نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۲، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۴۶-۶۳

ارائه روشی برای شارژ هوشمند تطبیقی باتری لیتیوم ـ یون در خودروهای الکتریکی با در نظرگیری منافع مشترکین و شرکت بهره‌بردار شبکه توزیع

حسین دهقان[۱]، جواد شکرالهی مغانی[۲]، علیرضا خوش سعادت[۳]، محمد عابدینی[۴]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲ / ۰۲ / ۱۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲ / ۰۹ / ۱۸

کلمات کلیدی:
پیک سایی
شارژ هماهنگ
باتری لیتیوم ـ یونی
تلفات درونی

چکیده

با افزایش نفوذ خودروهای الکتریکی، لزوم نزدیکی روش‌های شارژ به دنیای واقعی بیشتر شده است. بر این اساس، با توجه به جزئیات فنی روش شارژ و رفتار غیرخطی باتری خودرو در سطوح شارژ و نرخ شارژ، در این مقاله سعی شده که روشی تطبیقی، با در نظر گیری منافع مشترکین و شرکت بهره‌بردار ارائه شود. در ابتدا روش شارژ جریان تطبیقی باتری لیتیوم یونی مدل‌سازی شده که در آن با توجه به مقاومت درونی باتری در هر بازه، مقدار جریان شارژ به طور معکوس تغییر می‌کند تا کمترین تلفات باتری به دست آید. سپس از این مدل برای شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی با در نظرگیری منافع مشترکین (کاهش هزینه‌های شارژ) و شرکت بهره‌برداری شبکه توزیع (پیک سایی شبکه) در یک شبکه با ۳۷ باس استفاده می‌شود. نتایج، کارایی مدل پیشنهادی در کاهش تلفات درونی باتری خودروها، کاهش هزینه کل شارژ، و کاهش پیک بار شبکه را نشان می‌دهد.

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران Hoseindehghan@aut.ac.ir
۲. دانشیار،دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد،ایران
۴. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد،ایران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

۱ مقدمه

مدل‌سازی و تخمین سطح شارژ باتری لیتیومی یکی از چالش های مدیریت شارژ به شمار می‌آید. به دلیل اثر پذیری بالای وضعیت کاری باتری به پارامترهای محیطی مانند دما، جریان، تعداد سیکل کاری، و عمق دشارژ، مدل‌سازی این باتری‌ها به امری پیچیده مبدل شده است. در (لی[5]،۲۰۱۸) مدل‌سازی یک باتری لیتیوم فسفات آهن با در نظرگیری فرسودگی به صورت مدار معادل تونن دارای ولتاژ مدار باز، مقاومت و خازن انجام شده است. در (لی[6]،۲۰۱۹) از مدار معادل مرتبه دوم برای تعیین آنلاین وضعیت سلامت باتری استفاده شده است که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم میان مقاومت درونی باتری و شدت پلاریزاسیون با میزان ظرفیت محو شده باتری است. استفاده از روابط انتشار و سینتیک تشکیل الکترولیت حالت جامد برای تشخیص ظرفیت باتری در (سانکراس برنامیان[7]،۲۰۱۲) پیشنهاد شده که نشانگر رابطه غیرخطی تجربی محو شدگی باتری با میزان نفوذ حلال است. مدل‌سازی مکانیکی محوشدگی ظرفیت باتری لیتیوم سولفور در (هافمن[8]،۲۰۱۴) ارائه شده است که نشان‌دهنده تاثیر منفی کار در توان های زیر نامی بر روی محو شدگی باتری دارد. تحلیل های میکروسکوپی بیشتری برای درک رفتار این باتری‌ها در جریان‌های کم و افت ولتاژهای بالا نیاز است. تحلیل جامعی از چرخه عمر باتری‌های لیتیوم ــ یون در (هان[9]،۲۰۱۴) صورت گرفته است که نشان می‌دهد ظرفیت باتری تابع دو قانون اهم و آرنیوس می‌باشد. بررسی تاثیر نرخ شارژ، تاثیر حداقل سطح شارژ، دما، و عمق دشارژ در رفتار دینامیکی باتری در (چو[10]،۲۰۲۰) مدل شده است. در این مدل‌سازی کاهش ظرفیت و عمر مفید باتری بر اساس توابعی از مقاومت و شرایط کاری مانند دما، نرخ شارژ و دشارژ و طبیعت تصادفی باتری بیان شده است.

روش‌های شارژ گوناگونی نیز بر اساس مدار معادل‌های باتری لیتیومی تاکنون پیشنهاد شده است که روش‌های ولتاژ ثابت ـــ جریان ثابت، روش تطبیقی، و روش پالسی از جمله متداول‌ترین آن‌ها به شمار می‌آیند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خود را دارند. در سال‌های اخیر روش‌های شارژ تحولات تکاملی متعددی را به خود دیده‌اند. در (چن[11]،۲۰۱۹) یک روش بهینه‌سازی شارژ باتری لیتیوم ـــ یون با هدف کمینه سازی افزایش دما و تلفات انرژی و زمان شارژ ارائه شده است که در آن از مدار معادل مرتبه دو باتری، مدل تلفات، و مدل گرمایی برای تعیین پارامترهای مؤثر در شارژ استفاده شده است. در نظر گیری اهداف اقتصادی شارژ در (لیو[12]،۲۰۱۹) با استفاده از مدل الکتروگرمایی طوری انجام شده است به طوری که هزینه کل شارژ شامل هزینه مصرف برق و هزینه فرسودگی باتری کمینه شود و تاثیر نرخ شارژ، زمان شارژ، دما و شرایط محیطی دیگر بر مدل اقتصادی مشخص گردد. بهبود نرخ شارژ باتری‌های لیتیوم ـــ یون نیز یکی از عوامل تاثیر گذار در شارژ اقتصادی باتری‌ها محسوب می‌شود. نرخ شارژ بالای باتری لیتیوم منجر به تلفات بالا، اثرات مکانیکی و حتی برودت‌های گرمایی میشود. در (زی[13]،۲۰۲۰) مروری به روش‌های شارژ سریع و محدودیت‌های شیمیایی و گرمایی آن شده است و سازوکارهای مؤثر بر محدودیت نرخ شارژ باتری شده‌اند.

در (سرناس[14]،۲۰۲۰) یک روش شارژ زمان واقعی برای افزایش طول عمر باتری لیتیوم ـــ یون ارائه شده است که در آن باتری با روش جریان ثابت ـ ولتاژ ثابت طوری شارژ می‌شود که کمترین زوال را داشته باشد.

روش‌های شارژ پالسی، علی‌رغم مزایای متعدد، دو محدودیت اساسی دارند: الف) افزایش تلفات اهمی ناشی از مؤلفه AC جریان و ب) تضعیف پلاریزاسیون ناشی از زمان شارژ طولانی. به منظور رفع این محدودیت‌ها، یک تدبیر تکمیلی در (جیانگ[15]،۲۰۲۱) معرفی شده است

[5] Li
[6] Li
[7] Sankarasubramanian
[8] Hofmann
[9] Han
[10] Chu
[11] Chen
[12] Liu
[13] Xie
[14] Swernath
[15] Xie

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

که در با اســـتفاده از تحلیل طیف امپدانس الکترومکانیکی باتری، اقدام به کاهش امپدانس AC و تغییر دامنه‌ی پالس جریان به صـــورت عکس مقاومت درونی کرده است.

روش ولتاژ ثابت ـــ جریان ثابت ساده‌ترین و صنعتی‌ترین روش شارژ باتری لیتیومی است که با کمترین امکانات قابل پیاده سازی است. محدودیت این روش، تلفات بالا و کاهش عمر مفید باتری در گذر زمان است که ناشی از عدم در نظرگیری مقاومت درونی باتری در فرآیند شـارژ اسـت. برای رفع این محدودیت در (نوری[16]،۲۰۱۹)، جریان‌هایی با دامنه معکوس نسـبت به مقاومت درونی باتری تزریق شـده اسـت. اساس روش پیشنهادی در این مقاله نیز از این دو مرجع اقتباس شده است. اما نوآوری‌هایی بدان افزوده شده است.

روش‌های تطبیقی نیازمند تخمین سـطح شـارژ باتری هسـتند که در گذشـته با اسـتفاده از روابط تجربی و امروزه با اسـتفاده از شـبکه‌های عصـبی و منطق فازی این تخمین انجام می‌شـود. یافتن ارتباطی میان پارامترهای قابل اندازه‌گیری باتری و پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری از اهداف این روش‌های تخمینی هستند. مرجع (لی[17]،۲۰۲۰) نشان داده است که تخمین سطح شارژ باتری بر اساس معیار فرسودگی باتری و مقاومت درونی نسبت به سایر روش‌های موجود دارای بیش‌ترین دقت است.

روش‌های پیشـرفته‌تری نیز در زمینه‌ی شـارژ تطبیقی در سـال‌های اخیر گزارش شـده اسـت که نمونه‌ای از آن‌ها روش شـارژ تطبیقی چند مرحله ای ولتاژ ثابت ـــ جریان ثابت بر اساس مدل پیوند فرسودگی ترموالکتریک (جیانگ [18]،۲۰۲۰) و روش زمان واقعی بر اساس آگاهی از وضـعیت سـلامت باتری (نامبیسـان [19]،۲۰۲۱) اسـت. مقایسـه میان سـه روش جریان ثابت، جریان تطبیقی و پالسـی در (دو [20]،۲۰۲۰) نشـان می‌دهد که روش جریان ثابت با نرخ C۱ نسـبت روش پالسـی با دامنه C۲ و فرکانس ۵ هرتز، در حدود ۱۴ درصـد زمان کمتری نیاز دارد اما ظرفیت شارژ مجدد باتری را در حدود ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. این امر می‌تواند منجر به افزایش دمای ۵ درجه سلسیوسی شده و منجر به کهولت باتری گردد. بنابراین روش پالسی نتایج به مراتب بهتری را به همراه آورده است.

در تمامی تحقیقات ذکر شده تمرکز صرفاً بر مدل‌سازی باتری و روش شارژی است که منجر به حفظ عمر باتری و کاهش تلفات شود. اما هیچ اشاره‌ی به توسعه‌ی این روش‌ها در مقیاس بالادسـتی و شـارژ هماهنگ یک ایسـتگاه شـارژ خودروی الکتریکی نشـده اسـت. به عبارت دیگر، عملاً موارد پیاده سـازی این روش‌ها در قالب یک پارکینگ شـارژ با تمامی محدودیت‌های اعمالی از شـبکه توزیع، اعمال سـلایق رانندگان و ... نشـده اسـت. بنابراین ارائه‌ی راهکاری که بتواند هم منجر به کاهش تلفات باتری شـده و هم تمایلات رانندگان، مدیر شـارژ یا شرکت بهره‌برداری شبکه را تأمین کند، در دستور کار این مقاله قرار گرفته است.

برخی از روش‌های بالادسـتی شـارژ خودروهای الکتریکی عبارت‌اند از: شـارژ نامتمرکز، متمرکز و هایبرید (احمد [21]،۲۰۱۸)که برای مقابله با پیامدهای منفی نفوذ خودروی الکتریکی در شـبکه از قبیل اضـافه باری، ناپایداری فرکانسـی و تلفات طراحی می‌شـوند. در بیشـتر تحقیقات موجود در زمینه مدیریت شارژ، نرخ شارژ خودروی الکتریکی به صورت پیوسته یا گسسته (بینتی [22]،۲۰۱۵) فرض شده است. اکثراً خودروها در زمان اتمام شارژ به طور کامل شارژ شده‌اند و در برخی از موارد تزریق شارژ به صورت هوشمند صرفاً بر اساس نیاز مشتری صورت گرفته است (مهتا [23]،۲۰۱۶). انواع روش‌های شارژ هوشمند در (وانگ [24]،۲۰۱۶) گردآوری شده است. گسسته سازی نرخ شارژ خودروهای هوشمند منجر به نزدیکی بیشـتر مسـئله به دنیای واقعی میشـود چون در عمل ایسـتگاه‌های شـارژ واقعی قادر به تغییر نرخ شـارژ به صـورت پیوسـته نیستند و تنها با گام‌های معینی این کار را به صورت گسسته انجام می‌دهند (سان [25]،۲۰۱۶).

در این مقاله روش شارژ متمرکز خودروهای برخی به صورت هوشمند با نرخ شارژ گسسته مدل‌سازی می‌شود و هدف، کاهش پروفیل بار و کاهش دفعات سویچینگ شارژر است. محدودیت مربوط به ترانسفورماتور توزیع در مدیریت شارژ لحاظ شده است. پس از تعیین نوع شارژ و

[16] Nouri
[17] Li
[18] Jiang
[19] Nambisan
[20] Du
[21] Ahmad
[22] Binetti
[23] Mehta
[24] Wang
[25] Sun

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مشخص شدن بازه‌های مربوط به شارژ هر یک از خودروها، اقدام به اجرای روش شارژ تطبیقی بر اساس مشخصات باتری هر خودرو و مدار معادل باتری لیتیوم می‌شود. بدین ترتیب علاوه بر رعایت تمایلات شرکت توزیع برق و رانندگان در مرحله اول بهینه‌سازی، تلفات درونی باتری لیتیوم ـــ یونی نیز کمینه می-گردد تا حداکثر بهره‌وری حاصل گردد. تاثیر پارامترهای گوناگون مانند نرخ شارژ، دوره کاری جریان و تعداد پالس‌های جریان بررسی شده و نتیجه آن با روش جریان ثابت مقایسه می‌گردد. تمامی مدل-های بهینه‌سازی در وهله اول به صورت مدل برنامه‌ریزی مخروطی به نظر می‌رسند که با اعمال برخی از عملیات ریاضی و تغییر متغیر، به مدل خطی آمیخته عدد صحیح تبدیل می‌شوند. این مدل‌های به دست آمده قابل حل با نرم افزارهای تجاری از قبیل Mosek و Yalmip هستند که اخیراً کارایی آن‌ها از نظر همگرایی اثبات شده است. روش پیشنهادی می‌تواند زمینه را برای گسترش هرچه بیشتر خودروهای الکتریکی در شبکه فراهم آورد. این روش بر روی یک شبکه ۳۷ باس واقعی (سینجه [۲۶]،۲۰۰۷) پیاده سازی شده است. محدودیت مربوط به اضافه باری ترانسفرمرهای توزیع بر اساس مدل (ساندرسم[۲۷]،۲۰۱۱) و حفظ منافع مشترکین و بهره‌بردار شبکه بر اساس مدل (کرو[۲۸]،۲۰۱۷) است.

۲. توصیف و مدل‌سازی

۲-۱- شارژ جریان تطبیقی باتری لیتیوم ـ یون

فرض کنید هر یک از گام‌های زمانی شارژ هماهنگ خودرو با Δt_i نمایش داده شود و مقدار انرژی که در این بازه باید به خودرو تزریق شود را C_i^{Ah} بنامیم. در این صورت در روش جریان ثابت، جریانی به نام I_i در مدت زمان Δt_i باید به خودرو تزریق می‌شد به طوری که $C_i^{Ah} = \Delta t_i I_i$ شود. اما در روش جریان تطبیقی، بازه Δt_i به N زیر بازه تقسیم می‌شود که مقدار انرژی تزریق شده به خودرو در هر یک از این زیر بازه $\Delta t_{i,j}$ برابر با $C_{i,j}^{Ah} = C_i^{Ah}/N$ است. مقاومت باتری در هر یک از این زیر بازه‌ها برابر $R_{i,j}$ بوده و پالس جریان عبوری از باتری در این زیر بازه را با دامنه $I_{i,j}$ و دوره کاری $D_{i,j}$ می‌باشد. کمترین تلفات اهمی کل شارژ یک باتری لیتیومی در هر بازه زمانی E_{liBat}^{Loss} برابر خواهد شد با:

$$\min \; E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^{N} R_{i,j}.D_{i,j}.\Delta t_{i,j}.I_{i,j}^2 \qquad (۱)$$

در صورتی که جریان شارژ $I_{i,j}$ به نسبت عکس مقدار مقاومت درونی باتری $R_{i,j}$ تغییر کند، روش جریان تطبیقی خواهد بود. هدف اصلی بهینه‌سازی شارژ باتری، دسترسی به مجموعه جریان‌های $I_{i,j}$ است به طوری که کمترین تلفات حاصل شود و شرایط مرزی مسئله تأمین شود.

شرایط مرزی که در این بهینه‌سازی باید برآورده شود عبارت‌اند از:

$$\forall i, \exists j,k \in \{1,2,...,N\}: \; R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow i_{i,j} > i_{i,k} \qquad (۲)$$

$$D_{i,j}.\Delta t_{i,j}.I_{i,j} = C_i^{Ah}/N \;, \forall j,i \qquad (۳)$$

$$C_i^{Ah} = SoC_{i+1} - SoC_i \;, \forall i \qquad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^{N} Dt_{i,j} \le \Delta t_i \;, \forall i \qquad (۵)$$

[26] Wang
[27] Sundstrom
[28] Crow

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$I_{i,j} \le I_i^{\max}, \quad \forall i,j \tag{۶}$$

$$\sum_{i=1}^{N} C_i^{Ah} = \begin{cases} k_{aging}^{SoC} C_{Ah}^{Nominal} & if\ SoC_{ini} \ge 0,\ SoC_{final} \ge k_{aging}^{SoC} C_{Ah}^{Nominal} \\ SoC_{final} - SoC_{ini} & SoC_{ini} \ge 0,\ SoC_{final} < k_{aging}^{SoC} C_{Ah}^{Nominal} \end{cases} \tag{۷}$$

$$D_{\min} \le D_{i,j} \le D_{\max}, \quad \forall i \tag{۸}$$

رابطه (۲) شرط تغییرات جریان شارژ را در جهت معکوس مقاومت درونی بازه نشان می‌دهد. در رابطه (۳) C_i^{Ah} مقدار انرژی معین شده برای شارژ خودرو در بازه i ام است که مقدار آن طبق رابطه (۴) از تفاضل مقدار سطح شارژ انتهای بازه نسبت به ابتدای آن بازه به دست می‌آید. رابطه‌ی (۵) زمان کل شارژ هر بازه را به مقدار Δt_i محدود می‌کند. رابطه‌ی (۶) محدوده مجاز جریان شارژ را نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۷) بیانگر تاثیر کهولت باتری بر کاهش ظرفیت آن نسبت به مقدار نامی است. ضریب کهولت k_{aging}^{SOC} معمولاً به صورت تجربی به دست می‌آید و گاها منحنی در دیتاشیت (شکل ۱) ذکر می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد اگر خودرویی از حالت کاملاً خالی به حالت تمام شارژ بخواهد برسد به مقدار $k_{aging}^{SOC} \times C_{Ah}^{\text{Nominal}}$ می‌تواند شارژ بگیرد. اما در صورتی که دارای شارژ اولیه باشد و یا شارژ نهایی آن کمتر از مقدار نامی‌باشد، باید به مقدار $SoC_{final} - SoC_{ini}$ شارژ شود. مقدار مورد نیاز هر بازه بر اساس بهینه‌سازی شارژ هماهنگ خودرو که در ادامه مدل میشود به دست می‌آید. بنابراین روش مورد نظر باید طوری شارژ باتری را مدیریت کند که مقدار سطح شارژ آن از مقدار ظرفیت پس از فرسایش آن بیشتر نشود تا به باتری آسیب بیشتری وارد نشود و از رخ دادن مسئله‌های اضافه شارژ کردن و سایر موارد مشابه که منجر به گرمایش درونی بیشتر باتری و کاهش عمر بیشتر آن می‌شود، جلوگیری به عمل آید. لازم به ذکر است که فرسایش باتری‌های لیتیوم با یکدیگر تفاوت دارد که این تفاوت ناشی از نوع موارد بکاررفته در باتری، فناوری ساخت، شرایط محیطی و غیره ناشی می‌شود. بنابراین نمی‌توان یک فرمول جامع برای آن ارائه داد. بنابراین بهتر است به برگه اطلاعات هر باتری برای مشخص سازی ضریب فرسودگی مراجعه شود. رابطه (۸) نیز محدودیت مربوط به دوره کاری را نشان می‌دهد.

۲-۲ خطی سازی مدل شارژ تطبیقی

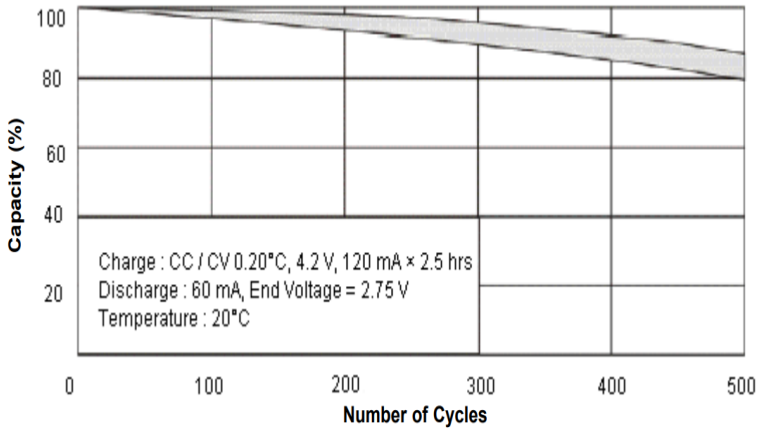
براساس رابطه (۳)، اساس کار خطی سازی به عبارت $I_{i,j}.\Delta t_{i,j}.D_{i,j}$ بستگی بالایی دارد. به دلیل حضور عبارت ضرب متغیرها در رابطه (۳) و تابع هدف (۱)، مسئله بهینه‌سازی شارژ تطبیقی به مدلی غیرخطی تبدیل شده است. به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌ها از روش‌های فرا ابتکاری برای حل مسئله غیرخطی کمک گرفته شده است. در این مقاله هدف ارائه‌ی مدل خطی از مسئله است که جواب‌های آن معادل با جواب مسئله‌ی بهینه از یک مسئله غیرخطی است. دو نگرش نسبت به روش شارژ تطبیقی می‌تواند وجود داشته باشد: الف) نگرش دوره زمانی ثابت . ب) نگرش دوره کاری ثابت.

۲-۲-۱ کنترل تطبیقی دوره زمانی ثابت

در نگرش دوره زمانی ثابت مقدار $\Delta t_{i,j}$ ثابت است و مقدار آن از (۵) تبعیت کرده و برابر با $\Delta t_{i,j} \le \Delta t_i / N$ می‌تواند در نظر گرفته شود. در این شرایط دو متغیر مستقل تصمیم‌گیری جریان و دوره کاری هر بازه هستند. به منظور خطی سازی این مسئله می‌توان متغیری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

حقیقی و مثبت به نام $z_{i,j} = D_{i,j} I_{i,j}$ تعریف نمود. در این صـــورت دو متغیر $z_{i,j}$ و $I_{i,j}$ را اگر به عنوان متغیرهای مســـتقل تصمیم‌گیری در نظر بگیریم خواهیم داشت:



شکل (۱): منحنی فرسودگی یک باتری لیتیوم ـ یون بر حسب طول عمر

$$\min \; E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^{N} R_{i,j} . \underbrace{C_i^{Ah} / N}_{D_{i,j} . \Delta t_{i,j} . I_{i,j}} I_{i,j}$$

$$s.t$$

$$\forall i, \forall j, k \in \{1,2,...,N\}:$$

$$R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow I_{i,j} > I_{i,k} \qquad (۹)$$

$$z_i = C_i^{Ah} / \left(N . \Delta t_{i,j}\right), \forall i$$

$$I_{i,j} \le I^{\max}, \quad \forall i$$

$$D_{\min} I_{i,j} \le z_{i,j} = D_{i,j} I_{i,j} \le I_{i,j} D_{\max}, \quad \forall i$$

بدین ترتیب فرم برنامه‌ریزی خطی این مسئله به صورت رابطه (۹) به دست آمد. پس از محاسبه مقادیر $z_{i,j}$ و $I_{i,j}$ می‌توان مقدار دوره کاری هر باز را از تقسیم $D_{i,j} = z_{i,j} / I_{i,j}$ به دست آورد.

۲-۲-۲ کنترل تطبیقی دوره کاری ثابت

قبل از هر چیز باید گفت که با فرض ثابت بودن دوره کاری در روابط (۱) الی (۸) دو متغیر مستقل $\Delta t_{i,j}$ و $I_{i,j}$ را داریم و سایر متغیرها همگی داده معلوم مسـئله هسـتند. به منظور خطی‌سـازی این مسـئله نیز متغیری به نام $Y_{i,j} = I_{i,j} \Delta t_{i,j}$ را تعریف می‌کنیم. بنابراین روابط به صورت زیر در خواهد آمد:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$\min \quad E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^{N} R_{i,j}.I_i.\underbrace{C_i^{Ah}/N}_{D_{i,j}.\Delta t_{i,j}.I_{i,j}}$$

$$s.t$$

$$\forall i,\forall j,k \in \{1,2,...,N\}: \quad R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow I_{i,j} > I_{i,k}$$

$$Y_{i,j} = C_i^{Ah}/N.D, \quad \forall i$$

$$I_{i,j} \le I^{\max}, \quad \forall i$$

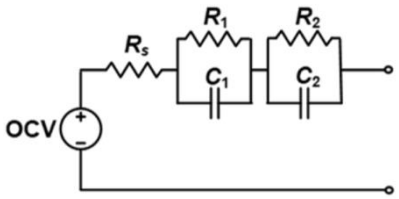
$$\sum_{j \atop I_{i,j}\Delta t_{i,j}} Y_{i,j} \le \sum_{j} I^{\max}\Delta t_j \le I^{\max}\Delta t_i, \quad \forall i \qquad (۱۰)$$

بنابراین مدل خطی از بهینه‌سازی کنترل تطبیقی با دوره کاری ثابت نیز به دست آمد.

قبل از پرداختن به روش شارژ هماهنگ، ابتدا روابط مربوط به مدار معادل باتری لیتوم- یون در ادامه بررسی خواهد شد تا ارتباط میان ولتاژ دو سر باتری و جریان عبوری از آن نیز مشخص شود و مفاهیم عمیق‌تری نسبت به رفتار باتری لیتیوم ـ یون حاصل شود.

۳-۲-۲ کنترل تطبیقی دوره کاری ثابت

در شکل ۲ مدار معادل یک باتری لیتیوم ــ یون نشان داده شده است که شامل یک ولتاژ مدار باز و چندین خازن و مقاومت است. با اجرای قانون ولتاژ کیرشهف در مدار خواهیم داشت:



شکل (۲): مدار معادل مرتبه دوم یک باتری لیتیوم ـ یون

$$V_o^{Bat} = V_{OCV} + R_s i_{Bat} + V_{RC1} + V_{RC2} \qquad (۱)$$

بر اساس روابط حاکم میان ولتاژ و جریان یک مدار RC موازی داریم:

$$V_{RC1} = R_1\left(e^{(-t/R_1C_1)}\right)i_{Bat}(0) + \frac{1}{R_1C_1}\int_0^t i_{Bat}(\tau)e^{\left(\frac{\tau - t}{R_1C_1}\right)}d\tau \qquad (۲)$$

$$V_{RC2} = R_2\left(e^{(-t/R_2C_2)}\right)i_{Bat}(0) + \frac{1}{R_2C_2}\int_0^t i_{Bat}(\tau)e^{\left(\frac{\tau - t}{R_2C_2}\right)}d\tau \qquad (۳)$$

نقش اصلی روابط (۱۱) تا (۱۳) نمایش ارتباط میان ولتاژ دو سر باتری و جریان تزریقی به آن است. تحلیل این مدار بسیار ساده است ولی مسئله اصلی شناسایی پارامترهای این مدار معادل است. در اینجا دو مسئله مطرح است: الف) پارامترها چگونه به دست می‌آید ب) این پارامترها بر حسب نرخ شارژ، دما و سطح شارژ باتری چگونه تغییر می‌کنند. در جواب مورد الف باید گفت این پارامترها را یا در دیتاشیت باتری باید یافت و یا توسط اجرای برخی از آزمون‌ها بدان رسید. انواع آزمون‌های مدار باز، اتصال کوتاه و اعمال پالس منجر به شناسایی این پارامترها خواهند شد. از طرفی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تخمین این مقادیر وجود دارد. در جواب مورد ب باید گفت دمای محیط و نرخ شارژ بر مقدار تمامی خازن‌ها، مقاومت‌ها و ولتاژ مدار باز اثرگذار است. در مورد نحوه تغییر این پارامترها با شرایط گوناگون هم می‌توان به دیتاشیت باتری‌ها رجوع کرده و هم با استفاده از داده‌های تجربی و آموزش شبکه‌های عصبی فازی به این روابط رسید هرچند فرم بسته‌ای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

برای روابط وجود ندارد. اطلاعات مربوط به پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم ـ یون این مقاله از (ان[۲۹]،۲۰۱۸) اقتباس شده است به بر اساس اندازه‌گیری واقعی از یک باتری به دست آمده است.

٤-۲-۲ شارژ هماهنگ و هوشمند خودروی الکتریکی

در رو uyش شـارژ هماهنگ خودروی الکتریکی هدف تعیین مقدار انرژی تزریق شـده به باتری در هر بازه از SoC اسـت. در واقع انرژی مورد نیاز C_i^{Ah} برای هر خودرو از روش شارژ هماهنگ مشخص می‌شود و سپس در مدل روش تطبیقی مشخص می‌شود که چه پالس جریانی این انرژی را در چه مدت زمانی باید تأمین نماید.

آنچه در مورد روش شـارژ هماهنگ مشـخص اسـت، کمینه‌سـازی هزینه شـارژ کل به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شـود. بنابراین تابع هدف روش شارژ هماهنگ برابر است با:

$$\min \sum_k \sum_i C_{i,k}^{Ah} \cdot \gamma_i^{TOU} \qquad (۴)$$

که در این رابطه γ_i^{TOU} قیمت برق در بازه زمانی Δt_i است و $C_{i,k}^{Ah}$ مقدار انرژی (کیلووات ساعت) مصرف شده بابت شارژ خودرو k در این بازه زمانی Δt_i است. برنامه‌ریزی‌ها باید طوری صورت گیرد که هر خودرو به اندازه مورد نیاز خود شارژ شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\sum_i C_{i,k}^{Ah} = E_k^{required}, \qquad \forall k \qquad (۵)$$

در زمانی که خودرو در پارکینگ حضور ندارد هیچ گونه تبادل انرژی نباید با شبکه داشته باشد. بنابراین داریم:

$$C_{i,k}^{Ah} = 0, \qquad \forall k, i \notin [i_{ini}, i_{final}] \qquad (۱۶)$$

در زمانی که خودرو درون پارکینگ است، فقط حق شارژ دارد. در این مقاله دشارژ باتری خودرو یا عملیات انتقال توان از خودرو به شبکه (به اصطلاح V2G) لحاظ نشده است. بنابراین داریم:

$$C_{i,k}^{Ah} = 0, \qquad \forall k, i \notin [i_{ini}, i_{final}] \qquad (۱۷)$$

ارتباط میان سـطح شـارژ خودرو $SoC_{i,k}$ و مقدار انرژی شـارژ شـده در هر بازه زمانی $C_{i,k}^{Ah}$ از رابطه زیر به دسـت می‌آید. البته راندمان شارژر ایده‌آل فرض شده است.

$$SoC_{i+1,k} = SoC_{i,k} + C_{i,k}^{Ah}, \qquad \forall k, i \qquad (۱۸)$$

سطح انرژی هر خودرو نیز در هر بازه زمانی نباید از محدوده مجاز خود تخطی نماید. بنابراین خواهیم داشت:

$$SoC_k^{\min} \le SoC_{i,k} \le SoC_k^{\max}, \qquad \forall k, i \qquad (۶)$$

که در این رابطه $SoC_k^{\min}$ و $SoC_k^{\max}$ به ترتیب کمترین و بیش‌ترین مقدار مجاز سطح انرژی باتری هر خودرو می‌باشند.

تا اینجا مدل ارائه شده برای شارژ هماهنگ یک مدل جامع بوده و فاقد هیچ‌گونه فرضیاتی برای توان مصرفی هر خودرو می‌باشد. به منظور دستیابی به توان شارژ هر خودرو بر حسب انرژی شارژ هر خودرو رابطه زیر عموماً برقرار است:

$$C_{i,k}^{Ah} = \int_{\Delta t_i} P_{i,k}^{ch} \, d\tau, \qquad \forall k, i \qquad (۷)$$

در بسـیاری از مقالات برای سـادگی مقدار $P_{i,k}^{ch}$ را در درون بازه، عددی ثابت فرض کرده‌اند که همان مقدار میانگین توان مصـرفی در آن بازه اسـت. در این صـورت نمودار پروفیل بار دیگر رفتار لحظه‌ای شـارژ را نشـان نمی‌دهد بلکه مقدار میانگین هر بازه زمانی را به جای مقدار لحظه‌ای نشان می‌دهد. با در نظر گیری این فرض ساده کننده خواهیم داشت:

[29] Ahn

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$$C_{i,k}^{Ah} = P_{i,k}^{ch} \Delta t_i , \qquad "k,i \tag{۸}$$

اما میدانیم که در عمل $P_{i,k}^{ch}$ ثابت نیست و به صورت پالسی با دوره و دوره کاری این است.

محدودیت پیک بار شبکه به صورت زیر اعمال میشود:

$$\sum_k P_{i,k}^{ch} \le P_{load}^{\max} - P_{load}^{base} , \qquad "i \tag{۹}$$

همواره توان شارژ نیز باید در مقدار مجاز خود قرار داشته باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$P_k^{ch,\min} x_{i,k}^{ch} \le P_{i,k}^{ch} \le P_k^{ch,\max} x_{i,k}^{ch} , \qquad "i,k \tag{۱۰}$$

تفاوت تحقیقات مربوط به نرخ شارژ گسسته یا پیوسته نیز مربوط به در نظر گیری نوع حقیقی یا عدد صحیح برای $P_{i,k}^{ch}$ است. در تحقیقات مد پیوسته هر مقداری می‌تواند به توان اختصاص داده شود اما در تحقیقات مد گسسته نرخ شارژ عددی ثابت و یا چندین عدد معین است. بیشتر شارژرها با مد گسسته کار می‌کنند. همچنین وضعیت شارژ شدن یا بیکار ماندن هر خودرو در هر بازه زمانی با متغیر باینری $x_{i,k}^{ch}$ نشان داده شده است. یکی دیگر از ترجیحات مدیریت پارکینگ شارژ، به حداقل رساندن تعداد دفعات کلیدزنی یا قطع و وصل شارژ ایستگاه‌های شارژ است که آسیب دیدگی ایستگاه‌ها را به حداقل رسانده و موجب افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود. به همین منظور محدودسازی تعداد دفعات قطع و وصل شارژ نیز در این مقاله در نظر گرفته شده است. اگر متغیرهای $u_{i,k}^{ch}$ و $v_{i,k}^{ch}$ را به عنوان متغیر تغییر وضعیت شارژ خودرو از وضعیت قطع به وصل و متغیر تغییر وضعیت شارژ خودرو از وصل به قطع را در نظر بگیریم. در این صورت ارتباط میان متغیرهای باینری مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$u_{i,k}^{ch} \ge x_{i,k}^{ch} - x_{i-1,k}^{ch} , \qquad "k,i \tag{۱۱}$$

$$v_{i,k}^{ch} \ge v_{i-1,k}^{ch} - x_{i,k}^{ch} , \qquad "k,i \tag{۱۲}$$

$$u_{i,k}^{ch} - v_{i,k}^{ch} = x_{i,k}^{ch} - x_{i-1,k}^{ch} , \qquad "k,i \tag{۱۳}$$

با توجه به این تعریف می‌توان تعداد کل سوئیچینگ‌های شارژ را به صورت زیر محدود نمود:

$$\sum_k \sum_i \left(u_{i,k}^{ch} + v_{i,k}^{ch}\right) \le N^{SW} \tag{۱۴}$$

جواب‌های مسئله بهینه‌سازی شارژ خودروهای الکتریکی جهت کاهش تعداد دفعات سوئیچینگ و مسطح سازی پروفیل بار هستند.

۳. روش اجرای بهینه‌سازی

روش اجرای بهینه‌سازی دارای چندین مرحله است که در قابل شبه کد زیر ارائه شده است:

گام ۱: شروع

گام ۲: قرائت برگه اطلاعات رانندگان

گام ۳: مشخص سازی شارژ مورد نیاز هر خودرو

گام۴: دریافت محدودیت‌های شارژ خودرو

گام۵: بهینه‌سازی شارژ هوشمند با در نظرگیری قیود مرزی طبق روابط ۱۴ تا ۲۷

گام۶: به دست آمدن جواب بهینه مسئله و استخراج

گام۷: اجرای بهینه‌سازی روش شارژ تطبیقی با استفاده از هر خودرو برای کاهش تلفات درونی باتری براساس (۹) یا (۱۰)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

گام ۸: دستیابی به مقدار جریان شارژ، دوره کاری و ... برای به دست آوردن ولتاژ خروجی باتری

گام ۹: رسم نتایج شبیه‌سازی

گام ۱۰: پایان

در ادامه نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد.

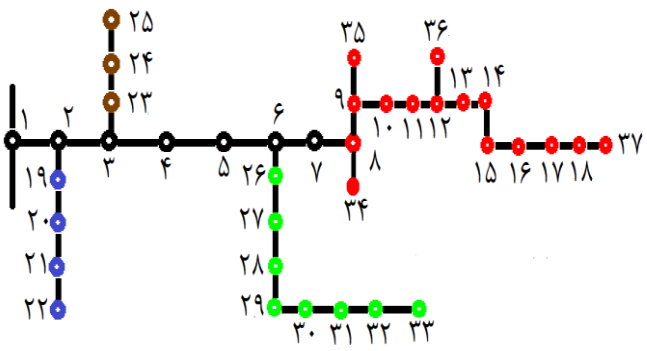
٤. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله یک شبکه توزیع واقعی ۳۷ باس شکل ۳ مورد مطالعه قرار گرفته است (سینجه ۲۰۰۷،[۴۲]) که بار پایه این شبکه (تمام بارها به غیر از خودروهای الکتریکی P_{load}^{base}) در شکل ۴ نمایش داده شده است. انواع مدل‌های خودروهای سبک، نیمه سنگین و سنگین این مقاله در جدول (۱) نشان داده شده است. دو نرخ شارژ برای ایستگاه‌های شارژ خودروی الکتریکی فرض شده است که برابر ۲ و ۴ کیلووات برای مد نرمال و سریع می‌باشد. اطلاعات آماری خودروها بر اساس آمار واقعی کشور سنگاپور است (وانگ ۲۰۱۶،[۴۰]) که در جدول (۲) 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 الکتریکی، اطلاعات پرسش‌نامه تجمیع کنندگان توان در پارکینگ خودروهای الکتریکی در قالب جدول (۳) آمده است. انرژی مورد نیاز مربوط به هر یک از خوشه‌های خودروی الکتریکی، باید به گونه‌ای تأمین شود که اولاً سطح شارژ خودرو به کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت نامی‌اش نرسد $SoC_k^{\min}= 20\%$ و از ۱۰۰ درصد این مقدار نیز تجاوز نکند $SoC_k^{\max}= 20\%$. همچنین در صورت در نظر گیری محدودیت ترانسفرمر توزیع، حد مجاز بار کشیده شده از شبکه بالادستی $P_{load}^{\max}$ رعایت گردد.

٤- ١- تحلیل موردهای مطالعاتی شارژ هماهنگ

چهار مورد مطالعاتی برای روند شارژ هماهنگ خودروهای الکتریکی لحاظ شده است که عبارت‌اند از: الف) شارژ نرمال بدون بار پاسخگو ب) شارژ سریع بدون پاسخ‌گویی بار. ج و د) همان موردهای الف و ب با در نظرگیری پاسخگویی بار. خلاصه نتایج مربوط به شارژ هوشمند چهار مورد مطالعاتی در جدول ۴ نشان داده شده است. طبق جدول ۴، توان تأمین نشده خودروها در حالت شارژ سریع، بیشتر از نرمال خواهد بود. تعداد دفعات شارژ و دشارژ نمایانگر تفاوت شارژ سریع و نرمال است. در شارژ نرمال دفعات شارژ به دلیل کوچک بودن مقدار توان شارژ تزریقی در هر مرحله، نسبت به حالت سریع بیشتر شده است. همچنین در غیاب پاسخ‌گویی بار دفعات شارژ افزایش می‌یابد، چون در هر بازه مقدار کمتری شارژ باید از شبکه کشیده شود.

توان شارژ خودروهای الکتریکی در شکل (۵) و میانگین سطح شارژ خودروها بر حسب درصد در شکل (۶) و مجموع بار شارژ شده خودروها بر حسب کیلووات ساعت در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۳): شبکه توزیع مورد بررسی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

جدول (۱): اطلاعات مربوط به انواع خودروهای الکتریکی

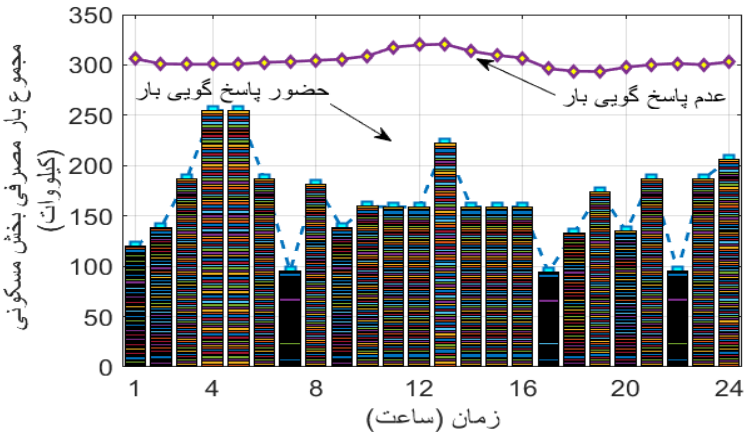
نام خودرو	برد مسافتی	ظرفیت (kWh)	درصد پراکندگی	نوع ذخیره‌ساز
هایبرید ۳۰	۳۰ مایل	۱۳/۸	۳۰	باتری
هایبرید ۴۰	۴۰ مایل	۱۸/۴	۶۰	باتری
نیسان لیف	۷۲ مایل	۲۴	۱۰	باتری

جدول (۲): اطلاعات آماری رانندگان خودروی الکتریکی

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

جدول (۳): جمع‌بندی اطلاعات ناشی از خوشه‌بندی خودروها

خوشه	زمان ورود	زمان خروج	شارژ اولیه٪	شارژ نهایی٪	ظرفیت (kWh)	kWh 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



شکل (۴): بار پایه شبکه در حضور یا فقدان پاسخ‌گویی بار

در ساعات پیک مصرف برق، مقدار توان شارژ کل نزدیک به صفر است و تنها در مورد سه شارژ به زمان پیک موکول شده است تا رانندگان با کمبود شارژ مواجه نشوند. نمودار مستطیلی مشارکت خودروهای مورد مطالعاتی ۱ نیز در این دو شکل نشان داده شده است. همانطور که

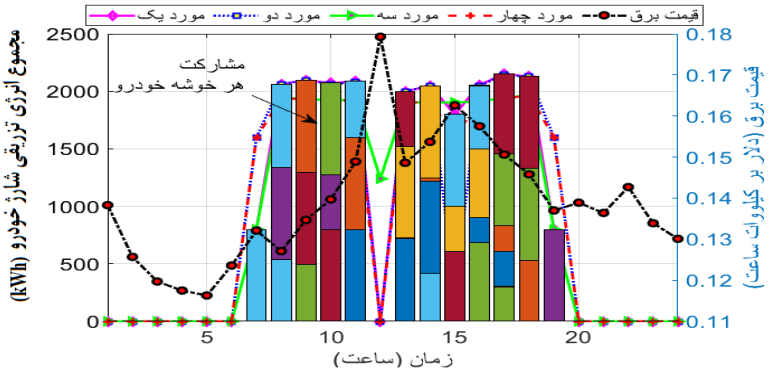
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

این نمودار استوانه‌ای نشان می‌دهد در هر بازه زمانی در حدود نیمی از خودروها در حال شارژ هستند. همچنین برخلاف روش سنتی، سطح شارژ هیچ راننده‌ای ۱۰۰٪ نشده است، بلکه تنها به میزان نیازش شارژ شده است.

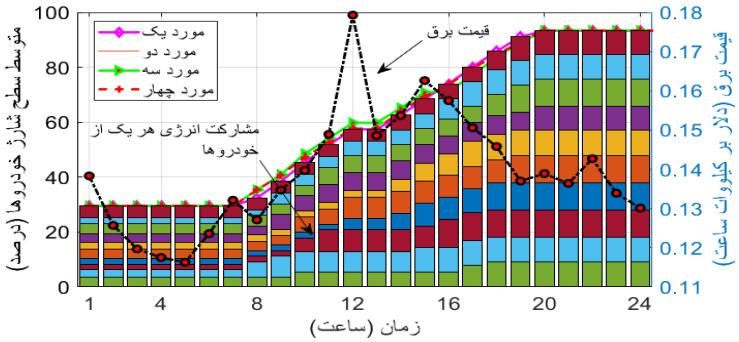
جدول (۴): مقایسه نتایج موردهای مطالعاتی

	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳	مورد ٤
هزینه شارژ (دلار)	۳۲۲۳/۱۳	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۶۶/۷۸	۳۲۰۸/۲۳
هزینه فرسودگی (دلار)	صفر	صفر	صفر	صفر
هزینه کل (دلار)	۳۲۲۳/۱۳	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۶۶/۷۸	۳۲۰۸/۲۳
دفعات شارژ	۱۲۲۰۰	۱۰۸۰۰	۱۹۶۰۰	۱۱۶۰۰
دفعات دشارژ	۷۴۰۰	۸۸۰۰	صفر	۸۰۰۰
مجموع شارژ تأمین نشده (kWh)	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸

مقدار انرژی مورد نیاز شارژ خودروها که بر اساس تقاضای مشترکین طبق جدول (۳) محاسبه می‌شود، به مرور زمان باید تأمین گردد؛ تا مسئله از جواب قابل قبول برخوردار باشد. نحوه تأمین تدریجی این میزان شارژ نیز در قالب شکل (۶) نمایش داده شده است. به تدریج با ورود خودروها به داخل پارکینگ (اثر بهمنی)، مقدار شارژ آن‌ها آغاز شده است و در نهایت به طور کامل این انرژی به خودروها اختصاص داده شده است. همان‌طور که مشخص است، تفاوت میان موردهای مطالعاتی چندان نیست.

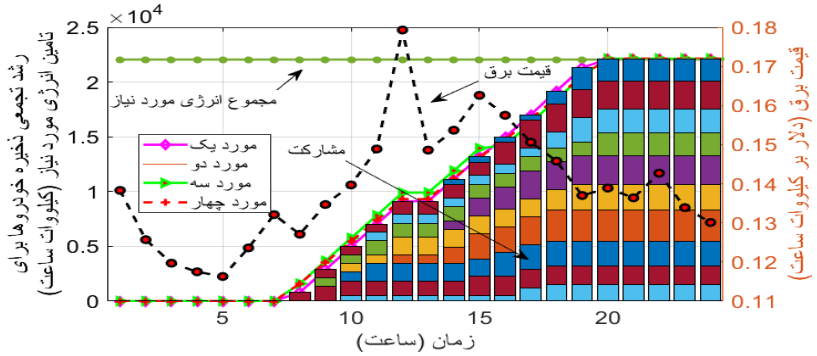


شکل (۵): مجموع توان شارژ خودروها در تمامی موارد مطالعاتی



شکل (۶): میانگین درصدی سطح شارژ تکاملی باتری

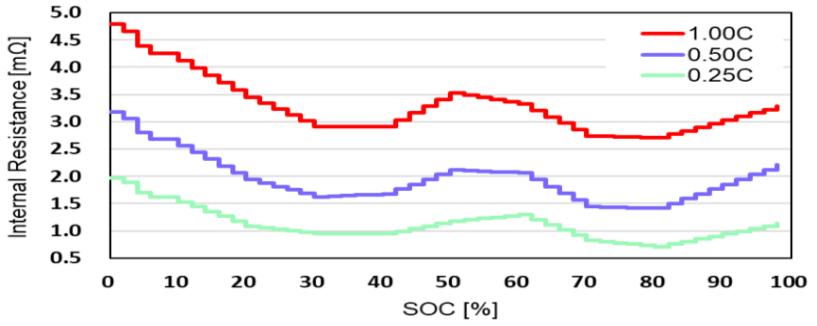
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل (۷): تأمین تدریجی انرژی مورد نیاز شارژ خودروها در هر مورد مطالعاتی

٤- ۲- تنظیم جریان شارژ برای کاهش تلفات درونی باتری

بر اساس مقدار انرژی تزریقی مورد نیاز هر بازه $C_{i,k}^{Ah}$ در مرحله شارژ هماهنگ، نوبت به مرحله شارژ جریان تطبیقی می‌رسد که در آن مقدار جریان تزریقی و دوره کاری طوری تنظیم شود که در هر دوره زمانی Δt_i مقدار تلفات درونی باتری کاهش پیدا کند. به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی، مقایسه‌ای میان روش جریان تطبیقی و جریان ثابت ارائه شده است. منحنی تغییرات مقدار مقاومت درونی باتری بر حسب سطح شارژ باتری و نرخ شارژ در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم ــ یون نیز در جدول (۵) آورده شده است.



شکل (۸): تغییرات مقاومت درونی باتری لیتیوم ـ یون بر حسب سطح شارژ و نرخ شارژ

جدول (۵): پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم –یون

سطح شارژ (درصد)	ولتاژ مدار باز (ولت)	R0 (اهم)	R1 (اهم)	R2 (اهم)	C1 (فاراد)	C2 (فاراد)
صفر	۳/۳۱	۰/۰۷۷۲	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۷۳	۳۴۱۴	۴۰۷
۱۰	۳/۵۱	۰/۰۶۰۴	۰/۰۱۵۴	۰/۰۰۴۳	۳۰۲۲	۱۲۴۷۲۴
۲۵	۳/۵۹	۰/۰۶۰۸	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۱۵	۲۶۶۶	۳۴۹۵۳۹
۵۰	۳/۶۷	۰/۰۵۸۴	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۷۲	۳۱۸۹	۲۶۸۲۴۱
۷۵	۳/۸۶	۰/۰۶۰۰	۰/۰۲۷۷	۰/۰۰۴۰	۱۶۹۸	۲۵۷۰۶۵
۹۰	۴/۰۲	۰/۰۶۱۵	۰/۰۳۸۶	۰/۰۱۳۸	۱۸۵۴	۷۰۱۳۷
۱۰۰	۴/۱۵	۰/۰۷۳۱	۰/۰۳۳۷	۰/۰۶۸۶	۳۰۱۰	۱۵۵۱۹

بر اساس داده‌های شکل ۸ و جدول ۵ و با استفاده از مقادیر $C_{i,k}^{Ah}$ به دست آمده از بهینه‌سازی شارژ هماهنگ خودروی الکتریکی می‌توان بهینه‌سازی جریان تطبیقی را اجرا نمود.

٤- ۲- ۱ روش دوره زمانی ثابت

در این روش ار رابطه (۹) برای بهینه‌سازی استفاده شده است. هر بازه Δt_i در این مقاله به ۶۰ زیر بازه تقسیم شده است ($N = 60$). چون هر گام زمانی در مسئله شارژ هماهنگ برابر ۱ ساعت است، بنابراین طول هر زیر بازه $\Delta t_{i,j}$ در حدود ۱ دقیقه خواهد بود

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

$\Delta t_{i,j} = \Delta t_i / N = 1h / 60 = 1\min$. مسـئله یافتن مقدار جریان عبوری از باتری در این فرآیند شـارژ و مقدار دوره کاری بهینه جریان می‌باشد. در واقع قرار است مشخص شود در مدت زمان یک دقیقه‌ای هر زیر بازه، چند ثانیه باتری شارژ شده و چند ثانیه شارژر قطع کند تا زمینه برای پلاریزاسیون باتری و استراحت آن آماده شود. همچنین جریان به نسبت عکس مقاومت طوری تغییر کند که تلفات باتری کاهش یابد. چون تعداد گام‌های زمانی ۲۴ عدد (یک شـبانه روز) و تعداد زیر بازه‌های هر گام ۶۰ عدد اسـت، بنابراین ۱۴۴۰ زیر بازه باید بهینه‌سازی شود. بنابراین متغیرهای $z_{i,j}$ و $I_{i,j}$ دارای ۱۴۴۰ آرایه هستند که در بهینه‌سازی باید به دست آید. در صورتی که روش جریان ثابت بود، تعداد این آرایه‌ها نهایتاً ۲۴ عدد می‌شد. به هرحال مصالحه‌ای میان کاهش زمان محاسباتی و کاهش تلفات باید یافت.

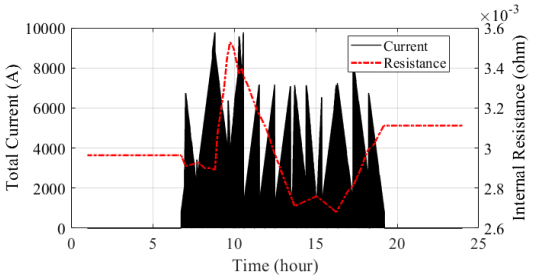
نمودارهای مربوط به روش شارژ جریان تطبیقی با در نظرگیری دوره زمانی ثابت برای شکل جریان‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. توجه شود که در شکل ۹ جریان مجموع کشیده شده برای شارژ خودروهای الکتریکی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۹ الف مشخص است، خودروهای الکتریکی پس از زمان ورود خود به پارکینگ تا زمان خروج (مربوط به مورد مطالعاتی ۱ است)، در حال شارژ شدن هستند. جریان شارژ در تقابل معکوسی با مقاومت درونی باتری قرار گرفته است.

بیش‌ترین جریان‌های کشیده شده از شبکه مربوط به کمترین مقادیر مقاومت درونی باتری است. همانطور در شکل ۹ (ب) مشخص است، هر ساعت به ۶۰ بازه یک دقیقه‌ای تقسیم شده است و در هر بازه سیگنال دارای دوره کاری و دامنه خاص خود است. در شکل ۹ (ج) روند شارژ انرژی مورد نیاز در هر ساعت مطالعاتی مشخص شده است. کل انرژی مورد نیاز باتری در ساعت مربوطه تأمین شده است. بنابراین در این روش با صرف زمانی برای استراحت باتری، اقدام به شارژ خودرو شده است. لازم به ذکر است که اگر دوره کاری برابر با یک شود و دامنه‌ی جریان‌ها تغییری نسبت به مقاومت درونی باتری نداشته باشد، آنگاه روش جریان ثابت به دست می‌آید که در مورد علل ناکارآمدی روش جریان ثابت در بهبود تلفات، در (وانگ ۲۰۱۶،[۲۰]) به خوبی بحث شده است، بنابراین از ذکر جزئیات آن در اینجا پرهیز میشود. موردهای مطالعاتی ۲، ۳ و ۴ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به دلیل محدودیت صفحه، شکل‌های مربوط به آن نمایش داده نشده است و صرفاً به نتایج تلفات باتری در آن‌ها در قالب جدول ۶ اکتفا شده است.

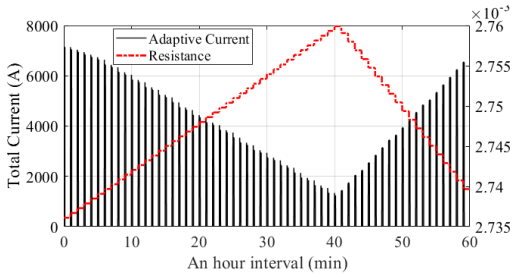
٤- ۲- ۲ روش دوره کاری ثابت

در این روش از رابطه (۱۰) برای بهینه‌سازی استفاده میشود. در اینجا نیز هر بازه Δt_i در این مقاله به ۶۰ زیر بازه متفاوت تقسیم شده است $N = 60$. دیگر طول بازه‌ها برابر نیست و آنچه ثابت است مقدار دوره کاری است. مسئله، یافتن مقدار جریان عبوری از باتری در این فرآیند شارژ و طول زیر بازه $\Delta t_{i,j}$ می‌باشد. در این مورد نیز $Y_{i,j}$ و $I_{i,j}$ دارای ۱۴۴۰ آرایه هستند که در بهینه‌سازی باید به دست آید. نتایج مربوط به پیاده سازی روش دوره کاری ثابت نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تفاوت شکل (۹) و شکل (۱۰) در نوع پالس‌های جریان آن‌ها است. شکل (۱۰) تنها نتایج مربوط به مورد مطالعاتی ۱ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰-(الف) و (ب) مشخص است، دامنه جریان به صورت معکوس مقدار مقاومت درونی باتری در هر لحظه تغییر می‌کند. طول بازه‌ها نیز برابر نیست. نتایج شکل ۱۰ (ج) نشان می‌دهد که بر اساس این روش، مقدار انرژی مورد نیاز خودرو به خوبی تأمین شده است که نشان از کارایی روش پیشنهادی دارد.

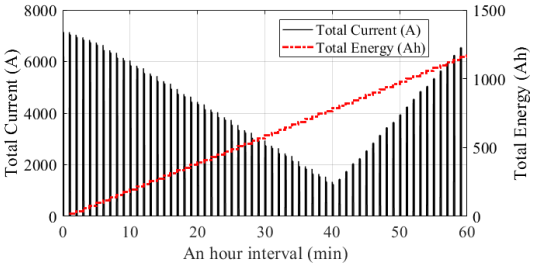
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹): مورد مطالعاتی ۱-حالت دوره زمانی ثابت:
الف)تامین جریان مورد نیاز شارژ خودروها در شبانه روز، (ب) تصویر بزرگنمایی شده از شکل الف برای ساعت ۱۵، (ج) منحنی میزان انرژی ذخیره شده در خودروها در ساعت ۱۵

جدول (۶): مقایسه تلفات در روش‌های مختلف و موردهای مختلف (کیلووات)

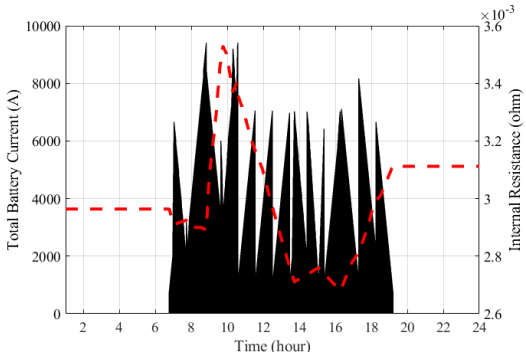
	دوره زمانی ثابت	دوره کاری ثابت
مورد ۱	۳۵۸/۷۵	۳۴۳/۱۸
مورد ۲	۳۵۴/۶۴	۳۳۹/۵۲
مورد ۳	۳۶۹/۸۱	۳۵۳/۱۹
مورد ۴	۳۳۶/۳۱	۳۵۰/۰۸

٤- ۲- ۳ مقایسه موردهای مطالعاتی

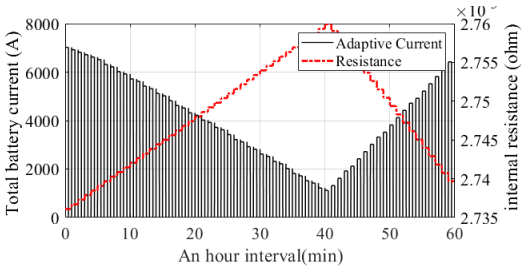
دو روش دوره زمانی ثابت و دوره کاری ثابت با یکدیگر طبق جدول ۶ مقایسه شده‌اند. از مقایسه این دو روش مشخص شده است که روش دوره زمانی ثابت جز در مورد ۴ همواره تلفات بیشـــتری را به همراه داشـــته اســـت. به عبارت دیگر از بتوان گام زمانی متفاوتی برای تأمین

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

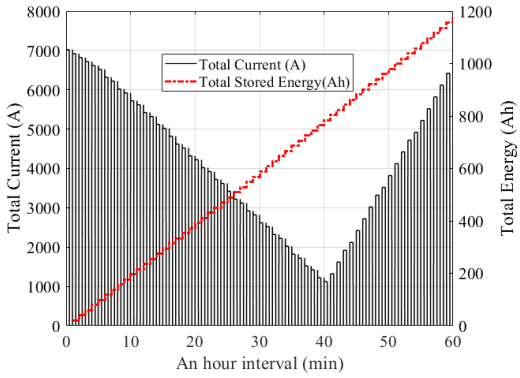
انرژی باتری در نظر گرفت، تلفات می‌تواند کاهش بیشـتری پیدا نماید. همچنین مورد ۳ و ۴ تلفات بیشـتری نسـبت به مورد ۱ و ۲ نشـان می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): مورد مطالعاتی ۱-حالت دیوتی سایکل ثابت:
الف)تامین جریان مورد نیاز شارژ خودروها در شبانه روز، (ب) تصویر بزرگنمایی شده از شکل الف برای ساعت ۱۵، (ج) منحنی میزان انرژی ذخیره شده در خودروها در ساعت ۱۵

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی دو مرحله ای برای شارژ خودروهای الکتریکی ارائه شد که در مرحله اول آن بر اساس مدل شارژ هماهنگ خودروهای الکتریکی، طوری برنامه‌ریزی شارژ خودروها صورت گرفت که با کمترین میزان هزینه شارژ هم توان مورد نیاز خودروها تأمین شود و هم به

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

الزامات شبکه پاسخ داده شود. در مرحله دوم بر اساس مقدار انرژی مورد نیاز تزریقی هر خودرو در هر بازه، و بر اساس مدل شارژ جریان تطبیقی خودروهای لیتیوم ـ یون، طوری جریان شارژ و دوره کاری شارژ بهینه شد که مقدار تلفات مقاومتی درون باتری خودروی الکتریکی کاهش یابد و عمر مفید آن افزایش یافته و از فرسودگی آن جلوگیری شود. روش پیشنهادی به خوبی ابعاد پیاده سازی عملی شارژ خودروی الکتریکی را بررسی کرده و با محدودسازی تعداد دفعات کلیدزنی ایستگاه شارژ، کارایی این دستگاه را بهبود بخشیده و آسیب‌رسانی به آن را کاهش داده است. هم روش دوره زمانی ثابت و هم روش دوره کاری ثابت در این مقاله پیاده سازی شده و نتیجه آن با روش جریان ثابت مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در کاهش تلفات و افزایش طول عمر باتری هستند.

منابع

[1] Li. J, et al. (2018). "Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss," Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, no. 1, pp. 1-9.
[2] Li. X, et al. (2019). "Correlation between capacity loss and measurable parameters of lithium-ion batteries," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 110, pp. 819-826.
[3] Sankarasubramanian. S, et al. (2012)., "A capacity fade model for lithium-ion batteries including diffusion and kinetics," Electrochimica Acta, vol. 70, pp. 248-254, 2012.
[4] Hofmann. A. F, et al. (2014). "Mechanistic modeling of polysulfide shuttle and capacity loss in lithium–sulfur batteries," Journal of Power Sources, vol. 259, pp. 300-310, 2014.
[5] Han. X, et al. (2014). "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation," Journal of Power Sources, vol. 268, pp. 658-669.
[6] Chu. A, et al. (2020). "Stochastic capacity loss and remaining useful life models for lithium-ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles," Journal of Power Sources, vol. 478, p. 228991.
[7] Chen. Z, , et al. (2019). "Optimal charging strategy design for lithium-ion batteries considering minimization of temperature rise and energy loss," International Journal of Energy Research, vol. 43, no. 9, pp. 4344-4358.
[8] Liu. K, et al. (2019). "Lithium-ion battery charging management considering economic costs of electrical energy loss and battery degradation," Energy conversion and management, vol. 195, pp. 167-179, 2019.
[9] Xie. W, et al. (2020). "Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries," Journal of Energy Storage, vol. 32, p. 101837.
[10] Swernath. S, et al. (2021). "A Real Time Adaptive Charging Approach for Cycle Life Extension of Li Ion Cells," Journal of The Electrochemical Society, vol. 168, no. 5, p. 050528.
[11] Jiang. L, et al. (2021). "Optimal Charging Strategy with Complementary Pulse Current Control of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles," IEEE Transactions on Transportation Electrification.
[12] Nouri Khajavi. M and G. R. Bayat (2019)., "Comparison of Li-Ion Battery State of Charge Prediction by Artificial Neural Network and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System," Modares Mechanical Engineering, vol. 19, no. 1, pp. 43-52.
[13] Li. Y, et al. (2020). "Optimized charging of lithium-ion battery for electric vehicles: Adaptive multistage constant current–constant voltage charging strategy," Renewable Energy, vol. 146, pp. 2688-2699.
[14] Jiang. L, et al. (2020), "Optimization of Variable-Current Charging Strategy Based on SOC Segmentation for Li-ion Battery," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 1, pp. 622-629.
[15] Nambisan. P, et al. (2021)., "Real-time optimal fast charging of Li-ion batteries with varying temperature and charging behaviour constraints," Journal of Energy Storage, vol. 41, p. 102918, 2021.
[16] Du. J and Y. Sun, (2020) "The Influence of High Power Charging on the Lithium Battery Based on Constant and Pulse Current Charging Strategies," in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC): IEEE, pp. 1-7.
[17] Ahmad. A , et al. (2018). "A review of the electric vehicle charging techniques, standards, progression and evolution of EV technologies in Germany," Smart Science, vol. 6, no. 1, pp. 36-53.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

[18] Binetti. G, et al. (2015). "Scalable real-time electric vehicles charging with discrete charging rates," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 5, pp. 2211-2220.

[19] Mehta. R, , et al. (2016). "Smart charging strategies for optimal integration of plug-in electric vehicles within existing distribution system infrastructure," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 299-312.

[20] Wang. Q, et al. (2016). "Smart charging for electric vehicles: A survey from the algorithmic perspective," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517.

[21] Sun. B, et al. (2016). "Optimal scheduling for electric vehicle charging with discrete charging levels in distribution grid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 624-634.

[22] Singh. D, et al. (2007). "Effect of load models in distributed generation planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 2204-2212.

[23] Sundstrom. O and C. Binding, (2011) "Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints," IEEE Transactions on Smart grid, vol. 3, no. 1, pp. 26-37.

[24] Crow. M. L, (2017) "Electric vehicle scheduling considering co-optimized customer and system objectives," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 410-419.

[25] Ahn. J.-H and B. K. Lee , (2018) "High-efficiency adaptive-current charging strategy for electric vehicles considering variation of internal resistance of lithium-ion battery," *IEEE transactions on Power electronics*, vol. 34, no. 4, pp. 3041-3052.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]