

Technical and Economic Management of Energy Distribution to Reduce Charging Costs and Reduction**Meysam Saeedirad¹, Ph.D.Student, Esmael Rokrok², Associate Professor, Mahmood Joorabian³, Professor**¹ Engineering Department- Islamic Azad University Lorestan Branch, Lorestan, Iran² Engineering Department- Lorestan University, Lorestan, Iran³ Engineering Department- Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
saidi.meysam93@gmail.com, rokrok.e@lu.ac.ir, mjoorabian@scu.ac.ir**Abstract**

Proper management of electrical energy in the electricity distribution network is one of the main issues of network operation that high impact of reducing operating costs, reducing network losses, increasing the quality of updates, increasing customer satisfaction and etc. can have achieving these goals is possible when the elements of the distribution network act in coordination and awareness of each other. This paper considers this awareness among home subscribers, car charging parking lots and the network operating company has been taken and its benefits have been explored. A two-stage model of energy management in the distribution network is presented. The first stage is related to home energy management in the presence or absence of a load response program, taking into account tastes. Subscribers' personalization is done to bring the results closer to the real world then based on the information sent from these subscribers and determining the residential load profile of the network, electric car charging parking operators to manage according to their limitations electric vehicle to improve both charging costs and network operation parameters. Unlike traditional charging methods, in this method does not require a full charge of car batteries and only the final limit of the battery charge level in terms of energy required for drivers' future trips will be determined, and charging operations will be performed using the discrete charge rate. The results of a review of various case studies applied to a 37-bus distribution network shows that the proposed method has a high capability. In providing customer satisfaction, improving network operation parameters and reducing charging costs and meeting the needs of car drivers will had. This method can pave the way for expanding the level of vehicle penetration in distribution networks and the benefits of the load response program and smart charging maximizes productivity.

Keywords: distribution network operation, electric car charge management, energy electrical, home energy management**Received:** 23 November 2021**Revised:** 18 January 2022**Accepted:** 26 February 2022**Corresponding Author:** Dr. Esmael Rokrok**Citation:** M. Saeedirad, E. Rokrok, M. Joorabian, "Technical and economic management of energy distribution to reduce charging costs and reduction", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 54, pp. 59-74, September 2023 (in Persian).

مدیریت فنی و اقتصادی توزیع انرژی جهت کاهش هزینه‌های شارژ و کاهش تلفات با استفاده از روش هوشمند شارژ خودروی برقی

میثم سعیدی‌راد^۱، دانشجوی دکتری، اسماعیل رک‌رک^۲، دانشیار، محمود جورابیان^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۲- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران

۳- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران
saidi.meysam93@gmail.com, rokrok.e@lu.ac.ir, mjoorabian@scu.ac.ir

چکیده: مدیریت صحیح انرژی الکتریکی در شبکه توزیع برق از اصلی‌ترین موضوع‌های بهره‌برداری شبکه به‌شمار می‌آید که تأثیر بالای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش تلفات شبکه، افزایش کیفیت به‌روزرسانی، افزایش رضایت مشترکین و ... می‌تواند داشته باشد. دسترسی به این اهداف زمانی امکان‌پذیر است که ارکان شبکه توزیع در هماهنگی و آگاهی از یکدیگر عمل نمایند. در این مقاله این آگاهی میان مشترکین خانگی، پارکینگ‌های شارژ خودرو و شرکت بهره‌برداری شبکه در نظر گرفته شده است و مزایای آن مورد بررسی قرار داده شده است. یک مدل دو مرحله‌ای از مدیریت انرژی در شبکه توزیع ارائه شده است که مرحله اول آن مربوط به مدیریت انرژی منازل در شرایط حضور یا غیاب برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظرگیری سلیقه‌های شخصی مشترکین انجام می‌شود تا نتایج به‌دنیای واقعی نزدیک باشد. سپس بر اساس اطلاعات ارسالی از این مشترکین و تعیین پروفیل بار مسکونی شبکه، بهره‌برداران پارکینگ شارژ خودروی برقی با توجه به محدودیت خود اقدام به مدیریت خودروی برقی می‌کند تا هم هزینه‌های شارژ و هم پارامترهای بهره‌برداری شبکه بهبود یابد. برخلاف روش‌های سنتی شارژ، در این روش نیازی به شارژ کامل باتری خودروها نبوده و صرفاً حد نهایی سطح شارژ باتری‌ها برحسب انرژی موردنیاز برای سفرهای آتی رانندگان تعیین خواهد شد و با استفاده از نرخ شارژ گسسته عملیات شارژ صورت خواهد گرفت. نتایج حاصل از بررسی موردهای مطالعاتی مختلف اعمال‌شده بر یک شبکه توزیع ۳۷ باس نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانمندی بالایی در تأمین رضایت مشترکین، بهبود پارامترهای بهره‌برداری شبکه و کاهش هزینه‌های شارژ و تأمین نیاز رانندگان خودرو خواهد داشت. این روش می‌تواند زمینه‌ساز گسترش سطح نفوذ خودروهای در شبکه‌های توزیع شود و از مزایای برنامه پاسخ‌گویی بار و شارژ هوشمند نهایت بهره‌وری را ببرد.

کلمات کلیدی: انرژی الکتریکی، بهره‌برداری شبکه توزیع، مدیریت انرژی منازل، مدیریت شارژ خودروی برقی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل رک‌رک

نشانی نویسنده‌ی مسئول: خرم‌آباد- کیلومتر ۵ جاده خرم‌آباد بروجرد- دانشگاه لرستان- دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی از مطالعات بنیادی در شبکه‌های توزیع به‌شمار می‌آید که هم‌زمان با ظهور و گسترش خودروهای برقی، مورد توجه محققین قرار داده شده است. بدون برنامه‌ریزی منظم خودروهای برقی عملاً امکان بهره‌برداری مفید و مؤثر از این فناوری بدون به خطر انداختن امنیت و پایداری شبکه توزیع وجود نخواهد داشت. تاکنون روش‌های مختلفی برای شارژ خودروهای برقی معرفی شده است. معمولاً روش‌های شارژ یا برای تأمین هدف شرکت توزیع، یا برای تأمین منافع مشترکین و یا با در نظرگیری منافع مالک پارکینگ انجام می‌گیرد که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند [۱]. از دیدگاه پیکربندی کنترل این روش‌ها به سه دسته شارژ متمرکز، شارژ غیرمتمرکز و شارژ هیبرید دسته‌بندی شده‌اند [۲]. دسته‌بندی دیگری از روش‌های شارژ هوشمند بر اساس مدیریت عدم قطعیت نیز در مرجع [۳] ارائه شده است و چالش‌های هر یک از این روش‌ها مطرح شده است. ذکر انواع دسته‌بندی روش‌های شارژ خودروی برقی در این مقاله به دلیل محدودیت صفحات نمی‌گنجد؛ بنابراین مستقیماً به ذکر روش‌های شارژ هوشمند در این مقاله پرداخته خواهد شد. یکی از روش‌های شارژ هوشمند، تصمیم‌گیری بر اساس مقدار بار شبکه، شرایط محیطی، الگوی رفتاری رانندگان، قیمت برق است که با هدف کاهش قیمت شارژ در زمان ازدحام شبکه توزیع با استفاده از ابزار یادگیری ماشین انجام شده است که از قابلیت پیاده‌سازی به‌صورت زمان واقعی برخوردار است [۴]. روش دیگری شارژ هوشمند خودروی برقی بر اساس شرایط ترافیکی، شرایط آب و هوایی است که در داخل خودرو نصب می‌شود و با استفاده از سطح شارژ اولیه خودرو، میزان مصرف خودرو در هر مایل و اطلاعات سیستم موقعیت‌یابی جهانی به‌صورت آنلاین با استفاده از یک ابزار یادگیری ماشین راننده را از میزان شارژ مورد نیاز خود برای سفر بعدی مطلع می‌سازد [۵]. در مرجع [۶] روش شارژ هوشمندی ارائه شده است که قابلیت ادغام با برنامه پاسخ-گویی بار را داشته و از روش‌هایی برای محاسبه‌سازی مسئله جهت همگرایی سریع‌تر مسئله استفاده کرده است. یکی از روش‌های شارژ هوشمند، روش مبتنی بر تشویق بر اساس داده‌های واقعی بازار برق کشور آلمان و فرانسه است که رانندگان با طول مسیر کمتر از ۱۰۰ کیلومتر در روز را تشویق به انعطاف بیشتر کرده تا پیک‌بار شبکه کاهش یابد [۷]. تعرفه‌بندی تولیدات پراکنده و خودروهای برقی یکی دیگر از راه‌کارهای پیشنهادی این مرجع است. روش شارژ هوشمند دیگری برای پایداری و حفاظت شبکه، کمینه‌سازی هزینه‌های شارژ، کاهش ازدحام شبکه و مدیریت عدم قطعیت در مرجع [۸] ارائه شده است که در آن مؤلفه‌های روان‌شناسی و اجتماعی رانندگان خودرو در برنامه‌ریزی شارژ در نظر گرفته شده است تا زمینه‌ساز گسترش هرچه بیشتر خودروهای برقی در شبکه شود. کشور چین یکی از کشورهایی است که پتانسیل بالایی برای پیاده‌سازی شارژ هوشمند خودروهای برقی دارد که لازمه پیاده‌سازی را در تغییر تعرفه قیمت‌گذاری انرژی، گسترش تنوع خودروها (سواری، نیمه-سنگین و سنگین) و گسترش سیستم‌های اطلاعاتی جدید می‌داند [۹]. روش‌های شارژ هوشمند از مزایا و محدودیت‌های گوناگونی برخوردار است. یکی از محدودیت‌های این روش ریسک مالی ناشی از عدم قطعیت مسئله است که در مرجع [۱۰] برای مقابله با آن از یک مدل کسب و کار ریسک‌گریز بهره گرفته شده است تا با تغییر قیمت‌گذاری ریسک مالی پارکینگ مدیریت شود. یکی از مزایای شارژ هوشمند افزایش طول عمر ترانسفررها توزیع ذکر شده است که ناشی از کاهش پیک‌بار و ازدحام شبکه بر اثر شارژ هوشمند است. همچنین کاهش هزینه از مزایای اقتصادی روش نیز هست. مجهزسازی ایستگاه‌های شارژ به پنل‌های فتوولتائیک نیز مزایای روش هوشمند را افزایش می‌دهد [۱۱]. در نظرگیری هم‌زمان منافع مشترکین خودروی برقی و تجمیع کنندگان توان در شارژ هوشمند خودروی برقی یکی از راه‌کارهای کاهش اثرات منفی نفوذ خودروی برقی در شبکه ارائه شده است که نتیجه پیاده‌سازی آن در یکی از شهرهای اکوادور نمایانگر صرفه‌جویی ۵ الی ۵۰ درصدی مصرف انرژی است [۱۲]. یکی از گزارش‌های مبتنی بر نظرسنجی مردمی، مصاحبه با صاحب‌نظران، داده‌های ثبت شده خودروها و سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی مشخص شده است که در حال حاضر با توجه به رشد کم خودروهای برقی بهتر است روش‌های شارژ خانگی خودروهای برقی هوشمند شود و در صورت گسترش سطح شارژ خودروها، پارکینگ‌ها نیز مجهز به این سیستم گردند. هنوز فناوری شارژ هوشمند به بلوغ خود نرسیده است و بنابراین تخمین دقیقی از زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی این روش مشخص نیست. یکی دیگر از ضرورت‌های این زمینه تدوین قوانین و تصویب سیاست‌های جدید دولت‌ها است [۱۳]. در برخی از مقاله‌ها [۱۴] الی [۱۸] عبارت شارژ هوشمند خودروی برقی به معنای مدیریت هوشمندانه جریان

انرژی در داخل یک خودروی هیبریدی تعبیر شده است که هدف آن افزایش راندمان خودرو جهت پیمایش مسیر بیشتر با سوخت و برق کمتر است که در اینجا این تعبیر مدنظر نیست. در مقاله‌های [۱۹] الی [۲۲] در مورد افزایش عمر مفید باتری در وسایل نقلیه الکتریکی و بهینه‌سازی دوسطحی مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای بحث گردیده است.

- مشکلات پیش روی بهره‌برداران گذشته فروپاشی ولتاژ و رشد بیش از حد مصرف انرژی از شبکه است که یک‌بار اضافه را به شبکه تحمیل می‌کند که از نظر رفاه حال مصرف‌کنندگان موجب نارضایتی خواهد شد.

- بر اساس نرخ شارژ پیوسته تحمیل شدن مصرف انرژی مازاد نیاز خودرو برقی است که هم موجب اتلاف انرژی و ایجاد فشار به شبکه خواهد شد.

- مدل‌های ارائه شده پیشین توانایی در نظرگیری حالت‌های مختلف شبکه نبوده و پاسخ مناسبی به نیاز مصرف‌کنندگان نمی‌دهند.

نوآوری بارز این مقاله ارائه روش شارژ هوشمند با نرخ گسسته است که در هیچ مرجعی به آن پرداخته نشده است. علاوه بر این نوآوری، نقش حضور و عدم حضور برنامه پاسخ‌گویی بار به‌طوری جامع مورد بررسی قرار گرفته است تا پیامدهای مثبت ادغام برنامه پاسخ‌گویی بار با شارژ هوشمند گسسته خودروهای برقی به‌خوبی تبیین شود. نوآوری سوم این مقاله نیز در نظرگیری عدم قطعیت مشترکین مسکونی است که توزیعی نرمالی برای حق انتخاب مشترکین در ضریب رضایت‌مندی یا ضریب هزینه-شان در نظر گرفته شده است، بنابراین در این تحقیق هدف ارائه یک روش مدیریت شارژ خودروی برقی است که دارای مشخصات زیر است:

- (۱) روش پیشنهادی به‌خوبی ابعاد پیاده‌سازی عملی شارژ خودروی برقی را بررسی کرده است.
 - (۲) با محدودسازی تعداد دفعات کلیدزنی ایستگاه شارژ، کارایی این دستگاه را بهبود بخشیده و آسیب‌رسانی به آن را کاهش داده است.
 - (۳) نتایج نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در کاهش تلفات و افزایش طول عمر باتری هستند.
 - (۴) برخلاف روش‌های سنتی که در آن نرخ شارژ معمولاً عددی پیوسته بود، نرخ شارژ به‌صورت گسسته در نظر گرفته شده است.
 - (۵) مقایسه میان نرخ شارژ نرمال و سریع صورت گرفته است.
 - (۶) مدل مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح درآمده است که با استفاده از نرم‌افزار MOSEK و YALMIP حل شده است.
 - (۷) محدودیت مربوط به اضافه باری ترانسفرهای توزیع بر اساس مدل مطرح‌شده لحاظ شده است.
 - (۸) شبکه مورد بررسی و مدل بار سنتی از یک شبکه واقعی مرجع [۲۳] اقتباس شده است.
 - (۹) منافع هم‌زمان مشترکین (کاهش فرسایش باتری) و منافع بهره‌بردار شبکه (پروفیل بار شبکه) بر اساس مدل مرجع [۲۴] الی [۲۷] مورد استفاده قرار گرفته است.
 - (۱۰) تأثیر روش در حضور و عدم حضور خودروهای برقی با تأثیر حضور متفاوت همراه با بار پاسخ‌گو در مرجع [۲۸] بررسی شده است.
- سایر بخش‌های مقاله به این شرح است. بخش ۲ مدل‌سازی مسئله را بیان می‌کند و بخش ۳ به شبیه‌سازی اختصاص دارد. در بخش ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها بیان می‌شود.

۲- توصیف و مدل‌سازی

مدل‌های بهینه‌سازی این مقاله مربوط به مسئله برنامه‌ریزی پاسخ‌گویی بار و برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی است. در ابتدا مدل برنامه پاسخ‌گویی بار ارائه می‌شود. سپس مدل برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی ارائه می‌گردد که نرخ شارژ در آن گسسته در نظر گرفته شده است، بنابراین در این پژوهش هدف ارائه روش شارژ هوشمند با نرخ گسسته است به این صورت که با اعلام پیمایش مسافت‌های بعدی به میزان مورد نیاز شارژ دریافت نمایند. همچنین نقش حضور و عدم حضور

برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار به‌طوری جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد تا پیامدهای مثبت ادغام برنامه پاسخ‌گویی بار با شارژ هوشمند گسسته خودروهای برقی به‌خوبی تبیین شود. از طرفی هدف بررسی عدم قطعیت مشترکین مسکونی است که توزیع نرمالی برای حق انتخاب مشترکین در انتخاب نوع شارژ به‌صورت شارژ سریع یا نرمال در ضریب رضایتمندی یا ضریب هزینه‌شان در نظر گرفته شده است، بنابراین در این تحقیق هدف ارائه یک روش مدیریت هوشمند شارژ خودروی برقی است.

۲-۱- مدل برنامه پاسخ‌گویی بار

برنامه پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته در این تحقیق، معطوف به سیستم مدیریت انرژی در منازل مسکونی است که در آن هر یک از مشترکین با توجه به امکانات خود و بر اساس علایق خود اقدام به برنامه‌ریزی مصرف برق خود می‌نمایند. سه نوع بار در این تحقیق در نظر گرفته شده است که بار منعطف توانی (زمان کاری مشخص با توان قابل تنظیم)، بار منعطف زمانی (توان کاری مشخص با زمان قابل تغییر) و بار غیر منعطف نام دارد. تابع هدف برنامه پاسخ‌گویی بار ترکیبی از هزینه و نارضایتی مشترک در نظر گرفته شده است که مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$f_{DR} = \varepsilon_1 \sum_{t \in T} \sum_{L \in \Omega^{load}} \underbrace{RTP(t)(P_t^L + P_t^S)}_{\text{هزینه برق}} + \varepsilon_2 \sum_{t \in T} \sum_{L \in \Omega^{load}} \underbrace{\gamma^L (\bar{P}_t^L - P_t^L)}_{\text{هزینه نارضایتی}} \cdot \bar{P}_t^L \quad (1)$$

ضریب‌های ε_1 و ε_2 به‌ترتیب وزن مربوط به هزینه برق و هزینه نارضایتی هستند که هر دو عددی مثبت بوده و در این مقاله فرض شده است که مجموع آن‌ها همواره برابر یک باشد، تا اگر مشترکی قصد اهمیت دادن به هدف خاصی را داشته باشد، از اهمیت هدف دیگر کاسته شود. قیود مرزی برنامه پاسخ‌گویی بار مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا به آن اشاره خواهد شد.

الف) محدودیت بار منعطف توانی: بار منعطف توانی دارای قابلیت تغییر زمان مصرف نیست بنابراین میزان تأخیر یا تعویق اندازی آن مطابق رابطه (۲) صفر خواهد بود. اما این بار قابلیت تغییر توان کاری خود در محدوده مجاز را مطابق رابطه (۳) دارد.

$$\tau^L = 0; \quad L \in \Omega^{FPL} \quad (2)$$

$$0 \leq P_t^L \leq \bar{P}_t^L, \quad \forall L \in \Omega^{FPL}, t \in T \quad (3)$$

ب) محدودیت بار منعطف زمانی: بار منعطف توانی دارای قابلیت تغییر زمان مصرف در محدوده مجاز بر اساس رابطه (۴) است. اما این بار قابلیت تغییر توان کاری خود را مطابق رابطه (۵) نخواهد داشت.

$$0 \leq \tau^L \leq \bar{T}; \quad L \in \Omega^{FTL} \quad (4)$$

$$P_t^L = \bar{P}_{t-\tau^L}^L, \quad \forall L \in \Omega^{FTL}, t \in T \quad (5)$$

ج) محدودیت بار غیر منعطف: مطابق رابطه‌های (۶) و (۷) بار غیر منعطف به‌ترتیب امکان تغییر زمان بهره‌برداری و تغییر توان مصرفی خود را نخواهد داشت.

$$\tau^L = 0; \quad L \in \Omega^{NFL} \quad (6)$$

$$P_t^L = \bar{P}_t^L, \quad \forall L \in \Omega^{NFL}, t \in T \quad (7)$$

د) محدودیت ذخیره‌ساز: توان و انرژی ذخیره‌ساز در هر لحظه مطابق رابطه‌های (۸) و (۹) به‌ترتیب باید در محدوده مجاز خود قرار داشته باشد. همچنین ارتباط میان توان و انرژی ذخیره‌ساز در رابطه (۱۰) و ارتباط میان انرژی اولیه و نهایی آن در رابطه (۱۱) ذکر شده است:

$$P_t^S \leq P_t^S \leq \bar{P}_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (8)$$

$$P_t^S \leq P_t^S \leq \bar{P}_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (9)$$

$$E_{t+1}^S = E_t^S + P_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (10)$$

$$E_{t_{final}}^S = E_{t_{ini}}^S, \quad t_{final}, t_{ini} \in \mathcal{T}, \forall S \in \Omega^{strg} \quad (11)$$

۲-۲- مدل برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی

هدف از شارژ خودروهای برقی در این مقاله کاهش هزینه شارژ باتری و هزینه فرسودگی آن است که در رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تعریف شده‌اند:

$$\min \text{Cost}_{\text{Total}} = \text{Cost}_{\text{charge}} + \text{Cost}_{\text{bat}} \quad (12)$$

$$\text{Cost}_{\text{charge}} = \sum_{t=1}^T \left(\text{RTP}(t) \cdot \left(r_{\text{PEV},k} \sum_{k=1}^N (C_k^t - D_k^t) \right) \right) \quad (13)$$

$$\text{Cost}_{\text{bat}} = \sum_{k=1}^N (c_{b,k} E_{b,k} + c_L) \frac{E_{\text{dis},k}}{L_c E_{b,k} \text{DOD}} \quad (14)$$

در این رابطه‌ها میزان توان شارژ خودروها و انرژی دشارژ شده خودرو بر اساس رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید:

$$P_{\text{PEV}}^t = \sum_{k=1}^N (C_k^t - D_k^t) \cdot r_{\text{PEV},k} \quad \forall t \in \mathcal{H} \quad (15)$$

$$E_{\text{dis},k} = \sum_{t=1}^T D_k^t \cdot r_{\text{PEV},k}, \quad \forall k \in \mathcal{Z} \quad (16)$$

قیود مرزی برنامه‌ریزی شارژ خودرو مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا به آن اشاره خواهد شد. الف) محدودیت‌های مربوط به ذخیره‌ساز خودروی برقی: همواره توان شارژ خودروهای و سطح انرژی آن‌ها باید مطابق رابطه‌های (۱۷) و (۱۹) در محدوده مجاز قرار داشته باشند. همچنین در زمانی که خودرو در پارکینگ حضور ندارد، توان شارژ آن مطابق رابطه (۱۸) برابر صفر باشد.

$$0 \leq r_{\text{PEV},k} \leq P_{\text{rated}} (C_k^t - D_k^t), \quad \forall k \in \mathcal{Z} \quad (17)$$

$$r_{\text{PEV},k} = 0, \quad \forall k \notin \mathcal{Z} \quad (18)$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_k^t \leq \text{SOC}_{\max}, \quad \forall k \in \mathcal{Z}, \forall t \in \mathcal{H} \quad (19)$$

ب) محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ: وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی مطابق رابطه (۲۱) متغیرهای باینری هستند که امکان وقوع هم‌زمان شارژ و دشارژ برای یک خودرو در یک لحظه مطابق رابطه (۲۰) ناممکن است. همچنین متغیر مربوط به وضعیت آماده به کار خودروی برقی مطابق رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$0 \leq C_k^t + D_k^t \leq 1 \quad (20)$$

$$C_k^t, D_k^t \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$s_k^t = \begin{cases} \{-1, 0, 1\} & \forall t \in P_{t,k}; \forall k \in \mathcal{Z} \\ 0 & \forall t \notin P_{t,k}; \forall k \in \mathcal{Z} \end{cases} \quad (22)$$

ج) محدودیت مربوط به توان موردنیاز خودرو: در مسئله شارژ هوشمند خودروی برقی، مسافت حرکت خودرو از خانه تا پارکینگ مطابق رابطه (۲۳) و از طول سفرهای بعدی آن مطابق رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود. سطح شارژ مورد نیاز هر خودرو و مقدار انرژی صرف شده برای آن ذخیره‌ساز به ترتیب از رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) به دست می‌آید. قید (۲۷) نیز تضمین‌کننده تأمین توان موردنیاز خودروهای برقی است.

$$\text{SOC}_A = 1 - (d/d_R) \quad (23)$$

$$\text{SOC}_D = 0.2 + (\text{STD}/d_R) \quad (24)$$

$$\text{SOC}_i^{\text{req}} = \begin{cases} 1 - \text{SoC}_A & \text{if : SoC}_D \geq 1 \\ \text{SoC}_D - \text{SoC}_A & \text{if : SoC}_A < \text{SoC}_D < 1 \\ 0 & \text{if : SoC}_A = \text{SoC}_F \\ -(\text{SoC}_A - \text{SoC}_D) & \text{if : SoC}_A > \text{SoC}_F > 0.2 \end{cases} \quad (25)$$

$$E_i^{\text{req}} = \frac{\text{SoC}_i^{\text{req}} B_C}{\eta} \quad (26)$$

$$\sum_{t=t_{in,k}}^{t=t_{out,k}} s_k^t \cdot r_{PEV,k} = E_{req,k}, \quad \forall k \in Z \quad (27)$$

د) محدودیت مربوط به پخش بار در شبکه توزیع (امنیت شبکه): قید مربوط به توازن توان حقیقی و راکتیو در هر یک از گره-های شبکه توزیع مطابق رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) به دست می‌آید. همچنین رابطه (۳۰) نمایانگر ارتباط میان توان عبوری از خطوط و افت ولتاژ در گره‌های شبکه توزیع است. رابطه‌های (۳۱) و (۳۲) محدودیت ولتاژ گره‌های بار و گره اسلک متصل به شبکه بالادستی را بیان می‌کند. قیدهای (۳۳) و (۳۴) به ترتیب محدود توان عبوری از پست شبکه توزیع و توان عبوری از خطوط شبکه را به مسئله اعمال می‌نماید.

$$PG_n^t + PLS_n^t - PD_n^t = I_{map}^{Br} p_{ij}^t, \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \quad (28)$$

$$QG_n^t + QLS_n^t - QD_n^t = I_{map}^{Br} q_{ij}^t, \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \quad (29)$$

$$n_i^t - n_j^t = 2(r_{ij} p_{ij}^t + x_{ij} q_{ij}^t), \quad \forall (i, j) \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \quad (30)$$

$$\underline{V}_n^2 \leq n_n^t \leq \bar{V}_n^2; \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \quad (31)$$

$$n_n^t \geq 1, \quad n = N^{\text{main}}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (32)$$

$$s_{agg}^t \leq T_{rat}, \quad \forall t \in H \quad (33)$$

$$Sp_{ij} \leq Sp_j^{\text{max}} \quad (34)$$

در بخش بعدی مدل‌های ذکر شده برای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار و برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی، در محیط نرم‌افزار متلب و جعبه‌ابزارهای Yalmip و Mosek پیاده‌سازی خواهد شد. همچنین نتایج مربوط به چند مورد مطالعاتی با یکدیگر مقایسه می‌گردد تا دید وسیع‌تری نسبت به مسئله به دست آید.

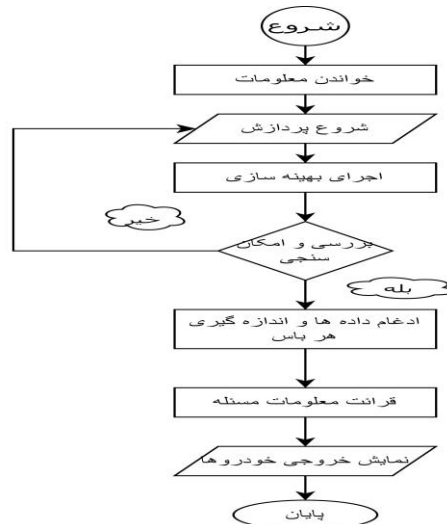
۲-۳- روش حل مسئله و ارائه ساختار کلی بهینه‌سازی

مسئله برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی در این مقاله خود یک مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن رابطه (۱۲) بوده (که شرح هر یک از مؤلفه‌های آن در رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) بیان شد) و قیدهای مرزی آن از رابطه (۱۵) الی (۳۴) است. همان‌طور که مشخص است، جواب‌های مسئله بهینه‌سازی شارژ خودروهای برقی، مستقل از رفتار منازل مسکونی نیستند. به عبارت دیگر قیدهای مربوط به توازن توان تولید و مصرف [رابطه‌های (۲۸) و (۲۹)] وابستگی مسئله را نسبت به 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 اساس الگوی مصرف برق مشترکین، چه در حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار و چه در غیاب آن تعیین می‌شود. برای تعیین مقدار بار مصرفی منازل مسکونی، نیاز به حل مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار است که تابع هدف آن رابطه (۱) بوده و قیدهای مرزی آن رابطه‌های (۲) الی (۱۱) است. پس از حل این برنامه مقدار بار مصرفی هر یک از منازل و بار مصرفی باس‌های شبکه به غیر از خودروهای برقی به دست می‌آید، بنابراین شبه کد مربوط به بهینه‌سازی کل مسئله به این صورت تعریف می‌گردد. بر اساس فلوچارت نمایش داده شده مقاله، می‌توان دریافت که نتایج از حل دو بهینه‌سازی جداگانه به دست می‌آیند. مرحله اول تنها اختصاص به انتخاب الگوی مصرف مشترکین منازل مسکونی هستند که مستقل از خودروهای برقی بهینه‌سازی می‌شود و مرحله دوم مربوط به بهینه‌سازی شارژ خودروهای برقی هستند که بستگی بالایی به جواب‌های به دست آمده از مرحله قبل دارد. بر اساس ادغام این دو مرحله به خوبی می‌توان متوجه شد که اگر مدیران مربوط به شارژ پارکینگ‌های خودروی برقی،

برنامه‌ریزی خود را با آگاهی از رفتار مشترکین منازل مسکونی انجام دهند، هم ترانسفرمرهای توزیع شبکه دچار اضافه باری نخواهد شد و هم پیک بار مصرفی شبکه به خوبی کنترل می‌شود.

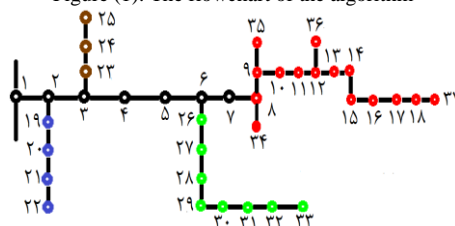
۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این تحقیق ۴ مورد مطالعاتی بررسی شده که مشخصات هر یک از آن‌ها در جدول (۱) نمایش داده شده است. شبکه مورد بررسی یک شبکه ۳۷ باس واقعی [۲۳] است که شمای آن در شکل (۲) آمده است. مشخصات مربوط به بار نامی هر یک از گره‌های شبکه و محدودیت خطوط انتقال از مرجع [۲۳] اقتباس شده است. نقاط سبز، قرمز، آبی و قهوه‌ای به ترتیب بیانگر مناطق مسکونی، بخش کامپوزیت، ناحیه تجاری و صنعتی است. با تمامی نواحی مطابق با مرجع مذکور است و تنها امکان برنامه پاسخ‌گویی بار برای نواحی مسکونی در نظر گرفته شده است. پارکینگ‌های شارژ خودرو نیز تنها در بخش صنعتی قرار دارند (گره ۲۵-۲۳). تعداد کل خودروهای برقی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده که برای تسریع در محاسبات بر اساس به ۱۰۰ خوشه ۱۰ تایی بر اساس مشابه بودنشان دسته‌بندی شده‌اند. مشخصات مربوط به بارهای پاسخ‌گو از مرجع‌های [۲۵] و [۲۶] اقتباس شده است که شامل بار منعطف زمانی (ماشین لباس‌شویی)، منعطف توانی (روشنایی و سیستم تهویه هوا) و بار غیر-منعطف (یخچال فریزر، توستر و کتری) است که مشخصات هر یک از آن‌ها برای یک‌منزل مسکونی نمونه در جدول (۲) آمده است. به منظور سادگی مسئله، فرض شده است که ۱۰۰ منزل در نواحی مسکونی وجود دارد و الگوی مصرف مشترکین در انتخاب ضریب رضایت‌مندی یا کاهش هزینه از یک توزیع نرمال تبعیت کند. حد مجاز افت ولتاژ نیز برابر ۵ درصد اختلاف کمابیش از مقدار نامی یک پریونیت در نظر گرفته شده است. ظرفیت ترانسفرمر توزیع پست شبکه نیز یک مگاوات لحاظ شده است. انواع خودروهای برقی به کار رفته در این تحقیق در جدول (۳) نمایش داده شده است. سایر مشخصات مربوط به خودروی برقی فرض شده است که عبارت‌اند از: شارژ نرمال با نرخ توان ۴ کیلووات و شارژ سریع با نرخ ۸ کیلووات است.



شکل (۱): فلوچارت روش حل مسئله و ساختار کلی بهینه‌سازی روش حل مسئله

Figure (1): The flowchart of the algorithm



شکل (۲): دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع مورد بررسی

Figure (2): Single line diagram of the network

Table (1): Single line diagram of the network

جدول (۱): موردهای مطالعاتی مقاله

مورد	۱	۲	۳	۴
مد شارژ	نرمال	سریع	نرمال	سریع
برنامه پاسخ‌گویی	دارد	دارد	ندارد	ندارد

Table (2): Information of all types of customer load

جدول (۲): مشخصات بارهای پاسخگوی یک منزل نمونه

نوع بار	منعطف زمانی		منعطف توانی		غیر منعطف	
	لباسشویی	روشنایی	تهویه	کتری	توستر	یخچال
نام بار						
زمان	۲ ساعت	۱ - ۱۹	تمام وقت	۹-۸ ۱۸-۱۷ ۲۱-۲۰	۹-۸	تمام وقت
توان	۰/۷	صفر تا ۰/۸	صفر تا ۱/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۲

Table (3): Information of all EVs types

جدول (۳): اطلاعات مربوط به انواع خودروهای برقی

نام خودرو	برد مسافتی	ظرفیت (کیلووات-ساعت)	درصد پراکندگی	نوع ذخیره‌ساز
هیبرید ۳۰	۳۰ مایل	۱۳/۸	۳۰	باتری
هیبرید ۴۰	۴۰ مایل	۱۸/۴	۶۰	باتری
نیسان لیف	۷۲ مایل	۲۴	۱۰	باتری

Table (4): Information of all EV trips

جدول (۴): اطلاعات آماری رانندگان خودروی برقی

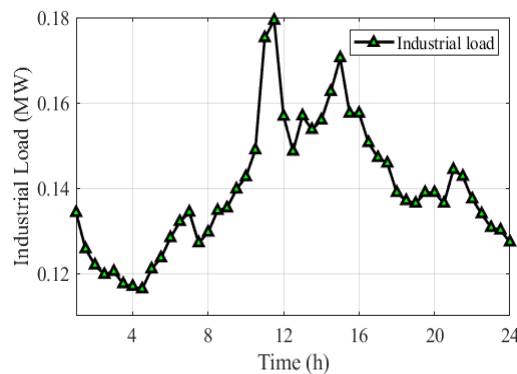
توصیف	مقدار	یکا
مسافت روزانه متوسط	توزیع نرمال	km
تعداد سفرها در روز	۳	عدد
میانگین طول هر سفر	۱۷/۳	km
کمترین طول هر سفر	۱	km
بیشترین طول هر سفر	۳۷/۵	km

Table (5): Information of all EV clusters

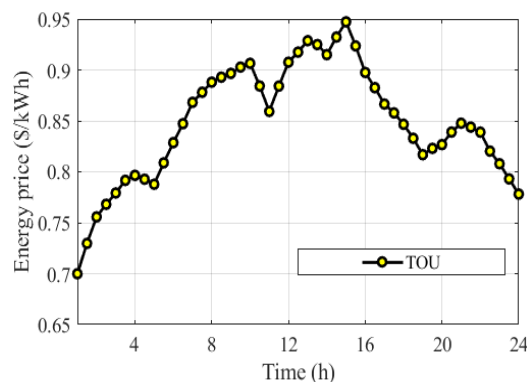
جدول (۵): جمع‌بندی اطلاعات ناشی از خوشه‌بندی خودروها

خوشه	زمان ورود	زمان خروج	شارژ اولیه بر حسب درصد	شارژ نهایی بر حسب درصد	ظرفیت (کیلووات-ساعت)	کیلووات-ساعت مورد نیاز
۱	۹	۱۷	۳۶/۴۸	۸۹/۹۶	۱۳/۸۰	۷/۳۸
۲	۷	۱۸	۲۶/۸۰	۹۰/۳۶	۱۳/۸۰	۸/۷۷
۳	۹	۱۸	۲۰/۰۰	۹۹/۸۸	۱۳/۸۰	۱۱/۰۲
۴	۱۱	۱۷	۲۰/۰۵	۹۷/۱۰	۱۸/۴۰	۱۴/۱۷
۵	۹	۱۸	۳۴/۴۲	۹۹/۲۵	۱۸/۴۰	۱۱/۹۲
۶	۱۰	۱۷	۲۳/۶۷	۹۳/۵۸	۱۸/۴۰	۱۲/۸۶
۷	۸	۱۹	۳۱/۸۹	۸۸/۰۷	۱۸/۴۰	۱۰/۳۳
۸	۱۰	۱۸	۳۸/۴۶	۹۸/۷۰	۱۸/۴۰	۱۱/۰۸
۹	۸	۱۸	۲۰/۰۰	۸۹/۵۹	۱۸/۴۰	۱۲/۸۰
۱۰	۹	۱۸	۴۳/۴۲	۸۴/۶۴	۲۴/۰۰	۱۱/۸۹

اطلاعات آماری خودروها بر اساس آمار واقعی کشور سنگاپور [۲۷] است که در قالب جدول (۴) نمایش داده شده است. فرض شده است که طول سفر اول برابر با مسافت میان منزل تا پارکینگ عمومی باشد که مالک برای ورود به پارکینگ آن را پیموده است و طول دو سفر بعدی از زمان خروج خودرو از پارکینگ محاسبه گردد. بر اساس مشخصات فنی و آماری ذکر شده برای خودروهای برقی، اطلاعات پرسش‌نامه تجمیع‌کنندگان توان در پارکینگ خودروهای برقی در قالب جدول (۵) در خواهد آمد. انرژی نیاز مربوط به هر یک از خوشه‌های خودرو برقی باید به‌گونه‌ای تأمین شود که اولاً سطح شارژ خودرو به کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت نامی‌اش نرسد و از ۱۰۰ درصد این مقدار نیز تجاوز ننماید. همچنین در صورت در نظرگیری محدودیت ترانسفورمر توزیع، حد مجاز بار کشیده شده از شبکه بالادستی رعایت گردد. قبل از برنامه‌ریزی هوشمند خودروهای برقی، نیاز به محاسبه بار مصرفی شبکه در حالت حضور بار پاسخ‌گو و عدم حضور آن و منحنی تغییرات نرمال شده بار سنتی در بخش صنعتی در ساعات روز است که نمودار آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. در صورتی که برنامه پاسخ‌گویی بار حضور داشته باشد، بستگی به ضریب رضایت‌مندی مشترکین، بارهایی مانند ماشین لباس‌شویی را می‌توان در زمان‌های مناسب‌تری بهره‌برداری نمود و یا اینکه می‌توان سیستم‌های تهویه و یا روشنایی را با توان کمتری نسبت به توان نامی مورد استفاده قرار داد. بنابراین انتظار می‌رود، منحنی بار انعطاف بیشتری نسبت به مورد سنتی داشته باشد. در صورت حضور برنامه پاسخ‌گویی بار برای نزدیکی بیشتر به واقعیت، فرض شده است که الگوی انتخاب ضریب رضایت‌مندی مشترکین از یک توزیع نرمال پیروی کند. هرچه ضریب رضایت‌مندی به سمت یک نزدیک شبکه به این معناست که مشترک تمایل بیشتری به حفظ رفاه خود دارد و افزایش هزینه را حاضر است پرداخت کند. هرچه این ضریب به صفر نزدیک شود، به این معناست که مشترک کاهش هزینه را به تأمین رفاه خود ترجیح می‌دهد. در صورتی که بار پاسخ‌گویی حضور نداشته باشد و به بیان دیگر امکان تغییر زمان یا توان بارها وجود نداشته باشد، آنگاه پروفیل بار رشد قابل توجه خواهد داشت. به‌منظور نزدیکی به واقعیت، فرض شده است که ناهم‌زمانی میان رفتار مشترکین وجود داشته باشد. این ناهم‌زمانی از توزیع نرمال پیروی می‌کند. مقایسه کمی میان پارامترهای پروفیل بار در شرایط حضور و غیاب برنامه پاسخ‌گویی بار در قالب جدول (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، میانگین بار و پیک‌بار شبکه در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار به ترتیب به‌اندازه ۴۶/۰۲ درصد و ۲۰/۵۳ درصد نسبت به حالت سنتی عدم حضور بارهای پاسخ‌گو کاهش یافته است. این مقایسه، میزان کارایی برنامه پاسخ‌گویی بار را در بهبود پارامترهای شبکه توزیع به‌خوبی نمایش می‌دهد. مسلماً برنامه‌ریزی خودروهای برقی، در شرایطی که محدودیت مربوط به ترانسفورمرهای توزیع در نظر گرفته شود، تأثیر قابل توجه در شارژ خودروهای برقی خواهد داشت. هر چه توان عبوری از خطوط با ازدحام بیشتری توسط منازل مسکونی مواجه باشد، امکان شارژ خودروهای برقی در آن بازه‌های زمانی نیز کاهش می‌یابد. حتی امکان دارد هزینه‌های شارژ خودروهای برقی نیز به دلیل جابه‌جایی زمان شارژ آن‌ها به بازه‌های گران‌قیمت‌تر نیز افزایش پیدا کند. در این پژوهش انواع پارامترهای شبکه توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ابعاد گسترده‌ای از جزئیات مسئله به‌دست آید و تفاوت میان چهار مورد مطالعاتی حاصل گردد. نتیجه مقایسه چهار مورد مطالعاتی در جدول (۷) نمایش داده شده است. در حل مسائل بهینه‌سازی توسط ترکیب نرم‌افزارهای Yalmip و Mosek هر یک از این نرم‌افزارها زمان مخصوص به خود را صرف خواهند کرد. زمانی که نرم‌افزار Yalmip صرف می‌کند بیشتر جهت مرتب‌سازی قیدهای مرزی و بررسی اولیه مدل بهینه‌سازی است که معمولاً کمتر از چندین ثانیه به طول می‌انجامد. به‌نوعی وظیفه Yalmip آماده‌سازی مدل و معرفی آن به حل‌کننده‌های Mosek است. پس از دریافت مدل توسط Mosek مسئله بهینه‌سازی با استفاده از ابزارهای مبتنی بر الگوریتم ساقه و ریشه شروع به حل می‌کند. نحوه تعریف هر یک از قیدها تأثیر به‌سزایی در همگرایی این نرم‌افزار دارد. در مورد مدل خاص استفاده شده در این تحقیق، حساسیت جواب‌ها به قیدها مربوط به محدودیت ولتاژ گره‌ها، محدودیت ظرفیت خطوط، تعریف گسسته یا پیوسته بودن نرخ شارژ، محدودیت بار تأمین نشده در هر گره، و محدودیت تأمین توان موردنیاز خودروها از جمله مواردی است که می‌تواند منجر به همگرایی یا واگرایی مسئله شود؛ بنابراین تعیین دقیق و صحیح این محدودیت‌ها در زمان حل مسئله و همگرایی آن بسیار اثرگذار است. اختلاف‌زمان حل مسئله در هر یک از موارد مطالعاتی، به دلیل تأثیرگذاری پروفیل بار مسکونی این موارد و توان شارژ خودروهای برقی است که منجر به افزایش زمان حل مسئله در مورد شارژ سریع نسبت به نرمال و در مورد بار سنتی نسبت به پاسخ‌گویی بار شده است.



شکل (۳): منحنی تغییرات نرمال شده بار سنتی بخش صنعتی در ساعات روز
Figure (3): The normalized change curve of the traditional load of the industrial sector in daylight hours



شکل (۴): قیمت گذاری ساعت مصرف انرژی
Figure (4): Pricing of energy consumption hours

Table (6): the load profile specifications of the cases with/without DR

جدول (۶): مقایسه پروفیل بار تجمعی منازل مسکونی در حضور و غیاب برنامه پاسخ گویی بار

تعداد کلید زنی	ضریب بار	کمینه بار	پیک بار	انحراف معیار	میانگین	برنامه پاسخ گویی بار
۱/۱۲۹۶	۱/۵۵	۹۴/۲۰	۲۵۴/۸۰	۴۳/۵۷	۱۶۴/۳۸	حضور
۱/۶۸۹۷	۱/۰۵	۲۹۳/۴۷	۳۲۰/۶۶	۷/۴۱	۳۰۴/۵۴	عدم حضور

چون نرخ شارژ گسسته در نظر گرفته شده است (از صفر تا ۱۰۰ نرخ شارژ به ۱۰۰ بازه گسسته تقسیم شده است)، مسئله در حالت نرمال، با پله‌های کوچک‌تری می‌تواند خودروها را شارژ کند و سریع‌تر موجب همگرایی می‌شود. اما زمانی که شارژ سریع است، اندازه هر گام بزرگ‌تر بوده و امکان تأمین قیدهایی که به‌دقت بالاتر (گام‌های کوچک‌تر) نیاز دارند کمتر فراهم می‌شود، بنابراین زمان همگرایی افزایش می‌یابد. همچنین در این جدول به‌خوبی مشخص است که توان تأمین نشده خودروها در حالت شارژ سریع نسبت به نرمال بیشتر خواهد بود. مقدار بار زدایی باس‌ها مقدار بسیاری اندکی است و این نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت توان خطوط، تعریف صحیح قید افت ولتاژ شبکه، مسئله به‌جوابی همگرا شده است که توان هر یک‌بارهای شبکه بدون اینکه افت ولتاژ از محدوده مجاز خارج شود، به‌خوبی تأمین گردد. تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیز به‌خوبی نمایانگر تفاوت شارژ سریع و نرمال است. در شارژ نرمال، تعداد دفعات شارژ به دلیل کوچک بودن مقدار توان شارژ در هر مرحله نسبت به حالت سریع افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار نسبت تعداد کلیدزنی شارژ ۱/۱۲۹۶ و در غیاب آن ۱/۶۸۹۷ به‌دست آمده است که دلیل این امر محدودیتی است که پروفیل بار مسکونی برای پست توزیع ایجاد کرده است و مقدار مؤثر شارژ در هر مرحله باید در گام‌های کوچک‌تر و دفعات بالاتر صورت گیرد تا پست توزیع دچار اضافه‌باری نشود. نمودار مربوط به قیمت‌گذاری ساعات مصرف انرژی در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در ساعات ۱۰ الی ۱۳ که قیمت برق در پیک قرار دارد، هیچ خودرویی شارژ نشده و تنها در مورد سوم کمی شارژ صورت گرفته

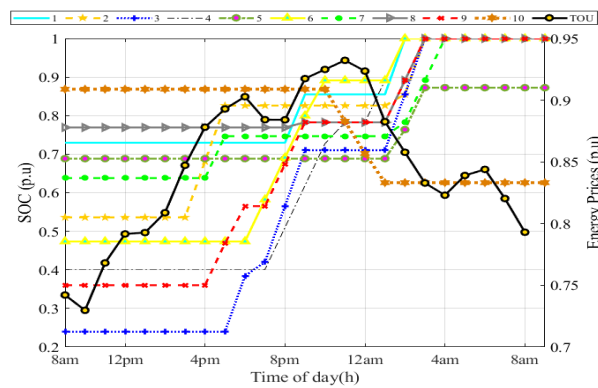
است، چون با توجه به پایین بودن سطح شارژ نرمال و محدودیتی که بار سنتی ایجاد کرده است، جهت تأمین توان خودروها مقداری از شارژ به ساعات پیک به‌اجبار باید موکول شود ولی این اتفاق برای سایر موارد رخ نداده است. به‌منظور درک بهتر زمان شارژ و میزان شارژ هر یک از خوشه‌های خودرو، نمودارهای میله‌ای مشارکت هر خوشه نیز در همین شکل نشان داده شده است. با کاهش هزینه برق، میزان شارژها بیشتر شده است. در هر لحظه نیز حداکثر ۴ الی ۵ خودرو هم‌زمان شارژ شده‌اند. وضعیت متوسط سطح شارژ باتری‌ها در هر لحظه برحسب درصد کیلووات-ساعت در خودروهای برقی در مد شارژ نرمال در شکل (۵) نمایش داده شده است. تا قبل از ورود خودروها به پارکینگ به‌طور میانگین خودروها در حدود ۳۰ درصد ظرفیت خود شارژ دارند. تا قبل از به پیک رسیدن قیمت در ساعت ۱۲ به‌طور متوسط خودروها کمتر از ۶۰ درصد شارژ شده‌اند. سپس در ساعت پیک شارژی صورت نگرفته است و پس‌از آن تا ساعت ۱۸ به‌طور میانگین حدوداً ۸۰ درصد شارژ هر خودرو شارژ دارد و از آن پس خودروها به‌طور میانگین تا حدود ۹۴ درصد شارژ خواهند شد. تفاوت روش شارژ هوشمند با شارژ سنتی در همین جا به‌خوبی مشخص می‌شود. به‌جای شارژ کامل هر خودرو به میزان نیاز شارژ شده است. مقدار انرژی موردنیاز شارژ خودروها که بر اساس تقاضای مشترکین طبق جدول (۵) محاسبه می‌شود، به‌مرور زمان باید تأمین گردد تا مسئله از جواب قابل قبول برخوردار باشد. نحوه تأمین توان عبوری از پست شبکه توزیع در قالب شکل ۶ نمایش داده شده است. به‌تدریج با ورود خودروها به درون پارکینگ (اثر بهمنی)، مقدار شارژ آن‌ها آغاز شده است و در نهایت به‌طور کامل این انرژی به خودروها اختصاص داده شده است. همان‌طور که مشخص است، تفاوت میان موردهای مطالعاتی چندان نیست. به‌منظور درک بهتر تفاوت میان حضور خودروهای برقی پروفیل بار کل خودروهای برقی در مد شارژ سریع و نرمال با در نظرگیری محدودیت‌های یک مگاواتی ظرفیت خطوط در شکل (۷) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مقایسه‌ای میان حضور متفاوت خودروهای برقی و مقایسه با نرخ خرید انرژی صورت گرفته است.

به دلیل بیشتر بودن بار مصرفی حالت سنتی نسبت به حالت پاسخ‌گویی بار، توان عبوری از پست توزیع در این زمان برای موردهای سه و چهار بیشتر از دو مورد دیگر است. از ساعت ۷ الی ۲۰ خودروها در پارکینگ حضور دارند و به دلیل پایین بودن قیمت برق، توان خریداری شده در حالت شارژ سریع بیشتر از شارژ نرمال است. مشاهده می‌شود که مورد سه نسبت به مورد یک (و همچنین مورد چهار نسبت به دو)، در همان زمان اولیه (ساعت ۷) با شارژ بالاتری شروع به کار کرده است. در شکل‌های (۴) و (۵) هم به‌خوبی مشخص است که منحنی مورد سه بالاتر از مورد یک قرار گرفته است. سپس مطابق شکل (۶) محدودیت پست توزیع نقشی سرنوشت‌ساز پیدا می‌کند و خودروها مجبور به کاهش نرخ شارژ و به تعویق اندازی آن می‌شوند. به‌منظور جبران این عقب‌ماندگی اولیه روش پاسخ‌گویی بار نسبت به روش سنتی، شاهد شارژ موردهای ۱ و ۲ در ساعت ۱۵ (به دلیل کاهش بار مسکونی و آزادسازی ظرفیت) هستیم و از آن پس مطابق شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌کنیم که منحنی سطح شارژ خودروها در مورد یک از ساعت ۱۵ به بعد بالاتر از مورد سه قرار گرفته است و به‌نوعی آن تعویق جبران شده است.

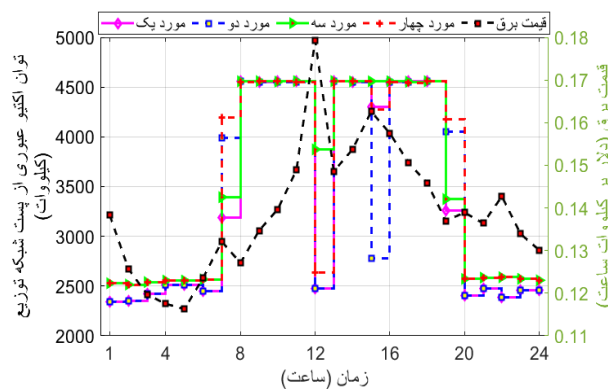
Table (7): comparison of case studies results

جدول (۷): مقایسه نتایج موردهای مطالعاتی

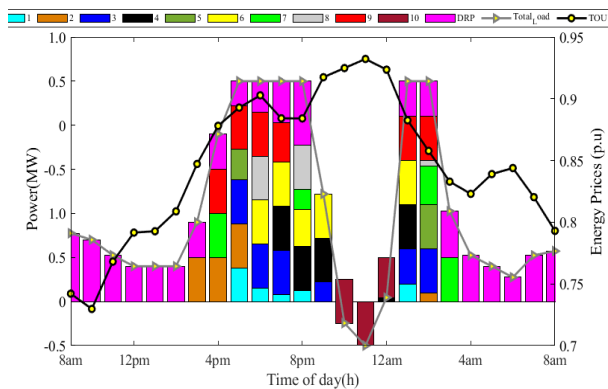
مورد ۴	مورد ۳	مورد ۲	مورد ۱	پارامتر
۱/۱۷	۱/۴۸	۱/۴۹	۵/۰۳	زمان Yalmip (ثانیه)
۳۲۵/۸۹	۲۴۵/۱۵	۲۴۹/۵۳	۲۱۰/۹۰	زمان Mosek (ثانیه)
۳۲۰۸/۲۳	۳۲۶۶/۷۸	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۲۳/۱۳	هزینه شارژ (دلار)
صفر	صفر	صفر	صفر	هزینه فرسودگی (دلار)
۳۲۰۸/۲۳	۳۲۶۶/۷۸	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۲۳/۱۳	هزینه کل (دلار)
۱۱۶۰۰	۱۹۶۰۰	۱۰۸۰۰	۱۲۲۰۰	دفعات شارژ
۸۰۰۰	صفر	۸۸۰۰	۷۴۰۰	دفعات دشارژ
۹۲/۷۸	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸	۵۲/۷۸	مجموع شارژ تأمین نشده (kWh)
۱/۴۳	۱/۴۳	صفر	۱/۰۴	مجموع بار زدایی (kWh)
۲۶ و ۶	۶	۳۳ و ۳۲ و ۹ و ۵ و ۴	۵	باس‌های دارای بار زدایی



شکل (۵). تأمین شارژ موردنظر هر یک از خودروهای برقی در مد شارژ نرمال
Figure (5): Provide the desired charge of each electric vehicle in normal charging mode

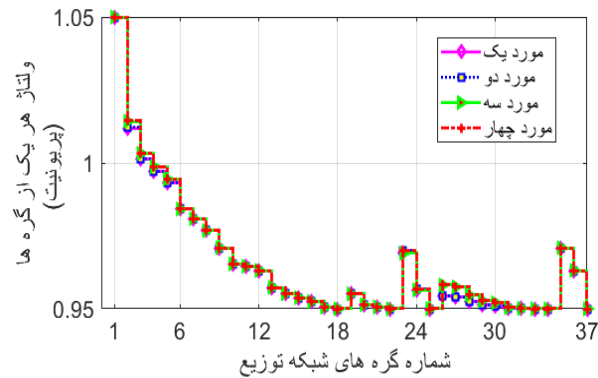


شکل (۶): توان عبوری از پست شبکه توزیع توان خریداری شده
Figure (6): Power passed through the post of the power distribution network purchased



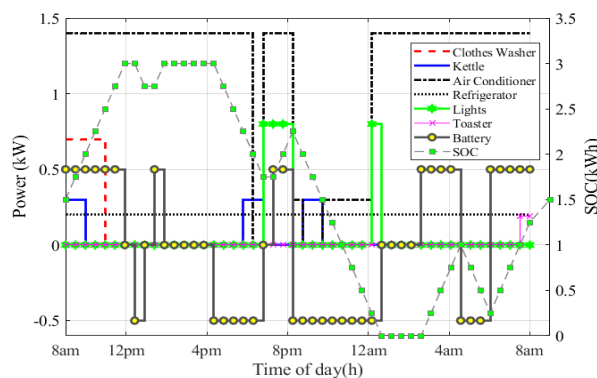
شکل (۷): پروفیل بار کل خودروهای برقی در مد شارژ سریع با در نظرگیری محدودیت یک مگاواتی ظرفیت خطوط
Figure (7): Total load profile of electric vehicles in fast charge mode considering the limit of one megawatt of line capacity

پروفیل ولتاژ هر یک از گره‌های شبکه در شکل (۸) نمایش داده شده است. خطوط ۲۲ تا ۲۴ مربوط به نواحی صنعتی هستند و تغییرات پاسخ‌گویی برابر آن‌ها تأثیری ندارد. همچنین میانگین توان عبوری از این خطوط در حالت نرمال و سریع با یکدیگر برابر است چون در طول روز باید مقدار یکسانی از انرژی را نهایتاً شارژ نمایند، بنابراین منحنی آن‌ها بر یکدیگر منطبق شده است. خطوط ۲۶ تا ۳۰ مربوط به نواحی مسکونی هستند که تأثیر برنامه پاسخ‌گویی بار در آن‌ها کامل مشخص است و شارژ یا دشارژ خودروها نیز تأثیری بر اختلاف موارد (مورد یک با دو یا مورد سه با چهار) ایجاد نکرده است.



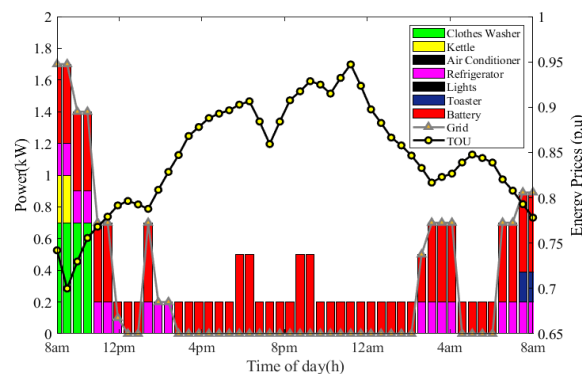
شکل (۸): پروفیل ولتاژ هر یک از گره‌های شبکه (پریونیت)

Figure (8): Voltage profile of each network node (prionite)



شکل (۹): مصرف انرژی هر یک از بارهای منزل با در نظرگیری هم‌زمان نارضایتی و هزینه مشترکین

Figure (9): Energy consumption of each of the loads of the house, taking into account the dissatisfaction and cost of the subscribers at the same time



شکل (۱۰): پروفیل بار کل مصرفی یک‌خانه در ساعات شبانه‌روز باهدف کمینه‌سازی هزینه برق

Figure (10): Total load consumption profile of a house during the day and night in order to minimize electricity costs

این توان‌ها از خطوط ۱ تا ۶ (که واسط پست توزیع به ناحیه مسکونی هستند) نیز عبور می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد، جریان عبوری از خطوط انتقال در محدوده مجاز خود قرار گرفته‌اند و هیچ‌یک به‌طور ۱۰۰ درصد دچار ازدحام نشده‌اند. بیشتر درصد ازدحام حدود ۹۰ درصد است. مصرف انرژی هر یک از بارهای منزل با در نظرگیری هم‌زمان نارضایتی و هزینه مشترکین در شکل (۹) ترسیم شده است که خروجی مدل پیشنهادی به‌خوبی با در نظرگیری محدودیت‌ها سطح رضایت‌مندی مشترکین و بعد هزینه مشترکین در نظر گرفته شد. در شکل (۹) نیز همان‌طور که مشخص است تمامی باس‌های شبکه در محدوده مجاز ولتاژی قرار دارند. نکته قابل توجه اینکه در شبکه‌های شعاعی، با فاصله گرفتن از پست توزیع، ولتاژها بر اساس توان عبوری از خطوط افت پیدا می‌کند. اگر در این مثال پست توزیع قابلیت افزایش ولتاژ خود به $1/0.5$ پریونیت را نداشت و به‌طور مثال در ولتاژ یک پریونیت تنظیم شود، آنگاه یا مسئله جواب نداشت (یعنی خطوط قابلیت انتقال توان را با رعایت محدودیت ولتاژ

نداشتند) و یا نیاز به بار زدایی بیشتر برای کاهش توان عبوری از خطوط و حفظ پروفیل ولتاژ بود. در شکل (۱۰) پروفیل بار کل مصرفی یک‌خانه در ساعات شبانه روز با هدف کمینه‌سازی هزینه برق جهت مشخص شدن میزان مصرف انرژی خودروهای برقی مشخص گردیده که چگونه هزینه برق مصرفی کاهش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی برای شارژ هوشمند خودروهای برقی ارائه شده است که در آن بر اساس میزان انرژی مورد نیاز برای پیمایش سفرهای روزانه، فرآیند شارژ خودروهای برقی با در نظرگیری محدودیت‌های فنی و اقتصادی شبکه و با هدف کاهش هزینه‌های شارژ صورت می‌گیرد. نتیجه پیاده‌سازی روش در دو مد شارژ نرمال و سریع در حضور و عدم حضور محدودیت توان عبوری از ترانسفرمر توزیع با یکدیگر مقایسه شد. همچنین نتیجه حضور و عدم حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در مسئله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که روش شارژ سریع به مراتب نتایج بدتری نسبت به روش شارژ نرمال ایجاد می‌کند. در واقع، هم مقدار هزینه این روش و هم مقدار پیک بار این روش نسبت به روش نرخ شارژ نرمال بیشتر است. همچنین در صورتی که 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 معوق خواهد شد. در صورت ادغام برنامه پاسخ‌گویی بار در مسئله نیز، امکان مدیریت مؤثرتر پیک‌بار شبکه و هزینه‌های شارژ فراهم خواهد شد. به‌عنوان پژوهش‌های آتی در زمینه، خودروهای برقی، طرح ادغام روش شارژ هوشمند با سایر روش‌ها از قبیل کنترل مدل پیش‌بین، فناوری اینترنت اشیا و در نظرگیری عدم قطعیت، به دانش‌پژوهان در زمینه، مدیریت شارژ خودروهای برقی پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] Q. Wang, X. Liu, J. Du, F. Kong, "Smart charging for electric vehicles: A survey from the algorithmic perspective", IEEE Communications Surveys, Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517, Jan. 2016 (doi: 10.1109/COMST.2016.2518628).
- [2] I. Rahman, P.M. Vasant, B.S.M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, N. Adnan, "Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1039-1047, May 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2015.12.353).
- [3] K.L. López, C. Gagné, M.A. Gardner, "Demand-side management using deep learning for smart charging of electric vehicles", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 2683-2691, May 2019 (doi: 10.1109/TS-G.2018.2808247).
- [4] F. Tuchnitz, N. Ebell, J. Schlund, M. Pruckner "Development and evaluation of a smart charging strategy for an EV fleet based on reinforcement learning", Applied Energy, vol. 285, Article Number: 116382, March 2021 (doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116382).
- [5] S. Grammatico, "Fast convergence in electric vehicle smart charging", Intelligent Integrated Energy Systems, Springer, pp. 123-139, 2019 (doi: 10.1007/978-3-030-00057-8_6).
- [6] A. Ensslen, P. Ringler, L. Dörr, P. Jochem, F. Zimmermann, W. Fichtner, "Incentivizing smart charging: Modeling charging tariffs for electric vehicles in German and French electricity markets", Energy Research and Social Science, vol. 42, pp. 112-126, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.erss.2018.02.013).
- [7] S. Sachan, N. Adnan, "Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids", Sustainable Cities and Society, vol. 40, pp. 91-100, July 2018 (doi: 10.1016/j.scs.2018.03.031).
- [8] L. Jian, Z. Yongqiang, K. Hyoungmi, "The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai", Energy Policy, vol. 119, pp. 206-214, 2018 (doi: 10.1016/j.enpol.2018.04.037).

- [9] M.M. Hussain, M.S. Alam, M.S. Beg, H. Malik, "A risk averse business model for smart charging of electric vehicles", Proceedings of ICSSIC, pp. 749-759, Springer Singapore, Jan. 2018 (doi: 10.1007/978-981-10-5828-8_71).
- [10] C.M. Affonso, M. Kezunovic, "Technical and economic impact of PV-BESS charging station on transformer life: A case study", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 10, no. 4, pp. 4683-4692, July 2019 (doi: 10.1109/TSG.2018.2866938).
- [11] J.M. Clairand, J. Rodríguez-García, C. Álvarez-Bel, "Smart charging for electric vehicle aggregators considering users' preferences", IEEE Access, vol. 6, pp. 54624-54635, Oct. 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2-872725).
- [12] S. Hardman, A. Jenn, G. Tal, J. Axsen, G. Beard, N. Daina, E. Figenbaum, N. Jakobsson, P. Jochem, N. Kinnear, P. Plötz, J. Pontes, N. Refa, F. Sprei, T. Turrentine, B. Witkamp, "A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure", Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 62, pp. 508-523, July 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872725).
- [13] E. Kamal, L. Adouane, "Intelligent energy management strategy based on artificial neural fuzzy for hybrid vehicle", IEEE Trans. on Intelligent Vehicles, vol. 3, no. 1, pp. 112-125, March 2018 (doi: 10.1109/TIV.20-17.2788185).
- [14] E. Kamal, L. Adouane, "Hierarchical energy optimization strategy and its integrated reliable battery fault management for hybrid hydraulic-electric vehicle", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 67, no. 5, pp. 3740-3754, May 2018 (doi: 10.1109/TVT.2018.2805353).
- [15] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, M.J. Barth, "Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 8, pp. 2181-2191, Aug. 2017 (doi: 10.1109/TITS.2016.2633542).
- [16] L. Guo, B. Gao, Y. Gao, H. Chen, "Optimal energy management for HEVs in eco-driving applications using bi-level MPC", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 8, pp. 2153-2162, Aug. 2017 (doi: 10.1109/TITS.2016.2634019).
- [17] L. Qiu, L. Qian, H. Zomorodi, P. Pisu, "Global optimal energy management control strategies for connected four-wheel-drive hybrid electric vehicles", IET Intelligent Transport Systems, vol. 11, no. 5, pp. 264-272, June 2017 (doi: 10.1049/iet-its.2016.0197).
- [18] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, F.L. Lewis, "Scalable real-time electric vehicles charging with discrete charging rates," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 5, pp. 2211-2220, Sept. 2015 (doi: 10.1109/TSG.2015.2396772).
- [19] H. Eskandari, M.R. Moradian, "Direct torque compound control of induction motors to increase the battery operating life in electric vehicles", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 1-13, Sept. 2020 (doi: 10.1001.1.23223871.1399.11.42.1.2, 2020).
- [20] M.A. Hormozi, B. Bahmani-Firoozi, "Bi-level energy management optimization in multi-area smart grids", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 29-40, Sept. 2020 (doi: 10.1001.1.23223871.1399.11.42.3.4) (in Persian).
- [21] V. Aravinthan, W. Jewell, "Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 999-1009, Sept. 2015 (doi: 10.1109/TSG.2015.2389-875).
- [22] N. Chen, C.W. Tan, T.Q. Quek, "Electric vehicle charging in smart grid: Optimality and valley-filling algorithms," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 6, pp. 1073-1083, Dec. 2014 (doi: 10.1109/JSTSP.2014.2334275).
- [23] D. Singh, R.K. Misra, D. Singh, "Effect of load models in distributed generation planning", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 2204-2212, Nov. 2007 (doi: 10.1109/TPWRS.2007.907582).
- [24] M.L. Crow, "Electric vehicle scheduling considering co-optimized customer and system objectives", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 410-419, Jan. 2018 (doi: 10.1109/TSTE.2017.2737146).
- [25] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen, "Benefits of demand response on operation of distribution networks: A case study," IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 1, pp. 189-197, March 2016 (doi: 10.1109/JSYST.2013.2297792).
- [26] S. Paudyal, C.A. Cañizares, K. Bhattacharya, "Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 684-694, March 2015 (doi: 10.1109/COMST.2016.2518628).
- [27] S.J. Ramchunder, D.D. Voutchkova, "Flowpath influence on stream acid events in tropical urban streams in Singapore", www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/who_we_are/statistics_and_publications/statistics.html (doi: 10.1002/hyp.14467).
- [28] M. Saeedirad, E. Rokrok, M. Joorabian, "A smart discrete charging method for optimum electric vehicles integration in the distribution system in presence of demand response program," Journal of Energy Storage, Article Number: 103577, Nov. 2021 (doi: 10.1016/j.est.2021.103577).

ضمیمه

نماد	پارامتر	نماد	پارامتر
B_c	ظرفیت باتری هر خودرو	C_k^t	مقدار شارژ خودروی k در بازه زمانی t
$C_{b,k}$	هزینه باتری خودروی k ام در هر کیلووات ساعت	C_L	هزینه کارگر برای تعویض باتری
C_k	بردار شارژ خودروی k ام	$Cost_{bt}$	هزینه فرسایش باتری خودروها
$Cost_{Total}$	هزینه مجموع خودروها	$Cost_{charge}$	هزینه شارژ خودروها
D_k	بردار دشارژ خودروی k ام	d	مسافت اولین سفر هر خودروی برقی
DOD	عمق دشارژ	D_k^t	مقدار دشارژ خودروی k در زمان t
P_t^L	توان مصرفی بار L در بازه زمانی t	P_{nm}^t	توان اکتیو انتقالی از گره به گره در زمان
P_t^S	توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t	\bar{P}_t^L	توان مطلوب مصرفی بار L در بازه زمانی t
P_t^{-S}	حداکثر توان شارژ ذخیره ساز s در بازه زمانی t	P_{-t}^S	حداقل توان شارژ ذخیره ساز s در بازه زمانی t
S_{total}^t	توان ظاهری کل شبکه در بازه زمانی t	SP_j^{max}	محدودیت پرشدگی انشعاب j
$E_{req,k}$	انرژی مورد نیاز خودروی k ام	$t_{in,k}$	زمان ورود خودروی k
Ω^{Load}	مجموعه بارهای منزل	Ω^{Line}	مجموعه انشعابات شبکه
Ω^{FTL}	مجموعه بارهای زمان منقطع	Ω^{FPL}	مجموعه بارهای توان منقطع
P_{rated}	توان نامی شارژر نصب شده در پارکینگ	Ω^{strg}	مجموعه ذخیره سازها
E_t^S	انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز s در بازه زمانی t	$E_{dis,k}$	مجموع انرژی دشارژ شده خودروی k ام
Ω^{Bus}	مجموعه گره های شبکه	Ω^{NFL}	مجموعه بارهای غیرمنقطع
i	اندیس گره های شبکه توزیع	E_t^{-S}	حداکثر انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز s
k	اندیس خودروهای رسیده در بازه زمانی خاص	$E_{t_{ini}}^S$	سطح شارژ اولیه موجود در ذخیره ساز s
PG_n^t	توان اکتیو تولیدی در گره در زمان	$E_{t_{final}}^S$	سطح شارژ نهایی موجود در ذخیره ساز s
N^{main}	باس متصل به شبکه بالادستی	$E_{b,k}$	ظرفیت باتری خودروی k ام
PD_n^t	توان اکتیو مصرفی در گره در زمان	H	بردار افق زمانی
Q_{base}^t	مولفه توان راکتیو بار پایه فاقد خودروی برقی در بازه	Z	بردار نمایانگر تعداد خودروهای رسیده به پارکینگ
$P_{t,k}$	بردار مدت پارک خودروی برقی k	L_c	چرخه عمر باتری در عمق شارژ معین
P_{PEV}^t	توان کل مورد نیاز برای N خودروی برقی در بازه زمانی t	N	مجموع تعداد خودروهای برقی رسیده به پارکینگ
P_{base}^t	بار پایه غیر خودروی برقی در شبکه صنعتی	P_{total}^t	بار کل مصرفی در بازه زمانی پس از ادغام N خودرو
j	اندیس انشعابات شبکه توزیع	QG_n^t	توان راکتیو تولیدی در گره n در زمان t
Q_{nm}^t	توان راکتیو انتقالی از گره m به گره n در زمان t	QD_n^t	توان راکتیو مصرفی در گره n در زمان t
$RTP(t)$	قیمت زمان واقعی پیش بینی شده در بازه زمانی t	$r_{PEV,k}$	نرخ شارژ یا دشارژ خودروی برقی k ام
η_D	راندمان دشارژ	η_{ch}	راندمان شارژ
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	ضرایب وزنی هزینه و نارضایتی در برنامه پاسخی گویی بار	SOC_k^t	سطح شارژ خودروی k در بازه زمانی t
γ^L	قیمت واحد نارضایتی مشترک	γ^L	تاخیر زمانی بار مصرفی L
r_{nm}	مقاومت انشعاب واصل دو باس n و m	S_k	بردار استراتژی شارژ خودروی برقی k
S_k^t	مقدار استراتژی شارژ خودروی برقی k در زمان t	S_{agg}^t	انتگرال توان ظاهری در زمان t
T	مجموع تعداد بازه های زمانی روز	SOC_A	سطح شارژ اولیه هر خودروی برقی در زمان ورود
SOC_{max}	حد بالای سطح شارژ باتری خودروی برقی	SOC_D	سطح شارژ مطلوب خودروی برقی در زمان خروج
SOC_{req}	سطح شارژ مورد نیاز هر خودرو در زمان پارک	SOC_{min}	حد پایین سطح شارژ باتری خودروی برقی
x_{mn}	راکتانس انشعاب واصل دو باس n و m	V_{-n}^2	حد پایین دامنه ولتاژ در گره i
V_n^{-2}	حد بالای دامنه ولتاژ در گره i	V_n^t	مجذور ولتاژ گره n در بازه زمانی t
$t_{out,k}$	زمان خروج خودروی k از پارکینگ	T_{rat}	ظرفیت نامی توان ترانسفورمر توزیع
		SP_j	توان ظاهری عبوری از انشعاب j