مدیریت شارژ هوشمندخودروهای برقی در شبکه توزیع در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

موید محسنی[۱]، محمود جورابیان*[۲]، افشین لشکر آرا محمره[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، moaiadmohsenii@gmail.com
*۲- استاد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، mjoorabian@scu.ac.ir
۳- دانشیار، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی،دزفول، ایران، lashkarara@ieee.org
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

چکیده: شارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع یکی از اساسی‌ترین راه‌کارها جهت مدیریت فنی و اقتصادی توزیع انرژی است. دربسیاری از روش‌های شارژ سنتی، قید شارژ شدن کامل خودروها در هنگام خروج از پارکینگ همواره در مساله لحاظ شده است. اما در این مقاله هر خودرو به صورت هوشمند تنها بر اساس مقدار انرژی مورد نیاز پیمایش سفرهای روزانه خود شارژ می شود. به منظور پیاده‌سازی این روش هوشمند، مالکان خودروی برقی اطلاعاتی را در مورد تعداد سفرها و طول مسیر آنها در اختیار مدیریت شارژ پارکینگ قرار می‌دهند، و بر اساس مشخصات خودروها و سطح انرژی اولیه باتری آنها در زمان ورود به پارکینگ، میزان شارژ مورد نیاز آنها تعیین می‌گردد. سپس مسئول شارژ بر اساس تعرفه زمان مصرف انرژی، محدودیت ترانسفورماتورهای شبکه توزیع، نوع سطح شارژ انتخابی (نرمال یا سریع) اقدام به برنامه‌ریزی شارژ می‌نماید به طوری که هزینه‌های شارژ با رعایت محدودیت‌های فنی و اقتصادی کمینه گردد. نتیجه شارژ هوشمند خودرو در شرایط شارژ نرمال و سریع و در محدودیت‌های مختلف شبکه توزیع و در حضور یا غیاب برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار با یکدیگر مقایسه شده است. از نرم افزار YALMIP و MOSEK برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: شارژ هوشمند خودروهای برقی، برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، شبکه توزیع

نمادها و علائم اختصاری

نماد	توصیف
B_C	ظرفیت باتری هر خودرو
$C_{b,k}$	هزینه باتری خودروی k ام در هر کیلووات ساعت
C_k	بردار شارژ خودروی k ام
C_k^t	مقدار شارژ خودروی k در بازه زمانی t
C_L	هزینه کارگر برای تعویض باتری
Cost_{bat}	هزینه فرسایش باتری خودروها
Cost_{charge}	هزینه شارژ خودروها
Cost_{Total}	هزینه مجموع خودروها
d	مسافت اولین سفر هر خودروی برقی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

d_R	مسافت کل پیموده شده ی هر خودروی برقی
D_k	بردار دشارژ خودروی k ام
D_k^t	مقدار دشارژ خودروی k در زمان t
DOD	عمق دشارژ
$E_{req,k}$	انرژی مورد نیاز خودروی k ام
$E_{dis,k}$	مجموع انرژی دشارژ شده خودروی k ام
E_t^S	انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز S در بازه زمانی t
$\underline{E}_t^S$	حداقل انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز S در بازه زمانی t
$\bar{E}_t^S$	حداکثر انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز S
$E_{t_{ini}}^S$	سطح شارژ اولیه موجود در ذخیره ساز S
$E_{t_{final}}^S$	سطح شارژ نهایی موجود در ذخیره ساز S
$E_{b,k}$	ظرفیت باتری خودروی k ام
H	بردار افق زمانی
i	اندیس گره های شبکه توزیع
j	اندیس انشعابات شبکه توزیع
k	اندیس خودروهای رسیده در بازه زمانی خاص
L_c	چرخه عمر باتری در عمق شارژ معین
N	مجموع تعداد خودروهای برقی رسیده به پارکینگ
N^{main}	باس متصل به شبکه بالادستی
P_{rated}	توان نامی شارژر نصب شده در پارکینگ
P_{base}^t	بار پایه غیر خودروی برقی در شبکه صنعتی و در بازه زمانی t
$P_{t,k}$	بردار مدت پارک خودروی برقی k
P_{PEV}^t	توان کل مورد نیاز برای N خودروی برقی در بازه زمانی t
P_{total}^t	بار کل مصرفی در بازه زمانی t پس از ادغام N خودروی برقی
PG_n^t	توان اکتیو تولیدی در گره n در زمان t
PD_n^t	توان اکتیو مصرفی در گره n در زمان t
P_{nm}^t	توان اکتیو انتقالی از گره m به گره n در زمان t
P_t^L	توان مصرفی بار L در بازه زمانی t
$\tilde{P}_t^L$	توان مطلوب مصرفی بار Lدر بازه زمانی t
P_t^S	توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t
$\underline{P}_t^S$	حداقل توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t
$\bar{P}_t^S$	حداکثر توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t
Q_{base}^t	مولفه توان راکتیو بار پایه فاقد خودروی برقی در بازه زمانی t
QG_n^t	توان راکتیو تولیدی در گره n در زمان t
QD_n^t	توان راکتیو مصرفی در گره n در زمان t
Q_{nm}^t	توان راکتیو انتقالی از گره m به گره n در زمان t
$r_{PEV,k}$	نرخ شارژ یا دشارژ خودروی برقی k ام
$RTP(t)$	قیمت زمان واقعی پیش بینی شده در بازه زمانی t
r_{nm}	مقاومت انشعاب واصل دو باس m و n
S_k	بردار استراتژی شارژ خودروی برقی k
s_k^t	مقدار استراتژی شارژ خودروی برقی k در زمان t
S_{total}^t	توان ظاهری کل شبکه در بازه زمانی t
S_{agg}^t	انتگرال توان ظاهری در زمان t
SOC_A	سطح شارژ اولیه هر خودروی برقی در زمان ورود
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
$SOC_{\max}$	حد بالای سطح شارژ باتری خودروی برقی
SOC_k^t	سطح شارژ خودروی k در بازه زمانی t
SP_j	توان ظاهری عبوری از انشعاب j
$SP_j^{\max}$	محدودیت پرشدگی انشعاب j
t	اندیس بازه های زمان
$t_{in,k}$	زمان ورود خودروی k
$t_{out,k}$	زمان خروج خودروی k از پارکینگ
T_{rat}	ظرفیت نامی توان ترانسفورمر توزیع
T	مجموع تعداد بازه های زمانی روز
v_n^t	مجذور ولتاژ گره n در بازه زمانی t
$\bar{V}_n^2$	حد بالای دامنه ولتاژ در گره i
$\underline{V}_n^2$	حد پایین دامنه ولتاژ در گره i
x_{mn}	راکتانس انشعاب واصل دو باس m و n
Z	بردار نمایانگر تعداد خودروهای رسیده به پارکینگ درهر زمان
η_{ch}	راندمان شارژ
η_D	راندمان دشارژ
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	ضرایب وزنی هزینه و نارضایتی در برنامه پاسخ گویی بار
γ^L	قیمت واحد نارضایتی مشترک
T	مجموعه بازه زمانی
τ^L	تاخیر زمانی بار مصرفی L
Ω^{Bus}	مجموعه گره های شبکه
Ω^{Line}	مجموعه انشعابات شبکه
Ω^{load}	مجموعه بارهای منزل
Ω^{strg}	مجموعه ذخیره سازها
Ω^{FPL}	مجموعه بارهای توان منعطف
Ω^{FTL}	مجموعه بارهای زمان منعطف
Ω^{NFL}	مجموعه بارهای غیرمنعطف

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی شـــارژ خودروهای برقی از جمله مطالعات بنیادی در شـــبکه‌های توزیع به شـــمار می‌آید که همزمان با ظهور و گســـترش خودروهای برقی، مورد توجه محققین قرار داده شـــده اســـت. بدون برنامه‌ریزی منظم خودروهای برقی عملا امکان بهره‌برداری مفید و موثر از این فناوری بدون به خطر انداختن امنیت و پایداری شـــبکه توزیع وجود نخواهد داشت. تاکنون روش‌های گوناگونی برای شارژ خودروهای برقی معرفی شـده اسـت. معمولا روش‌های شـارژ یا برای تامین هدف شرکت توزیع، یا برای تامین 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 شـده اسـت و چالش‌های هر یک از این روش‌ها مطرح شده است. دراین مقاله مستقیما به ذکر روش‌های شارژ هوشـــمند پرداخته خواهد شـــد. یکی از روش‌های شـــارژ هوشـــمند، تصمیم‌گیری بر اساس مقدار بار شبکه، شرایط محیطی، الگوی رفتاری رانندگان، قیمت برق می‌با شد که با هدف کاهش قیمت شارژ در زمان ازدحام شبکه توزیع با استفاده از ابزار یادگیری ماشین انجام شده‌است که از قابلیت پیاده‌ســازی به صــورت زمان واقعی برخوردار اســت [۴]. روش دیگری شارژ هو شمند خودروی برقی بر ا ساس شرایط ترافیکی، شـرایط آب و هوایی می‌باشـد که در داخل خودرو نصـب می‌شـود و با استفاده از سطح شارژ اولیه خودرو، میزان مصرف خودرو در هر مایل و اطلاعات سی ستم موقعیت یابی جهانی به صورت آنلاین با ا ستفاده از یک ابزار یادگیری ماشـین راننده را از میزان شـارژ مورد نیاز خود برای سفر بعدی مطلع می سازد [۵]. در مرجع [۶] روش شارژ هو شمندی ارائه شده است که قابلیت ادغام با برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار را داشته و از روش‌هایی برای محدب‌سـازی مسـاله جهت همگرایی سـریع‌تر مسـاله ا ستفاده کرده‌ا ست. یکی از روش‌های شارژ هو شمند، روش مبتنی بر تشویق بر ا ساس داده‌های واقعی بازار برق کشور آلمان و فرانسه ا ست رانندگان با طول مســـیر کمتر از ۱۰۰ کیلومتر در روز را تشـــویق به انعطاف بیشـــتر کرده تا پیک بار شـــبکه کاهش یابد [۷]. تعرفه بندی تولیدات پراکنده و خودروهای برقی یکی دیگر از راه‌کارهای پی شنهادی این مرجع ا ست. روش شارژ هو شمند دیگری برای پایداری و حفاظت شبکه، کمینه سازی هزینه‌های شارژ، کاهش ازدحام شبکه و مدیریت عدم قطعیت در [۸] ارائه شده ا ست که در آن مولفه‌های روانشناسی و اجتماعی رانندگان خودرو در برنامه‌ریزی شارژ در نظرگرفته شده ا ست تا زمینه ساز گ سترش هرچه بی شتر خودروهای برقی در شبکه شود. کشور چین یکی از کشورهایی است که پتانسیل بالایی برای پیاده‌سازی شارژ هو شمند خودروهای برقی دارد که لازمه پیاده سازی را در تغییر تعرفه قیمت‌گذاری انرژی، گسترش تنوع خودروها (سواری، نیمه‌سنگین و سنگین) و گسترش سیستم‌های اطلاعاتی جدید می‌داند[۹].روش‌های شـارژ هوشـمند از مزایا و محدودیت‌های گوناگونی برخوردار هسـتند. یکی از محدودیت‌های این روش ریســک مالی ناشـــی از عدم قطعیت م ساله ا ست که در مرجع [۱۰] برای مقابله با آن از یک مدل ک سب و کار ری سک‌گریز بهره‌گرفته شده ا ست تا با تغییر قیمت‌گذاری ری سک مالی پارکینگ مدیریت شـود. یکی از مزایای شـارژ هوشـمند افزایش طول عمر ترانسفرمرهای توزیع ذکر شده است که ناشی از کاهش پیک بار و ازدحام شـبکه بر اثر شـارژ هوشـمند می‌باشـد. همچنین کاهش هزینه از جمله مزا یای اقتصـــادی روش نیز هســـت. مجهزســـازی ایستگاه‌های شارژ به پنل‌های فتوولتائیک نیز مزایای روش هو شمند را افزایش می‌د هد[۱۱]. همز مان م نافع مشـــترکین خودروی برقی و تجمیع‌کن ند گان توان در شـــارژ هوشـــم ند خودروی برقی یکی از راه‌کارهای کاهش اثرات منفی نفوذ خودروی برقی در شبکه ارائه شده اســت که نتیجه پیاده‌ســازی آن در یکی از شــهرهای اکوادور نمایانگر صـرفه‌جویی ۵ الی ۵۰ درصـدی مصـرف انرژی می‌باشـد[۱۲]. یکی از گزارش‌های مبتنی بر نظرســنجی مردمی، مصــاحبه با صــاحب نظران، داده‌های ثبت شـــده خودروها و ســـیســـتم‌های موقعیت یابی جهانی م شخص شده ا ست که در حال حا ضر با توجه به ر شد کم خودروهای برقی بهتر ا ست روش‌های شارژ خانگی خودروهای برقی هو شمند 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 زیرســاخت‌های لازم برای پیاده ســازی این روش مشـــخص نیســـت. یکی دیگر از ضـــرورت‌های این زمینه تدوین قوانین و تصویب سیاست‌های جدید دولت‌ها می‌باشد[۱۳].در برخی از مقالات مانند [۱۸-۱۴] عبارت شارژ هوشمند خودروی برقی به معنای مدیریت هوشـــمندانه جریان انرژی در داخل یک خودروی هیبریدی تعبیر شـــده اســـت که هدف آن افزایش راندمان خودرو جهت پیمایش مسیر بیشتر با سوخت و برق کمتر است که در اینجا این تعبیر مد نظر نیست.

در این مقاله، هدف ارائه یک روش مدیریت هوشمند شارژ خودروی برقی است که دارای مشخصات زیر است:

۱) به جای شـــارژ کامل خودروها در این روش، خودروها بر ا ساس میزان م سافت م سیرهای روزانه و سطح انرژی اولیه باتری خود شارژ می‌شوند.
۲) برخلاف روش‌های سنتی که در آن نرخ شارژ معمولا عددی پیو سته بود، نرخ شارژ به صورت گسسته بر ا ساس مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده است.
۳) مقایسه میان نرخ شارژ نرمال و سریع صورت گرفته است.
۴) مدل مســاله به صــورت برنامه‌ریزی خطی عدد صــحیح در آ مده اســـت که با اســـتفاده از نرم افزار MOSEK و YALMIP حل شده است.
۵) محدودیت مربوط به اضـــافه باری ترانســـفرمرهای توزیع بر اساس مدل مرجع [۲۲-۲۰] لحاظ شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022

۶) شبکه مورد بررسی و مدل بار سنتی از یک شبکه واقعی مرجع [۲۳] اقتباس شده است.

۷) منافع همزمان مشترکین (کاهش فرسایش باتری) و منافع بهره‌بردار شبکه (پروفیل بار شبکه) بر اساس مدل مرجع [۲۴] مورد استفاده قرار گرفته است.

۸) تاثیر روش در حضور و عدم حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار مورد بررسی قرار گرفته است که مدل پاسخ‌گویی بار از [۲۵, ۲۶] اقتباس شده است.

سایر بخش‌های مقاله به شرح ذیل خواهد بود. بخش ۲ و ۳ به ترتیب به مدل سازی مساله و شبیه سازی اختصاص دارد. بخش ۴ مربوط به نتیجه‌گیری خواهد بود.

۲- توصیف و مدل‌سازی

مدل‌های بهینه‌سازی این مقاله مربوط به مساله برنامه‌ریزی پاسخ‌گویی بار و برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی می‌باشد. در ابتدا مدل برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار ارائه می‌شود که بر گرفته از مرجع [۲۵ و ۲۶] است. سپس مدل برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی با استفاده از مراجع [۱۹ و ۲۴] ارائه می‌گردد که نرخ شارژ در آن گسسته در نظر گرفته شده است.

۲-۱-مدل برنامه پاسخ‌گویی بار

برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته در این تحقیق، معطوف به سیستم مدیریت انرژی در منازل مسکونی می‌باشد 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 مقاله در نظرگرفته شده‌است که بار منعطف توانی (زمان کاری مشخص با توان قابل تنظیم)، بارمنعطف زمانی(توان کاری مشخص با زمان قابل تغییر) و بار غیرمنعطف نام دارد. تابع هدف برنامه پاسخ‌گویی بار ترکیبی از هزینه و نارضایتی مشترک در نظر گرفته شده است که در رابطه (۱) بدان اشاره شده است.

$$f_{DR}=\varepsilon_1\underbrace{\sum_{t\in \mathrm{T}}\sum_{\mathrm{L}\in\Omega^{load}} RTP(t)\left(\mathrm{P}_t^{\mathrm{L}}+\mathrm{P}_t^{\mathrm{S}}\right)}_{\text{هزینه برق}}+\varepsilon_2\underbrace{\sum_{t\in \mathrm{T}}\sum_{\mathrm{L}\in\Omega^{load}}\gamma^{\mathrm{L}}\left(\breve{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{L}}-\mathrm{P}_t^{\mathrm{L}}\right).\breve{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{L}}}_{\text{هزینه نارضایتی}} \quad (۱)$$

ضرایب ε_1 و ε_2 به ترتیب 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 برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا بدان اشاره خواهد شد.

الف) محدودیت بار منعطف توانی:

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

$$\tau^{\mathrm{L}}=0; \qquad \mathrm{L}\in\Omega^{FPL} \quad (۲)$$

$$0\le \mathrm{P}_t^{\mathrm{L}}\le \breve{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{L}}, \qquad \forall \mathrm{L}\in\Omega^{FPL}, t\in \mathrm{T} \quad (۳)$$

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 طبق رابطه (۵) نخواهد داشت.

$$0\le \tau^{\mathrm{L}}\le \bar{T}; \qquad \mathrm{L}\in\Omega^{FTL} \quad (۴)$$

$$\mathrm{P}_t^{\mathrm{L}}\equiv \breve{\mathrm{P}}_{t-\tau^{\mathrm{L}}}^{\mathrm{L}}, \qquad \forall \mathrm{L}\in\Omega^{FTL}, t\in \mathrm{T} \quad (۵)$$

ج) محدودیت بار غیرمنعطف:

طبق رابطه (۶) و (۷) بار غیر منعطف به ترتیب امکان تغییر زمان بهره‌برداری و تغییر توان مصرفی خود را نخواهد داشت.

$$\tau^{\mathrm{L}}=0; \qquad \mathrm{L}\in\Omega^{NFL} \quad (۶)$$

$$\mathrm{P}_t^{\mathrm{L}}\equiv \breve{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{L}}, \qquad \forall \mathrm{L}\in\Omega^{NFL}, t\in \mathrm{T} \quad (۷)$$

د) محدودیت ذخیره ساز

توان و انرژی ذخیره ساز در هر لحظه طبق رابطه (۸) و (۹) به ترتیب باید در محدوده مجاز خود قرار داشته باشد. همچنین ارتباط میان توان و انرژی ذخیره ساز در رابطه (۱۰) و ارتباط میان انرژی اولیه و نهایی آن در رابطه (۱۱) ذکر شده است.

$$\underline{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{S}}\le \mathrm{P}_t^{\mathrm{S}}\le \bar{\mathrm{P}}_t^{\mathrm{S}} \qquad \forall \mathrm{S}\in\Omega^{strg}, t\in \mathrm{T} \quad (۸)$$

$$\underline{E}_t^{\mathrm{S}}\le E_t^{\mathrm{S}}\le \bar{E}_t^{\mathrm{S}} \qquad \forall \mathrm{S}\in\Omega^{strg}, t\in \mathrm{T} \quad (۹)$$

$$E_{t+1}^{\mathrm{S}}=E_t^{\mathrm{S}}+\mathrm{P}_t^{\mathrm{S}} \qquad \forall \mathrm{S}\in\Omega^{strg}, t\in \mathrm{T} \quad (۱۰)$$

$$E_{t_{final}}^{\mathrm{S}}=E_{t_{ini}}^{\mathrm{S}}, \qquad t_{final}, t_{ini}\in \mathrm{T}, \forall \mathrm{S}\in\Omega^{strg} \quad (۱۱)$$

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) الی (۱۴) به ترتیب تعریف شده‌اند.

$$\min \quad \mathrm{Cost}_{Total}=\mathrm{Cost}_{charge}+\mathrm{Cost}_{bat} \quad (۱۲)$$

$$\mathrm{Cost}_{charge}=\sum_{t=1}^{T}\left(RTP(t).\left(r_{PEV,k}\sum_{k=1}^{N}\left(C_k^t-D_k^t\right)\right)\right) \quad (۱۳)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022

$$\mathrm{Cos}t_{bat}=\sum_{k=1}^{N}\left(c_{b,k}E_{b,k}+c_L\right)\frac{.E_{dis,k}}{L_cE_{b,k}DOD} \qquad (۱۴)$$

در این روابط میزان توان شارژ خودروها و انرژی د شارژ شده خودرو بر اساس روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید:

$$P_{PEV}^t=\sum_{k=1}^{N}\left(C_k^t-D_k^t\right).r_{PEV,k} \qquad \forall \mathrm{t}\in \mathrm{H} \qquad (۱۵)$$

$$E_{dis,k}=\sum_{t=1}^{T}D_k^t.r_{PEV,k}, \qquad \forall k\in Z \qquad (۱۶)$$

قیود مرزی برنامه‌ریزی شـــارژ خودرو مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا بدان اشاره خواهد شد.

الف) محدودیت‌های مربوط به ذخیره‌ساز خودروی برقی

همواره توان شارژ خودروهای و سطح انرژی آنها باید طبق روابط (۱۷) و (۱۹) در محدوده مجاز قرار داشـــته باشـــند. همچنین در زمانی که خودرو در پارکینگ ح ضور ندارد، توان شارژ آن طبق رابطه (۱۸) برابر صفر باشد.

$$0\le r_{PEV,k}\le P_{rated}\left(C_k^t-D_k^t\right), \qquad \forall k\in Z \qquad (۱۷)$$

$$r_{PEV,k}=0, \qquad \forall k\notin Z \qquad (۱۸)$$

$$SOC_{\min}\le SOC_k^t\le SOC_{\max}, \qquad \forall k\in Z,\forall t\in H \qquad (۱۹)$$

ب) محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ

وضـعیت شـارژ و دشـارژ خودروهای برقی طبق رابطه (۲۱) متغیرهای باینری هستند که امکان وقوع همزمان شارژ و د شارژ برای یک خودرو در یک لحظه طبق رابطه (۲۰) ناممکن می‌باشد. همچنین متغیر مربوط به وضعیت آماده به کار خودروی برقی طبق رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$0\le C_k^t+D_k^t\le 1 \qquad (۲۰)$$

$$C_k^t,D_k^t\in\{0,1\} \qquad (۲۱)$$

$$s_k^t=\begin{cases}\{-1,0,1\} & \forall t\in P_{t,k};\forall k\in Z\\ 0 & \forall t\notin P_{t,k};\forall k\in Z\end{cases} \qquad (۲۲)$$

ج) محدودیت مربوط به توان مورد نیاز خودرو

در مساله شارژ هوشمند خودروی برقی، مسافت حرکت خودرو از خانه تا پارکینگ طبق رابطه (۲۳) و از طول ســفرهای بعدی آن طبق رابطه (۲۴) محا سبه می شود. سطح شارژ مورد نیاز هر خودرو و مقدار انرژی صرف شده برای آن ذخیره ساز به ترتیب از روابط (۲۵) و (۲۶) بدست می‌آید. قید (۲۷) نیز تضـــمین کننده تامین توان مورد نیاز خودروهای برقی می‌باشد.

$$SOC_A=1-\left(d/d_R\right) \qquad (۲۳)$$

$$SOC_D=0.2+\left(STD/d_R\right) \qquad (۲۴)$$

$$SOC_i^{req}=\begin{cases}1-SoC_A & if: SoC_D>=1\\ SoC_D-SoC_A & if: SoC_A<SoC_D<1\\ 0 & if: SoC_A=SoC_F\\ -\left(SoC_A-SoC_D\right) & if: SoC_A>SoC_F>0.2\end{cases} \qquad (۲۵)$$

$$E_i^{req}=\frac{SoC_i^{req}B_C}{\eta} \qquad (۲۶)$$

$$\sum_{t=t_{in,k}}^{t=t_{out,k}}s_k^t.r_{PEV,k}=E_{req,k}, \qquad \forall \mathrm{k}\in \mathrm{Z} \qquad (۲۷)$$

$$PG_n^t+PLS_n^t-PD_n^t=I_{map}^{Br}p_{ij}^t, \qquad \forall n\in\Omega^{Bus},\mathrm{t}\in T \qquad (۲۸)$$

$$QG_n^t+QLS_n^t-QD_n^t=I_{map}^{Br}q_{ij}^t, \qquad \forall n\in\Omega^{Bus},\mathrm{t}\in T \qquad \forall \mathrm{n}\in\Omega^{Bus},\mathrm{t}\in \mathrm{T} \qquad (۲۹)$$

$$v_i^t-v_j^t=2\left(r_{ij}p_{ij}^t+x_{ij}q_{ij}^t\right), \quad \forall(i,j)\in\Omega^{Bus},t\in \mathrm{T} \qquad (۳۰)$$

$$\underline{V}_n^2\le v_n^t\le \bar{V}_n^2; \qquad \forall n\in\Omega^{Bus},t\in \mathrm{T} \qquad (۳۱)$$

$$v_n^t\ge 1, \qquad \mathrm{n=N}^{main}, \forall \mathrm{t}\in \mathrm{T} \qquad (۳۲)$$

$$s_{agg}^t\le T_{rat}, \qquad \forall \mathrm{t}\in \mathrm{H} \qquad (۳۳)$$

$$Sp_{ij}\le Sp_j^{\max} \qquad (۳۴)$$

در بخش بعدی مدل‌های ذکر شـــده برای برنامه‌ی پاســـخ‌گویی بار و برنـامـه‌ریزی شـــارژ خودروهـای برقی، در محیط نرم‌افزار متلـب و جعبه‌ابزارهای Yalmip و Mosek پیاده‌ســـازی خواهد شـــد. همچنین نتایج مربوط به چندین مورد مطالعاتی با یکدیگر مقایســـه می‌گردد تا دید و سیع‌تری نسبت به مساله بد ست آید. الگوریتم شارژ هو شمند خودروها در حضـــور برنامه پاســـخ‌گویی بار(DRP) در دو مرحله اجرا شده است. مرحله اول از شماره ۱ تا ۶ و مرحله دوم از شماره ۷ تا ۱۲ انجام می شوند. اجرای دو مرحله بصورت زیر می باشد.

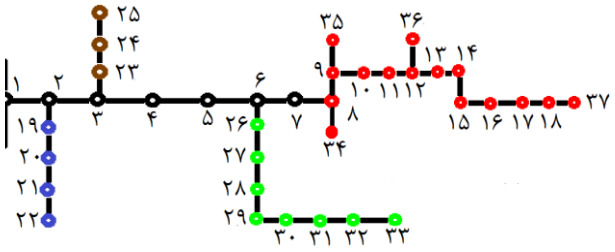
۱- شروع
۲- دریافت داده های بارهای PFL,TFL,NFL
۳- در صـــورت انتخاب برنامه DRP برو به مرحله ۴ در غیر اینصورت برو به مرحله ۶
۴- اجرای برنامه DRP مبتنی بر اولویت های مشـــترکین طبق رابطه های (۱) الی (۱۱)
۵- محاسبه پروفیل کل بار و ارسال آن جهت شارژ خودروهای برقی
۶- ثبت پروفیل بار ســـنتی منطقه مســـکونی و ســـپس برو به مرحله ۵
۷- در صـــورت انتخاب برنامه شـــارژ هوشـــمند خودروها برو به مرحله ۸ در غیر اینصورت برو به مرحله ۱۰
۸- عمل کردن خودروهای برقی طبق اطلاعات کاری و ســـپس برو به مرحله ۹
۹- اجرای شارژ هوشمند مبتنی بر رابطه های (۱۲) الی (۳۴)
۱۰- عدم نیاز به اطلاعات کاری راننده بلکه نیاز به شـــارژ کامل خودروها می باشد و سپس برو به مرحله ۹
۱۱- چاپ نتایج

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۱۲- توقف

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله ۴ مورد مطالعاتی بررسی شده است که مشخصات هر یک از آنها در جدول (۱) نمایش داده شده است. شبکه‌ی مورد بررسی یک شبکه ۳۷ باس واقعی [۲۳] است که شمای آن در شکل (۱) نمایش داده شده 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 برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار برای نواحی مسکونی در نظرگرفته شده‌است. پارکینگ‌های شارژ خودرو نیز تنها در بخش صنعتی قرار دارند (گره ۲۵-۲۳). تعداد کل خودروهای برقی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده است که برای تسریع در محاسبات بر اساس به ۱۰۰ خوشه ۱۰ تایی بر اساس مشابهتشان دسته بندی شده‌اند. مشخصات مربوط به بارهای پاسخگو از مرجع [۲۵و۲۶] اقتباس شده است که شامل بار منعطف زمانی (ماشین لباسشویی)، منعطف توانی (روشنایی و سیستم تهویه هوا) و بار غیرمنعطف (یخچال فریزر، توستر و کتری) می‌باشد که مشخصات هر یک از آنها برای یک منزل مسکونی نمونه در جدول (۲) نمایش داده شده است. به منظور سادگی مساله، 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 ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. ظرفیت ترانسفرمر توزیع پست شبکه نیز ۱ مگاوات لحاظ شده است. انواع خودروهای برقی به کار رفته در این مقاله در جدول (۳) نمایش داده شده است. سایرمشخصات مربوط به خودروهای برقی مورد استفاده در این مقاله نیز از مرجع [۲۵] اقتباس شده است. دو نوع نرخ شارژ برای ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی فرض شده است که عبارتند از: شارژ نرمال با نرخ توان ۴ کیلووات و شارژ سریع با نرخ ۸ کیلووات می‌باشد.



شکل (۱) دیاگرام تک خطی شبکه توزیع مورد بررسی

جدول (۱) موردهای مطالعاتی مقاله

مورد	۱	۲	۳	۴
مد شارژ	نرمال	سریع	نرمال	سریع

برنامه پاسخ گویی	دارد	دارد	ندارد	ندارد

جدول (۲) مشخصات بارهای پاسخگوی یک منزل نمونه

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

جدول (۳) اطلاعات مربوط به انواع خودروهای برقی

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

جدول (۴) اطلاعات آماری رانندگان خودروی برقی

توصیف	مقدار	یکا
مسافت روزانه متوسط	توزیع نرمال $\mu=۵۵,\ \sigma^2=۱۰$	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

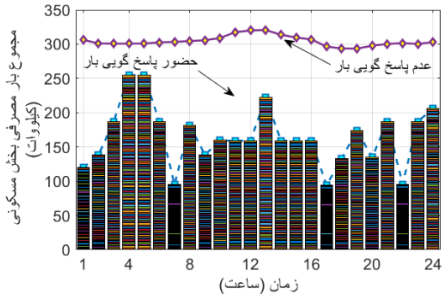
جدول (۵) جمع بندی اطلاعات ناشی از خوشه بندی خودروها

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

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

بعدی از زمان خروج خودرو از پارکینگ محاسبه گردد. بر اساس مشخصات فنی و آماری ذکر شده برای خودروهای برقی، اطلاعات پرسشنامه تجمیع کنندگان توان در پارکینگ خودروهای برقی در قالب جدول (۵) در خواهد آمد. انرژی نیاز مربوط به هر یک از خوشه‌های خودرو برقی باید به گونه‌ای تامین شود که اولا 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 ترانسفرمر 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 است که نمودار آن در شکل (۲) نمایش داده شده است. در صورتی که برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار حضور داشته باشد، بستگی به ضریب رضایتمندی مشترکین، بارهایی از قبیل 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 برنامه‌ی 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 ۱ نزدیک شبکه بدین 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، بدین معناست که مشترک کاهش هزینه را به تامین 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 توجهی خواهد داشت. به منظور 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 برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در قالب جدول (۶) نمایش داده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، میانگین بار و پیک بار شبکه در حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار به ترتیب به اندازه ۴۶/۰۲ درصد و ۲۰/۵۳ درصد نسبت به حالت سنتی عدم حضور بارهای پاسخ‌گو کاهش یافته است. این مقایسه، میزان کارایی برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار را در بهبود پارامترهای شبکه توزیع به خوبی نمایش می‌دهد. مسلما برنامه‌ریزی خودروهای برقی، در شرایطی که محدودیت مربوط به ترانسفورماتورهای توزیع در نظر گرفته شود، تاثیر قابل توجهی در شارژ خودروهای برقی خواهد داشت. هر چه توان عبوری از خطوط با ازدحام بیشتری تو سط منازل مسکونی مواجه با شد، امکان شارژ خودروهای برقی در آن بازه‌های زمانی نیز کاهش می‌یابد. حتی امکان دارد هزینه‌های شارژ خودروهای برقی نیز به دلیل جابجایی زمان شارژ آنها به بازه‌های گران قیمت‌تر نیز افزایش پیدا کند. در این مقاله انواع پارامترهای شبکه توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ابعاد گسترده‌ای از جزئیات مساله بدست آید و تفاوت میان چهار مورد مطالعاتی حاصل گردد.



شکل (۲) پروفیل بار مناطق مسکونی درعدم حضور برنامه پاسخ‌گویی بار (با فرض ناهمزمانی نرمال) و در حضور برنامه پاسخگویی بار

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

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

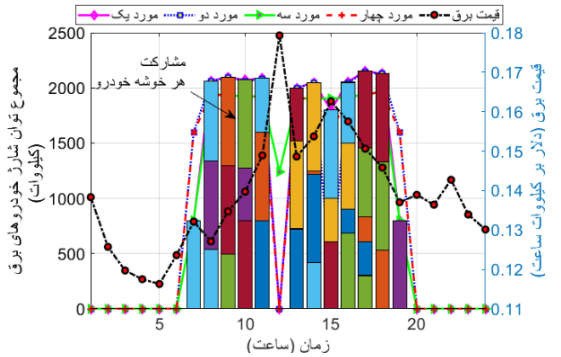
نتیجه مقایسه چهار مورد مطالعاتی در جدول (۷) نمایش داده شده است. در حل مسائل بهینه‌سازی توسط ترکیب نرم‌افزارهای Yalmip و Mosek هر یک از این نرم افزارها زمان مخصوص به خود را صرف خواهند کرد. زمانی که نرم افزار Yalmip صرف می‌کند بیشتر جهت مرتب‌سازی قیود مرزی و بررسی اولیه مدل بهینه‌سازی است که معمولا کمتر از چندین ثانیه به طول می‌انجامد. به نوعی وظیفه Yalmip آماده‌سازی مدل و معرفی آن به حل‌کننده‌های Mosek است. پس از دریافت مدل توسط Mosek مساله بهینه‌سازی با استفاده از ابزارهای مبتنی بر الگوریتم ساقه و ریشه شروع به حل می‌کند. نحوه تعریف هر یک از قیود تاثیر به سزایی در همگرایی این نرم افزار دارد. در مورد مدل خاص استفاده شده در این مقاله، حساسیت جواب‌ها به قیود مربوط به محدودیت ولتاژ گره‌ها، محدودیت ظرفیت خطوط، تعریف گسسته یا پیوسته بودن نرخ شارژ، محدودیت بار تامین نشده در هر گره، و محدودیت تامین توان مورد نیاز خودروها از جمله مواردی است که می‌تواند منجر به همگرایی یا واگرایی مساله شود. بنابراین تعیین دقیق و صحیح این محدودیت‌ها در زمان حل مساله و همگرایی آن بسیار اثرگذار است. اختلاف زمان حل مساله در هر یک از موارد مطالعاتی، به دلیل تاثیر گذاری پروفیل بار مسکونی این موارد و توان شارژ خودروهای برقی است که منجر به افزایش زمان حل مساله در مورد شارژ سریع نسبت به نرمال و در مورد بار سنتی نسبت به پاسخ‌گویی بار شده است. چون نرخ شارژ گسسته در نظر گرفته شده است (از صفر تا ۱۰۰ نرخ شارژ به ۱۰۰ بازه گسسته تقسیم شده است)، مساله در حالت نرمال، با پله‌های کوچکتری می‌تواند خودروها را شارژ کند و سریع‌تر موجب همگرایی می شود. اما

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

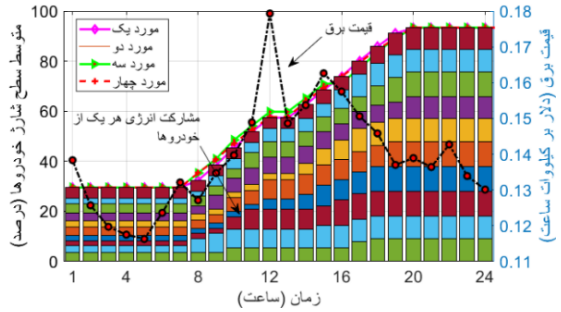
زمانی که شارژ سریع است، اندازه هر گام بزرگتر بوده و امکان تامین قیودی که به دقت بالاتر (گام های کوچکتر) نیاز دارند کمتر فراهم می‌شود. بنابراین زمان همگرایی افزایش می یابد. همچنین در این جدول به خوبی مشخص است که توان تامین نشده خودروها در حالت شارژ سریع نسبت به نرمال بیشتر خواهد بود. مقدار بارزدایی باس‌ها مقدار بسیاری اندکی است و این نشان می‌دهد، که با توجه به ظرفیت توان خطوط، تعریف صحیح قید افت ولتاژ شبکه، مساله به جوابی همگرا شده است که توان هر یک بارهای شبکه بدون اینکه افت ولتاژ از محدوده مجاز خارج شود، به خوبی تامین گردد. تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیز به خوبی 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 بدست آمده است که دلیل این امر محدودیتی است که پروفیل بار مسکونی برای پست توزیع ایجاد کرده است و مقدار موثر شارژ در هر مرحله باید در گام‌های کوچکتر و دفعات بالاتر صورت گیرد تا پست توزیع دچار اضافه‌باری نشود. نمودار مربوط به توان شارژ مجموع خودروهای برقی در شکل (۳) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در ساعات ۱۰ الی ۱۳ که قیمت برق در پیک قرار دارد، هیچ خودرویی شارژ نشده است 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 تامین توان خودروها مقداری از شارژ به ساعات پیک به اجبار باید موکول می شده است ولی این اتفاق برای سایر موارد رخ نداده است. به منظور 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 هزینه‌ی 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 بر حسب درصد کیلوات ساعت در شکل (۴) نمایش داده شده است. تا قبل از ورود خودروها به پارکینگ به طور میانگین خودروها در حدود ۳۰ درصد ظرفیت خود شارژ دارند. تا قبل از به پیک رسیدن قیمت در ساعت ۱۲ به طور متو سط خودروها کمتر از ۶۰ در صد شارژ شده‌اند. سپس در ساعت پیک شارژی صورت نگرفته است و پس از آن تا ساعت ۱۸ به طور میانگین حدودا ۸۰ درصد شارژ هر خودرو شارژ دارد و از آن پس خودروها به طور میانگین تا حدود ۹۴ در صد شارژ خواهند شد. تفاوت روش شارژ هوشمند با شارژ سنتی در همین جا به خوبی مشخص می شود. به جای شارژ کامل هر خودرو به میزان نیازش شارژ شده است.

جدول (۷) مقایسه نتایج موردهای مطالعاتی

	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳	مورد ۴
زمان Yalmip (ثانیه)	۵/۰۳	۱/۴۹	۱/۴۸	۱/۱۷
زمان Mosek (ثانیه)	۲۱۰/۹۰	۲۴۹/۵۳	۲۴۵/۱۵	۳۲۵/۸۹
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 تامین نشده (kWh)	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸
مجموع بارزدایی (kWh)	۱/۰۴	صفر	۱/۴۳	۱/۴۳
باس های دارای بارزدایی	۵	۴و۵و۹و۳۲و۳۳	۶	۶و۲۶

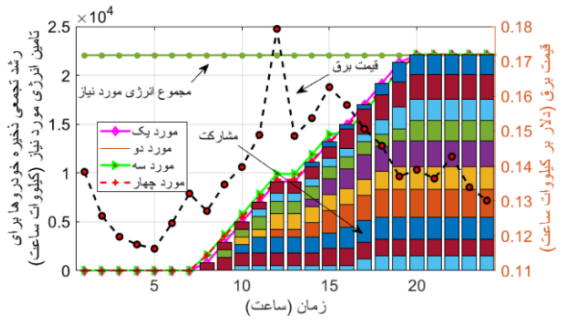


شکل (۳) مجموع توان شارژ خودروها در هر یک از موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه در مورد ۱

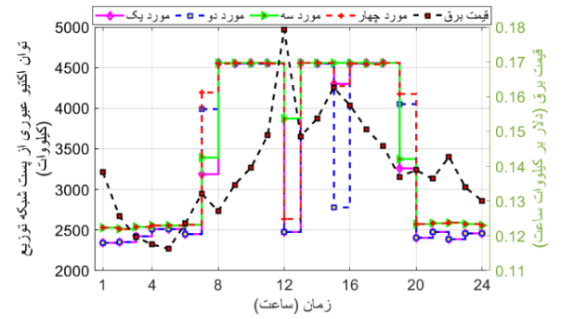


شکل (۴) میانگین سطح انرژی ذخیره شده بر حسب درصد در موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه

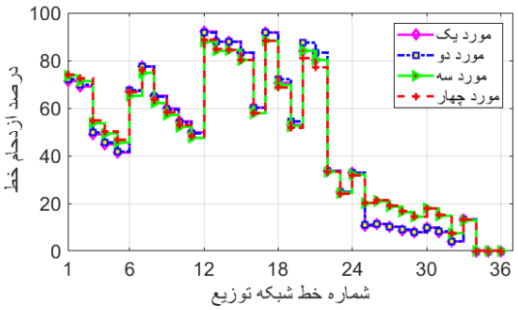
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



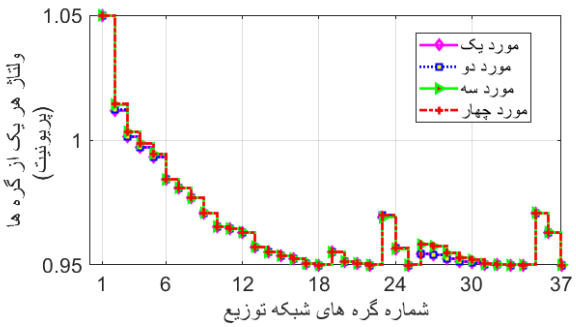
شکل (۵) تامین تدریجی انرژی مورد نیاز شارژ خودروها در هر مورد مطالعاتی



شکل (۶) توان عبوری از پست شبکه توزیع (توان خریداری شده از شبکه بالادستی) در هر مورد مطالعاتی



شکل (۷) مگاولت آمپر عبوری از هر یک خطوط شبکه



شکل (۸) ولتاژ هر یک از گره های شبکه (پریونیت)

مقدار انرژی مورد نیاز شارژ خودروها که بر ا ساس تقا ضای م شترکین طبق جدول (۵) محاسبه می‌شود، به مرور زمان باید تامین گردد تا مساله از جواب قابل قبول برخوردار باشد. نحوه تامین تدریجی این میزان شارژ نیز در قالب شکل ۵ نمایش داده شده ا ست. به تدریج با ورود خودروها به درون 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. به منظور درک بهتر تفاوت میان موردهای مطالعاتی، توان عبوری از پست توزیع در شکل (۶) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، تا قبل از ساعت ۸ که خودرویی وارد پارکینگ نشده است یا ساعت بعد از ۲۰ که خودرویی در پارکینگ ح ضور ندارد، به دلیل بی شتر بودن بار م صرفی حالت سنتی ن سبت به حالت پاسخ‌گویی بار، توان عبوری از پست توزیع در این زمان برای موردهای سه و چهار بیشتر از دو مورد دیگر ا ست. از ساعت ۷ الی ۲۰ خودروها در پارکینگ حضور دارند و به دلیل بالا 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 شکل ۴ و ۵ هم به خوبی مشخص است که منحنی مورد سه بالاتر از مورد یک قرار گرفته ا ست. سپس طبق شکل ۶ محدودیت پ ست توزیع نق شی سرنو شت ساز پیدا می‌کند، و خودروها مجبور به کاهش نرخ شارژ و به تعویق اندازی آن می شوند. به منظور جبران این عقب ماندگی اولیه روش پاسخ گویی بار نسبت به روش سنتی، شاهده شارژ مورد ۱ و ۲ در ساعت ۱۵ (به دلیل کاهش بار مسکونی و آزادسازی ظرفیت) هستیم و از آن پس طبق شکل 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 به نوعی آن تعویق جبران شده است. متوسط توان عبوری از هر یک خطوط در شکل (۷) نمایش داده شده ا ست. خطوط ۲۲ تا ۲۴ مربوط به نواحی صنعتی هستند و تغییرات پاسخ‌گویی بار برآنها تاثیری 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 نهایتا شارژ نمایند، بنابراین منحنی آنها بر یکدیگر منطبق شده است.خطوط ۲۶ تا ۳۰ مربوط به نواحی مسکونی هستند که تاثیر برنامه پاسخ‌گویی بار در آنها کامل م شخص ا ست و شارژ یا د شارژ خودروها نیز تاثیری بر اختلاف موارد (مورد یک با دو یا مورد سه با چهار) ایجاد نکرده است. این توان‌ها از خطوط ۱ تا ۶ (که واسط پست توزیع به ناحیه مسکونی ه ستند) نیز عبور می‌کند. این نمودار ن شان می‌دهد، جریان عبوری از خطوط انتقال در محدوده مجاز خود قرار گرفته‌اند و هیچ‌یک به طور ۱۰۰ درصد دچار ازدحام نشده‌اند. بیشتر درصد ازدحام حدود ۹۰ در صد می‌با شد. متو سط پروفیل ولتاژ شبکه نیز در شکل (۸) تر سیم شده است. همانطور که مشخص است تمامی باس‌های شبکه در

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

محدوده مجاز ولتاژی قرار دارند. نکته قابل توجه اینکه در شـــبکه‌های شعاعی، با فاصله گرفتن از پست توزیع، ولتاژها بر اساس توان عبوری از خطوط افت پیدا می‌کند. اگر در این مثال پســـت توزیع قابلیت افزایش ولتاژ خود به ۱/۰۵ پریونیت را نداشـــت و به طور مثال در ولتاژ ۱ پریونیت تنظیم می‌شـد، آنگاه یا مســـاله جواب نداشـت (یعنی خطوط قابلیت انتقال توان را با رعایت محدودیت ولتاژ نداشـــتند) و یا نیاز به بازردایی بیشتر برای کاهش توان عبوری از خطوط و حفظ پروفیل ولتاژ بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشـی برای شـارژ هوشـمند خودروهای برقی ارائه شـده اســـت که در آن بر اســـاس میزان انرژی مورد نیاز برای پیشـــمایش ســـفرهای روزانه، فرآیند شـــارژ خودروهای برقی با در نظر گیری محدودیت های فنی و اقتصـــادی شـــبکه و با هدف کاهش هزینه‌های شارژ صورت می‌گیرد. نتیجه پیاده سازی روش در دو مد شارژ نرمال و سریع در حضور و عدم حضور محدویت توان عبوری از ترانسفورماتور توزیع با یکدیگر مقایسـه شـد. همچنین نتیجه حضـور و عدم حضـور برنامه‌ی پاســخ‌گویی بار در مســـاله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که روش شارژ سریع به مراتب نتایج بدتری نســـبت به روش شـــارژ نرمال ایجاد می‌کند. در واقع، هم مقدار هزینه ی این روش و هم مقدار پیک بار این روش نســـبت به روش نرخ شارژ نرمال بیشتر است. همچنین در صورتی که روش شارژ هوشمند به شـــبکه توزیع اعمال می‌شـود، توان عبوری از پســـت شـــبکه 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 معوّق خواهد شـد. در صـورت ادغام برنامه‌ی پاسـخگویی بار در مســـاله نیز، امکان مدیریت موثرتر پیک بار شـــبکه و هزینه‌های شـــارژ فراهم خواهد شد.

مراجع

[1] Q. Wang, X. Liu, J. Du, and F. Kong, "Smart charging for electric vehicles: A survey from the algorithmic perspective," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517, 2016.

[2] I. Rahman, P. M. Vasant, B. S. M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, and N. Adnan, "Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1039-1047, 2016.

[3] K. L. López, C. Gagné, and M.-A. Gardner, "Demand-side management using deep learning for smart charging of electric vehicles," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 2683-2691, 2018.

[4] X. G. Yang, J. M. Marcicki, P. Addepalli, D. B. Dave, and J. Lu, "Smart charging battery systems and methods for electrified vehicles," ed: Google Patents, 2019.

[5] S. Grammatico, "Fast Convergence in Electric Vehicle Smart Charging," in Intelligent Integrated Energy Systems: Springer, 2019, pp. 123-139.

[6] A. Ensslen, P. Ringler, L. Dörr, P. Jochem, F. Zimmermann, and W. Fichtner, "Incentivizing smart charging: Modeling charging tariffs for electric vehicles in German and French electricity markets," Energy research & social science, vol. 42, pp. 112-126, 2018.

[7] S. Sachan and N. Adnan, "Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids," Sustainable cities and society, vol. 40, pp. 91-100, 2018.

[8] L. Jian, Z. Yongqiang, and K. Hyoungmi, "The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai," Energy policy, vol. 119, pp. 206-214, 2018.

[9] M. M. Hussain, M. S. Alam, M. S. Beg, and H. Malik, "A risk averse business model for smart charging of electric vehicles," in Proceedings of First International Conference on Smart System, Innovations and Computing, 2018: Springer, pp. 749-759.

[10] C. de Mattos Affonso and M. Kezunovic, "Technical and economic impact of PV-BESS charging station on transformer life: A case study," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 4, pp. 4683-4692, 2018.

[11] J.-M. Clairand, J. Rodríguez-García, and C. Álvarez-Bel, "Smart charging for electric vehicle aggregators considering users' preferences," IEEE Access, vol. 6, pp. 54624-54635, 2018.

[12] S. Hardman et al., "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, 2018.

[13] E. Kamal and L. Adouane, "Intelligent energy management strategy based on artificial neural fuzzy for hybrid vehicle," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 3, no. 1, pp. 112-125, 2017.

[14] E. Kamal and L. Adouane, "Hierarchical energy optimization strategy and its integrated reliable battery fault management for hybrid hydraulic-electric vehicle," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 5, pp. 3740-3754, 2018.

[15] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, and M. J. Barth, "Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 8, pp. 2181-2191, 2016.

[16] L. Guo, B. Gao, Y. Gao, and H. Chen, "Optimal energy management for HEVs in eco-driving applications using bi-level MPC," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 8, pp. 2153-2162, 2016.

[17] L. Qiu, L. Qian, H. Zomorodi, and 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, 2017.

[18] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, and F. L. Lewis, "Scalable real-time electric vehicles charging with discrete charging rates," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 5, pp. 2211-2220, 2015.

[19] B. Sun, Z. Huang, X. Tan, and D. H. Tsang, "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, 2016.

[20] O. Sundstrom and C. Binding, "Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

grid constraints," IEEE Transactions on Smart grid, vol. 3, no. 1, pp. 26-37, 2011.
[21] V. Aravinthan and W. Jewell, "Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 999-1009, 2015.
[22] N. Chen, C. W. Tan, and 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, 2014.
[23] D. Singh, R. K. Misra, and D. Singh, "Effect of load models in distributed generation planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 2204-2212, 2007.
[24] M. L. Crow, "Electric vehicle scheduling considering co-optimized customer and system objectives," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 410-419, 2017.
[25] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Benefits of demand response on operation of distribution networks: A case study," IEEE systems journal, vol. 10, no. 1, pp. 189-197, 2014.
[26] S. Paudyal, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 684-694, 2014.
[27]www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/who_we_are/statistics_and_publications/statistics.html

.

رزومه



موید محسنی در کشور کویت متولد شده است (۱۳۵۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون(۱۳۸۰)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول(۱۳۹۰) و اکنون داتشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول را سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ، بازار برق، شبکه هوشمند و سیستم های انرژی نو است.



محمود جورابیان در شوشتر متولد شده است (۱۳۴۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه New Haven, CT, USA (1362) ، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA (1364) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه Bath, Bath, UK را سپری کرده است. فعالیت-های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه شبکه هوشمند، مطالعات سیستم قدرت است.



افشین لشکر ارا محمره در تهران متولد شده است (۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه ازاد اسلامی واحد دزفول(۱۳۷۴)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه بابل(۱۳۸۰) و دکتری مهندسی برق-قدرت در دانشگاه علم و صنعت(۱۳۹۰) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مطالعات سیستم قدرت ، بازار برق، شبکه هوشمند است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Smart Charge Management of Electric Vehicles in the Distribution Network in the Presence of Demand Response Program

Moaiad Mohseni [1], Mahmood Joorabian [2*], Afshin Lashkar Ara [3]
1- PhD student - Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2-Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email:*mjoorabian@scu.ac.ir.
3-Associate Professor ,Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract: Charging electric vehicles in the distribution network is one of the most basic solutions for technical and economic management of energy distribution. In many traditional charging methods, the condition of fully charging cars when leaving the parking lot has always been a problem. But in this article, each car is intelligently charged only based on the amount of energy required to travel its daily journeys. In order to implement this smart method, owners of electric vehicles provide information about the number of trips and the length of their route to the parking charge management, and based on the specifications of the vehicles and the initial energy level of their battery when entering the parking lot, the amount The charge required for them is determined. Then, the charging manager plans the charging based on the tariff of energy consumption time, limitation of distribution network transformers, type of charge level selected (normal or fast) so that charging costs are minimized by observing technical and economic constraints. . The result of intelligent car charging in normal and fast charging conditions and in different limitations of the distribution network and in the presence or absence of load response program is compared with each other. YALMIP and MOSEK software have been used to solve the mixed integer linear programming model.

Keywords: Smart Charging Vehicles, demand Response program, mixed integer linear programming, Distribution Network.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 4- Winter 2022