

استفاده از تکنیک شارژ گسسته برای خودروهای برقی با هدف مسطح سازی پروفیل بار شبکه جهت کاهش دفعات کلیدزنی

میثم سعیدی راد^۱ اسماعیل رک رک^۲ محمود جورابیان^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- واحد خرم آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- خرم آباد- ایران
Saidi.meysam93@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده فنی مهندسی- واحد لرستان- دانشگاه لرستان- خرم آباد- لرستان- ایران
و دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
rokrok.e@lu.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- ایران
mjoorabian@scu.ac.ir

چکیده: از دیدگاه بهره‌برداری شبکه، عدم مدیریت صحیح خودروهای برقی در شبکه می‌تواند پروفیل بار شبکه را تغییر داده و موجب ایجاد قله‌ها و دره‌های متعددی در آن شوند که از دیدگاه بهره‌بردار شبکه نیز مناسب نمی‌باشد. در این مقاله، یک استراتژی شارژ هوشمند که در آن با توجه به اطلاعات ثبت شده از رانندگان مانند طول مسیر سفر قبلی، طول مسیر سفر بعدی، زمان ورود و زمان خروج خودرو و با هدف کاهش هزینه‌های روزانه و همچنین کاهش پیک بار شبکه برای ادغام هرچه بهتر خودروهای برقی در شبکه ارائه می‌شود. برجستگی‌ها و نقاط شاخص مقاله شامل بررسی حضور پارکینگ‌های شارژ در تامین انرژی به‌جای توسعه ترانسفورمرهای قدرت و بررسی پیامدهای مثبت به‌کارگیری شارژ هوشمند گسسته خودروهای برقی، جهت مسطح سازی پروفیل بار شبکه و کاهش دفعات سوئیچینگ و همچنین در نظریه برنامه زمانبندی شارژ خودروهای برقی در سطح نفوذ مختلف خودروهای برقی است که توزیع نرمالی برای حالات کنسلی یا حضور تمام مشترکین در ضریب رضایتمندی یا ضریب هزینه‌شان در نظر گرفته شده است. همچنین دو مدل شارژ هوشمند که با هدف کمینه سازی هزینه کل روزانه و نسبت پیک بار به متوسط آن جهت بررسی اثرات شارژ خودروی برقی از دیدگاه اقتصادی و فنی ارائه شده است. همچنین شارژ سریع و کند دو روش شارژ متفاوتی است که به همراه پارکینگ‌های شارژ و نوع شارژ‌های خانگی نیز برای این موارد بررسی خواهد شد. در این پژوهش روشی برای مسطح سازی پروفیل بار شبکه معرفی و تأثیر سطح نفوذ خودروهای برقی در پروفیل بار شبکه بررسی و نتایج مثبت حاصل شد. با انجام شارژ در ساعات اولیه از ایجاد پیک بار جلوگیری شد و همچنین از ایجاد آسیب به شبکه جلوگیری به عمل آمد. جهت شبیه سازی‌ها از یک شبکه ۳۷ با سه توزیع استفاده شده است که در آن دو روش فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش از جعبه ابزارهای قدرتمند YALMIP استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به‌طور موثری در کاهش تعداد دفعات کلیدزنی و مسطح سازی پروفایل بار عمل خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: پارکینگ‌های شارژ، شارژ‌های خانگی، شارژ سریع و کند، کمینه سازی نسبت پیک بار، مسطح سازی پروفیل بار
نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل رک رک

نشانی نویسنده‌ی مسئول: خرم آباد- کیلومتر ۵ جاده خرم آباد به بروجرد- دانشگاه لرستان- دانشکده فنی و مهندسی- گروه قدرت

۱- مقدمه

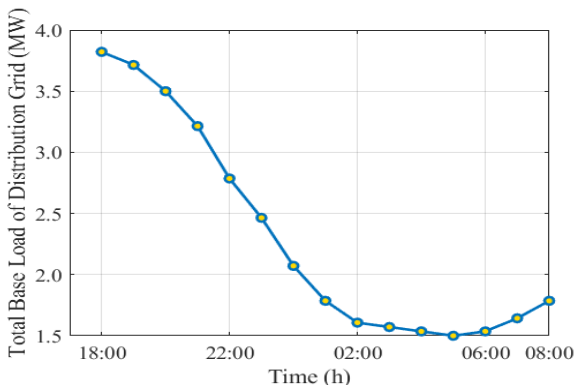
که در آن دو تابع تک هدفه به طور مجزا بررسی شده است. تابع اول مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌های شارژ و تابع دوم مربوط به مسطح سازی پروفیل بار ذکر شده است و نتایج به دست آمده از دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. در این مرجع فرض شده است که خودروها به طور کامل شارژ نشده؛ بلکه بر پایه سطح شارژ اولیه و مسافت سفرهای بعدی شارژ شوند. مساله در سطح نفوذهای مختلف خودروی برقی بررسی شده و با یکدیگر مقایسه شده است. در [۱۰] به نقش بارز پارکینگ‌های شارژ در شبکه‌های هوشمند بر پایه تولیدات پراکنده تأکید شده است. در این پژوهش فرض شده است که توان خروجی پارکینگ دارای عدم قطعیت باشد و در این راستا مدلی برای افزایش دقت ارائه شده است. در [۱۱] ادغام ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی با برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته است که در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی چند هدفه در آمده است. در [۱۲] به چالش‌های مربوط به تعیین ظرفیت بهینه‌ی ایستگاه شارژ خودروی برقی پرداخته شده است که بر پایه مشخص‌سازی بار شارژ سریع خودروها توسط تکنیک مدل‌سازی مارکوف می‌باشد. تعداد شارژها و فضای انتظار ایستگاه شارژ سریع نیز به تواما بهینه شده است تا حداکثر سود ایستگاه حاصل شود. در [۱۳] مدل منعطف برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در قالب روش دینامیکی دو مرحله‌ای درآمده است. تأثیر شارژ هماهنگ خودروهای برقی در پارکینگ‌های شارژ و میزان تناقض میان اهداف صاحب پارکینگ و شرکت بهره‌بردار شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۴] اقدام به دسته‌بندی روش‌های مدیریت شارژ از دیدگاه ارکان مختلف شبکه شده است. تمامی روش‌ها در سه گروه روش‌های بر پایه اهداف و منافع بهره‌بردار شبکه، روش‌های بر پایه منافع مشترکین شبکه و روش‌های بر پایه منافع تجمیع‌کنندگان جای داده شده‌اند. در [۱۵] اقدام به دسته بندی روش‌های شارژ هوشمند خودروی برقی در شبکه‌های هوشمند شده است. همچنین استراتژی‌های شارژ هماهنگ یا ناهماهنگ و سلسله‌مراتبی در شبکه‌های هوشمند در این پژوهش بررسی شده است. در مرجع [۱۶] یک الگوریتم زمان بندی هماهنگ برای شارژ و تخلیه خودروهای الکتریکی را پیشنهاد تا ادغام تولید بار را به حداکثر برساند و هزینه شارژ را برای دارندگان خودروهای الکتریکی [۱۷] در راه اندازی وسائل نقلیه به شبکه به حداقل برساند. از دیدگاه بهره‌بردار شبکه، عدم مدیریت صحیح خودروهای برقی در شبکه می‌تواند پروفیل بار شبکه [۱۸] را تغییر داده و موجب ایجاد قله‌ها و دره‌های متعددی در آن شوند که از دیدگاه بهره‌بردار شبکه نیز مناسب نمی‌باشد. بنابراین در این پژوهش روشی ارائه می‌شود که در آن با توجه به اطلاعات ثبت شده از رانندگان مانند طول مسیر سفر قبلی، طول مسیر سفر بعدی، زمان ورود و زمان خروج خودرو و... سطح شارژ اولیه و سطح شارژ نهایی مطلوب خودروهای برقی و همچنین نحوه شارژ و دشارژ این خودروها مشخص می‌شود و بنابراین به این روش هوشمند گفته می‌شود. هدف از شارژ و دشارژ خودروهای برقی کاهش هزینه

با توجه به رشد نگرانی‌های مربوط به مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تلاش‌های فراوانی برای توسعه خودروهای برقی با توانایی اتصال به شبکه در سال‌های اخیر صورت گرفته است. خودروهای برقی منجر به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی شده و به عنوان جایگزین موثری برای خودروهای درون‌سوز سنتی محسوب می‌شوند. با این حال، افزایش نفوذ خودروهای برقی، به‌عنوان بار اضافی در شبکه‌های برق تلقی می‌شود که مساله طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند [۱]. از میان روش‌های استراتژی شارژ خودروهای برقی می‌توان به روش‌هایی از قبیل استراتژی شارژ ناهماهنگ، الگوریتم توزیع یافته پیشرفته، شارژ تطبیقی، شارژ تطبیقی پیشرفته، شارژ لحظه‌ای متمرکز ایده آل، شارژ متمرکز کمینه سازی قیمت و شارژ متمرکز کمینه سازی واریانس بار اشاره کرد. [۲] بنابراین برنامه‌ریزی توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ سریع از اهمیت والایی در گسترش سطح نفوذ خودروهای برقی برخوردار است و پیش بینی می‌شود که میزان سرمایه‌گذاری بر احداث ایستگاه‌های سرراهی خودروهای برقی دائماً رشد نماید [۳]. در تحقیقات متعددی نشان داده شده است که افزایش بی‌رویه خودروهای برقی می‌تواند اثرات و پیامدهای منفی در شبکه توزیع به ارمغان آورد. برخی پیامدهای منفی شامل اضافه بار، نوسانات فرکانس شبکه و افزایش تلفات شبکه می‌باشد. البته این پیامدهای منفی در صورتی رخ خواهد داد که شارژ خودروها به صورت مناسب و هماهنگ صورت نگیرد [۴]. محققین گذشته نیز دستاوردهای مطلوبی را استخراج نموده‌اند که با پژوهش در این زمینه‌ها سعی در به‌کارگیری این دانش‌ها شده است [۲۲،۵]. روش‌های بر پایه شبکه هوشمند همواره در صدد مسطح‌سازی پروفیل بار، تثبیت فرکانس یا تنظیم ولتاژ برآمده‌اند. [۶] بیشتر کارهای موجود در زمینه مدیریت شارژ، نرخ شارژ خودروی برقی را به صورت پیوسته فرض کرده‌اند و متغیر تصمیم‌گیری متناظر آن به صورت عددی پیوسته فرض شده است که این فرضیه می‌تواند بر زمان شارژ و سرعت شارژ خودرو اثرگذار باشد. چنین مسائلی نیز به صورت برنامه‌ی خطی، یا برنامه‌ی ربعی محدب در بسیاری از موارد در می‌آید و می‌تواند به صورت متمرکز یا غیرمتمرکز نیز مساله حل گردد. در [۷] نرخ شارژ گسسته‌ی قابل تعمیم در نظر گرفته شده است و مساله‌ی بهینه‌سازی سعی در یافتن لحظه‌ی بهینه‌ی شروع شارژ هر یک از خودروها را داشته است. به طور خاص از یک الگوریتم تصادفی غیرمتمرکز در طراحی استفاده شده است که با روش‌های بر پایه تکرار به حل مساله پرداخته است و همگرایی این روش نیز بررسی شده است. در [۸] برای جلوگیری از اضافه‌بار ترانسفورمر شبکه توزیع فرض شده است، انواع شرایط بارگذاری شبکه بررسی شده است و یک نقطه‌ی بهینه برای روش متمرکز ارائه شده است اما این روش از دیدگاه محاسباتی بسیار سنگین بوده و ضمانتی برای یافتن پاسخ بهینه ارائه نمی‌دهد. در [۹] مساله شارژ هوشمند خودروهای برقی بیان شده است

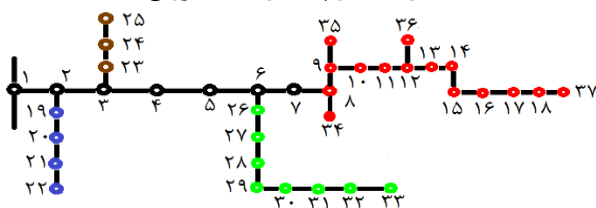
مطالعاتی گوناگونی در نظر گرفته شده است تا ابعاد فنی و اقتصادی مساله روشن گردد.

۲- سیستم تحت مطالعه

در این پژوهش یک شبکه توزیع در نظر گرفته شده است که دارای ۳۷ گره بار می‌باشد. دیاگرام تک خطی آن در شکل (۵) نشان داده شده است. تمامی گره‌ها نیز مستقیماً توسط ترانسفرمر توزیع به پست شبکه متصل شده‌اند. اطلاعات شبکه در [۲۶، ۹] موجود است. نرخ شارژ خودروهای برقی نیز برابر با ۳/۳ کیلووات در نظر گرفته شده است. فرض شده است که تمامی خودروها در ساعات ۱۸:۰۰ غروب به شبکه اتصال یافته‌اند و در ساعت ۸:۰۰ صبح روز بعد از آن خارج خواهند شد. همچنین فرض شده است که خودروها در زمان اتصال به شبکه فاقد هر گونه شارژی باشند و در زمان خروج از شبکه دارای شارژ کامل باشند. زمان شارژ کامل هر خودرو ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. بر پایه توپولوژی شبکه مجموعه باس‌های بار شبکه خود به M زیرمجموعه تقسیم می‌شوند که نماد N است اگر خودروی n متصل به باس M شبکه باشد [۲۷]. در این مقاله فرض شده است که هماهنگ کننده‌ی شارژ خودروی برقی قادر است اطلاعات زیر را در آغاز افق مطالعاتی دریافت نماید و همچنین در این پژوهش به جای نرخ ثابت از چند نرخ معین استفاده شده است.



شکل (۴): بار پایه کل شبکه توزیع



شکل (۵): شماتیک شبکه ۳۷ باس مورد بررسی در مقاله

۳- فرمولاسیون شارژ خودرو و نرخ توان گسسته

شبکه

برای اینکه منافع و انتظارات مشترکین خودروهای برقی در مساله گنجانده شود، تامین میزان شارژ مورد نیاز هر خودروی برقی در قالب قید مرزی مطابق رابطه (۱) در مساله لحاظ می‌گردد [۱۹].

های روزانه و همچنین کاهش پیک بار شبکه برای ادغام هر چه بهتر خودروهای برقی در شبکه است. به‌طور مختصر می‌توان گفت، گسسته سازی نرخ شارژ خودروهای هوشمند منجر به نزدیکی بیشتر مساله به دنیای واقعی شده است چون در عمل ایستگاه‌های شارژ واقعی قادر به تغییر نرخ شارژ به‌صورت پیوسته نیستند و تنها با گام‌های معینی این کار را به‌صورت گسسته انجام می‌دهند [۱۹]. از سوی دیگر تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ خودروی برقی می‌تواند، راه را برای بهره برداری اقتصادی ایستگاه‌های شارژ روشن سازد [۲۰]. ظرفیت ایستگاه شارژ هر ناحیه باید بر پایه عوامل متعددی از قبیل تعداد خودروهای مراجعه کننده به پارکینگ، نرخ شارژ مورد نظر خودروها، میزان انرژی مورد نیاز آنها برای شارژ، محدودیت‌های شبکه توزیع، محدودیت‌های بودجه توسعه ایستگاه شارژ و... در تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ می‌تواند نقش داشته باشد. در این مقاله تمرکز بر پارکینگ‌هایی است که شارژ خودروی برقی در آنها صورت می‌گیرد. چون قیمت برق در ساعات روز بالا است، از شارژ خودروهای برقی تا مقدار بیشینه‌ی سطح شارژ آنها خودداری می‌شود و شارژ بر پایه سفر بعدی خودرو باید تعیین شود. بنابراین، انرژی مورد نیاز خودروی برقی بر پایه سطح شارژ اولیه، زمان خروج مورد نظر (که به ترجیح صاحب خودرو بستگی دارد)، مسافت روزانه طی شده، سفر پیموده شده در هر سفر و مسافت سفر بعدی مشخص می‌شود. همچنین یک استراتژی شارژ هوشمند با در نظرگیری قابلیت شارژ از شبکه به خودرو و دشارژ از خودرو به شبکه V2G ارائه شده است. که هدف آن ادغام بهینه‌ی خودروهای برقی در وضعیت کنونی شبکه است. نکته‌ی قابل توجه این است که پارکینگ‌های خانگی در زمان شب منجر به پر کردن دره (یا قعر) بار شده و در ساعات روز پارکینگ‌های عمومی می‌توانند منجر به کاهش پیک (یا قله) بار شوند تا پروفیل مسطحی از بار به‌دست آید. یکی از ضرورت‌های انجام این پژوهش را می‌توان دستیابی به مقدار بیشینه سطح نفوذ خودروهای برقی در شبکه قدرت و یک روش تحلیلی بیان نمود. سهم اصلی نوآوری در این مقاله را نیز می‌توان تأثیر حداکثر نفوذ خودروی برقی، هزینه روزانه هماهنگ‌سازی شارژ و پروفیل بار شبکه با در نظر گرفتن شارژ سریع و کند اشاره کرد. همچنین در این مقاله تمرکز بر پارکینگ خودروهای برقی است که ماشین‌ها در طول روز در آن پارک می‌کنند. این پارکینگ‌ها در نواحی صنعتی، تجاری و مجتمع‌های شامل بخش‌های صنعتی و تجاری قرار دارند. در ادامه این مقاله رفتار شارژ خودروهای برقی تحت مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار داده خواهد شد تا درک بهتری از کارایی روش پیشنهادی حاصل گردد. در ابتدا مساله مدیریت شارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی در یک شبکه توزیع ارائه می‌گردد و تأثیر در نظرگیری عوامل متعددی در آن بررسی می‌گردد. سپس بحث تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ مطرح می‌شود. در ادامه به بیان فرضیات و داده‌های معلوم مدل پرداخته خواهد شد. سپس نتایج شبیه سازی این روش در نرم افزار متلب ارائه خواهد شد. برای درک بهتر کارایی روش، طرح‌های

تر تنها رابطه‌ی ۴ هدفش مسطح‌سازی پروفیل بار شبکه با رعایت تامین برق مشترکین و ظرفیت ترانسفرمر های توزیع که نشان می‌دهد در هر لحظه چه تعداد خودرو شارژ باشند. اما هیچ توجهی به روند لحظه‌ای شارژ خودروها نشده است. در واقع دفعات روشن و خاموشی خودروها، یا قطع و وصل شارژ آنها در مساله لحاظ نشده است.

نکته دوم: اگر محدودیتی برای دفعات شارژ و دشارژ لحاظ نگردد، عمر مفید ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی کاسته خواهد شد و در عمل موجب ایجاد فراجش‌های متنوعی در مدارات الکترونیکی این دستگاه‌ها شده و مدارات آنها را با مشکلات فنی و اقتصادی متعددی مواجه خواهد کرد. در این صورت هزینه‌های مازادی برای تعویض ایستگاه‌های شارژ فرسوده و نو باید لحاظ نمود.

نکته سوم اینکه در اکثر موارد مالکان خودرو نیز ترجیح می‌دهند که تعداد سوئیچینگ آنها تا حد امکان کمینه باشد. در واقع سوئیچینگ دو مشکل دیگر دارد. اول اینکه منجر به فرسودگی باتری خودروها شده و دوم موجب ایجاد اسپایک‌هایی در باس‌های بار می‌شود که پایداری ترانسفرمر توزیع را با اختلال مواجه می‌کند. به‌طور کلی دو راهکار برای رفع این مشکل در این زمینه می‌توان اجرا نمود:

• راهکار اول اینکه به مساله‌ی ۴ قیدی اضافه گردد که تعداد دفعات کلیدزنی کل را محدود به عدد معینی سازد که همیشه تعیین نادرست این عدد یا می‌تواند منجر به واگرایی الگوریتم برآمده از غیرموجه بودن فضای جواب‌ها (به اصطلاح infeasible شدن فضای جواب‌ها) گردد و یا اینکه منجر به کمترین تعداد کلیدزنی‌ها نشود.

• راهکار دوم این است که یک مساله‌ی بهینه‌سازی جدا (به نام مساله پیرو) ایجاد شود که تابع هدف آن کمینه‌سازی تعداد کلیدزنی‌های شبکه بوده و قیود مرزی همان قیود رابطه ۴ بوده و تنها یک شرط جدید بدان اضافه گردد. این شرط جدید که در قالب رابطه ۵ نوشته می‌شود این است که در هر لحظه تعداد خودروهای در حال شارژ مساله پیرو برابر با پاسخ بهینه تعداد خودروهای در حال شارژ مساله ۴ (مساله پیشرو) شود تا پروفیل بار شبکه هیچ تغییر نکند. در این مقاله از راه‌حل دوم استفاده شده است.

۴- ارائه ساختار کلی بهینه‌سازی و روش حل مسئله با هدف مسطح‌سازی بار و کاهش تعداد دفعات کلیدزنی

همانطور که اشاره شد روش حل مسئله به‌کارگیری روش پیشرو-پیرو است که در ادامه درباره ساختار کلی بهینه‌سازی و روش حل

$$(1) \quad \sum_{t=i_n}^{t_n^d} u_{n,t} = e_n$$

این معادله تضمین می‌کند که به هر خودروی برقی زمان کافی برای شارژ اختصاص داده شده است تا به مقدار دلخواه شارژ خود رسیده باشد. در مواردی که نرخ شارژ پیوسته بود همیشه مقدار انرژی مورد نیاز خودروها در قالب کیلووات‌ساعت بیان می‌شد چون نرخ شارژ ثابت نبود و نمی‌توان به‌طور قطعی گفت که چند ساعت برای تامین این انرژی بسنده می‌کند. اما در شارژ گسسته، با فرض تک نرخی بودن توان ایستگاه‌های شارژ و غیرقابل تغییر بودن آن دیگر نیازی به بیان انرژی در قالب کیلووات‌ساعت نیست چون نرخ شارژ معلوم است، براحتی زمان شارژ با تقسیم کردن کیلووات ساعت مورد نیاز خودرو بر نرخ شارژ ایستگاه به‌صورت $t_n^{req} = e_n / r_0$ به‌دست می‌آید.

e_n کیلو وات‌ساعت مورد نیاز و r_0 نرخ شارژ ایستگاه می‌باشد.

به‌منظور جلوگیری از اضافه بار ترانسفرمر در شبکه توزیع که به هر باس متصل شده است در رابطه (۲) قید زیر اعمال می‌گردد:

$$(2) \quad r_0 \sum_{n \in N_m} u_{n,t} + D_m(t) \leq C_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau$$

که در این رابطه C_m ظرفیت ترانسفرمر توزیع باس m است. با عملیات ریاضی مختصر و پس از ساده‌سازی می‌توان رابطه (۲) را (که سمت راست آن ظرفیت نامی ترانسفرمر بود) به‌صورت معادله (۳) که سمت راست آن شاخصی از ظرفیت آزاد ترانسفرمر است بازنویسی کرد:

$$(3) \quad \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_{m,t}, \quad \forall m \in M, t \in \tau$$

که در این رابطه $c_{m,t} = \left[\frac{C_m - D_m(t)}{r_0} \right]$ برابر با نسبت ظرفیت آزاد خط بر نرخ شارژ ایستگاه است که به‌صورت عبارت داخل براکت محاسبه شده است. بنابراین مدل شارژ هماهنگ خودروی برقی با نرخ توان گسسته‌ی به‌صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$(4) \quad OCDC : \quad \min_U F(U)$$

$$s.t. \quad \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau$$

$$, \quad \sum_{t=i_n}^{t_n^d} u_{n,t} = e_n$$

$$u_{n,t} \in \{0,1\}$$

در مورد رابطه‌ی ۴ ذکر چند نکته ضروری به نظر می‌رسد:

- نکته اول اینکه همانطور که مشخص شد، رابطه‌ی فوق تنها منافع سه نهاد را در نظر گرفته است که بر این پایه‌اند مشترکین، نهاد هماهنگ‌سازی شارژ و شرکت بهره‌برداری شبکه توزیع. اما هیچ‌گونه توجهی به سلامت و امنیت ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی نشده است. به بیان علمی

مسالهی پیرو شارژ هماهنگ خودروی برقی با شارژ گسسته، که با هدف کمینه‌سازی سوئیچینگ خودروهای برقی است به‌صورت رابطه (۶) زیر نشان داده می‌شود:

$$SOCD: \min_U G(U) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (u_{n,t} - u_{n,t+1})^2 \quad (6)$$

$$s.t. U \in U^*$$

$$s.t. \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \forall m \in M, t \in \tau$$

$$\sum_{t=t_n^i}^{t_n^f} u_{n,t} = e_n$$

$$\sum_{n=1}^{N_{EV}} u_{n,t} = v_t^*$$

$$u_{n,t} \in \{0,1\}$$

در اینجا ذکر چند نکته‌ی دیگر ضروری به نظر می‌رسد که باید بدان پرداخته شود:

- نکته ۱: گاهی امکان دارد، رابطه (۵) نتواند بهبودی برای ایستگاه‌های شارژ ایجاد کند. در چنین مواردی اولویت و تمرکز با همان جواب مسالهی پیشرو **OCDC** است. به راستی اولویت کمینه‌سازی قطع و وصل از اهمیت کمتری نسبت به اولویت مسطح‌سازی بار برخوردار است. چون قطع و وصل هیچ‌گونه هزینه‌ای مزایای در مساله وارد نمی‌کند. برای درک این مساله به شکل ۲ توجه نمایید. به هیچ‌گونه نمی‌توان سمت چپ شکل ۲ را به‌گونه‌ای تغییر داد که بدون تغییر پروفیل بار، امکان کاهش تعداد دفعات کلیدزنی باشد. شکل سمت راست، همان پروفیل بار را داشته و تعداد کلیدزنی‌های آن نیز برابر حالت سمت چپ است. پس اولویت با همان سمت چپ خواهد بود.

- نکته ۲: مسالهی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۴ یک مساله برنامه ریزی عدد صحیح مرتبه‌ی دوم است. می‌توان با اعمال روش‌های تغییر (تعریف متغیرهای اضافی) شکل مساله را خطی سازی کرده و فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح از آن رو کرد که به‌سادگی قابل حل با جعبه‌ابزارهای موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی شود. در ادامه روند خطی سازی و تغییر فرم این مساله ارائه خواهد شد.

تعداد کل در حال شارژ	۲	۰	۱	۱	۲	۰	۱	۱
خودرو ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
خودرو ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زمان	t_1	t_2	t_3	t_4	t_1	t_2	t_3	t_4

شکل (۲): تأثیر اعمال مساله پیرو (کمینه‌سازی تعداد سوئیچینگ) به

مساله پیشرو

مسئله توضیح داده خواهد شد. فرض کنید که U^* نمایانگر مجموعه جواب‌های بهینه‌ی مساله پیشرو (رابطه ۴) باشد که صرفاً با هدف مسطح‌سازی پروفیل بار تجمیعی شبکه، بهینه‌سازی شده است. در رابطه (۵) تعداد خودروهای در حال شارژ در هر لحظه را می‌توان با V_n^t نمایش داد که به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{n=1}^N u_{n,t} = v_n^t, u \in U^* \quad (5)$$

حال نکته این است که باید راه حلی جستجو کرد که با تعداد خودروی مشخص متصل به شبکه در هر لحظه، بتوان طوری زمان شارژ خودروها را جا به جا کرد که هر خودرو با کمترین سوئیچینگ شارژ شود و در عین حال پروفیل بار تغییر نکند. با دقت در شکل ۱ همانطور که مشخص است، دو خودروی برقی در شبکه وجود دارند که یکی با رنگ آبی و دیگری با رنگ قرمز اقدام با شارژ در بازه‌ی زمانی ۴ ساعته کرده‌اند و هر خودروی ۲ ساعت برای شارژ خود نیاز داشته است. در سمت چپ دیواره این شکل مشاهده می‌شود که هر دو خودرو بخوبی دو ساعت را صرف شارژ خود کرده‌اند اما برای این شارژ بیش از دو بار روشن و خاموش شده‌اند (به‌راستی گپی بین زمان شارژ آن‌ها برپا شده است). برآیند شارژ هر دو خودروی آبی و قرمز منجر به وضعیتی شده است که در هر لحظه تنها یک خودرو در حال شارژ است. حال بدون اینکه در وضعیت پروفیل بار تغییری ایجاد شود (یعنی پروفیل بار شبکه در همان وضعیت شارژ ۱ خودرو در بازه‌ی زمانی باقی بماند)، براحتمی می‌توان زمان شارژ دو خودروی آبی و قرمز را جا به جا کرد و آن را به‌صورت سمت راست شکل ۱ درآورد. بخوبی مشخص می‌شود که بدون تغییری در پروفیل بار، تعداد دفعات خاموشی و روشنی خودروها کاهش پیدا کرده و به‌عبارت دیگر شارژ به‌صورت یکنواخت انجام شد.

تعداد کل در حال شارژ	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
خودرو ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
خودرو ۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زمان	t_1	t_2	t_3	t_4	t_1	t_2	t_3	t_4

شکل (۱): تأثیر اعمال مساله پیرو (کمینه‌سازی تعداد سوئیچینگ) به

مساله پیشرو

و دیگری یک پاسخ غیرقابل قبول $y_n^t = z_n^t = 1$. به منظور جلوگیری از همگرایی الگوریتم به این پاسخ غیرقابل قبول شرط مرزی دیگری نیز باید به مساله اعمال شود. این شرط بیان می‌دارد که خاموشی و روشنی یک خودرو نمی‌تواند به‌طور همزمان رخ دهد. بنابراین در رابطه (۱۰) داریم:

$$y_n^t + z_n^t \leq 1, \quad \forall n, t \quad (10)$$

در رابطه (۱۱) با اعمال این شرط دیگر امکان ندارد مساله به پاسخ غیرقابل قبول زیر همگرا شود:

$$y_n^t = z_n^t = 1 \quad (11)$$

تا اینجا تعریف دو متغیر کمکی روشنی و خاموشی بخوبی در قالب روابط ۱۰ و ۱۱ پیاده‌سازی گردید. حال نوبت به تغییر فرم تابع هدف مساله نیز می‌رسد. همانطور که در رابطه‌ی ۴ مشخص شده‌است، تابع هدف کمینه‌سازی تعداد سوئیچینگ‌ها یا تعداد روشن و خاموشی‌ها بوده است که به صورت

$$\min_U G(U) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (u_{n,t} - u_{n,t+1})^2$$

علت به‌کارگیری توان ۲، جلوگیری از منفی شدن تابع هدف و جمع جبری اعداد مثبت و منفی $(u_{n,t} - u_{n,t+1})$ بوده است. همچنین ضریب $1/2$ نیز به دلیل تکراری بودن جواب $(u_{n,t+1} - u_{n,t})^2$ و $(u_{n,t} - u_{n,t+1})^2$ بوده‌است. اما اکنون که متغیر روشنی و خاموشی تعریف شده است، می‌توان مجموع تعداد کلیدزنی‌ها را به صورت

$$\min_U G(U) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (y_n^t + z_n^t)$$

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مساله ۴ به صورت رابطه‌ی ۱۲ تبدیل خواهد شد. بنابراین داریم:

$$SOCCD: \quad \min_U G(U) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (y_n^t + z_n^t) \quad (12)$$

$$s.t. \quad U \in U^*$$

$$s.t. \quad \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau$$

$$\sum_{t=i_n}^{t_n^d} u_{n,t} = e_n$$

$$\sum_{n=1}^{N_{EV}} u_{n,t} = v_t^*$$

$$y_n^t - z_n^t = u_n^{t+1} - u_n^t, \quad \forall n, t$$

$$y_n^t + z_n^t \leq 1, \quad \forall n, t$$

$$y_n^t, z_n^t, u_n^t \in \{0, 1\}$$

به منظور تغییر فرم مساله‌ی ۵ به شکل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، دو متغیر که بیانگر وضعیت روشنی و وضعیت خاموشی هر یک از یک از خودروهای برقی هستند را به ترتیب به صورت y_n^t و z_n^t تعریف می‌کنیم که مفهوم هر یک از این دو متغیر در قالب رابطه ۷ و ۸ نمایش داده شده‌است:

$$y_n^t = \begin{cases} 1 & \text{if } : u_{n,t+1} - u_{n,t} = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$z_n^t = \begin{cases} 1 & \text{if } : u_{n,t+1} - u_{n,t} = -1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

به راستی رابطه (۷) نشان می‌دهد که اگر وضعیت شارژ یک خودرو از حالت صفر به یک دگرگون شد، یا به زبان ریاضی $(u_{n,t+1} - u_{n,t} = 1)$ شد، آنگاه یعنی شارژ خودرو روشن شده است و y_n^t برابر یک خواهد بود و در سایر موارد هیچ‌گونه روشنی رخ نداده است. همچنین رابطه‌ی (۸) نشان می‌دهد که اگر وضعیت شارژ یک خودرو از حالت یک به صفر دگرگون شد، یا به زبان ریاضی $(u_{n,t+1} - u_{n,t} = -1)$ آنگاه یعنی شارژ خودرو قطع شده است و متغیر z_n^t خاموشی برابر یک خواهد شد و در سایر موارد هیچ‌گونه خاموشی رخ نمی‌دهد.

به سادگی می‌توان مفاهیم تعریف شده در رابطه‌های (۷) و (۸) را به زبان قیود مرزی بهینه‌سازی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$y_n^t - z_n^t = u_n^{t+1} - u_n^t, \quad \forall n, t \quad (9)$$

$$y_n^t, z_n^t, u_n^t \in \{0, 1\}$$

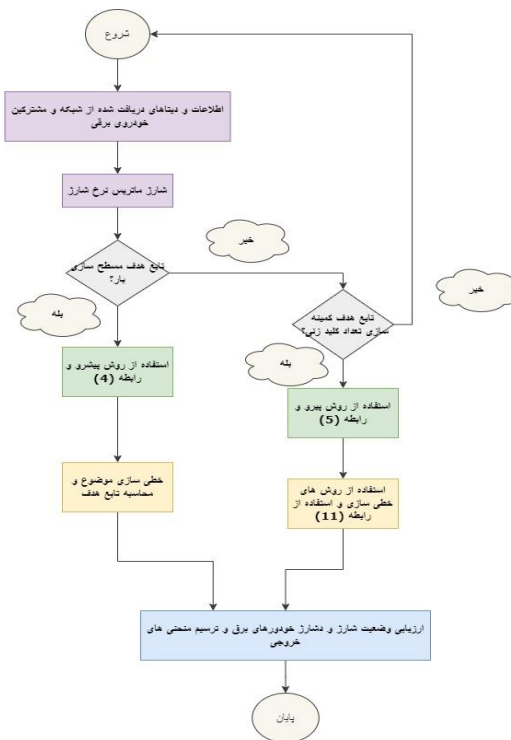
رابطه‌ی (۹) بخوبی و سادگی ارتباط بین سه متغیر وضعیت شارژ، وضعیت روشنی و خاموشی را نشان می‌دهد. به‌طور مثال فرض کنید وضعیت شارژ از صفر به یک تغییر کند $(u_{n,t+1} - u_{n,t} = 1)$ ، در این صورت $y_n^t - z_n^t = 1$ خواهد شد. چون هر دو متغیر روشنی و خاموشی عدد باینری هستند، تنها زمانی این معادله صدق می‌شود که $y_n^t = 1$ و $z_n^t = 0$ شود. از سوی دیگر وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن خودرو از وضعیت شارژ ۱ به صفر رسید باشد در این صورت $(u_{n,t+1} - u_{n,t} = -1)$ خواهد بود و در نتیجه $y_n^t - z_n^t = -1$ خواهد شد. به‌طور مشابه چون متغیرهای روشنی و خاموشی اعداد باینری هستند، تنها پاسخ این معادله $y_n^t = 0$ و $z_n^t = 1$ خواهد بود. تنها یک حالت باقی می‌ماند که در آن خودرو هیچ تغییر وضعیتی ندهد. در این حالت عبارت تغییر وضعیت $(u_{n,t+1} - u_{n,t} = 0)$ خواهد شد و خواهیم داشت: $y_n^t - z_n^t = 0$. مشاهده می‌شود که این مساله به دو پاسخ خواهد رسید یک پاسخ قابل قبول $y_n^t = z_n^t = 0$

خودروهای بیشتری نمی‌توانند نفوذ کنند چون ترانسفرمرها با اضافه بار مواجه می‌شوند. [۲۳,۲۱] بنابراین نیاز به توسعه شبکه‌های توزیع است. فرض می‌کنیم که شبکه‌ای توزیع کنونی، امکانی برای توسعه ترانسفرمرهای توزیع به ظرفیت‌های بالاتر نداشته باشد. در این صورت تنها راهی که باقی می‌ماند، تأسیس یک پارکینگ عمومی شارژ خودروهای برقی است که همیشه در نواحی پرتردد مانند نواحی تجاری قابل اجرا است. در این پژوهش به منظور تسهیل افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی اقدام به توسعه شبکه توزیع از طریق طراحی یک ایستگاه شارژ خودروهای برقی در نواحی تجاری شده‌است که در ادامه به جزئیات آن پرداخته خواهد شد.

۵- مدل ایستگاه‌های شارژ سریع

همیشه توسعه ایستگاه‌های شارژ در دو قالب مجزا صورت می‌گیرد که یکی مربوط به تعیین مکان بهینه و دیگری مربوط به تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ است [۲۴]. در این پژوهش چون تمامی باس‌های شبکه مسکونی هستند (و امکان توسعه ترانسفرمر توزیع آنها وجود ندارد) و تنها یک باس تجاری وجود دارد، مکان نصب ایستگاه شارژ در باس تجاری فرض می‌شود. اما مساله‌ی تعیین ظرفیت بهینه‌ی ایستگاه شارژ که در قالب مدل بهینه‌سازی ارائه خواهد شد. [۲۵] طراحی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی به معنای مشخص‌سازی بیشترین ظرفیت نامی نصب شده‌ی ایستگاه‌ها است به طوری که سود سرمایه‌گذاری بیشینه شود و در عین حال تعداد شارژرها s و فضای مورد انتظار v از مقادیر مجاز خود تجاوز نکند. منظور از سود بهره برداری ایستگاه شارژ خودروی برقی اختلاف میان درآمد ایستگاه و هزینه‌های آن است. در ادامه لیست درآمدها و هزینه‌های ایستگاه شارژ خودروهای برقی ذکر می‌شود [۲۸].

- درآمد ایستگاه شارژ خودروی برقی برآمده از شارژرهایی است که در هر لحظه معین مشغول به کار بوده و در وضعیت خدمت رسانی هستند، بنابراین درآمد ایستگاه شارژ برابر است با حاصل ضرب C_1 ضریب درآمد ایستگاه‌های مشغول به کار (بر حسب دلار) و B تعداد شارژرهای مشغول به کار است $Income = C_1 B$.
- چهار نوع هزینه برای ایستگاه شارژ خودروی برق در نظر گرفته شده‌است که شامل (الف) هزینه درخواست‌های que شده، (ب) هزینه درخواست‌های کنسلی، (ج) هزینه شارژرهای بی‌کار، (د) هزینه‌ی فضاهای انتظار بلااستفاده ماند.
- (الف) هزینه درخواست‌های que شده. برابر با حاصل ضرب C_2 ضریب هزینه درخواست پذیرفته شده ایستگاه‌های شارژ (بر حسب دلار) و L تعداد درخواست‌های que شده است. (ب) هزینه درخواست‌های کنسلی. برابر با حاصل



شکل (۶): فلوچارت روش حل مساله و ساختار کلی بهینه سازی

با توجه به اینکه در این مقاله مساله بهینه‌سازی با هدف مسطح‌سازی پروفیل بار انجام می‌شود که در آن پیک‌سایی یا دره‌زدایی صورت می‌گیرد در شکل (۶) فلوچارت روش حل مساله و متدی از ساختار کلی بهینه سازی بیان شد و لذا از استراتژی شارژ متمرکز کمینه سازی واریانس بار استفاده می‌شود. در مقایسه با روش شارژ نامتمرکز، این روش اطلاعات لازم و ضروری را هم از شبکه و هم از مشترکین خودروی برقی جمع‌آوری کرده و پیش از حل مساله ماتریس نرخ شارژ بهینه را تعیین می‌کند. (در بخش شبیه سازی و بیان سناریوهای مختلف این موضوع بیشتر پرداخته خواهد شد.) جواب‌های مساله بهینه سازی شارژ خودروهای برقی جهت کاهش تعداد دفعات سوئیچینگ و مسطح سازی پروفیل بار هستند. به عبارت دیگر قیود مربوط به توازن توان تولید و مصرف (روابط (۶) و (۷)) وابستگی مساله را نسبت به توازن میزان بار مصرفی اکتیو و راکتیو هر یک از باس‌های شبکه نشان می‌دهد. این بار مصرفی هر یک از باس‌ها تابعی از رفتار مشترکین شبکه است و بر پایه الگوی تامین انرژی برق مشترکین، حفظ ایجاد قله و دره و تامین انرژی تولیدی به صورت مسافتی و کاهش پیک بار شبکه جهت کمینه سازی مصرف انرژی انجام خواهد شد پس از حل این برنامه بهترین راهکار جهت تامین انرژی مورد نیاز شبکه و جلوگیری از پیک بار شبکه به دست می‌آید. مساله شارژ خودروهای برقی مقید به ظرفیت ترانسفرمرهای توزیع متصل به هر باس است. این محدودیت، عامل اصلی جلوگیری از نفوذ بیشتر خودروهای برقی در شبکه کنونی می‌شود. در واقع اگر قرار باشد، شبکه توزیع به خصوص ترانسفرمرهای توزیع هیچ‌گونه توسعه‌ای پیدا نکنند، آنگاه دیگر

و تعداد فضاهای بلااستفاده برابر است با تعداد کل فضاها منهای تعداد فضاهایی که برای صفبندی خودروهای در حال انتظار اختصاص داد شده است که از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$I_w = W - L \quad (18)$$

بنابراین مدل بهینه‌سازی طراحی ایستگاه شارژ را می‌توان به صورت رابطه ۱۹ زیر نمایش داد:

$$\max \sum_{t=1}^{48} E(t) \quad (19)$$

$$s.t. \begin{cases} 1 \leq s \leq s_{\max} \\ 0 \leq w \leq w_{\max} \end{cases}$$

که در این رابطه s_{\max} بیانگر بیشترین تعداد مجاز شارژهای خودروی برقی و w_{\max} بیانگر بیشترین فضای موجود برای نصب ایستگاه‌های شارژ است که از رابطه ۲۰ زیر به دست می‌آید:

$$s_{\max} = \frac{C_{sub} - P_b}{P_f} \quad (20)$$

که در این رابطه عبارت $\frac{C_{sub} - P_b}{P_f}$ بیانگر بیشترین تعداد شارژها بدون تجاوز از ظرفیت مجازی است که توسط ترانسفرمر پست اعمال شده است.

۶- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

اطلاعات مربوط به تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ همان داده های رابطه (۱۲) هستند. ضرایب هزینه مربوط به رابطه (۱۲) در جدول ۱ بیان شده است.

جدول (۱): پارامترهای اقتصادی مربوط به ظرفیت ایستگاه شارژ

ضریب	مقدار	یکا	ضریب	مقدار	یکا
C_1	۵	دلار	C_5	۰/۰۵	دلار
C_2	۱	دلار	s_{\max}	۲۰	عدد
C_3	۲	دلار	w_{\max}	۲۰	عدد
C_4	۰/۵	دلار	نرخ	خودرو	
			ترافیک	۱۰۰	در
			خودرو		ساعت

۶-۱- سناریوهای مطالعاتی

در این مقاله سناریوهای مطالعاتی متنوعی در نظر گرفته شده است که هر یک بیانگر جنبه‌ی متفاوتی از شبیه‌سازی می‌توانند باشند. [۳۰، ۲۹]

• **سناریو ۱:** پیاده‌سازی مدیریت شارژ خودروهای برقی با در نظرگیری شارژ گسسته بدون لحاظ نمودن تعیین ظرفیت

ضرب C_3 ضریب هزینه درخواست کنسلی ایستگاه‌های شارژ (بر حسب دلار) و R تعداد درخواست‌های کنسل شده است $Cost_{reject} = c_3 R$.

• (ج) هزینه شارژهای بی‌کار. برابر با حاصل ضرب C_4 ضریب هزینه شارژهای بی‌کار ایستگاه‌های شارژ (بر حسب دلار) و I_s تعداد شارژهای بی‌کار است.

• (د) هزینه فضاهای انتظار بلااستفاده. برابر با حاصل ضرب C_5 ضریب هزینه فضای بلااستفاده ایستگاه‌ها (بر حسب دلار) و I_w تعداد فضاهای بلااستفاده

$$Cost_{idle-space} = c_5 I_w$$

بنابراین در رابطه (۱۳) سود مربوط به ایستگاه شارژ خودروهای برقی برابر خواهد بود با:

$$E = c_1 B - (c_2 L + c_3 R + c_4 I_s + c_5 I_w) \quad (13)$$

که در این رابطه $c_i, i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ضرایب هزینه هستند. همچنین B, L, R, I_s, I_w به ترتیب تعداد شارژهای مشغول، تعداد درخواست‌های اعلامی، تعداد درخواست‌های رد شده، تعداد شارژهای بی‌کار و فضای در حال انتظار هستند.

محاسبه هر از پارامترها بر پایه مابانی احتمال انجام می‌شود. فرض کنید که پارکینگ دارای s ایستگاه شارژ باشد که هر ایستگاه قادر به سرویس دهی به ρ تعداد خودرو (توسط شارژر هایش) باشد. بنابراین ظرفیت کل پارکینگ برابر با $s\rho$ خودرو (یا شارژر) خواهد بود. اگر P_N درصد از خودروها انصراف دهند. در این صورت تعداد شارژر مشغول به کار ایستگاه شارژ بر پایه رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$B = s\rho - s\rho P_N = s\rho(1 - P_N) \quad (14)$$

همچنین تعداد درخواست‌های پذیرفته شده بر پایه رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$L = \sum_{k=s+1}^N (k - s) P_k \quad (15)$$

اگر فرض شود که نرخ ورود خودروها به پارکینگ شارژ برابر با λ باشد و P_N درصد از خودروها انصراف دهند. آنگاه تعداد درخواست‌های کنسل شده بر پایه رابطه ۱۶ خواهد بود:

$$R = \lambda P_N \quad (16)$$

تعداد شارژهای بلااستفاده برابر است با تفاوت میان کل شارژرها و شارژهای مشغول به کار که توسط رابطه ۱۷ به دست می‌آید:

$$I_w = s - B \quad (17)$$

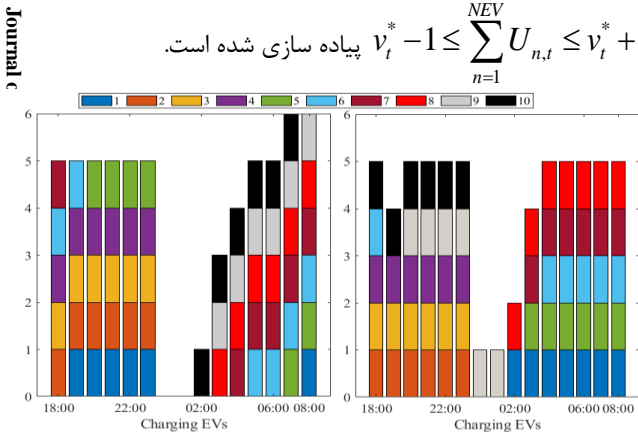
۱، برای تامین شارژ خود در هر دو شکل، ۶ ساعت شارژ شده است (چون قید تامین توان در هر دو رابطه یکسان است و خودرو باید به طور کامل شارژ می‌شده است) اما این خودرو در شکل سمت چپ ۳ بار در این مدت تغییر وضعیت شارژ داده است. اما در نمودار سمت راست، مشاهده می‌شود که خودروی شماره ۱، تا ساعت ۲ بامداد شارژ نشده و سپس تا ساعات پایانی مجاز برای شارژ، اقدام به تامین شارژ مورد نیاز خود کرده‌است. یا به طور مثال خودروی شماره ۴ (رنگ بنفش)، در منحنی سمت چپ از ساعت ۱۸ تا ۲ بامداد ممتد شارژ شده اما سپس خاموش شده و تنها در ساعت ۶ برای تامین یک ساعت از شارژ خود به سرعت قطع و وصل شده است که منجر به عدم بهره‌وری بهینه از ایستگاه شارژ شده است. اما در مورد سمت راست همین خودرو صرفاً از ساعت ۲۳ تا ساعت ۸ صبح به طور پیوسته بدون هیچ‌گونه قطعی شارژ شده است. بنابراین اهمیت اعمال رابطه ۴ بخوبی مشخص می‌گردد. ذکر یک نکته‌ی دیگر نیز در مورد این شکل ضروری به نظر می‌رسد، این دو منحنی در تعداد خودروهای در حال شارژ در ساعات ۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۱۹ و ۲۴ بامداد با یکدیگر یک واحد تفاوت دارند اما در دیگر ساعات تعداد خودروهای در حال شارژ دو روش یکسان است. از دیدگاه نظری باید تعداد خودروهای در حال شارژ دو روش با یکدیگر کاملاً برابر باشد که لازمه آن برقراری یک قید تساوی

$$\sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} = v_t^*$$

است. اعمال این قید تساوی که بشدت از دیدگاه بهینه‌سازی سختگیرانه است منجر به صرف زمان بسیار برای دسترسی به جواب‌های مساله می‌شود که چندان نمی‌تواند در کاربردهای زمان واقعی مؤثر واقع شود. بنابراین کمی این قید ساده‌تر شده و در قالب

$$v_t^* - 1 \leq \sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} \leq v_t^* + 1$$

پیاده سازی شده است.



شکل (۷): وضعیت شارژ خودروها پیش از اعمال رابطه ۴ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست)

به عبارت دیگر یک واحد اختلاف بلامانع در نظر گرفته شده است. اما می‌توان همین یک اختلاف را نیز حذف کرد و تنها صرف زمان بیشتری را شاهد بود. شکل ۷ مربوط به وضعیتی است زمان شارژ هر خودروی برق ۶ ساعت انتخاب شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت رابطه (۳) بدون توجه به محدودیت‌های عملی شارژر تنها اقدام به مسطح

بهینه ایستگاه شارژ و بدون قرار دادن جریمه‌ای برای شارژ در لحظات پایانی.

- سناریو ۲: پیاده‌سازی مدیریت شارژ خودروهای برقی با در نظرگیری نرخ شارژ گسسته بدون لحاظ نمودن تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ و قرار دان جریمه‌ای برای شارژ در لحظات پایانی.
- سناریو ۳: ادغام مساله تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ با مساله مدیریت شارژ خودروهای برقی

در واقع در مورد های ۱ و ۲ هیچ‌گونه تعیین ظرفیت بهینه‌ای صورت نمی‌گیرد و صرفاً نقش اعمال جریمه برای ماکول‌سازی شارژ به لحظات پایانی مشخص خواهد شد. با این کار در لحظه پایان شارژ (یعنی ساعت ۸ بامداد) دیگر شاهد فراجاهش بزرگی در پروفیل بار شبکه نخواهیم بود.

۶-۱-۱- مورد مطالعاتی ۱

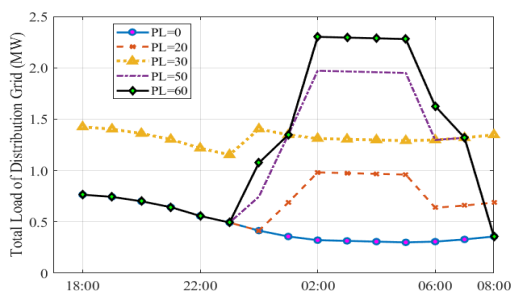
در مورد شماره ۱ تنها مساله شارژ خودروهای برقی با نرخ گسسته مطرح شده است. در این روش خودروهای برقی بر پایه روابط (۳ و ۴) شارژ خواهند شد. در واقع ابتدا برنامه شارژ خودروهای برقی، با هدف مسطح سازی پروفیل بار شبکه (کمینه‌سازی جریمه عدم مسطح سازی بار) با نرخ شارژ گسسته (شارژ تک نرخ) طبق رابطه ۳ اجرا می‌گردد و تعداد خودروهای در حال شارژ در هر یک از ساعات زمانی مشخص می‌گردد. سپس به منظور کاهش تعداد دفعات کلیدزنی (قطع و وصل شارژ)، مدل بهینه‌سازی ۴ اجرا می‌گردد تا با همین تعداد خودروی در حال شارژ رابطه ۳، تعداد دفعات قطع و وصل کمینه گردد. نکته‌ی قابل توجهی در اینجا وجود دارد. رابطه ۳ تنها قادر با هدف مسطح سازی پروفیل بار صورت می‌گیرد و قیود مربوط به تامین شارژ مورد نیاز خودروها و ظرفیت ترانسفرمر توزیع در آن رعایت می‌گردد. این مساله جوابی یکتا ندارد. آنچه برای پروفیل بار اهمیت دارد تنها تعداد خودروهای در حال شارژ است و دیگر اینکه چه خودروهایی شارژ باشند تفاوتی در مساله ایجاد نمی‌کند. این نوع مدیریت شارژ می‌تواند به ایستگاه‌های شارژ آسیب وارد کند چون گاهی جواب‌هایی به دست می‌آید که در آن تعداد دفعات قطع و وصل خودروها بالاست و شارژ با مشکل مواجه خواهد شد. بنابراین رابطه ۴ اعمال می‌شود که در آن از جواب‌های رابطه ۳ یعنی تعداد کل خودروهای در حال شارژ در هر ساعت استفاده می‌کند و آرایشی از شارژ خودروها تعیین می‌شود که کمترین تعداد روشن خاموشی را به ارمغان آورد. بنابراین با این روش دو مرحله‌ای می‌توان به هر دو دستاورد مربوط به بهره‌بردار شبکه و ایستگاه‌های شارژ نایل گشت. برای درک بهتر این مطلب، نتیجه شبیه سازی مورد ۱ در قالب شکل (۶) ارائه شده‌است. همانطور که در این شکل مشخص است، تعداد تغییر وضعیت شارژ خودروها در نمودار سمت راست (حاصل از اعمال رابطه ۴) نسبت به نمودار سمت چپ (بدون اعمال رابطه ۴) بسیار کمتر است. به طور مثال خودروی شماره

۶-۱-۲- مورد مطالعاتی ۲

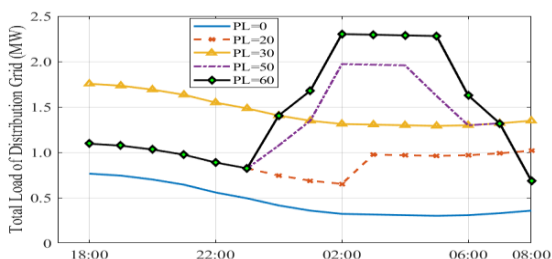
این مورد مطالعاتی نیز همانند مورد مطالعاتی شماره ۱ است با این تفاوت که یک ضریب وزنی در تابع هدف رابطه‌ی ۳ طوری ضرب شده است که جریمه در ساعات پایانی شارژ گرانتر شود. در واقع این ضریب به صورتی تنظیم شده است که تا قبل از ساعت ۴ بامداد برابر یک بوده و پس از آن به صورت خطی افزایش یابد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\omega_t = \begin{cases} 1 & 18^{pm} \leq t \leq 4^{am} \\ t-4 & t > 4^{am} \end{cases}$$

زمان‌های شارژ به ساعات پایانی موکول نشود و بدین ترتیب در ساعات پایانی شارژ مواجهه جهشی در میزان پروفیل بار نباشیم. نتایج مربوط به شبیه‌سازی روابط ۳ و ۴ در این راستا نیز در شکل (۹) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نسبت به مورد شماره ۱، خودروها تمایل بیشتری به شارژ در ساعات اولیه دارند و کمتر شارژ خود را به تأخیر انداخته‌اند. از ساعت ۵ صبح تا ساعت ۸ صبح به دلیل گران بودن مقدار جریمه، پروفیل‌های بار روندی نزولی به خود گرفته‌اند و بدین ترتیب در زمان نهایی شارژ مانند مورد ۱ شاهد بالا بودن مقدار بار شبکه نخواهیم بود. در منحنی ۴ تنها هدف بهره بردار شبکه مد نظر قرار گرفته است. اگر قرار باشد، آسیب رسانی به شارژرها نیز کمتر شود، با اعمال قید ۴ نتایج به صورت شکل (۱۰) در خواهد آمد که اندکی تغییر را در برخی از ضرایب نفوذ نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): پروفیل بار شبکه برای سطوح مختلف خودروی برقی در مورد ۲ بدون اعمال قید ۴



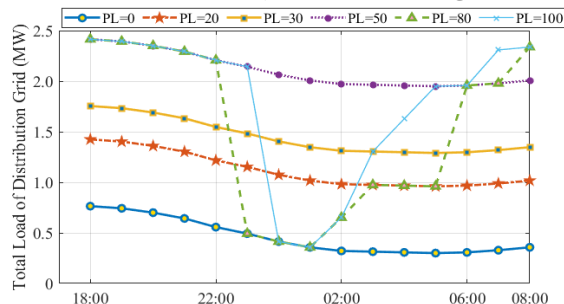
شکل (۱۱): پروفیل بار شبکه برای سطوح مختلف خودروی برقی در مورد ۲ با اعمال قید ۴

در مورد شکل‌های (۹ و ۱۰) ذکر چندین نکته حائز اهمیت است. اول آنکه هر دوی این اشکال، میزان تأثیر نحوه جریمه‌گذاری را بر رفتار مشترکین خودرو و شارژ آن‌ها بخوبی نشان می‌دهد. هرچه جریمه‌ی زمان‌های پایانی شارژ بیشتر شود، مشترکین شارژ خود رو زودتر آغاز

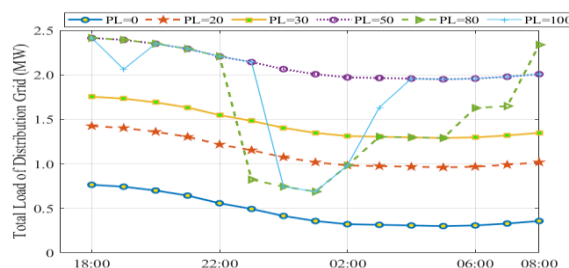
سازی پروفیل بار پرداخته است و به نفع بهره‌بردار شبکه است. در رابطه (۴) یکنواخت شارژ شدن خودروها بیشتر اولویت داشته و به سود

ایستگاه شارژ خواهد بود. چنانچه رابطه $\sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} = V_t^*$ رعایت گردد،

هم بهره‌بردار شبکه و هم خودروی برقی به‌طور همزمان به سود خواهند رسید، اما قابلیت پیاده‌سازی آنلاین یا زمان واقعی روش با مشکل مواجه خواهد شد. در ادامه به بررسی تأثیر سطح نفوذ خودروهای برقی در پروفیل بار شبکه پرداخته می‌شود و فرض شده است که هر خودروی برقی برای شارژ خود نیاز به ۶ ساعت شارژ داشته باشد. با افزایش سطح نفوذ خودروی برقی (نسبت خودروهای برقی به تعداد کل خودروها)، در شکل ۸ پروفیل بار شبکه در سطوح مختلف خودروی برقی ارائه شده است که پیش بینی می‌شود سهم شارژ خودروهای برقی بیشتر شده و از سهم بار پایه کاسته شود.

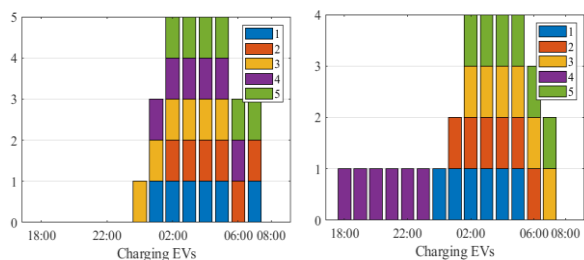


شکل (۸): پروفیل بار شبکه در سطوح مختلف نفوذ خودروی برقی

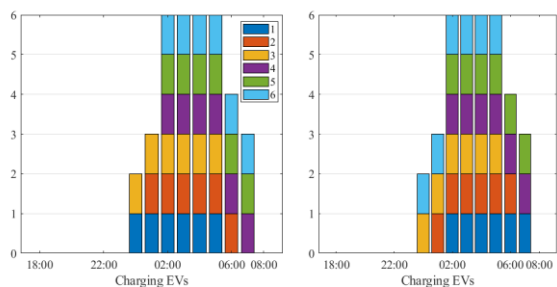


شکل (۹): پروفیل بار شبکه در سطوح مختلف نفوذ خودروی برقی با ادغام رابطه ۴

در شکل ۹ پروفیل بار کل شبکه در سطوح نفوذ ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصدی خودروی برقی در صورت عدم اعمال رابطه ۴ و اعمال آن به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، با افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی بار شبکه افزایش می‌یابد تا جایی که از محدودیت ترانسفرم‌های توزیع عبور نماید. در سطوح نفوذ ۸۰ و ۱۰۰ درصدی خودروهای برقی، با توجه به اینکه ترانسفرم‌های توزیع محدودیت ساز می‌شوند شاهد نوساناتی در پروفیل بار هستیم. در واقع محدودیت خطوط انجامیده تا تناقضی میان دو هدف مسطح سازی پروفیل بار و در عین حال تامین شارژ مورد نیاز خودروهای برقی ایجاد شود. تامین شارژ خودرو اولویت بالاتری نسبت به مسطح سازی پروفیل بار خواهد داشت.



شکل (۱۴): وضعیت شارژ خودروها پیش از اعمال رابطه ۴ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۵۰ درصد)



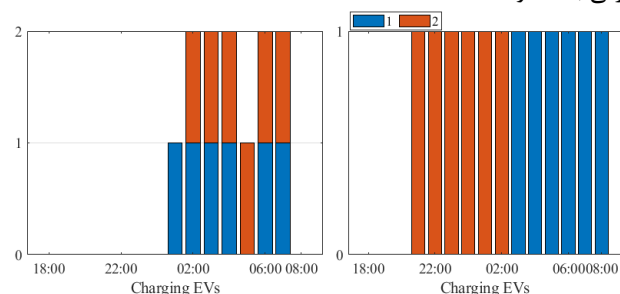
شکل (۱۵): وضعیت شارژ خودروها پیش از اعمال رابطه ۴ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۶۰ درصد)

مقایسه مورد مطالعاتی ۲ و ۱ نشان می‌دهد که نوع جریمه‌گذاری چه تأثیری می‌تواند بر رفتار خودروها داشته باشد اما بیان شد که گاهی جریمه‌گذاری خود می‌تواند نوعی محدودیت برای شارژ خودروهای برقی به شمار آید. این محدودیت‌ها، زمینه را برای گسترش هرچه بیشتر خودروهای برقی در شبکه با مشکلاتی مواجه می‌سازد. از سوی دیگر محدودیت‌های ترانسفرمرهای توزیع خود امکان شارژ را برای خودروهای بیشتر مقدر نمی‌سازد. بنابراین به‌جای تقویت ترانسفرمرهای توزیع شبکه (۲۵ کیلووات آمپر)، بهتر است که یک پارکینگ عمومی شارژ خودرو قرار داده شود و بسیاری از خودروها برای شارژ خود بدانجا هدایت شوند.

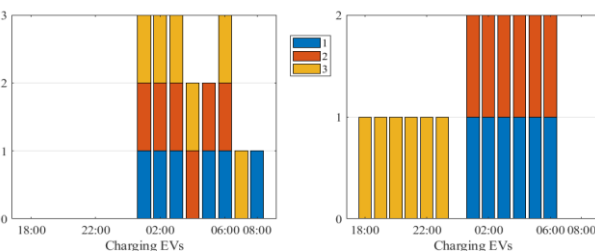
۶-۱-۳ - مورد مطالعاتی ۳

در این راستا مطالعاتی مساله برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ خودروی برقی مطرح شده‌است. همانطور که در بخشهای قبل اشاره شد، ترانسفورمرهای توزیع شبکه که به باس‌های مسکونی متصل هستند از ظرفیت محدودی (۲۵ مگاوات آمپر) برخوردارند. بار پایه شبکه توزیع نیز با اشغال بخشی از ظرفیت ترانسفرمر توزیع، فضا را برای شارژ خودروهای نیز محدودتر ساخته است و از طرفی امکان رشد این بارها در آینده نیز وجود دارد. بنابراین چنانچه شبکه توزیع دچار توسعه نشود، دیگر امکان گسترش سطح نفوذ خودروهای برقی فراهم نخواهد شد و این فناوری‌های پاک چندان کارایی خود را نشان نخواهند داد. از طرفی در این پژوهش فرض شده‌است که ترانسفورمرهای توزیع قابلیت ارتقا نداشته باشند و برنامه‌ای برای تقویت آنها یا احداث

می‌کنند. دوم آنکه این نوع قیمت‌گذاری جریمه منجر به تجمع خودروها در زمان‌های قبل از ۴ بامداد می‌شود، به‌عبارت دیگر گویی مدت زمان موجود برای شارژ خودروها نسبت به گذشته کاهش می‌یابد و خودرو در زمان کمتری باید انرژی مورد نیاز خود را تامین کند. از طرفی در زمان‌های ابتدایی شارژ، بار پایه شبکه نسبت به زمان‌های انتهایی بیشتر است. در چنین شرایطی محدودیت ترانسفرمرهای توزیع امکان شارژ تعداد بالایی از خودروها را با محدودیت جدی مواجه می‌کند. تمامی این محدودیت‌ها باعث می‌شود، تا دیگر مساله در سطوح نفوذ بالای ۷۰ درصد، یا همگرا نشود و یا مدت به جوابی نه چندان اقتصادی همگرا شود. از این روی، دیگر نمودارهای سطح نفوذ ۷۰ درصد به بالا در این اشکال نمایش داده نشده است چون محدودیت‌های مساله به قدری است که امکان دستیابی به پاسخ بهینه را بشدت کاهش داده است و الگوریتم در تعداد تکرارهای مجاز به همگرایی نخواهد رسید. بنابراین مشاهده می‌شود که در مورد ۱ جواب هایی برای سطوح نفوذ ۸۰ و ۱۰۰ درصد نشان داده شده است اما در مورد ۲ جوابی برای این دو سطح نفوذ یافت نشده است. نتایج مربوط به وضعیت سطح شارژ خودروها در هر یک از سطوح نفوذ ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصدی به‌ترتیب در شکل‌های (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) نمایش داده شده‌است. نکته قابل توجه در مورد مفهوم سطح نفوذ خودروی برقی این است که منظور از سطح نفوذ ۱۰۰ درصدی یعنی هر ده خانه مستقر در باس دارای خودروی برقی باشند. منظور از سطح نفوذ ۲۰ درصدی، یعنی از هر ۱۰ خانه‌ی هر باس، تنها دو خانه دارای خودروی برقی باشند و...

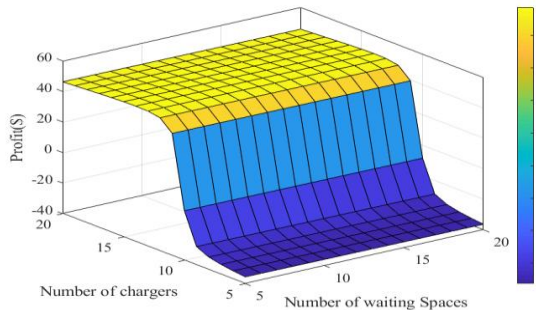


شکل (۱۲): وضعیت شارژ خودروها پیش از اعمال رابطه ۴ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۲۰ درصد)



شکل (۱۳): وضعیت شارژ خودروها پیش از اعمال رابطه ۴ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۳۰ درصد)

عمودی بیانگر سود پارکینگ بر حسب دلار می‌باشد. بیشترین سود در این نمودار مربوط به حالتی است که تعداد شارژرها برابر $s=14$ و تعداد فضاهای مورد انتظار برابر با $w=5$ است. بیشترین مقدار سود برابر با $48/7195$ دلار به دست آمده است.



شکل (۱۶): سود پارکینگ بر حسب تعداد شارژرها و تعداد فضاهای انتظار (بدون در نظرگیری کنسلی)

نکات متعددی در مورد شکل (۱۶) وجود دارد که در اینجا به چند مورد از آنها اشاره می‌شود:

- با کاهش تعداد شارژها، سود ایستگاه شارژ کمتر خواهد شد. چون زمانی که نرخ ترافیک عدد قابل توجه $10/28$ خودرو در نیم ساعت را به خود اختصاص داده است، با کم شدن تعداد شارژها، خودروهای بسیاری در صف انتظار باقی می‌مانند که خود هزینه بر بوده و منجر به کاهش سود پارکینگ خواهد شد.
- افزایش فضای انتظار منجر به افزایش سود با شیب به نسبت کمی می‌شود. علت این امر این است که حتی اگر خودروها در پارکینگ جا داده شوند اما ایستگاه‌های شارژ پر شده باشند و بسنده نکنند، آنچنان سودی نصیب بهره‌بردار پارکینگ نخواهد شد و تنها رضایت مشترکین پیدا کردن جایی برای پارک آنها می‌باشد (به‌راستی اگر در پارکینگ جایی نباشد، خودروها آنجا را ترک خواهند کرد که چندان خوشایند نیست).
- بیشتر شدت تغییرات سود، در بازه $10 \leq s \leq 15$ مشاهده شده است. در نقاط کمتر از این بازه هیچ‌گونه توجیه اقتصادی وجود ندارد چون تعداد کم شارژرها پاسخ گوی این مکان نخواهد بود. در نقاط بعد از این بازه، دیگر بانه‌ها آزاد و بیکار خواهند ماند. چون همین تعداد کفایت این حجم ورودی خودروها را می‌کند. از این روی است که $s=14$ به‌عنوان بهترین پاسخ انتخاب شده است.

حال نقش یکی از پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی را مورد تحلیل حساسیت قرار می‌دهیم. پارامتر نرخ ورود خودروها به پارکینگ برابر با $10/28$ در نظر گرفته شده‌باشد. حال

ترانسفورمرهای جدید در نظر گرفته نشده باشد. بنابراین، باید به فکر راهکار دیگری برای این مساله بود. در این پژوهش طراحی پارکینگ عمومی خودروی برقی برای رفع این مساله پیشنهاد شده‌است. همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، تهیه مکان مناسب و ظرفیت مناسب این ایستگاه شارژ از جمله وظایف برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه شارژ به شمار می‌آید. با توجه به ساختار شبکه مورد بررسی، تنها یک باس تجاری در شبکه وجود دارد که ظرفیت توانی آن 500 مگاوات آمپر است و بنابراین این مکان به‌عنوان محل احداث پارکینگ شارژ خودروی برقی در نظر گرفته شده است و دیگر مساله‌ای برای جایابی آن در این پژوهش دلخواه قرار نگرفته است. آنچه در اینجا اهمیت دارد، تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ خودروی برقی است. به بیان دیگر در این پژوهش تعداد شارژرهای بهینه پارکینگ خودروی برقی به همراه فضای مورد نیاز برای انتظار رانندگان به دست خواهد آمد. لازم به ذکر است که ایستگاه‌های شارژ همگی تک نرخی از سطح دوم بوده و دارای توان $3/3$ کیلووات می‌باشند. عوامل متعددی در تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ دخیل هستند که در این پژوهش نقش نرخ ورود خودروهای برقی به پارکینگ (تعداد مراجعین به پارکینگ) و تأثیر درصد کنسلی برخی از رانندگان در میزان سود بهره‌بردار پارکینگ مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرد. همچنین فضای جواب‌ها نیز برای درک بهتر مساله نمایش داده شده و جواب بهینه نهایی معین می‌گردد. قبل از بیان جزئیات مربوط به شبیه‌سازی، ممکن است سؤالی مطرح شود که فصل مشترک میان مساله‌ی مدیریت شارژ خودروهای برقی که طبق روابط 3 و 4 اجرا شد، و مساله‌ی برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه شارژ در کجا قرار دارد. در پاسخ به این سؤال باید گفت که تمامی خودروهای برقی شبکه نمی‌توانند هم اکنون در خانه‌های خود توسط شبکه توزیع تامین شوند. مورد مطالعاتی شماره 1 در سطح نفوذهای بالای 70 درصد و مورد مطالعاتی شماره 2 در سطح نفوذهای بالای 60 درصد، قادر به دستیابی جواب‌های نبودند چون امکان شارژ تمامی خودروها با افزایش سطح نفوذ آنها کاهش می‌یابد. بنابراین فرض شده است که دیگر خودروها برای شارژ به پارکینگ‌های شارژ مراجعه کنند. با توجه به محدودیت ترانسفر متصل به باس تجاری (500 مگاوات آمپر) و با توجه به نرخ شارژ $3/3$ کیل واتی خودروهای برقی، تا 150 خودرو در پایان می‌توانند به ایستگاه شارژ مراجعه نمایند. در این پژوهش فرض شده‌است که فضای پارکینگ شارژ خودروی برقی برابر 100 دستگاه در نظر گرفته شود، تا ترانسفرم توزیع نیز وارد اضافه باری نشود. چون پارکینگ در منطقه‌ی تجاری قرار گرفته است، فرض شده‌است که نرخ ورود خودروها به پارکینگ به‌طور متوسط برابر با $10/28$ خودرو در هر نیم ساعت باشد. همچنین برای سادگی فرض شده‌است که هیچ‌گونه درخواست کنسلی نیز از طرف رانندگان ارائه نشود. سایر اطلاعات مربوط به هزینه‌ها نیز در جدول 1 ارائه شده‌است. در این صورت میزان سود بهره‌بردار پارکینگ در ازای تعداد شارژرهای مختلف و فضای انتظار مختلف در قالب شکل 11 خواهد بود که محور

خواهد شد. نرخ کنسلی ۶۰ درصدی به بالا هیچ‌گونه سودی را برای مالک پارکینگ به ارمغان نخواهد آورد.

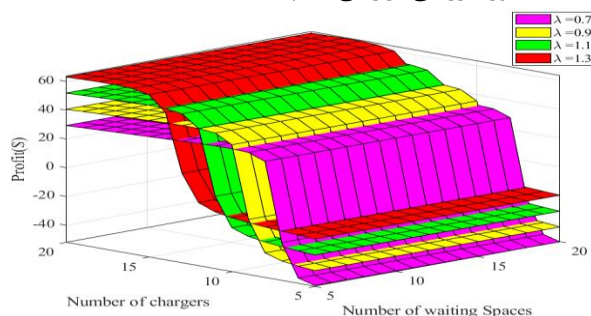
۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای مسطح‌سازی پروفیل بار شبکه معرفی و تأثیر سطح نفوذ خودروهای برقی در پروفیل بار شبکه بررسی و نتایج مثبت حاصل شد. با انجام بررسی‌ها در سناریو مطالعاتی ۱ با به کارگیری رابطه ۳ شاهد کاهش قابل ملاحظه سوئیچینگ و تعداد کلید زنی‌ها و دست‌یابی به هدف بهره‌برداری از شبکه خواهیم بود. در بررسی سناریو مطالعاتی شماره ۲ همانند مورد پیش شارژ خودروهای برقی با نرخ گسسته با هدف مسطح‌سازی پروفیل بار و همچنین بررسی شارژ خودروهای برقی با نرخ گسسته و کاهش سوئیچینگ را مشاهده کردیم و با انجام شارژ در ساعات اولیه از ایجاد پیک بار جلوگیری شد و همچنین از ایجاد آسیب به شبکه جلوگیری به عمل آمد. نتایج نشان می‌دهد به‌جای ایجاد و تقویت ترانسفرمرهای توزیع شبکه بهتر است که یک پارکینگ عمومی شارژ استفاده شود تا بسیاری از خودروها جهت بهینه‌سازی ظرفیت ایستگاه شارژ مراجعه کنند تا شاهد تأثیر اعمال تغییر سیاست جریمه‌گذاری برای جلوگیری از انتقال شارژ به ساعات پایانی نباشیم. نتایج در سناریو شماره ۳ حاکی از آن است که جهت رفع مشکلات شبکه با طراحی پارکینگ‌های شارژ با ظرفیت‌های مشخص و به‌صورت تک‌نرخ ورودی خودروها به پارکینگ و در نظرگیری نرخ کنسلی برخی رانندگان میزان سود بیشتری به پارکینگ خواهد رسید و ترانسفرمر نیز وارد اضافه‌باری نخواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش سناریو مطالعاتی سوم به‌مراتب نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر ایجاد می‌کند. به‌راستی، هم مقدار هزینه‌ی این روش و هم مقدار پیک بار این روش نسبت به روش‌های دیگر بهتر است. همچنین چنانچه روش شارژ هوشمند به شبکه توزیع اعمال می‌شود، توان عبوری از پست شبکه توزیع نیز کاهش یافته و ظرفیت آن آزادتر می‌شود. بنابراین دیگر نیازی به احداث پست جدید یا تقویت همان پست نیست و هزینه‌های توسعه شبکه توزیع به تعویق خواهد افتاد.

مراجع

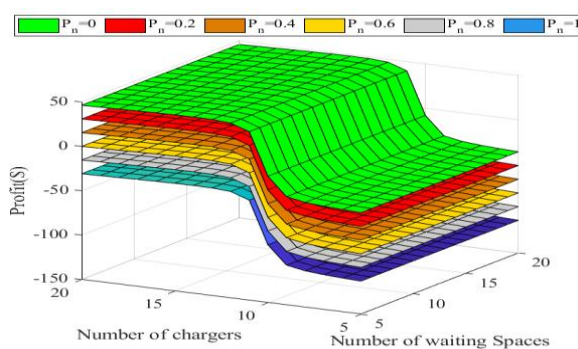
- [1] Q. Wang, X. Liu, J. Du, and F. Kong, "Smart charging for EVs: A survey from the algorithmic perspective," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517, 2016.
- [2] I. Rahman, P. M. Vasant, B. S. M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, and N. Adnan, "Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and EV charging infrastructures," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1039-1047, 2016.
- [3] K. L. López, C. Gagné, and M.-A. Gardner, "Demand-side management using deep learning for smart charging of EVs," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 2683-2691, 2018.

افزایش و کاهش ۱۰ درصدی و ۳۰ درصدی این پارامتر را بر میزان سود مساله مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.



شکل (۱۷): تحلیل حساسیت ظرفیت ایستگاه شارژ نسبت به نرخ ورود خودروها به پارکینگ

همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، منحنی مربوط به افزایش ۳۰ درصدی نرخ ورود خودروها در بالای دیگر نمودارها قرار گرفته است و کاهش ۳۰ درصدی نرخ ورود در پایین‌ترین وضعیت قرار گرفته است. در واقع این امر نشان می‌دهد، با افزایش تردد خودروها در پارکینگ، فضا برای سود بیشتر صاحب پارکینگ فراهم می‌شود. البته بیشترین مقدار مجاز افزایش این نرخ ۵۰ درصد است که پس از آن محدودیت ترانسفرمر توزیع چالش ایجاد خواهد کرد. نکته‌ی دیگر اینکه با افزایش تردد پارکینگ، تعداد شارژرهای مورد نیاز نیز بیشتر خواهد شد و در واقع افزایش شارژرها و فضای انتظار در این حالت توجیه اقتصادی بیشتری دارد.



شکل (۱۸): تحلیل حساسیت ظرفیت ایستگاه شارژ نسبت به نرخ کنسلی رانندگان

یکی دیگر از موارد مورد بررسی در این پژوهش مساله تحلیل حساسیت نسبت به نرخ کنسلی رانندگان است که در قالب شکل (۱۸) ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، چنانچه نرخ کنسلی صفر باشد، یعنی هیچ درخواست کنسلی صادر نشود، بیشترین سود عاید پارکینگ خواهد شد. چنانچه نرخ کنسلی افزایش یابد، سود پارکینگ شروع به کاهش می‌کند تا جایی که در نرخ کنسلی ۱ (یعنی کنسلی ۱۰۰ درصدی تمام رانندگان) به‌طور کامل پارکینگ دچار زیان

- [19] O. Sundstrom and C. Binding, "Flexible charging optimization for EVs considering distribution grid constraints," *IEEE Transactions on Smart grid*, vol. 3, no. 1, pp. 26-37, 2011.
- [20] V. Aravinthan and W. Jewell, "Controlled EV charging for mitigating impacts on distribution assets," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 999-1009, 2015.
- [21] N. Chen, C. W. Tan, and T. Q. Quek, "EV charging in smart grid: Optimality and valley-filling algorithms," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 6, pp. 1073-1083, 2014.
- [22] Varshosaz F, Moazzami M, Fani B, "Scheduling and Stochastic Capacity Estimation of an EV Charging Station with PV Rooftop Using Queuing Theory and Random Forest," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol 16, no 1, pp. 31-39, 2019.
- [23] M. L. Crow, "EV scheduling considering co-optimized customer and system objectives," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 410-419, 2017.
- [24] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Benefits of demand response on operation of distribution networks: A case study," *IEEE systems journal*, vol. 10, no. 1, pp. 189-197, 2014.
- [25] S. Paudyal, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 684-694, 2014.
- [26] Amiri A B, 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*, 16 (1) :21-29, 2019.
- [27] Acharya, Samrat, et al. "Cybersecurity of smart electric vehicle charging: A power grid perspective." *IEEE Access* 8: 214434-214453, 2020.
- [28] Karpenko, Anastasiia, et al. "Open IoT ecosystem for smart EV charging." ,*Global Internet of Things Summit (GIoTS)*. IEEE, 2020.
- [29] Cao, Yongsheng, et al. "Smart Online Charging Algorithm for Electric Vehicles via Customized Actor-Critic Learning." *IEEE Internet of Things Journal*, 2021.
- [30] Lee, Sangyoon, and Dae-Hyun Choi. "Dynamic pricing and energy management for profit maximization in multiple smart electric vehicle charging stations: A privacy-preserving deep reinforcement learning approach." *Applied Energy* 304:117754, 2021.
- [4] A. Ensslen, P. Ringler, L. Dörr, P. Jochem, F. Zimmermann, and W. Fichtner, "Incentivizing smart charging: Modeling charging tariffs for EVs in German and French electricity markets," *Energy research & social science*, vol. 42, pp. 112-126, 2018.
- [5] Felix. Tuhnitz and Niklas. Ebell, Jonas. Schlund, Marco. Pruckner "Development and Evaluation of a Smart Charging Strategy for an EV Fleet Based on Reinforcement Learning," *Applied Energy*, Volume 285, 116382, 2021.
- [6] S. Sachan and N. Adnan, "Stochastic charging of EVs in smart power distribution grids," *Sustainable cities and society*, vol. 40, pp. 91-100, 2018.
- [7] L. Jian, Z. Yongqiang, and K. Hyoungmi, "The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai," *Energy policy*, vol. 119, pp. 206-214, 2018.
- [8] M. M. Hussain, M. S. Alam, M. S. Beg, and H. Malik, "A risk averse business model for smart charging of EVs," in *Proceedings of First International Conference on Smart System, Innovations and Computing*, 2018: Springer, pp. 749-759.
- [9] C. de Mattos Affonso and M. Kezunovic, "Technical and economic impact of PV-BESS charging station on transformer life: A case study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4683-4692, 2018.
- [10] J.-M. Clairand, J. Rodriguez-Garcia, and C. Álvarez-Bel, "Smart charging for EV aggregators considering users' preferences," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 54624-54635, 2018.
- [11] S. Hardman et al., "A review of consumer preferences of and interactions with EV charging infrastructure," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 62, pp. 508-523, 2018.
- [12] E. Kamal and L. Adouane, " smart energy management strategy based on artificial neural fuzzy for hybrid vehicle," *IEEE Transactions on smart Vehicles*, vol. 3, no. 1, pp. 112-125, 2017.
- [13] E. Kamal and L. Adouane, "Hierarchical energy optimization strategy and its integrated reliable battery fault management for hybrid hydraulic-EV," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 3740-3754, 2018.
- [14] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, and M. J. Barth, "Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid EVs," *IEEE Transactions on smart Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2181-2191, 2016.
- [15] L. Guo, B. Gao, Y. Gao, and H. Chen, "Optimal energy management for HEVs in eco-driving applications using bi-level MPC," *IEEE Transactions on smart Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2153-2162, 2016.
- [16] L. Qiu, L. Qian, H. Zomorodi, and P. Pisu, "Global optimal energy management control strategies for connected four-wheel-drive hybrid EVs," *IET smart Transport Systems*, vol. 11, no. 5, pp. 264-272, 2017.
- [17] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, and F. L. Lewis, "Scalable real-time EVs charging with discrete charging rates," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2211-2220, 2015.
- [18] B. Sun, Z. Huang, X. Tan, and D. H. Tsang, "Optimal scheduling for EV charging with discrete charging levels in distribution grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 624-634, 2016.