

ارائه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع فعال با در نظر گرفتن مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها

محمد علیزاده گل‌محله^۱ میثم جعفری نوکندی^۲ مجید شهابی^۳

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر، ایران
m.alizadeh@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
shahabi.m@nit.ac.ir

چکیده: با توجه به استفاده روزافزون از خودروهای برقی در شبکه حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ این خودروها در پارکینگ‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر تاب‌آوری شبکه توزیع در شرایط بحرانی داشته باشد. در این مقاله، با توجه به تأثیر متقابل بین مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها، یک مدل بهینه‌سازی خطی دو سطحی به‌منظور بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع پیشنهاد شده است. در مسئله سطح بالا، با پیش‌بینی بار مصرفی شبکه توزیع و مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها، مرزبندی جزایر در شبکه توزیع با هدف حداکثر کردن مقدار مورد انتظار بار بازیابی شده تعیین می‌شود. با تعیین مرزبندی جزایر و مکان پارکینگ‌های متصل به شبکه در مسئله سطح بالا و با در نظر گرفتن تمایل رانندگان خودروهای برقی برای توقف در نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی جهت شرکت در برنامه مدیریت شارژ و دشارژ، تغییرات هر سفر و در نتیجه، مشخصات ناوگان خودروهای موجود در هر پارکینگ در مسئله سطح پایین مشخص می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از چندین خطای هم‌زمان در شبکه توزیع فعال ۱۱۸ شین در حضور خودروهای برقی در شبکه ترافیکی ۲۵ گره‌ای، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شده است. با توجه به وجود متغیرهای باینری در مسئله سطح پایین، ترکیبی از برنامه‌نویسی ریاضی و الگوریتم تکاملی برای حل مدل پیشنهادی و رسیدن به پاسخ نهایی استفاده شده است. نتایج موارد مطالعاتی، کارایی و دقت عملکرد مدل دوسطحی پیشنهادی را در راستای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع با استفاده از مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دوسطحی، خودروهای برقی، پارکینگ، جزیره‌سازی، تاب‌آوری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.195

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد علیزاده گل‌محله

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - استان مازندران - نوشهر - دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

نگرانی‌های زیست‌محیطی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، امنیت تأمین سوخت‌های فسیلی و افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت، عواملی هستند که باعث افزایش استفاده از خودروهای برقی^۱ (PEV) در شبکه حمل‌ونقل شده‌اند. از طرف دیگر، اتصال خودروهای برقی به شبکه الکتریکی از طریق پارکینگ‌ها و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ این خودروها در مدت‌زمان توقف در پارکینگ‌ها می‌تواند بر تاب‌آوری شبکه توزیع تأثیرگذار باشد.

در سال‌های اخیر، با رخ دادن خاموشی‌های گسترده در شبکه‌های برق که به دلیل وقوع حوادث با احتمال وقوع کم-تأثیر زیاد^۲ مانند سیل، طوفان و یا زمین‌لرزه اتفاق می‌افتند، تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به یکی از کلمات کلیدی در این سیستم‌ها تبدیل شده است [۱]. مفهوم تاب‌آوری با برخی از اصطلاحات مرتبط با عملکرد بهینه شبکه توزیع مانند قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری، مقاوم کردن، دسترس‌پذیری، پایداری، آسیب‌پذیری، دوام و قابلیت بقا از لحاظ مفهومی متفاوت است که در [۲] به این تفاوت‌ها پرداخته شده است. تاب‌آوری، توانایی سیستم قدرت را در تحمل حوادث دارای احتمال وقوع کم-تأثیر زیاد نشان می‌دهد که کمترین قطعی در سیستم قدرت و نیز بازیابی و برگشت سریع به شرایط عادی را تضمین می‌کند [۲]. بنابراین، تعریف تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی بایستی هر دو وجه استقامت در برابر حادثه و بازیابی سریع پس از حادثه را در کانون توجه خود قرار دهد [۳].

مدل‌های مختلفی برای ارزیابی تاب‌آوری یک سیستم قدرت پیشنهاد شده است. در مرجع [۴] با استفاده از نظریه گراف و با در نظر گرفتن معیارهای مختلف برای تاب‌آوری با استفاده از الگوریتم تجمع شاخص‌ها و با در نظر گرفتن ضریب وزنی برای هر شاخص، یک معیار کمی جهت محاسبه تاب‌آوری شبکه معرفی شده است. کفایت منابع به‌عنوان یکی دیگر از عوامل مهم تاب‌آوری شبکه در [۵] مورد بحث قرار گرفته است. در این مرجع، با معرفی شاخص در دسترس بودن منابع تولید پراکنده در حوادث شدید و با بهینه‌سازی اندازه و مکان این منابع، در جهت بهبود این شاخص تلاش شده است.

جزیره‌سازی و بازآرایی شبکه توزیع و تشکیل چندین ریزشبکه کوچک‌تر از مهم‌ترین اقدامات عملیاتی به‌منظور بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع به شمار می‌روند [۶]. جهت تشریح نقش ریزشبکه‌ها در بهبود تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، یک بررسی جامع شامل طرح‌های به‌کار رفته به‌منظور افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت پس از وقوع حوادث شدید در [۷] انجام شده است. یک سرویس بازیابی بارهای بحرانی پس از وقوع بلاای طبیعی و با استفاده از طرح جزیره‌سازی به‌صورت یک برنامه‌ریزی تصادفی مقید به شانس^۳ در [۸] مدل‌سازی شده است اما در این مقاله هر بار بحرانی در زمان بازیابی فقط توسط یک ریزشبکه تأمین می‌شود درحالی‌که امکان استفاده از دو یا چند ریزشبکه برای

تأمین مجموعه یکسانی از بارهای بحرانی وجود دارد. در [۹]، یک ساختار مدیریت سلسله‌مراتبی در هنگام خاموشی ناشی از وقوع حوادث غیرمنتظره متشکل از چند ریزشبکه جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شده است، با این حال، توپولوژی شبکه توزیع و محدودیت‌های آن در [۹] در نظر گرفته نشده است. عملکرد یک ریزشبکه دارای منابع تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر در انتقال از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای و با هماهنگ کردن ذخیره‌سازها، منابع تولید پراکنده^۴ (DG) و بارهای پاسخگو در [۱۰] بررسی شده است اما محدودیت‌های شبکه توزیع در این مقاله در نظر نگرفته است. مرجع [۱۱] با فرض حضور چندین DG دارای قابلیت کنترل فرکانس و ولتاژ در هر جزیره، موجب بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع شده است. یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه خطی آمیخته با عدد صحیح^۵ (MILP) برای بازیابی بارهای اولویت‌بندی‌شده با مطالعه ساختار جزیره‌سازی پویا و مدیریت بهینه فن‌آوری‌های مختلف شبکه هوشمند در [۱۲] ارائه شده است اما در این مقاله از خودروهای برقی، سلول‌های خورشیدی و همچنین محدودیت توان عبوری از خطوط چشم‌پوشی شده است. یک مدل MILP سلسله‌مراتبی و تصادفی برای مدل‌سازی هم‌زمان برنامه‌ریزی یک ریزشبکه و مدیریت انرژی نیروگاه مجازی برای تعیین مرزهای بهینه جزایر با هدف بهبود شاخص بازیابی و کاهش هزینه‌های تأمین بار در [۱۳] ارائه شده است. در [۱۴]، یک چارچوب تصمیم‌گیری دو مرحله‌ای مبتنی بر ریسک به‌منظور بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع فعال و با هماهنگی برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده و مدیریت خاموشی‌ها ارائه شده است، به‌گونه‌ای که با ایجاد جزایر بهینه پویا و برنامه‌های بارزدایی، ایمنی شبکه در برابر وقوع حوادث شدید حفظ شود اما در این مقاله از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع استفاده نشده است. با مطالعه مقالات فوق و سایر مقالاتی که در حوزه تاب‌آوری شبکه توزیع تألیف شده‌اند مشخص شد که هیچ‌یک از مقالات، تأثیر خودروهای برقی را بر تاب‌آوری شبکه توزیع در نظر نگرفته‌اند.

مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌های خودروی برقی^۶ (EVPLs) می‌تواند مزایای فراوانی برای شبکه توزیع به دنبال داشته باشد. از نظر فنی، خودروهای برقی می‌توانند در دو حالت شارژ (به‌عنوان مصرف‌کننده توان) و دشارژ (به‌عنوان واحد ذخیره‌کننده انرژی) به شبکه الکتریکی متصل شوند [۱۵-۱۷]. پارکینگ‌ها، مکان مناسبی برای شارژ و دشارژ خودروهای برقی و اتصال آن‌ها به شبکه الکتریکی هستند زیرا خودروها تقریباً ۲۳ ساعت از روز را در پارکینگ‌ها متوقف هستند [۱۶]. در [۱۸]، یک روش برنامه‌ریزی تصادفی شارژ و دشارژ برای تعداد زیادی از خودروهای برقی در یک پارکینگ هوشمند ارائه شده است که در آن، پارکینگ‌های هوشمند مجهز به سیستم‌های فتولتائیک و منابع تولید پراکنده به‌طور بالقوه به‌عنوان یک تجمع کننده به خودروهای برقی اجازه می‌دهند که با شرکت‌های برق، تعامل داشته باشند، اما در این مقاله نیز شبکه ترافیکی نادیده گرفته شده

است. در [۱۹]، یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها برای به حداقل رساندن هزینه های بهره‌برداری شبکه توزیع از جمله هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست و هزینه شارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها ارائه شده است. مرجع [۲۰]، یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی را برای مدیریت انرژی پارکینگ‌ها با توجه به برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر کاهش پیک با در نظر گرفتن عدم قطعیت در رفتار خودروهای برقی پیشنهاد کرده است. در [۲۱]، مکان پارکینگ‌ها و مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی با توجه به الگوی رانندگی و مدل رفتاری رانندگان خودروها در هر دو مسئله برنامه‌ریزی شرکت توزیع و بهره‌برداری شرکت‌های تولید برق بررسی شده است. نادیده گرفتن تأثیر عدم اتصال برخی از پارکینگ‌های مقصد بر ویژگی‌های سفر، یکی از نواقص مدل پیشنهادی در [۲۰، ۲۱] است. در [۲۲]، یک مدل دوسطحی به منظور بررسی تأثیر متقابل بین مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع و تقاضای شارژ خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ سریع پیشنهاد شده است ولی تأثیر پارکینگ‌ها و مدیریت شارژ و دشارژ خودروها در این پارکینگ‌ها بر مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است.

در برخی از مقالات، حرکت خودروهای برقی در شبکه حمل‌ونقل به صورت چندین ناوگان مدل شده است که همه خودروها با هم از مبدأ مشخصی به سمت مقصد حرکت می‌کنند و پس از انجام کارهای معمول روزانه، دوباره از همان مسیر باز می‌گردند [۲۳-۲۶]. هر ناوگان با تعداد زیادی از خودروهای برقی را می‌توان به عنوان یک مصرف‌کننده توان یا واحد ذخیره انرژی قابل توجه از دیدگاه شبکه الکتریکی در نظر گرفت [۱۶]. مرجع [۲۳] عملکرد بهینه طرح بازآرایی شبکه توزیع را با سطح نفوذ زیاد خودروهای برقی و تولید برق همبسته با باد بررسی کرده است. در این راستا، یک چارچوب تصادفی جدید مبتنی بر تبدیل بدون اثر^۷ برای مدل‌سازی عدم قطعیت رفتار خودروهای برقی پیشنهاد شده است. در [۲۶]، با در نظر گرفتن جابجایی خودروهای برقی بین پارکینگ‌ها در دو مسیر، آرایش بهینه جزیره‌سازی شبکه توزیع، منابع تولید پراکنده راهبر و پیرو در هر جزیره و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای برقی به صورت بهینه تعیین شده است ولی تأثیر وضعیت شبکه برق بر ارائه سرویس شارژ و دشارژ پارکینگ‌ها و تغییر داده‌های مربوط به سفر خودروها در نظر گرفته نشده است. در [۲۴]، یک مدل برنامه‌ریزی برای ریزشبکه‌های قابل بازآرایی با در نظر گرفتن ناوگان خودروهای برقی به منظور به حداقل رساندن مجموع هزینه منابع تولیدی، پیشنهاد شده است. با دانستن تعداد و ویژگی خودروهای موجود در هر ناوگان، ویژگی اصلی آن ناوگان مانند سطح شارژ^۸ (SOC)، میزان مصرف انرژی و حداقل / حداکثر ظرفیت باتری هر ناوگان تعیین می‌شود [۲۴].

با بررسی مقالات بالا مشخص شد که هیچ‌یک از مقالات، تأثیر متقابل مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع و مسئله شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها و تغییر در مشخصات مربوط به سفر

خودروهای برقی را بر تاب‌آوری شبکه توزیع مورد بررسی قرار نداده‌اند. لذا در این مقاله، یک مدل دو سطحی به منظور بررسی تأثیر متقابل بین مشخصات متغیر مربوط به سفرهای خودروهای برقی و مسئله بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع پیشنهاد شده است. به‌طور خلاصه، نوآوری اصلی این مقاله به شرح زیر است:

۱- یک مدل ریاضی MILP برای تعیین نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار به مقصد هر سفر با توجه به شبکه ترافیکی ارائه شده است. فرض بر این است که اگر پس از جزیره‌سازی شبکه توزیع الکتریکی، برخی از پارکینگ‌های مقصد به دلیل عدم اتصال به شبکه الکتریکی، قادر به ارائه سرویس شارژ و دشارژ به خودروهای برقی نباشند، این خودروها مقصد خود را به نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار تغییر می‌دهند. همچنین تمام خودروهایی که از یک پارکینگ برق‌دار استفاده می‌کنند، در برنامه مدیریت شارژ و دشارژ شرکت می‌کنند.

۲- تا جایی که نویسندگان اطلاع دارند در هیچ یک از مطالعات قبلی، وابستگی مقصد خودروها به برق‌دار بودن و یا نبودن برخی از پارکینگ‌ها و تأثیر آن بر تاب‌آوری شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است. بنابراین، این مقاله با مدل‌سازی جریان‌های ترافیکی شبکه حمل‌ونقل، تأثیر مشخصات متغیر سفرهای مربوط به هر ناوگان از خودروهای برقی و مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای موجود در پارکینگ‌های برق‌دار بر مسئله تاب‌آوری شبکه توزیع را بررسی می‌کند. ۳- برای مدل‌سازی تأثیر متقابل بین شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی، یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی ارائه و فرمول‌بندی شده است که در سطح پایین، داده‌های مربوط به سفرها به صورت متغیر و با توجه به وضعیت اتصال پارکینگ‌ها به شبکه الکتریکی و توپولوژی شبکه حمل‌ونقل مشخص می‌شود. در مسئله سطح بالا، مرزهای بهینه جزایر با هدف حداکثر کردن مقدار مورد انتظار بار بازایابی شده همراه با مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی موجود در پارکینگ‌های برق‌دار تعیین می‌شود.

ادامه این مقاله به شرح زیر است: مدل دو سطحی پیشنهادی شامل مسئله تاب‌آوری شبکه توزیع و تعیین مشخصات متغیر مربوط به سفر هر ناوگان از خودروهای برقی در بخش ۲ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳ ارائه شده است و بخش ۴ نتایج مقاله را بررسی و تحلیل می‌کند.

۲- مدل بهینه‌سازی دوسطحی

جزیره‌سازی و بازآرایی شبکه توزیع به دنبال یک حادثه شدید، نیاز به پیش‌بینی مقدار توان‌های مصرفی و تولیدی در سطح شبکه توزیع دارد. با افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی، توان دریافتی / تزریقی مربوط به شارژ و دشارژ این خودروها می‌تواند تأثیر مهمی در کارایی طرح جزیره‌سازی و بازآرایی شبکه توزیع داشته باشد. از آنجا که اغلب اوقات، مسافت پیموده شده روزانه خودروهای برقی کمتر از محدودیت مسافت رانندگی این خودروها است، شارژ در مقصد مانند شارژ در

هستند و سایر متغیرهای شبکه الکتریکی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی با هدف حداقل کردن مقدار بارزدایی به صورت مدل ریاضی، پیاده‌سازی و با حل‌کننده CPLEX حل شده است. متغیرهای مسئله بارزدایی همان متغیرهای مسئله پخش بار در مسئله سطح بالا هستند.



شکل (۱): مدل دو سطحی پیشنهادی برای جزیره‌سازی شبکه توزیع با در نظر گرفتن پارکینگ‌ها

در صورتی که پیاده‌سازی مدل دو سطحی پیشنهادی بدون در نظر گرفتن امکان بارزدایی در شبکه توزیع انجام شود، جزایری که با انجام بارزدایی در مسئله بهینه‌سازی بارزدایی تشکیل شده‌اند امکان تشکیل برای آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین این جزایر باید حذف شده و مجدداً با در نظر گرفتن وضعیت جدید اتصال پارکینگ‌ها به شبکه توزیع و تعیین تعداد خودروهای موجود در هر یک از پارکینگ‌ها، مسئله بهینه‌سازی بارزدایی مجدداً حل شود تا جایی که در هیچ‌یک از جزایر تشکیل شده، بارزدایی انجام نشده باشد. روندنمای مدل دوسطحی پیشنهادی بدون در نظر گرفتن امکان بارزدایی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۲- مسئله سطح بالا

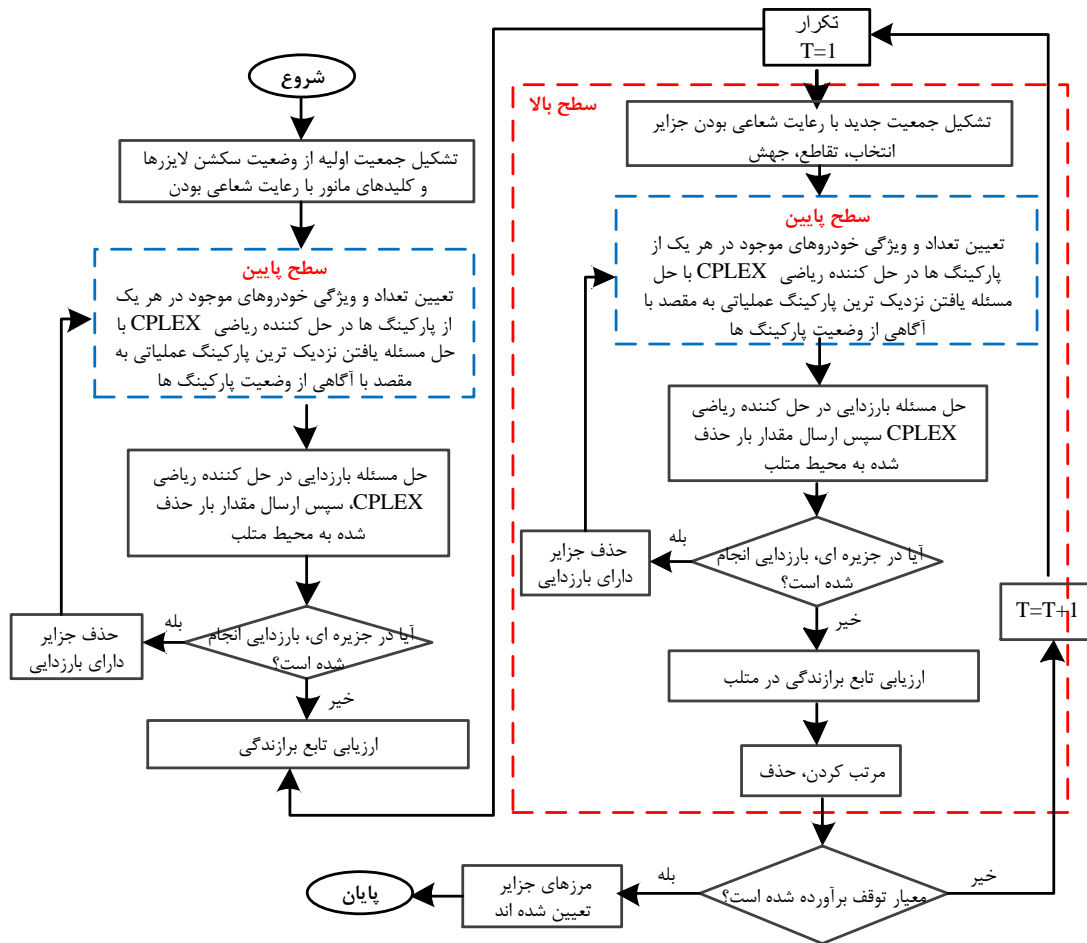
با پیش‌بینی توان مصرفی شبکه توزیع و همچنین اطلاع از تعداد و مشخصات خودروهای موجود در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی، مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع همراه با مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای موجود در پارکینگ‌ها به عنوان مسئله سطح بالا مدل شده است. روابط مربوط به مسئله سطح بالا در روابط (۱) تا (۳۰) بیان شده است:

پارکینگ خانه و یا محل کار، اصلی‌ترین روش تأمین انرژی خودروهای برقی محسوب می‌شود [۲۷]. بنابراین، مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در پارکینگ‌ها جهت بهبود عملکرد شبکه الکتریکی ضروری است.

با دانستن توان مصرفی شبکه توزیع و همچنین تعداد و مشخصات خودروهای موجود در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی، مرزبندی بهینه جزایر با هدف حداکثر کردن شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع تعیین می‌شود. پس از مرزبندی جزایر توسط بهره‌بردار شبکه توزیع، برخی از پارکینگ‌ها ممکن است به دلیل عدم اتصال به شبکه الکتریکی، قادر به ارائه سرویس شارژ و دشارژ به خودروهای برقی نباشند. به دلیل مشوق‌هایی که بهره‌بردار شبکه توزیع در شرایط بحرانی برای اتصال خودروهای برقی به شبکه الکتریکی در نظر می‌گیرد، رانندگان این خودروها تمایل دارند پارکینگ مقصد خود را - در صورت عدم اتصال به شبکه الکتریکی - به نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار تغییر دهند. از نظر منطقی، رانندگان نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار نسبت به مقصد را برای توقف انتخاب می‌کنند زیرا در این صورت می‌توانند با برگشتن به مقصد اصلی سفر در کوتاه‌ترین زمان ممکن، کارهای روزمره خود را انجام دهند. با تغییر برخی از پارکینگ‌های مقصد، تعداد و مشخصات خودروهای موجود در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده تغییر خواهد کرد. تغییرات احتمالی در مشخصات برخی از سفرها ممکن است منجر به تغییر در تصمیم بهره‌بردار شبکه توزیع در خصوص جزیره‌سازی و بازآرایی شبکه توزیع شود. بنابراین در این مقاله، تأثیر متقابل بین مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع و داده‌های متغیر مربوط به سفر خودروهای برقی از طریق پیشنهاد یک مدل دوسطحی، بررسی شده است. این روند در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱- روندنمای روش حل مدل پیشنهادی

با توجه به اینکه مسئله تعیین پارکینگ‌های مقصد برای هر سفر در مسئله سطح پایین دارای متغیرهای باینری است نمی‌توان مدل پیشنهادی را با استفاده از شرایط کراش-کان-تاکر به یک مدل یک سطحی، تبدیل کرد؛ بنابراین برای حل مدل دو سطحی پیشنهادی از ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است [۲۸]. دلیل انتخاب الگوریتم ژنتیک برای حل مدل پیشنهادی، سادگی استفاده و قابلیت جستجوی فضای زیاد این الگوریتم است [۲۹، ۳۰]. در حالت کلی، کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک باید شامل مجموعه‌ای از جواب‌های کاندید و شدنی برای همه متغیرهای مسئله بهینه‌سازی باشند. در مدل پیشنهادی، با توجه به تعداد زیاد متغیرها در مدل پیشنهادی و به منظور کاهش زمان رسیدن به جواب نهایی و افزایش سرعت حل مسئله بهینه‌سازی، کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک فقط شامل متغیرهای مربوط به وضعیت کلیدهای مانور و سکشن لایزرها



شکل (۲): روند نمای مدل دو سطحی پیشنهادی در حضور پارکینگ‌ها و بدون امکان بارزدایی در شبکه توزیع

$$\alpha_i \cdot V_i^{\min} \leq V_{i,t,\omega} \leq \alpha_i \cdot V_i^{\max} \quad (10)$$

$$-\alpha_i \cdot \delta_i^{\max} \leq \delta_{i,t,\omega} \leq \alpha_i \cdot \delta_i^{\max} \quad (11)$$

$$V_{i,t,\omega} = \alpha_i \cdot V_i^{\text{set-point}} \quad i \in N_{CDG} \quad (12)$$

$$\delta_{i,t,\omega} = 0 \quad i \in N_{CDG} \quad (13)$$

$$P_{m,t,\omega}^{DG} + P_{n,t,\omega}^{wind} + \sum_{e \in N_{ev}(i)} P_{e,t,\omega}^{EV,disch} = P_{i,t}^{load} \quad (14)$$

$$+ \sum_{e \in N_{ev}(i)} P_{e,t,\omega}^{EV,ch} + \sum_{l \in \theta L_i} P_{l,t,\omega}^{flow}$$

$$Q_{m,t,\omega}^{DG} - Q_{i,t}^{load} = \sum_{l \in \theta L_i} Q_{l,t,\omega}^{flow} \quad m = N_{ADG}(i) \quad (15)$$

$$0 \leq P_{n,t,\omega}^{wind} \leq \alpha_i \cdot P_{n,t,\omega}^{prod} \quad i = N_{WT}(n) \quad (16)$$

$$P_{l,t,\omega}^{flow} = P_{l,t,\omega}^{z-flow} + F2_l \times (\delta_{i,t,\omega} - \delta_{j,t,\omega}) + F1_l \times (V_{i,t,\omega} - V_{j,t,\omega}) \quad (17)$$

$$Obj = \max \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \pi_{\omega} \cdot pr_{i,t} \cdot P_{i,t,\omega}^{load} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{i,t,\omega}^{load} \leq \alpha_i \cdot Pload_{i,t} \quad (2)$$

$$P_{i,t,\omega}^{load} - (Pload_{i,t} - P_{i,t,\omega}^{LC}) \leq (1 - \alpha_i) \cdot M \quad (3)$$

$$P_{i,t,\omega}^{load} - (Pload_{i,t} - P_{i,t,\omega}^{LC}) \geq -(1 - \alpha_i) \cdot M \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{i,t,\omega}^{load} \leq \alpha_i \cdot Qload_{i,t} \quad (5)$$

$$Q_{i,t,\omega}^{load} - (Qload_{i,t} - \tan \varphi_i \cdot P_{i,t,\omega}^{LC}) \leq (1 - \alpha_i) \cdot M \quad (6)$$

$$Q_{i,t,\omega}^{load} - (Qload_{i,t} - \tan \varphi_i \cdot P_{i,t,\omega}^{LC}) \geq -(1 - \alpha_i) \cdot M \quad (7)$$

$$0 \leq P_{m,t,\omega}^{DG} \leq \alpha_i \cdot P_m^{DG,max} \quad i = N_{CDG}(m) \quad (8)$$

$$\alpha_i \cdot Q_m^{DG,min} \leq Q_{m,t,\omega}^{DG} \leq \alpha_i \cdot Q_m^{DG,max} \quad i = N_{CDG}(m) \quad (9)$$

خواهد شد که شین متصل به آن نیروگاه، عضوی از آن جزیره باشد و مقدار آن در هر سناریو کمتر از حداکثر توان تولیدی قابل پیش‌بینی خواهد بود. روابط پخش بار خطی اکتیو و راکتیو در هر جزیره در روابط (۱۷) تا (۱۹) بیان شده است [۳۱]. روابط (۲۰) و (۲۱) محدودیت متغیر کمکی مورد استفاده در پخش بار خطی را نشان می‌دهند. با توجه به روابط (۲۲) و (۲۳)، در صورت آسیب‌دیدگی و یا باز شدن یک خط توسط بهره‌بردار شبکه توزیع، توان عبوری اکتیو و راکتیو از آن خط برابر صفر خواهد بود. رابطه (۲۴) محدودیت حداکثر توان ظاهری عبوری از هر خط را تعریف می‌کند. طبق رابطه (۲۵) زمانی که یک ناوگان از خودروهای برقی در یکی از پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی توقف می‌کند در یکی از سه حالت شارژ، دشارژ و یا غیرفعال خواهد بود. بسته به محدودیت‌های مربوط به نازل‌های شارژ، محدودیت توان شارژ و دشارژ خودروها در روابط (۲۶) و (۲۷) بیان شده است. خودروهای برقی با توجه به مسافت بین مبدأ و مقصد سفر، مقداری از انرژی ذخیره‌شده در باتری را در طول مسیر مصرف می‌کنند و در نتیجه با کاهش بخشی از SOC، به پارکینگ مقصد می‌رسند؛ بنابراین با اطلاع از SOC اولیه، توان شارژ و دشارژ در هر ساعت، ظرفیت باتری و طول مسیر طی شده تا پارکینگ مقصد، SOC باتری خودرو از رابطه (۲۸) تعیین می‌شود. حداقل و حداکثر سطح شارژ مجاز هر خودرو با توجه به محدودیت عمق دشارژ باتری و نیز ظرفیت باتری در رابطه (۲۹) تعیین شده است. سطح شارژ باتری خودرو در شروع حرکت در رابطه (۳۰) مشخص شده است.

جهت ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی در مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع، از نسبت بار اکتیو بازیابی شده به کل بار اکتیو قطع‌شده به‌عنوان شاخص تاب‌آوری استفاده شده است.

$$SRI = \frac{\sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \pi_{\omega} \cdot pr_{i,t} \cdot P_{i,t,w}^{load}}{\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} pr_{i,t} \cdot Pload_{i,t}} \quad (31)$$

۳-۲- مسئله سطح پایین

پس از حل مسئله سطح بالا و تعیین مرزبندی جزایر، وضعیت هر یک از پارکینگ‌ها از نظر اتصال به شبکه الکتریکی مشخص خواهد شد. در مسئله سطح پایین و با در نظر گرفتن تمایل مالکین خودروها برای توقف در یکی از پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی و شرکت در برنامه شارژ و دشارژ و کسب درآمد احتمالی، در صورتی که پارکینگ مقصد به شبکه الکتریکی متصل نباشد، رانندگان، مقصد خود را تغییر داده و نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی را به‌عنوان مقصد جدید برای سفر خود انتخاب می‌کنند؛ بنابراین تعداد و ویژگی خودروهای موجود در پارکینگ‌ها نسبت به وضعیتی که همه پارکینگ‌ها قادر به ارائه سرویس شارژ و دشارژ هستند تغییر خواهد

$$Q_{l,t,w}^{flow} = Q_{l,t,w}^{z-flow} + F1_l \times (\delta_{j,t,w} - \delta_{i,t,w}) + F2_l \times (V_{i,t,w} - V_{j,t,w}) \quad (18)$$

$$F1_l = \frac{r_l}{r_l^2 + x_l^2}, \quad F2_l = \frac{x_l}{r_l^2 + x_l^2} \quad (19)$$

$$-(1 - \beta_l) \cdot M \leq P_{l,t,w}^{z-flow} \leq (1 - \beta_l) \cdot M \quad (20)$$

$$-(1 - \beta_l) \cdot M \leq Q_{l,t,w}^{z-flow} \leq (1 - \beta_l) \cdot M \quad (21)$$

$$-\beta_l \cdot M \leq P_{l,t,w}^{flow} \leq \beta_l \cdot M \quad (22)$$

$$-\beta_l \cdot M \leq Q_{l,t,w}^{flow} \leq \beta_l \cdot M \quad (23)$$

$$\left(P_{l,t,w}^{flow} \right)^2 + \left(Q_{l,t,w}^{flow} \right)^2 \leq \left(S_l^{\max} \right)^2 \quad (24)$$

$$U_{e,i,t,\omega}^{ch} + U_{e,i,t,\omega}^{disch} + U_{e,i,t,\omega}^{idle} = U_{e,i,t} \quad (25)$$

$$U_{e,i,t,\omega}^{ch} \cdot P_e^{ch,min} \leq P_{e,i,t,\omega}^{ch} \leq U_{e,i,t,\omega}^{ch} \cdot P_e^{ch,max} \quad (26)$$

$$U_{e,i,t,\omega}^{disch} \cdot P_e^{disch,min} \leq P_{e,i,t,\omega}^{disch} \leq U_{e,i,t,\omega}^{disch} \cdot P_e^{disch,max} \quad (27)$$

$$SOC_{e,t+1,\omega} = SOC_{e,t,\omega} + \eta_c \cdot \sum_{i \in I} P_{e,t,\omega}^{disch} \quad (28)$$

$$-\frac{1}{\eta_d} \cdot \sum_{i \in I} P_{e,i,t,\omega}^{ch} - \left(1 - \sum_{i \in I} U_{e,i,t} \right) \cdot EC_e \cdot mile_e \quad (29)$$

$$CAP_e^{\max} \cdot (1 - DOD_e) \leq SOC_{e,t,\omega} \leq CAP_e^{\max} \quad (29)$$

$$SOC_{e,t,\omega} = SOC_e^{ini} \cdot CAP_e^{\max} \quad t = t^{initial} \quad (30)$$

در (۱)، شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع به‌عنوان تابع هدف حداکثر کردن مقدار مورد انتظار بار بازیابی شده در همه سناریوها و با در نظر گرفتن اولویت هر یک از بارها محاسبه شده است. بارهای اکتیو و راکتیو هر شین به ترتیب در روابط (۲) تا (۴) و (۵) تا (۷) مشخص شده‌اند. در این مقاله فرض شده است که ضریب توان بار در همه شین‌ها مشخص و ثابت است. روابط (۸) و (۹) محدودیت حداکثر و حداقل توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهند. رابطه (۱۰) و (۱۱) محدودیت اندازه و زاویه ولتاژ هر شین را بیان می‌کنند. با توجه به روابط (۱۲) و (۱۳)، اگر شینی که دارای یک منبع با قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس است در داخل جزیره‌ای قرار گیرد اندازه ولتاژ آن شین برابر مقدار از پیش تعیین‌شده و زاویه ولتاژ آن شین نیز برابر صفر خواهد شد. قیود برابری توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی در هر شین با در نظر گرفتن توان شارژ و دشارژ خودروها توسط روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف شده است. طبق رابطه (۱۶) توان تولیدی یک نیروگاه بادی در صورتی که یک جزیره، تزریق

در سطح بالا، تعریف شده و با تعیین مرزبندی جزایر، مقدار این متغیر به عنوان یک پارامتر مشخص و معلوم به سطح پایین فرستاده می‌شود. همچنین نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار به هر مقصد و در نتیجه تعداد و مشخصات خودروهای موجود در هر پارکینگ به عنوان متغیر در مسئله ترافیکی سطح پایین، تعیین شده و به عنوان یک پارامتر معلوم به مسئله جزیره‌سازی در سطح بالا فرستاده می‌شود.

۲-۴- خطی‌سازی مدل پیشنهادی

برخی از روابط مدل پیشنهادی، غیر خطی هستند لذا باید به روابط خطی تبدیل شوند. قید محدودیت توان ظاهری عبوری از هر خط در مسئله جزیره‌سازی که در رابطه (۲۴) بیان شده است با رابطه (۴۱) جایگزین و خطی شده است [۳۴].

$$\left(\sin\left(\frac{2\pi h}{H}\right) - \sin\left(\frac{2\pi(h-1)}{H}\right) \right) P_{l,t,w}^{flow} - \left(\cos\left(\frac{2\pi h}{H}\right) - \cos\left(\frac{2\pi(h-1)}{H}\right) \right) Q_{l,t,w}^{flow} \leq \sin\left(\frac{2\pi}{H}\right) S_l^{\max} \quad (41)$$

همچنین رابطه مربوط به قدر مطلق توان الکتریکی معادل عبوری از خطوط ترافیکی که برای تعیین قوس‌های موجود در کوتاه‌ترین مسیر در رابطه (۳۹) مورد استفاده قرار گرفته است با استفاده از روابط (۴۲) تا (۴۴) به روابط خطی تبدیل شده است [۳۵].

$$P_{b,b',s}^{flow, traf} = P_{b,b',s}^{flow} + P_{b,b',s}^{flow} - P_{b,b',s}^{flow} \quad (42)$$

$$\left| P_{b,b',s}^{flow, traf} \right| = P_{b,b',s}^{flow} + P_{b,b',s}^{flow} - P_{b,b',s}^{flow} \quad (43)$$

$$P_{b,b',s}^{flow, traf} + P_{b,b',s}^{flow} \geq 0, \quad P_{b,b',s}^{flow} \geq 0 \quad (44)$$

۳- شبکه مورد مطالعه

مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع ۱۱ کیلوولتی مطابق شکل متشکل از ۳ فیدر، ۱۱۸ شین، ۳ قطع‌کننده (بریکر)، ۲۹ سکشن لایزر و ۹ کلید مانور، پیاده‌سازی شده است [۱۱]. بار پیک اکتیو و راکتیو مصرفی این شبکه به ترتیب برابر ۲۲/۷۱ مگاوات و ۱۷/۰۴ مگاوار است. اولویت همه بارهای شبکه، برابر در نظر گرفته شده است.

کرد. برای تعیین نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار به هر مقصد از روابط (۳۲) تا (۴۰) استفاده شده است.

$$obj = \min \sum_{b,b' \in PL} D_{b,b'} \quad (32)$$

$$Z_{b,b'} \leq elec_b, \quad \forall b \in PL, \forall b' \in PL \quad (33)$$

$$\sum_{b' \in PL} Z_{b,b'} = 1 \quad \forall b \in PL \quad (34)$$

$$P_{b,b',c}^{DG, traf} = P_{b,b',c}^{load, traf} + \sum_{s \in S_c} P_{b,b',s}^{flow, traf} \quad (35)$$

$$P_{b,b',c}^{load, traf} = Z_{b,b'}, \quad \forall b \in PL, \forall b' \in PL, c = b' \quad (36)$$

$$P_{b,b',c}^{DG, traf} = 0 \quad \forall b \in PL, \forall b' \in PL, \forall c \neq b \quad (37)$$

$$P_{b,b',c}^{DG, traf} \geq 0 \quad \forall b \in PL, \forall b' \in PL, \forall c = b \quad (38)$$

$$\frac{\left| P_{b,b',s}^{flow, traf} \right|}{M} \leq X_{b,b',s} \leq M \cdot \left| P_{b,b',s}^{flow, traf} \right| \quad (39)$$

$$D_{b,b'} = \sum_{s \in S} X_{b,b',s} \cdot adj_s \quad \forall b \in PL, \forall b' \in PL \quad (40)$$

تعیین نزدیک‌ترین پارکینگ برق‌دار به مقصد به عنوان تابع هدف مسئله سطح پایین در رابطه (۳۲) مشخص شده است. رابطه (۳۳) بیان می‌کند پارکینگی که به عنوان مقصد جدید انتخاب می‌شود حتماً باید به شبکه الکتریکی متصل باشد تا بتواند به خودروها، سرویس شارژ و دشارژ ارائه دهد. خودروها فقط می‌توانند یکی از پارکینگ‌ها را به عنوان مقصد جدید انتخاب کنند. این شرط در رابطه (۳۴) بیان شده است. برای تضمین پیوستگی مسیر بین پارکینگ‌ها از روش تشکیل یک شبکه الکتریکی معادل استفاده شده است که یک منبع انرژی در مقصد اصلی و یک بار الکتریکی در پارکینگ مقصد جدید قرار داده می‌شود [۳۲، ۳۳]. انجام معادلات پخش بار در این شبکه نشان‌دهنده پیوستگی مسیر خواهد بود. این روش در روابط (۳۵) تا (۳۸) تعریف شده است. مطابق رابطه (۳۹) اگر در شبکه الکتریکی معادل، توان الکتریکی از قوسی عبور کند به این معنی است که این قوس در مسیر بین پارکینگ‌های مقصد اولیه و جدید قرار دارد. با تعیین قوس‌های موجود در کوتاه‌ترین مسیر، طول مسیر در رابطه (۴۰) تعیین شده است.

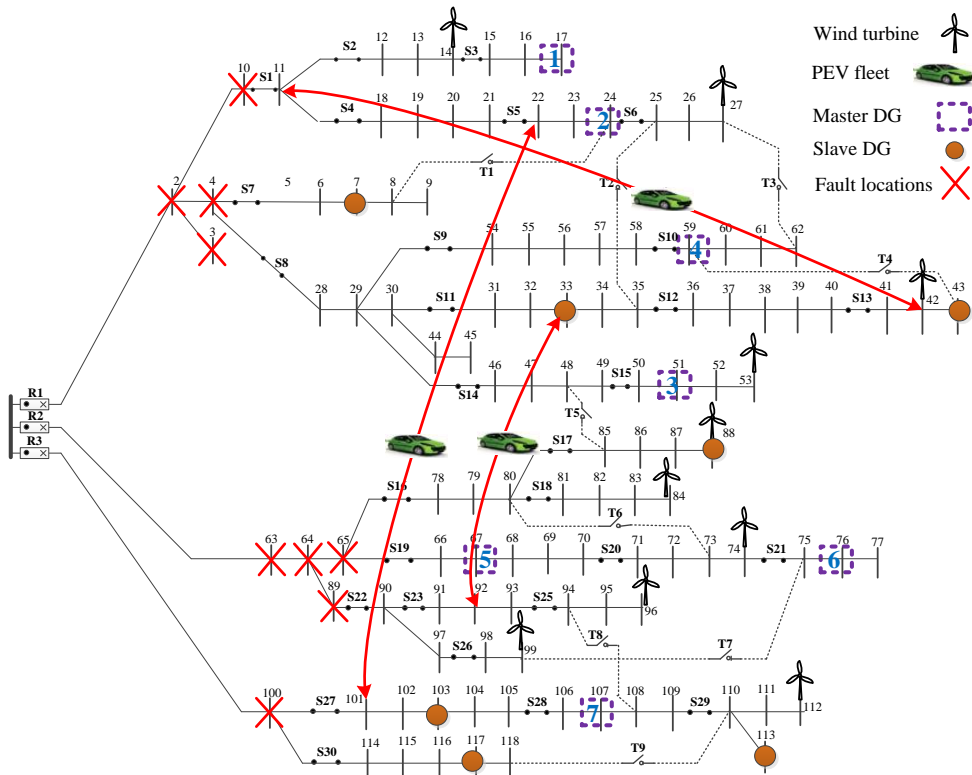
لازم به ذکر است که پارامتر $elec_b$ که اتصال پارکینگ موجود در گره ترافیکی b را به شبکه الکتریکی نشان می‌دهد به عنوان یک متغیر

جزییات شبکه مورد مطالعه از [۳۶] قابل استخراج است. در این شبکه ۱۴ منبع تولید پراکنده وجود دارد که تعداد هفت منبع (منبع ۱ الی ۷) دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس هستند. همچنین، ۱۰ توربین بادی وجود دارد که در ضریب توان واحد بهره‌برداری می‌شوند. ظرفیت تولید هر توربین بادی برابر ۵۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده و مکان نصب آن‌ها نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. از عدم قطعیت

بار صرف نظر شده است. سناریوهای متناظر با عدم قطعیت در پیش-بینی توان بادی تولیدی از [۱۱] قابل استخراج است. خودروهای برقی در قالب سه ناوگان با سه مسیر مختلف به صورت دو سفره از مبدأ مشخصی به سمت مقصد، حرکت کرده و مجدداً پس از انجام کارهای روزمره از همان مسیر به مبدأ شروع حرکت بازمی‌گردند [۲۳-۲۵]. مسیرهای تردد هر ناوگان در شکل ۳ نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به تعداد خودروهای موجود در هر ناوگان و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ و اطلاعات مربوط به سفرها و زمان ورود و خروج ناوگان‌ها در جدول ۲ آورده شده است. به منظور متمایز کردن مسیر حرکت ناوگان‌ها، ناوگان اول و دوم از منطقه مسکونی به سمت منطقه صنعتی و اداری حرکت می‌کنند و سپس به همان منطقه مسکونی بر می‌گردند ولی ناوگان سوم از منطقه مسکونی به سمت منطقه تجاری حرکت کرده و سپس به نقطه شروع حرکت برمی‌گردد.

جدول (۲): مشخصات مسیر حرکت هر ناوگان

شماره ناوگان	سفر اول				سفر دوم			
	خروج		ورود		خروج		ورود	
	ساعت	شین	ساعت	شین	ساعت	شین	ساعت	شین
۱	۶	۱۱	۷	۴۲	۱۷	۴۲	۸۱	۱۱
۲	۷	۳۳	۸	۹۲	۱۸	۹۲	۱۹	۳۳
۳	۱۵	۲۲	۱۶	۱۰۱	۱۹	۱۰۱	۲۰	۲۲



شکل (۳): شبکه توزیع مورد مطالعه و نحوه حرکت ناوگان خودروها بین پارکینگ‌ها

جدول (۳): تلاقی گره‌های ترافیکی و الکتریکی دارای پارکینگ

شماره پارکینگ	۱	۲	۳	۴	۵	۶
گره شبکه الکتریکی	۱۱	۱۵	۲۲	۶۱	۳۳	۴۸
گره شبکه ترافیکی	۲	۵	۷	۸	۹	۱۳
شماره پارکینگ	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
گره شبکه الکتریکی	۶۶	۴۲	۸۶	۹۲	۱۰۱	۱۰۸
گره شبکه ترافیکی	۱۴	۱۵	۱۷	۲۰	۲۳	۲۵

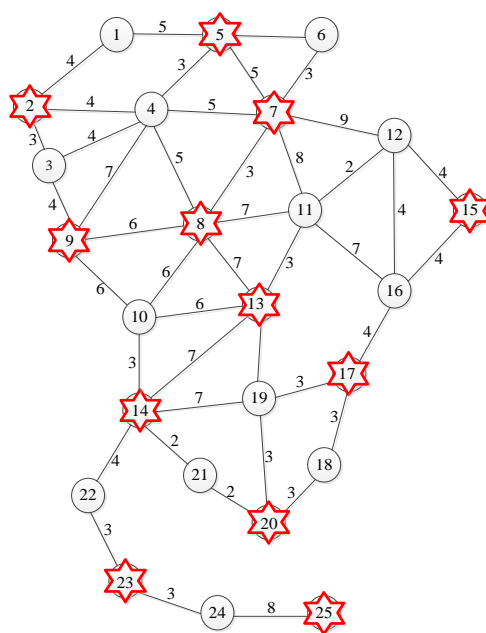
جدول (۱): مشخصات هر ناوگان

ناوگان	سطح شارژ در شروع سفر	طول سفر (مایل)	تعداد خودرو	ظرفیت (MWh)		نرخ شارژ/دشارژ (kW)	
				حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۱	۱۰۰٪	۱۰	۳۵۰	۱/۳۳	۶/۶۵	۷/۳-۶/۲	۲۵۵۵/۲۱۷۰
۲	۹۰٪	۳	۳۰۰	۱/۶۴	۸/۲۲	۷/۳-۶/۲	۲۱۹۰/۱۸۶۰
۳	۸۰٪	۴	۲۵۰	۱/۳۷	۶/۸۵	۷/۳-۶/۲	۱۸۰۰/۱۵۵۰

شبکه حمل‌ونقل مورد مطالعه دارای ۲۵ گره ترافیکی است که در شکل ۴ نشان داده شده است. اعداد روی هر قوس نشان‌دهنده طول آن قوس بر حسب مایل است. با توجه به وسعت شبکه حمل‌ونقل، تعداد ۱۲ پارکینگ برای این شبکه در نظر گرفته شده است که محل قرارگیری پارکینگ‌ها در شبکه حمل‌ونقل در شکل ۴ نشان داده شده است. هم‌پوشانی گره‌های الکتریکی و ترافیکی دارای پارکینگ‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

متوسط ظرفیت باتری هر یک از خودروهای ناوگان اول برابر ۱۹ کیلووات‌ساعت و برای ناوگان‌های دوم و سوم برابر ۲۷/۴ کیلووات‌ساعت در نظر گرفته شده است. حداکثر عمق دشارژ خودروها برابر ۹۰٪ سطح شارژ کامل، میزان مصرف انرژی برای هر خودرو برابر ۰/۲۷ کیلووات‌ساعت در هر مایل و بازده شارژ و دشارژ برابر ۸۵٪ در نظر گرفته شده است [۲۵]. برای ارزیابی مدل پیشنهادی، پنج حالت متفاوت در نظر گرفته شده است که این حالت‌ها در ادامه معرفی شده‌اند:

- حالت اول:** بدون بارزدایی و بدون در نظر گرفتن تأثیر خودروهای برقی
- حالت دوم:** بدون بارزدایی و با در نظر گرفتن تأثیر حضور خودروهای برقی در پارکینگ‌ها با مشخصات سفر ثابت



شکل (۴): شبکه حمل‌ونقل مورد مطالعه

حالت سوم: بدون بارزدایی و با در نظر گرفتن تأثیر حضور خودروهای برقی در پارکینگ‌ها با مشخصات سفر متغیر

حالت چهارم: با بارزدایی و بدون در نظر گرفتن تأثیر خودروهای برقی

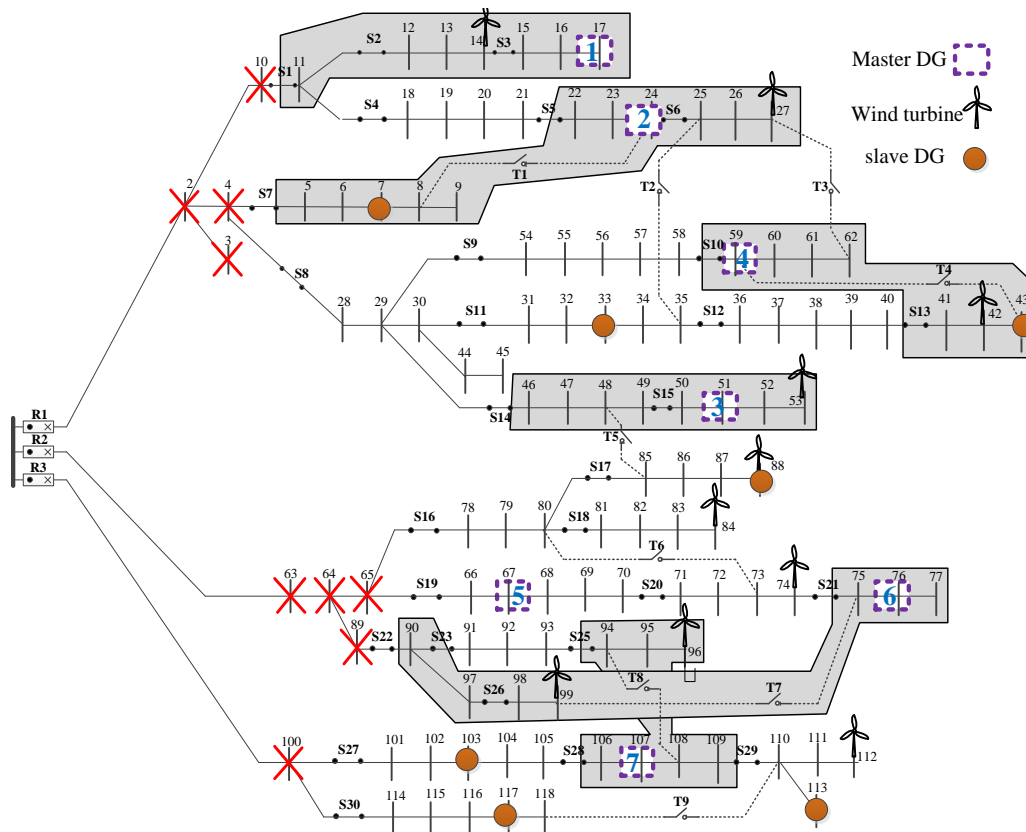
حالت پنجم: با بارزدایی و با در نظر گرفتن تأثیر حضور خودروهای برقی در پارکینگ‌ها با مشخصات سفر متغیر

تحلیل نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف در ادامه آورده شده است:

حالت اول:

در حالت اول که حضور خودروهای برقی در نظر گرفته نشده است و امکان بارزدایی برای شبکه توزیع نیز وجود ندارد مرزبندی جزایر در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت با وجود هفت DG دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس، فقط شش جزیره تشکیل شده است. هیچ جزیره‌ای با محوریت منبع شماره ۵ تشکیل نشده است چون در برخی از ساعت‌ها، مقدار بار موجود در کوچک‌ترین جزیره‌ای که می‌تواند با محوریت منبع شماره ۵ تشکیل شود از ظرفیت تولید توان اکتیو این منبع بیشتر است و چون امکان بارزدایی نیز در این حالت وجود ندارد این جزیره تشکیل نشده است. مشخصات جزایر تشکیل شده شامل مقدار بار اکتیو و راکتیو بازیابی شده در هر جزیره، شین‌های بازیابی شده و همچنین منابع تولید پراکنده پیش‌رو و پیرو موجود در هر جزیره در جدول ۴ آورده شده است.

با توجه شین‌های بازیابی شده و نتایج جدول ۴، مقدار ۱۰۷,۰۷۶ کیلووات‌ساعت از بارهای اکتیو و نیز مقدار ۵۴,۵۳۳ کیلووات‌ساعت از بارهای راکتیو شبکه توزیع در طول مدت ۲۴ ساعت بازیابی و تأمین انرژی شده است؛ بنابراین در این حالت، شاخص تاب‌آوری برابر ۲۴/۵ درصد تعیین شده است.



شکل (۵): آرایش بهینه جزایر در حالت اول

ویژگی خودروهای موجود در هر پارکینگ هیچ تغییری نسبت به شرایط عملکرد عادی پارکینگ‌ها نخواهد داشت.

مرزبندی جزایر در این حالت، مشابه مرزبندی جزایر در حالت اول و شکل ۵ به دست آمده است. چون هیچ‌یک از ناوگان‌ها به صورت دائم در یکی از جزایر قرار ندارند و بین جزایر مختلف، جابه‌جا می‌شوند بنابراین نمی‌توان برای تأمین مداوم بخشی از بارهای موجود در هیچ‌یک از جزایر از انرژی ذخیره‌شده در این خودروها استفاده کرد، همچنین در ساعت‌هایی که ناوگان‌ها در یکی از پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی قرار دارند هیچ‌یک از جزایر دارای کمبود تولیدی نیستند که بتوان از انرژی ذخیره‌شده در خودروها برای جبران کمبود تولیدی در آن ساعت استفاده کرد لذا هیچ‌یک از ناوگان‌ها تأثیری در تغییر مرزبندی جزایر و بهبود شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع ندارند. چون در این حالت هیچ شینی به مجموعه شین‌های بازیابی شده در شبکه توزیع، اضافه نشده است بنابراین همان مقدار ۱۰۷،۰۷۶ کیلووات ساعت معادل ۲۴/۵ درصد از بارهای اکتیو و نیز مقدار ۵۴،۵۳۳ کیلووات ساعت از بارهای راکتیو شبکه توزیع در طول مدت ۲۴ ساعت مشابه حالت اول، بازیابی شده است.

حالت دوم:

در این حالت نیز امکان بارزدایی برای شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است ولی تأثیر داده‌های ثابت مربوط به سفر خودروهای برقی و حضور آنها در پارکینگ‌ها بر شبکه توزیع لحاظ شده است. داده‌های ثابت سفرها به این معنی است که مالکین خودروهای برقی حتی در صورتی که پارکینگ مقصد آن‌ها به شبکه الکتریکی متصل نباشد حاضر نیستند پارکینگ مقصد خود را تغییر دهند بنابراین تعداد و

جدول (۴): مشخصات جزایر تشکیل شده در حالت اول

جزیره	شین بازیابی شده	بار اکتیو بازیابی شده (کیلووات ساعت)	بار راکتیو بازیابی شده (کیلووار ساعت)	منابع تولید انرژی
۱	۱۱-۱۷	۷۲۶،۸	۲۴۵،۴	DG1, WT1
۲	۵-۹، ۲۲-۲۷	۱۸،۲۶۷	۸،۶۷۴	DG2, DG8
۳	۴۶-۵۳	۱۶،۲۶۰	۹،۵۰۹	DG3, WT4
۴	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۱۴،۴۴۶	۷،۲۴۷	DG4, DG10, WT3
۵	-	-	-	-
۶	۷۵-۷۷، ۹۰، ۹۷-۹۹	۱۹،۹۶۷	۸،۷۳۱	DG6, WT9
۷	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹	۱۶،۱۲۶	۲۹،۴۰۹	DG7, WT8
	بار بازیابی شده	۱۰۷،۰۷۶	۵۴،۵۳۳	

حالت سوم:

جدول (۵): وضعیت تغییر پارکینگ‌های مقصد

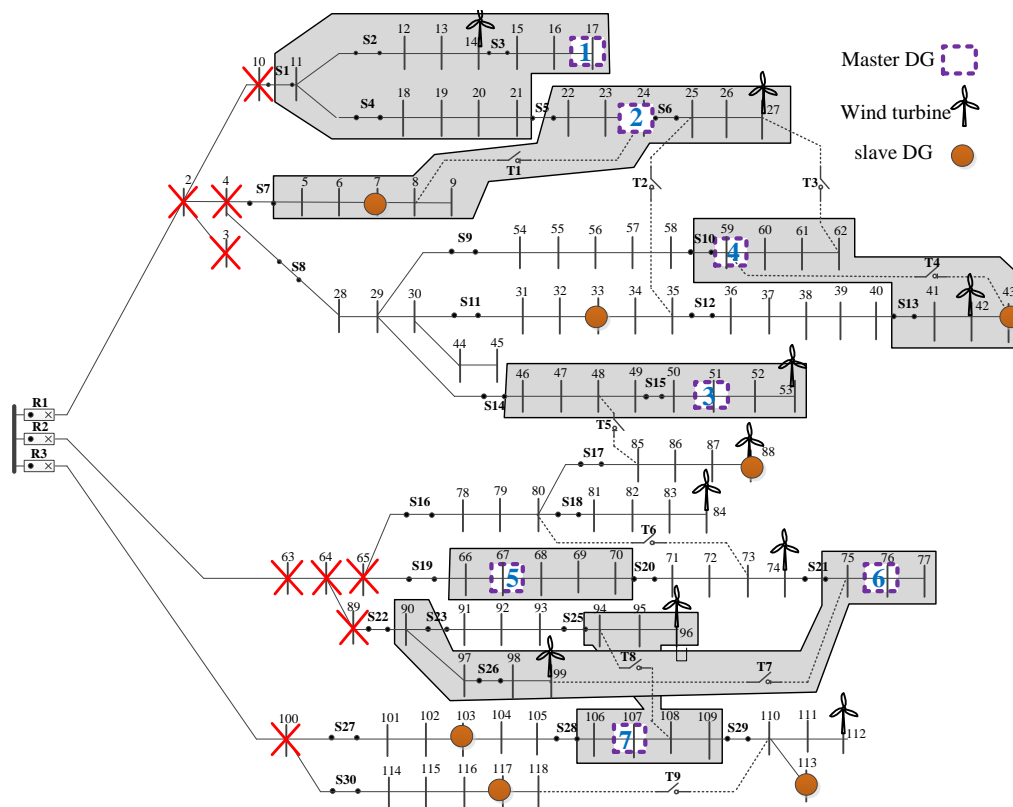
ناوگان	سفر	گره ترافیکی مقصد	شین الکتریکی مقصد	وضعیت اتصال به شبکه الکتریکی	گره ترافیکی نزدیکترین پارکینگ متصل به شبکه
۱	اول	۲	۱۱	متصل	۲
	دوم	۱۵	۴۲	متصل	۱۵
۲	اول	۹	۳۳	عدم اتصال	۸
	دوم	۲۰	۹۲	عدم اتصال	۱۴
۳	اول	۷	۲۲	متصل	۷
	دوم	۲۳	۱۰۱	عدم اتصال	۱۴

در این حالت امکان بارزدایی برای شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است ولی تأثیر مشخصات متغیر سفر خودروهای برقی و حضور آن‌ها در پارکینگ‌ها بر تاب‌آوری شبکه توزیع لحاظ شده است. مشخصات متغیر سفر به این معنی است که رانندگان خودروهای برقی، در صورت اطلاع از عدم اتصال پارکینگ مقصد به شبکه الکتریکی و عدم ارائه سرویس شارژ و دشارژ، پارکینگ مقصد خود را تغییر داده و به مقصد نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی تغییر مسیر خواهند داد؛ بنابراین مقصد سفر و در نتیجه تعداد و ویژگی خودروهای موجود در هر پارکینگ تغییر خواهد کرد. در این حالت، مرزبندی جزایر در شکل ۶ نشان داده شده است.

جزیره‌سازی توسط بهره‌بردار شبکه توزیع، پارکینگ‌های موجود در گره‌های ترافیکی ۹، ۲۰ و ۲۳ به شبکه الکتریکی متصل نشدند بنابراین رانندگان، نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی را که پارکینگ‌های گره‌های ترافیکی ۸ و ۱۴ هستند به‌عنوان مقصد جدید خود تعیین خواهند کرد. مشخصات تغییر یافته مسیر حرکت ناوگان‌ها با توجه به مقصد جدید هر سفر در جدول ۶ آورده شده است. مشخص است که مقصد سفر اول برای ناوگان‌های دوم و سوم و همچنین مقصد سفر دوم برای ناوگان دوم به مقصد نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی تغییر یافته است. لازم به یادآوری است که مبدأ شروع سفر حتی در حالت عدم اتصال پارکینگ مبدأ به شبکه الکتریکی تغییر نخواهد کرد. با عدم اتصال برخی از پارکینگ‌ها به شبکه الکتریکی،

با مرزبندی جزایر مطابق شکل ۶، پارکینگ‌های موجود در گره‌های ترافیکی ۲، ۵، ۷، ۸، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۸ در داخل جزایر قرار گرفته‌اند و با اتصال به شبکه الکتریکی، می‌توانند با شارژ و دشارژ خودروها روی عملکرد شبکه توزیع تأثیرگذار باشند ولی پارکینگ‌های متصل به شین‌های ۹، ۱۷، ۲۰ و ۲۳ به دلیل قرار نگرفتن در هیچ جزیره‌ای، نمی‌توانند با شبکه الکتریکی تبادل توان داشته باشند.

وضعیت تغییر پارکینگ‌هایی که به‌عنوان مقصد سفر در نظر گرفته شده‌اند در جدول ۵ مشخص شده است. با توجه به جدول ۵، پس از



شکل (۶): آرایش بهینه جزایر در حالت سوم

نیز مقدار ۶۳,۶۶۳ کیلوواتساعت از بارهای راکتیو شبکه بازیابی شده است؛ بنابراین با مدیریت شارژ و دشارژ خودروها و در نظر گرفتن مشخصه متغیر سفرها در این حالت، شاخص تاب‌آوری برابر ۲۹ درصد محاسبه شده است که نسبت به حالت اول مقدار ۴/۵ درصد بهبود یافته است.

حالت چهارم:

در این حالت، تأثیر مدیریت شارژ و دشارژ خودروها بر تاب‌آوری شبکه توزیع لحاظ نشده است ولی امکان بارزدایی برای شبکه توزیع فراهم شده است. آرایش و مرزبندی جزایر در این حالت در شکل ۸ نشان داده شده است. در این حالت، تعداد هفت جزیره با محوریت هفت منبع تولید پراکنده دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس تشکیل شد و همچنین مقدار ۲۵۹,۶۸۱ کیلووات ساعت از بارهای اکتیو شبکه و مقدار ۱۳۳,۹۷۶ کیلووات ساعت از بارهای راکتیو شبکه توزیع در طول مدت ۲۴ ساعت بازیابی شده است. با بازیابی این مقدار از بارهای اکتیو قطع شده شبکه توزیع پس از وقوع خطاها، شاخص تاب‌آوری شبکه برابر ۵۹/۵ درصد محاسبه شده که به مقدار ۳۵ درصد نسبت به حالت اول که امکان بارزدایی برای بارهای شبکه توزیع وجود نداشت بهبود یافته است.

حالت پنجم:

در این حالت، علاوه بر امکان بارزدایی در شبکه توزیع، مشخصه متغیر سفرها و مدیریت شارژ و دشارژ خودروها در زمان توقف آن‌ها در پارکینگ‌ها نیز مد نظر قرار گرفته است. مرزبندی بهینه جزایر در این حالت همان مرزبندی تعیین شده در حالت چهارم است که در شکل ۸ نشان داده شده است، اما مدیریت شارژ و دشارژ خودروها موجب بازیابی مقادیر بیشتری از بارهای شبکه توزیع شده است. در این حالت مقدار ۲۷۲,۹۸۲ کیلووات ساعت از بارهای اکتیو و مقدار ۱۴۱,۱۴۴ کیلوواتساعت از بارهای راکتیو شبکه توزیع با مدیریت شارژ و دشارژ خودروها در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی، بازیابی و تأمین انرژی شده است که با بازیابی این مقدار از بارهای اکتیو، شاخص تاب‌آوری به مقدار ۳/۱ درصد نسبت به حالت چهارم که تأثیر حضور خودروهای برقی در نظر گرفته نشده بود بهبود یافته است.

با در نظر گرفتن آرایش تعیین شده برای مرزبندی جزایر، همه شین‌ها به شبکه الکتریکی متصل شده‌اند بنابراین همه پارکینگ‌ها نیز به شبکه الکتریکی متصل شده‌اند و می‌توانند به خودروهای برقی، سرویس شارژ و دشارژ ارائه دهند؛ بنابراین با توجه به اتصال همه پارکینگ‌ها به شبکه الکتریکی و برق‌دار شدن همه آن‌ها، پارکینگ‌های مقصد در سفرها تغییر نخواهند نکرد و مشخصات سفرها و تعداد و ویژگی

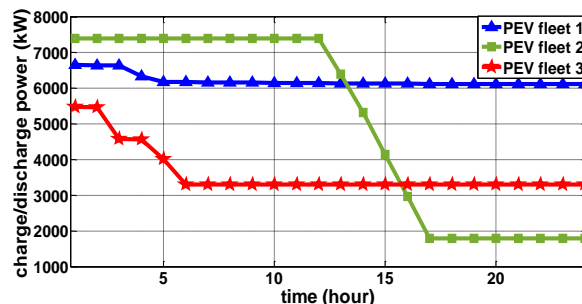
جدول (۶): مشخصات جدید مسیر حرکت هر ناوگان

شماره ناوگان	سفر اول				سفر دوم			
	خروج		ورود		خروج		ورود	
	ساعت	شین	ساعت	شین	ساعت	شین	ساعت	شین
۱	۶	۱۱	۷	۴۲	۱۷	۴۲	۸۱	۱۱
۲	۷	۳۳	۸	۶۶	۱۸	۶۶	۱۹	۶۱
۳	۱۵	۲۲	۱۶	۶۶	۱۹	۶۶	۲۰	۲۲

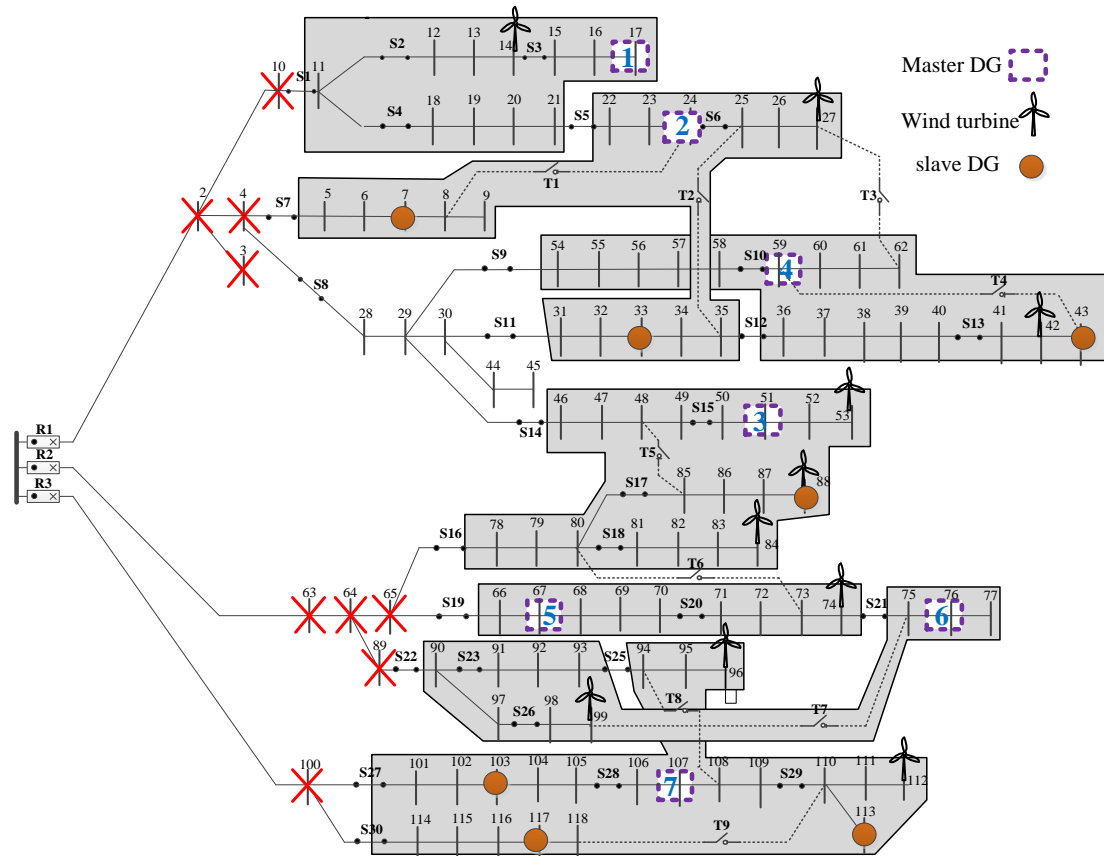
رانندگان، مقاصد خود را به نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی تغییر خواهند داد.

سطح شارژ هر یک از ناوگان‌های خودروهای برقی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۷ مشخص است ناوگان دوم که پارکینگ متصل به شین ۹۲ را به‌عنوان مقصد سفر اول انتخاب کرده بود در ساعتی که جزیره ۵ با اضافه باری مواجه است به پارکینگ موجود در شین ۶۶ این جزیره تغییر مقصد داده است لذا با دشارژ بخشی از انرژی ذخیره‌شده در آن ناوگان، کمبود توان تولیدی در این جزیره برطرف شد و جزیره ۵ در حالت سوم و با مدیریت شارژ و دشارژ این خودروها تشکیل شده است.

امکان تشکیل جزیره ۵ در حالت‌های اول و دوم به دلیل تنها کمبود ۶/۲ کیلووات در ساعت ۱۵ وجود نداشت یعنی فقط دشارژ ۶/۲ کیلووات از توان باتری خودروهای برقی موجود در ناوگان دوم برای تشکیل این جزیره کافی بود ولی با توجه به شکل ۷، مقدار خیلی بیشتری از توان مورد انتظار توسط ناوگان دوم تأمین شده است. دلیل این امر این است که در این مقاله و برای هزینه تأمین انرژی شبکه توزیع، هیچ بخشی در تابع هدف مسئله در نظر گرفته نشده است و هیچ مدیریتی روی منابعی که باید انرژی مورد نیاز شبکه را تأمین کنند انجام نمی‌شود بنابراین بخشی از انرژی که باید توسط منابع تولید پراکنده تأمین شود توسط خودروها تأمین شده است. در این حالت و با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی موجود در پارکینگ‌ها، مقدار ۱۲۶,۴۰۵ کیلووات ساعت از بارهای اکتیو شبکه و



شکل (۷): سطح شارژ ناوگان خودروها در حالت سوم (سناریوی اول)



شکل (۸): آرایش بهینه جزایر در حالت چهارم

خودروهای برقی همه توان ذخیره‌شده در باتری‌ها را تا پایین‌ترین سطح مجاز (حداکثر عمق دشارژ) به شبکه توزیع، تحویل داده و دشارژ شده‌اند.

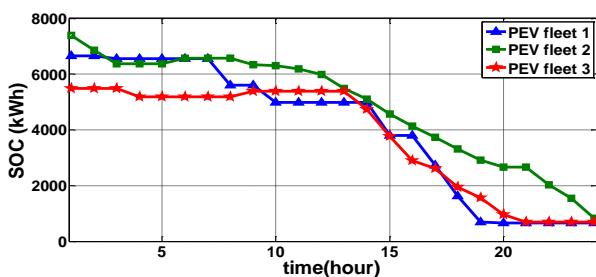
به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پنج مورد مختلف مطالعاتی، همه نتایج در شکل ۱۱، آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

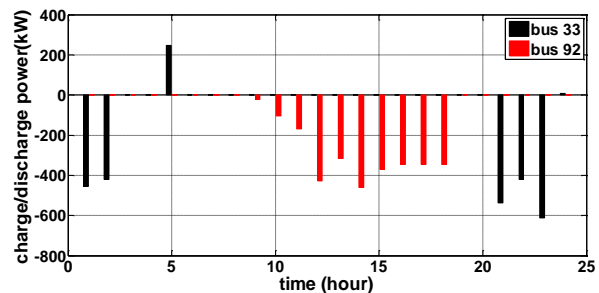
در این مقاله، با توجه به تأثیر متقابل مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع و انتخاب نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی به‌عنوان مقصد سفر توسط رانندگان خودروهای برقی و مدیریت شارژ و

خودروهایی که در پارکینگ‌ها حضور دارند همان داده‌های پیش‌بینی شده در حالت عملکرد عادی شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی در جداول ۱ و ۲ است.

برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای ناوگان دوم در ساعاتی که این ناوگان در پارکینگ‌های متصل به شبکه الکتریکی حضور دارد در شکل ۹ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که در مدیریت شارژ و دشارژ ناوگان‌ها، مقادیر مثبت و منفی در شکل‌ها، به ترتیب نشان‌دهنده توان‌های شارژ و دشارژ خودروها است. همچنین سطح شارژ هر سه ناوگان خودروهای برقی در اولین سناریوی احتمالاتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، مشخص است که

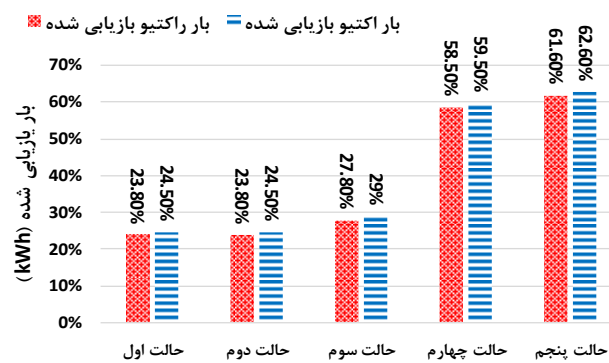


شکل (۱۰): سطح شارژ ناوگان خودروها در حالت پنجم (سناریوی اول)



شکل (۹): مدیریت شارژ و دشارژ ناوگان دوم در حالت پنجم (سناریوی اول)

- [3] Mensah, A.F. and Dueñas-Osorio, L., "Efficient Resilience Assessment Framework for Electric Power Systems Affected by Hurricane Events", Journal of Structural Engineering. Vol. 142(8): pp. C4015013, 2016
- [4] Bajpai, P., Chanda, S., and Srivastava, A.K., "A Novel Metric to Quantify and Enable Resilient Distribution System Using Graph Theory and Choquet Integral", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 9(4): pp. 2918-2929, 2018
- [5] Zhang, B., Dehghanian, P., and Kezunovic, M., "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 10(1): pp. 535-545, 2019
- [6] Naderi, K. and Hesami, A., "A New Algorithm For Power Systems Controlled Islanding Based on constrained spectral clustering", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. Vol. 14(3): pp. 41-54, 2017
- [7] Hussain, A., Bui, V.-H., and Kim, H.-M., "Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience", Applied Energy. Vol. 240: pp. 56-72, 2019
- [8] Gao, H., Chen, Y., Xu, Y., and Liu, C., "Resilience-Oriented Critical Load Restoration Using Microgrids in Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 7(6): pp. 2837-2848, 2016
- [9] Farzin, H., Moeini-Aghtaie, M., and Fotuhi-Firuzabad, M., "A hierarchical scheme for outage management in multi-microgrids", International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 26: pp. 2023-2037, 2016
- [10] Khederzadeh, M. and Maleki, H., "Coordinating storage devices, distributed energy sources, responsive loads and electric vehicles for microgrid autonomous operation", International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 25(10): pp. 2482-2498, 2015
- [11] Mousavizadeh, S., Haghifam, M.-R., and Shariatkah, M.-H., "A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources", Applied Energy. Vol. 211: pp. 443-460, 2018
- [12] Gilani, M.A., Kazemi, A., and Ghasemi, M., "Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources", Energy. Vol. 191: pp. 116442, 2020
- [13] Sheidaei, F. and Ahmarinejad, A., "Multi-stage stochastic framework for energy management of virtual power plants considering electric vehicles and demand response programs", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 120: pp. 106047, 2020
- [14] Zadsar, M., Sebtahmadi, S.S., Kazemi, M., Larimi, S.M.M., and Haghifam, M.R., "Two stage risk based decision making for operation of smart grid by optimal dynamic multi-microgrid",



شکل (۱۱): مقایسه نتایج شبیه‌سازی در پنج مورد مطالعاتی

دشارژ خودروها در این پارکینگ‌ها، یک مدل دو لایه با در نظر گرفتن مشخصه متغیر سفرها برای خودروهای برقی و با هدف حداکثر کردن بازایی بار و بهبود شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع پیشنهاد شده است. در مسئله بررسی تأثیر مدیریت شارژ و دشارژ خودروها در پارکینگ‌ها بر جزیره‌سازی شبکه توزیع، مسئله جزیره‌سازی شبکه توزیع در لایه بیرونی و مسئله تغییر پارکینگ‌های مقصد در سفرها و تعداد خودروهای موجود در پارکینگ‌ها در لایه داخلی تعریف شده است. مدل پیشنهادی، هم‌زمان شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی را در نظر می‌گیرد. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن حرکت متغیر ناوگان خودروها بین پارکینگ‌ها می‌تواند مرزبندی جزایر را به صورت بهینه تعیین می‌کند. مدل پیشنهادی در پنج مورد مطالعاتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با تجزیه و تحلیل نتایج می‌توان نتیجه گرفت که اگر رانندگان خودروهای برقی به دلایلی مانند مشوق‌های در نظر گرفته شده توسط بهره‌بردار شبکه توزیع، پارکینگ مقصد خود را به نزدیک‌ترین پارکینگ متصل به شبکه الکتریکی تغییر دهند می‌توان با مدیریت شارژ و دشارژ خودروها، مقدار بیشتری از بارهای شبکه توزیع را بازایی کرد و تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشید. همچنین اگر امکان بارزایی در شبکه توزیع وجود داشته باشد، به دلیل استفاده حداکثری از ظرفیت منابع تولید پراکنده، بارهای بیشتری بازایی می‌شود و تاب‌آوری شبکه بهبود می‌یابد.

مراجع

- [1] Panteli, M., Trakas, D.N., Mancarella, P., and Hatzigiorgiou, N.D., "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies", Proceedings of the IEEE. Vol. 105(7): pp. 1202-1213, 2017
- [2] Izadi, M., Hosseinian, S.H., Dehghan, S., Fakharian, A., and Amjady, N., "A critical review on definitions, indices, and uncertainty characterization in resiliency-oriented operation of power systems", International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 31(1): pp. e12680, 2021

- Hourly Power Generation Scheduling", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 4(2): pp. 779-788, 2013
- [26] alizadeh, m., jafari, m., and shahabi, m., "Improving the resilience of active distribution networks by optimal charging/discharging management of electric vehicles in parking lots", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity. Vol. 10(2): pp. 57-74, 2021
- [27] Zhang, H., Moura, S.J., Hu, Z., and Song, Y., "PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 9(4): pp. 2595-2605, 2018
- [28] Zheng, Y., Xie, S., Hu, Z., Wang, J., and Kong, S., "The optimal configuration planning of energy hubs in urban integrated energy system using a two-layered optimization method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 123: pp. 106257, 2020
- [29] Ganguly, S. and Samajpati, D., "Distributed Generation Allocation on Radial Distribution Networks Under Uncertainties of Load and Generation Using Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Sustainable Energy. Vol. 6(3): pp. 688-697, 2015
- [30] Jannesar, M.R., Sedighi, A., Savaghebi, M., and Guerrero, J.M., "Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration", Applied Energy. Vol. 226: pp. 957-966, 2018
- [31] Yuan, H., Li, F., Wei, Y., and Zhu, J., "Novel Linearized Power Flow and Linearized OPF Models for Active Distribution Networks With Application in Distribution LMP", IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 9(1): pp. 438-448, 2018
- [32] Ding, T., Sun, K., Huang, C., Bie, Z., and Li, F., "Mixed-integer linear programming-based splitting strategies for power system islanding operation considering network connectivity", IEEE Systems Journal. Vol. 12(1): pp. 350-359, 2015
- [33] Ding, T., Lin, Y., Bie, Z., and Chen, C., "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration", Applied Energy. Vol. 199: pp. 205-216, 2017
- [34] Akbari, T. and Bina, M.T., "Linear approximated formulation of AC optimal power flow using binary discretisation", IET Generation, Transmission & Distribution. Vol. 10(5): pp. 1117-1123, 2016
- [35] Alizadeh, M., Jafari-Nokandi, M., and Amraee, T., "Multiobjective optimal setting for UFLS relays considering voltage deviation", International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 29(3): pp. e2770, 2019
- [36] Zhang, D., Fu, Z., and Zhang, L., "An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 118: pp. 105791, 2020
- [15] Xiong, J., Zhang, K., Guo, Y., and Su, W., "Investigate the Impacts of PEV Charging Facilities on Integrated Electric Distribution System and Electrified Transportation System", IEEE Transactions on Transportation Electrification. Vol. 1(2): pp. 178-187, 2015
- [16] Rezaee, S., Farjah, E., and Khorramdel, B., "Probabilistic Analysis of Plug-In Electric Vehicles Impact on Electrical Grid Through Homes and Parking Lots", IEEE Transactions on Sustainable Energy. Vol. 4(4): pp. 1024-1033, 2013
- [17] Amiri, A.b. and Ghayeni, M., "Improving Fast Charging Methods Using Genetic Algorithm and Coordination between Chargers in Fast Charging Station of Electric Vehicles in Order to Optimal Utilization of Power Capacity of Station", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. Vol. 16(1): pp. 21-29, 2019
- [18] Honarmand, M., Zakariazadeh, A., and Jadid, S., "Self-scheduling of electric vehicles in an intelligent parking lot using stochastic optimization", Journal of the Franklin Institute. Vol. 352(2): pp. 449-467, 2015
- [19] Mohammadi Landi, M., Mohammadi, M., and Rastegar, M., "Simultaneous determination of optimal capacity and charging profile of plug-in electric vehicle parking lots in distribution systems", Energy. Vol. 158: pp. 504-511, 2018
- [20] İ, Ş., Erdinç, O., Yener, B., Taşçıkaraoğlu, A., and Catalão, J.P.S., "Optimal Energy Management of EV Parking Lots Under Peak Load Reduction Based DR Programs Considering Uncertainty", IEEE Transactions on Sustainable Energy. Vol. 10(3): pp. 1034-1043, 2019
- [21] 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, Man, and Cybernetics: Systems. Vol. 49(9): pp. 1879-1892, 2019
- [22] Alizadeh, M., Jafari-Nokandi, M., and Shahabi, M., "Resiliency-oriented islanding of distribution network in the presence of charging stations for electric vehicles", International Transactions on Electrical Energy Systems. Vol. 30(12): pp. e12670, 2020
- [23] Kavousi-Fard, A., Niknam, T., and Fotuhi-Firuzabad, M., "Stochastic Reconfiguration and Optimal Coordination of V2G Plug-in Electric Vehicles Considering Correlated Wind Power Generation", IEEE Transactions on Sustainable Energy. Vol. 6(3): pp. 822-830, 2015
- [24] Kavousi-Fard, A. and Khodaei, A., "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids", Energy. Vol. 111: pp. 653-663, 2016
- [25] Khodayar, M.E., Wu, L., and Li, Z., "Electric Vehicle Mobility in Transmission-Constrained

ضمایم

فهرست علائم و اختصارات

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N_{ADG}	مجموعه شین‌های متصل به منابع تولید پراکنده
N_{CDG}	مجموعه شین‌های متصل به منابع تولید پیش‌رو
θ_{L_i}	مجموعه خطوط متصل به شین i
Ψ_l	مجموعه شین‌های دو سر خط l
N_{wt}	مجموعه شین‌های متصل به توربین‌های بادی
S_c	مجموعه مسیرهای متصل به گره ترافیکی c
B	مجموعه گره‌های ترافیکی
PL	مجموعه گره‌های ترافیکی دارای پارکینگ
N_{ev}	مجموعه ناوگان خودروها
n	اندیس توربین‌های بادی
m	اندیس منابع تولید پراکنده
i, j	اندیس گره‌های شبکه الکتریکی
l	اندیس خطوط شبکه الکتریکی
k, k'	اندیس جزایر الکتریکی
b, b', c, c'	اندیس گره‌های شبکه ترافیکی
s	اندیس مسیرهای شبکه ترافیکی
h	اندیس تعداد بخش‌ها در خطی‌سازی قید حداکثر توان خطوط
e	اندیس ناوگان خودروهای برقی

پارامترها

M	عدد بزرگ
H	تعداد بخش‌ها در خطی‌سازی حداکثر توان ظاهری خطوط
$P_{load, i, t}$	توان اکتیو مصرفی شین i در زمان t
$Q_{load, i}$	توان راکتیو مصرفی شین i در زمان t
$P_m^{DG, max}$	حداکثر توان اکتیو تولیدی منبع تولید پراکنده
$Q_m^{DG, min}$	حداقل توان راکتیو تولیدی منبع تولید پراکنده
$Q_m^{DG, max}$	حداکثر توان راکتیو تولیدی منبع تولید پراکنده
V_i^{max}, V_i^{min}	حداکثر و حداقل اندازه ولتاژ مجاز در شین i
δ_i^{max}	حداکثر زاویه ولتاژ مجاز در شین i
S_l^{max}	حداکثر توان ظاهری قابل تحمل خط l
$P_{n, t, \omega}^{w, prod}$	توان تولیدی توربین بادی n در زمان t و سناریو ω
$V_m^{DG, set}$	اندازه ولتاژ تعیین شده برای منبع پیش‌رو
$\delta_m^{DG, set}$	زاویه ولتاژ تعیین شده برای منبع پیش‌رو
$PR_{i, t}$	اولویت بار متصل به شین i در زمان t
π_ω	احتمال وقوع سناریوی ω
Adj_s	طول قوس ترافیکی s
$P_e^{ch, min}$	حداقل توان شارژ ناوگان خودروی برقی e

$P_e^{ch, max}$	حداکثر توان شارژ ناوگان خودروی برقی e
CAP_e^{max}	حداکثر ظرفیت باتری ناوگان خودروی برقی e
EC_e	انرژی مصرفی ناوگان e در هر مایل
DOD_e	عمق دشارژ باتری خودروی ناوگان e
$SOC_{e, i, \omega}^{ini}$	سطح شارژ اولیه باتری خودروی ناوگان e

متغیرها

a_i	متغیر باینری نشان‌دهنده بازیابی شین i
β_l	متغیر باینری نشان‌دهنده فعال بودن خط l
$\beta\beta_{l, k}$	متغیر باینری نشان‌دهنده وجود خط فعال l در جزیره k
$P_{i, t, \omega}^{load}$	توان اکتیو بازیابی شده در شین i در زمان t
$Q_{i, t, \omega}^{load}$	توان راکتیو بازیابی شده در شین i در زمان t
$P_{i, t, \omega}^{LC}$	مقدار بار حذف شده در گره i زمان t و سناریو ω
$P_{m, t, \omega}^{DG}$	توان اکتیو تولیدی منبع m در زمان t و سناریوی ω
$Q_{m, t, \omega}^{DG}$	توان راکتیو تولیدی منبع m در زمان t و سناریوی ω
$P_{n, t, \omega}^{wind}$	توان مورد استفاده توربین بادی n در زمان t و سناریوی ω
$V_{i, t, \omega}, \delta_{i, t, \omega}$	اندازه و زاویه ولتاژ شین i در زمان t و سناریوی ω
$P_{l, t, \omega}^{flow}$	توان اکتیو عبوری از خط l در زمان t و سناریوی ω
$Q_{l, t, \omega}^{flow}$	توان راکتیو عبوری از خط l در زمان t و سناریوی ω
$P_{l, t, \omega}^{z-flow}$	متغیر کمکی برای اعتبار روابط پخش بار
$Q_{l, t, \omega}^{z-flow}$	متغیر کمکی برای اعتبار روابط پخش بار
$P_{b, b', s}^{flow, traf}$	توان اکتیو عبوری از قوس ترافیکی s در شبکه الکتریکی معادل
$P_{b, b', c}^{DG, traf}$	توان تولیدی منبع شبکه فرضی در گره ترافیکی c
$P_{b, b', c}^{load, traf}$	بار شبکه فرضی در گره ترافیکی c و زوج مبدأ-مقصد b, b'
$U_{e, i, t, \omega}^{ch}$	متغیر باینری تعیین‌کننده وجود ناوگان e در حالت شارژ
$U_{e, i, t, \omega}^{disch}$	متغیر باینری تعیین‌کننده وجود ناوگان e در حالت دشارژ
$U_{e, i, t, \omega}^{idle}$	متغیر باینری تعیین‌کننده وجود ناوگان e در حالت غیرفعال
$U_{e, i, t}$	متغیر باینری نشان‌دهنده حضور ناوگان e در شین i در زمان t
$P_{e, i, t, \omega}^{ch}$	توان شارژ ناوگان e در زمان t و سناریوی ω
$P_{e, i, t, \omega}^{disch}$	توان دشارژ ناوگان e در زمان t و سناریوی ω
$SOC_{e, i, \omega}$	سطح شارژ ناوگان e در زمان t و سناریوی ω
$D_{b, b'}$	طول کوتاه‌ترین مسیر بین زوج گره‌های ترافیکی مبدأ-مقصد b, b'
$X_{b, b', s}$	متغیر نشان‌دهنده وجود قوس ترافیکی s در مسیر مبدأ-مقصد b, b'
$Z_{b, b'}$	متغیر باینری نشان‌دهنده تغییر مکان خودروها از مقصد b به b'

زیر نویس‌ها

-
- ¹ Plug-in Electric vehicles
 - ² High-Impact Low-Probability Incidents
 - ³ chance-constrained stochastic programming
 - ⁴ Distributed Generation
 - ⁵ Mixed-Integer Linear Programming
 - ⁶ Electric Vehicle Parking Lots
 - ⁷ Unscented Transformation
 - ⁸ State of Charge