., "A Multi-Objective Optimization Problem for Allocating Parking lots in a Distribution Network", Int Journal Electr Power Energy Syst, Vol. 46, pp. 115–122, 2013.
- [14] Aryanezhad, M., Ostadaghaee, E., Joorabion, M., "Management and Coordination Charging of Smart Park and V2G Strategy Based on Mont Carlo Algorithm", IEEE conference, pp. 1-8, 2014.
- [15] Khalid, M. W., Al-Awami, A. T., "Stochastic Programming Based Bidding Strategy for V2G Services", IEEE conference, pp. 1-5, 2013.
- [16] Sayas, F. C., Allan, R. N., "Generation Availability Assessment of Wind Farms", Int Journal Electr Power Energy Syst., Vol. 21, No. 5, pp. 507-518, 1996.
- [17] Leite, A. P., Borges, C. L. T., Falcao, D. M. "Probabilistic Wind Farms Generation Model for Reliability Studies Applied to Brazilian Sites", IEEE Trans. Power Syst, Vol. 21 , No. 1, pp. 1493-1503, 2006.
- [18] Salehi Dobakhshari, A., Fotuhi-Firuzabad, M., "A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, pp. 792–801, 2009.
- [19] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, Springer, 1992.
- [20] Fitiwi, D. Z., Cuadra, F. de., Olmos, L., Rivier, M., "A New Approach of Clustering Operational States for Power Network Expansion Planning Problems Dealing with RES (Renewable Energy Source) Generation Operational Variability and Uncertainty", Energy, Vol. 90, pp. 1360-1376, 2015.(65)
- [21] Khalesi, N., Haghifam, M. R., "Application of Dynamic Programming for Distributed Generation Allocation", IEEE conference, pp. 1-6, 2009.

- [22] U.s. Department of Transportation. *Federal Highway Administration. 2009 National Household Travel Survey*. <http://nhts.ornl.gov>.