یک روش شارژ هوشمند برای ادغام بهینه خودروی برقی در شبکه توزیع در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

دکتر حمید رادمنش[1] احمد نصیری[2]

۱- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی – تهران – ایران
h.radmanesh@iauctb.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی – تهران – ایران
amd.nasiri@gmail.com

چکیده: شارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع یکی از اساسی‌ترین راه‌کارها جهت مدیریت فنی و اقتصادی توزیع انرژی است که در صورت اجرای صحیح، مزایای متعددی را از قبیل کاهش پیک بار شبکه، کاهش هزینه‌های شارژ، کاهش تلفات و ... به ارمغان خواهد آورد. دربسیاری از روش‌های شارژ سنتی، قید شارژ شدن کامل خودروها در هنگام خروج از پارکینگ همواره در مساله لحاظ شده است، اما واقعیت آن است که لزومی به شارژ کامل خودروهای برقی نیست و بهتر است هر خودرو به صورت هوشمند، تنها بر اساس مقدار انرژی مورد نیاز پیمایش سفرهای روزانه خود شارژ 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 ترانسفرمرهای شبکه توزیع، نوع سطح شارژ انتخابی (نرمال یا سریع) و ... 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 عدم حضور برنامه پاسخ‌گویی بار با یکدیگر مقایسه شده است. از نرم افزار YALMIP و MOSEK برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده شده است.

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

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.27

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمید رادمنش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – میدان پونک – دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی – دانشکده‌ی فنی و مهندسی

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
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
$E_t^{\mathcal{S}}$	انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز $\mathcal{S}$ در بازه زمانی t
$\underline{E}_t^{\mathcal{S}}$	حداقل انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز $\mathcal{S}$ در بازه زمانی t
$\bar{E}_t^{\mathcal{S}}$	حداکثر انرژی ذخیره‌شده در ذخیره ساز $\mathcal{S}$
$E_{t_{ini}}^{\mathcal{S}}$	سطح شارژ اولیه موجود در ذخیره ساز $\mathcal{S}$
$E_{t_{final}}^{\mathcal{S}}$	سطح شارژ نهایی موجود در ذخیره ساز $\mathcal{S}$
$E_{b,k}$	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
$\mathcal{N}^{main}$	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
$\mathcal{P}_t^{\mathcal{L}}$	توان مصرفی بار $\mathcal{L}$ در بازه زمانی t
$\breve{\mathcal{P}}_t^{\mathcal{L}}$	توان مطلوب مصرفی بار $\mathcal{L}$ در بازه زمانی t
$\mathcal{P}_t^{\mathcal{S}}$	توان شارژ ذخیره ساز $\mathcal{S}$ در بازه زمانی t
$\underline{\mathcal{P}}_t^{\mathcal{S}}$	حداقل توان شارژ ذخیره ساز $\mathcal{S}$ در بازه زمانی t
$\bar{\mathcal{P}}_t^{\mathcal{S}}$	حداکثر توان شارژ ذخیره ساز $\mathcal{S}$ در بازه زمانی t

نماد	توصیف
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
$\gamma^{\mathcal{L}}$	قیمت واحد نارضایتی مشترک
$\mathcal{T}$	مجموعه بازه زمانی
$\tau^{\mathcal{L}}$	تاخیر زمانی بار مصرفی $\mathcal{L}$
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

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی از جمله مطالعات بنیادی در شبکه‌های توزیع به شمار می‌آید که همزمان با ظهور و گسترش خودروهای برقی، مورد توجه محقّقین قرار گرفته است. بدون برنامه‌ریزی شارژ منظّم خودروهای برقی، امکان بهره‌برداری مفید و موثر از این فناوری، بدون به خطر انداختن امنیت و پایداری شبکه توزیع وجود نخواهد داشت. تاکنون روش‌های گوناگونی برای شارژ خودروهای برقی معرفی شده است. معمولاً روش‌های شارژ یا برای تامین اهداف 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 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 و قیمت برق می‌باشد که با هدف کاهش قیمت شارژ در زمان ازدحام شبکه توزیع با استفاده از ابزار یادگیری ماشین انجام شده است که از قابلیت پیاده‌سازی به صورت زمان واقعی برخوردار است [۴]. روش دیگر شارژ هوشمند خودروی برقی بر اساس شرایط ترافیکی و شرایط آب و هوایی می‌باشد که با استفاده از سطح شارژ اولیه خودرو، میزان مصرف خودرو در هر مایل و اطلاعات سیستم موقعیت یاب جهانی به صورت آنلاین با استفاده از یک ابزار یادگیری ماشین، راننده را از میزان شارژ مورد نیاز خود برای سفر بعدی مطّلع می‌سازد [۵]. در مرجع [۶] روش شارژ هوشمندی ارائه شده است که قابلیت ادغام با برنامه پاسخ‌گویی بار را داشته و از روش‌هایی برای محدّب‌سازی مساله جهت همگرایی سریع‌تر مساله 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 پیک بار 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 مولفه‌های روانشناسی و اجتماعی رانندگان خودرو، در برنامه‌ریزی شارژ در نظرگرفته 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، نیمه‌سنگین 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 مساله است که در مرجع [۱۰] برای مقابله با آن از یک مدل کسب و کار ریسک‌گریز بهره‌گرفته شده است تا با تغییر قیمت‌گذاری، ریسک مالی پارکینگ مدیریت شود.

یکی از مزایای شارژ هوشمند افزایش طول عمر ترانسفرمرهای توزیع ذکر شده است که ناشی از کاهش پیک بار و ازدحام شبکه بر اثر شارژ هوشمند می‌باشد. همچنین کاهش هزینه، از جمله مزایای اقتصادی این روش نیز هست. مجهّزسازی ایستگاه‌های شارژ به پنل‌های فتوولتائیک نیز مزایای روش هوشمند را افزایش می‌دهد [۱۱] .

در نظرگیری همزمان منافع مشترکین خودروی برقی و تجمیع‌کنندگان 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 می‌باشد [۱۲] . یکی از گزارش‌های مبتنی بر نظرسنجی مردمی، مصاحبه با صاحب نظران، داده‌های ثبت شده خودروها و سیستم‌های موقعیت یاب 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 مجهّز به این سیستم شوند. هنوز فناوری شارژ هوشمند به بلوغ خود نرسیده است و بنابراین تخمین دقیقی از زیرساخت‌های لازم برای پیاده سازی این روش مشخص نیست. یکی دیگر از ضرورت‌ها در این زمینه، تدوین قوانین و تصویب سیاست‌های جدید دولت‌ها می‌باشد [۱۳] .

در برخی از مقالات مانند [۱۴-۱۸] 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 مدّ نظر نیست.

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

۱) به جای شارژ کامل خودروها در این روش، خودروها بر اساس میزان مسافت مسیرهای روزانه و سطح انرژی اولیه باتری خود شارژ می‌شوند.

۲) برخلاف روش‌های سنتی که در آن نرخ شارژ معمولاً عددی پیوسته بود، نرخ شارژ به صورت گسسته بر اساس مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده است.

۳) مقایسه میان نرخ شارژ نرمال و سریع صورت گرفته است.

۴) مدل مساله به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در آمده است که با استفاده از نرم افزار MOSEK و YALMIP حل شده است.

۵) محدودیت مربوط به اضافه باری ترانسفرمرهای توزیع بر اساس مدل مرجع [۲۰-۲۲] لحاظ شده است.

۶) شبکه مورد بررسی و مدل بار سنتی از یک شبکه واقعی مرجع [۲۳] برگرفته 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 شارژ هوشمند در حضور و عدم حضور برنامه پاسخ-گویی بار مورد بررسی قرار گرفته است که مدل پاسخ‌گویی بار از مرجع [۲۵, ۲۶] برگرفته شده است.

نوآوری‌های اصلی این مقاله شامل سه مورد هستند: گسسته‌سازی نرخ شارژ مدل شارژ هوشمند، در نظرگیری عدم قطعیت مشترکین در انتخاب سهم هزینه‌هایشان نسبت به نارضایتی، و پیاده سازی روش در نرم افزارهای MOSEK و YALMIP.

سایر بخش‌های مقاله به شرح ذیل خواهد بود. بخش ۲ و ۳ به ترتیب به مدل‌سازی مساله و شبیه‌سازی اختصاص دارد. بخش ۴ مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادات 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 برنامه 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

برنامه 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 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 غیرمنعطف نام دارند. تابع هدف برنامه پاسخ‌گویی بار، ترکیبی از هزینه و نارضایتی مشترک در نظر گرفته شده است که در رابطه (۱) به آن اشاره شده است:

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

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 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 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.

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

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

- ب) محدودیت بار منعطف زمانی:

بار منعطف زمانی دارای قابلیت تغییر زمان مصرف در محدوده مجاز، بر اساس رابطه (۴) می‌باشد. اما این بار، قابلیت تغییر توان کاری خود را طبق رابطه (۵) نخواهد داشت.

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

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

- 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.

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

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

- 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.

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

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

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

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

۲-۲- مدل برنامه ریزی شارژ خودروی برقی

هدف از شارژ خودروهای برقی در این مقاله، کاهش هزینه شارژ باتری و هزینه فرسودگی آن است که در رابطه (۱۳) و (۱۴) به ترتیب تعریف شده‌اند.

$$\min \quad \mathrm{Cos}\,t_{Total} = \mathrm{Cos}\,t_{charge} + \mathrm{Cos}\,t_{bat} \tag{۱۲}$$

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

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

میزان توان شارژ خودروها و انرژی دشارژ شده آن‌ها بر اساس روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید:

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

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

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 خودروها و سطح انرژی آن‌ها باید طبق روابط (۱۷) و (۱۹) در محدوده مجاز قرار داشته باشند. همچنین در زمانی که خودرو در پارکینگ حضور ندارد، توان شارژ آن طبق رابطه (۱۸) برابر صفر باشد.

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

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

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

- ب) محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ:

وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی طبق رابطه (۲۱)، متغیرهای باینری هستند که امکان وقوع همزمان شارژ و دشارژ 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.

$$0 \le C_k^t + D_k^t \le 1 \tag{۲۰}$$

$$C_k^t, D_k^t \in \{0,1\} \tag{۲۱}$$

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

- 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 سفرهای بعدی آن طبق رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود. 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 تضمین کننده تامین توان مورد نیاز خودروهای برقی می‌باشد.

$$SOC_A = 1 - \left(d / d_R\right) \tag{۲۳}$$

$$SOC_D = 0.2 + \left(STD / d_R\right) \tag{۲۴}$$

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

$$E_i^{req} = \frac{SoC_i^{req} B_C}{\eta} \tag{۲۶}$$

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

- د) محدودیت مربوط به پخش بار در شبکه توزیع:

قید مربوط به توازن توان حقیقی و راکتیو در هر یک از گره‌های شبکه توزیع، طبق روابط (۲۸) و (۲۹) بدست می‌آید. همچنین رابطه (۳۰) نمایان‌گر ارتباط میان توان عبوری از خطوط و افت ولتاژ در گره‌های شبکه توزیع است. روابط (۳۱) و (۳۲) محدودیت ولتاژ گره‌های بار و گره اسلک متصل به شبکه بالادستی را بیان می‌کند. قید (۳۳) و (۳۴) به ترتیب، محدودیت توان عبوری از پست شبکه توزیع و توان عبوری از خطوط شبکه را به مساله اعمال می‌نماید.

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

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

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

$$\underline{V}_n^2 \le v_n^t \le \overline{V}_n^2; \qquad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in \mathcal{T} \tag{۳۱}$$

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

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

$$Sp_{ij} \le Sp_j^{\max} \tag{۳۴}$$

در بخش بعدی، مدل‌های ذکر شده برای برنامه پاسخ‌گویی بار و برنامه-ریزی شارژ خودروهای برقی؛ در محیط نرم افزار متلب و جعبه ابزارهای Yalmip و Mosek پیاده‌سازی خواهد شد. همچنین نتایج مربوط به چندین مورد مطالعاتی با یکدیگر مقایسه می‌گردد، تا دید وسیع‌تری نسبت به مساله بدست آید. گاهاً هدف از بهینه‌سازی خودروهای برقی، مدیریت شارژ نیست و موضوع استفاده بهینه از شارژ و یا تقسیم بندی بهینه از برق و سوخت در خودروهای هیبریدی نیز به عنوان مدیریت شارژ شناخته می‌شود که در اینجا به آن پرداخته نشده است [۲۸].

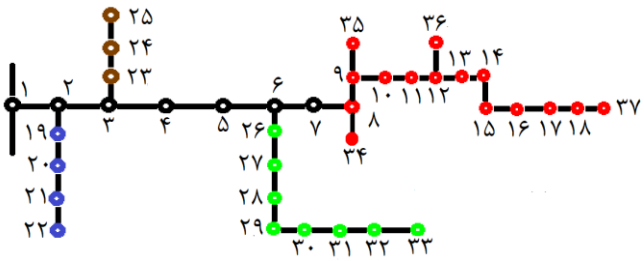
۳- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این تحقیق چهار 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 است [۲۳] ، 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] برگرفته شده است. نقاط سبز، قرمز، آبی و قهوه‌ای به ترتیب بیان‌گر مناطق مسکونی، بخش کامپوزیت، ناحیه تجاری و صنعتی است. بار تمامی نواحی، مطابق با مرجع مذکور است و تنها امکان برنامه پاسخ‌گویی بار، برای نواحی مسکونی در نظرگرفته شده است. پارکینگ‌های شارژ خودرو نیز تنها در بخش صنعتی قرار دارند. تعداد کل خودروهای برقی ۲۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده است که برای تسریع در محاسبات به ۱۰ خوشه ۲۰۰ تایی بر اساس شباهت‌شان دسته بندی شده‌اند. مشخصات مربوط به بارهای پاسخگو از مرجع [۲۵و۲۶] برگرفته شده است که شامل بار منعطف زمانی (ماشین لباسشویی)، منعطف توانی (روشنایی و سیستم تهویه هوا) و بار غیرمنعطف (یخچال فریزر، تستر و کتری) می‌باشد و 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 پیروی کند. حد مجاز افت ولتاژ نیز برابر ۵ درصد اختلاف کم و بیش 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 تحقیق در جدول (۳) نمایش داده شده است. سایر مشخصات مربوط به خودروهای برقی مورد استفاده در این تحقیق نیز از مرجع [۲۵] برگرفته شده است.

دو نوع نرخ شارژ برای ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی فرض شده است که عبارتند از: شارژ نرمال با نرخ توان ۴ کیلو وات و شارژ سریع با نرخ توان ۸ کیلو وات.



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 پاسخ‌گویی بار	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	تستر	یخچال
زمان	۲ ساعت	۱ - ۱۹	تمام وقت	۸-۹ ۱۷-۱۸ ۲۰-۲۱	۸-۹	تمام وقت
توان (kW)	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 ذخیره‌ساز
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 است [۲۷] 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

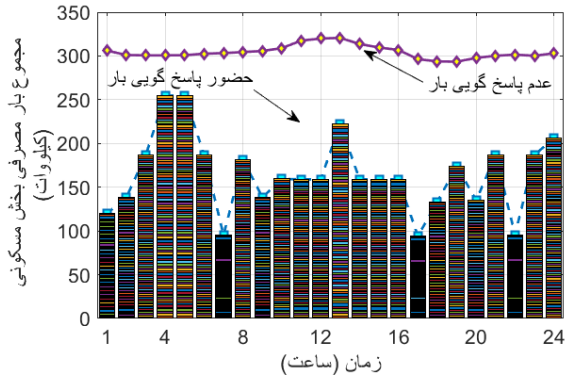
مشخصات فنی و آماری ذکر شده برای خودروهای برقی، اطلاعات پرسش‌نامه تجمیع کنندگان توان در پارکینگ خودروهای برقی در قالب جدول (۵) آمده است. انرژی مورد نیاز مربوط به هر یک از خوشه‌های خودروی برقی، باید به گونه‌ای تامین شود که اولاً سطح شارژ خودرو به کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت نامی‌اش نرسد و از ۱۰۰ درصد این مقدار نیز تجاوز نکند. 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 برنامه 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 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 ۱ نزدیک شود، 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 کمّی میان پارامترهای پروفیل بار در شرایط حضور و عدم حضور برنامه 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 برنامه 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 برنامه پاسخ‌گویی بار را در بهبود پارامترهای شبکه توزیع به خوبی نمایش می‌دهد.

مسلّماً برنامه‌ریزی هوشمند خودروهای برقی، در شرایطی که محدودیت مربوط به ترانسفرمرهای توزیع در نظر گرفته شود، تاثیر قابل توجهی 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. حتّی امکان دارد هزینه‌های شارژ خودروهای برقی نیز به دلیل جابجایی زمان شارژ آن‌ها به بازه‌های گران‌قیمت‌تر، افزایش پیدا کند.

در این پژوهش 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 عدم حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

برنامه پاسخ‌گویی بار	میانگین بار	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

نتیجه‌ی 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 مرتّب‌سازی قیود مرزی و بررسی اولیه مدل بهینه‌سازی است که معمولاً 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. نحوه‌ی تعریف هر یک از قیود، تاثیر به سزایی در همگرایی این نرم افزار دارد. در مورد مدل خاص استفاده شده در این تحقیق، حسّاسیت 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 تاثیرگذاری 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

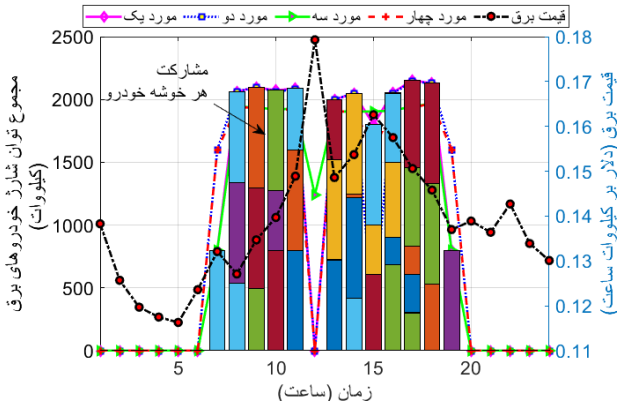
گرفته شده است (از صفر تا ۱۰۰ نرخ شارژ، به ۱۰۰ بازه گسسته تقسیم شده است)، مساله در حالت نرمال، با پله‌های کوچکتری می‌تواند خودروها را شارژ کند و سریع‌تر موجب همگرایی می‌شود. اما زمانی که شارژ سریع است، اندازه هر گام بزرگتر بوده و امکان تامین قیودی که به دقت بالاتر (گام های کوچکتر) نیاز دارند، کمتر فراهم می‌شود؛ بنابراین زمان همگرایی افزایش می‌یابد. 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 بسیار اندکی است و این نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت توان خطوط و تعریف صحیح قید افت ولتاژ شبکه، مساله به جوابی همگرا شده است که توان هر یک از 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 اضافه‌بار نشود.

نمودار مربوط به مجموع توان شارژ 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 باید به اجبار مقداری از شارژ به ساعات پیک موکول شود؛ 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.

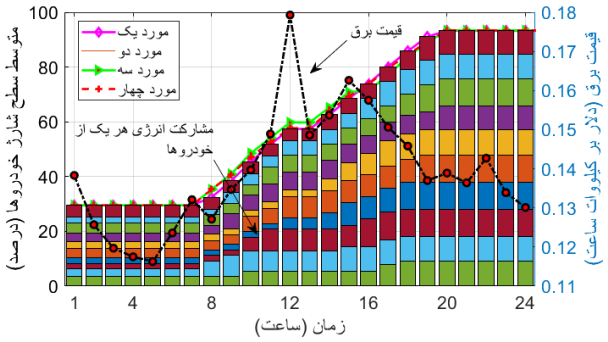
وضعیت متوسط سطح شارژ باتری‌ها در هر لحظه بر حسب درصد کیلووات ساعت در شکل (۴) نمایش داده شده است. تا قبل از ورود خودروها به پارکینگ به طور میانگین، خودروها در حدود ۳۰ درصد ظرفیت خود شارژ دارند. تا قبل از به پیک رسیدن قیمت در ساعت ۱۲ به طور متوسط، خودروها کمتر از ۶۰ درصد شارژ شده‌اند. سپس در ساعت پیک، شارژی صورت نگرفته است و پس از آن تا ساعت ۱۸ به طور میانگین حدوداً ۸۰ درصد شارژ دارند و از آن پس خودروها به طور میانگین تا حدود ۹۴ درصد شارژ خواهند شد. تفاوت روش شارژ هوشمند با شارژ سنتی در همین جا به خوبی مشخص می‌شود. به جای شارژ کامل، هر خودرو به میزان نیازش شارژ شده است. در مورد بهبود روش‌های شارژ با نرخ گسسته نیز روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که چندپلکانی کردن شارژ و ایجاد اختلاف زمانی برای عملکرد ایستگاه‌های شارژ، یکی از آن‌هاست که دراینجا برای سادگی بیشتر به آن پرداخته نشده است [۲۹].

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

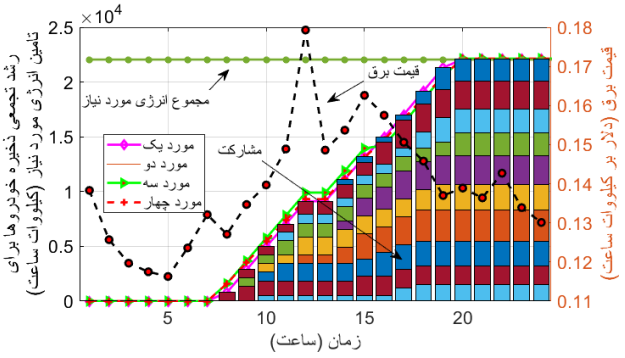


شکل (۳): مجموع توان شارژ خودروها در هر یک از موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه در مورد ۱

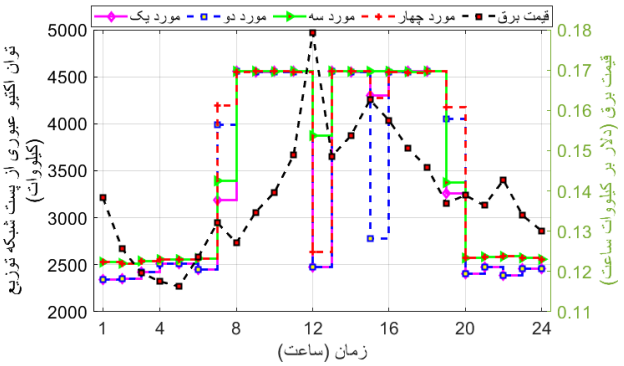


شکل (۴): میانگین سطح انرژی ذخیره شده بر حسب درصد در موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه

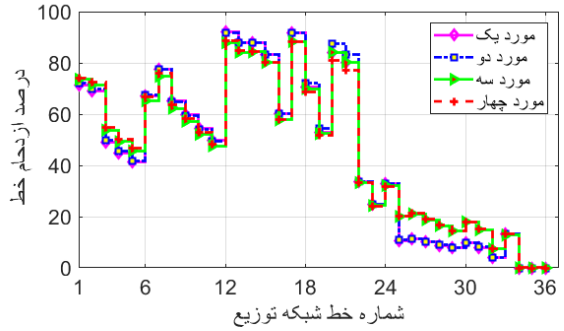
مقدار انرژی مورد نیاز شارژ خودروها که بر اساس تقاضای مشترکین طبق جدول (۵) محاسبه می‌شود، به مرور زمان باید تامین گردد؛ تا مساله از جواب قابل قبول برخوردار باشد. نحوه تامین تدریجی این میزان شارژ نیز در قالب شکل (۵) نمایش داده شده است. به تدریج با ورود خودروها به داخل پارکینگ (اثر بهمنی)، مقدار شارژ آن‌ها 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.



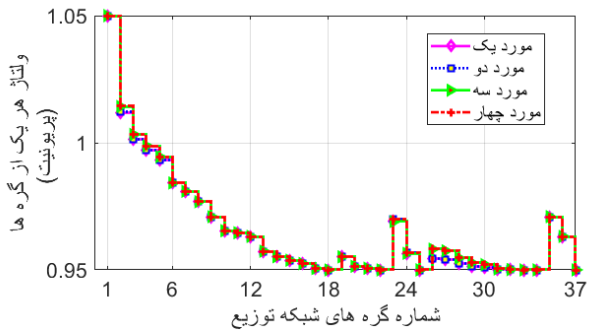
شکل (۵): تامین تدریجی انرژی مورد نیاز شارژ خودروها در هر مورد مطالعاتی



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 از خطوط شبکه



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

رفتار مشترکین در این بخش با تابع توزیع احتمال مدل شده است. زمان ورود و خروج خودروها نیز با تابع گوسی مدل شده است، اما در برخی از مراجع از نظریه صف نیز برای مدل‌سازی عدم قطعیت ورود و خروج بهره گرفته شده است [۳۰].

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 ۷ که خودرویی وارد پارکینگ نشده است، یا بعد از ساعت ۲۰ که خودرویی در پارکینگ حضور ندارد، 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 شکل (۴) و (۵) هم به خوبی مشخص است که منحنی مورد سه بالاتر از مورد یک قرار گرفته است. سپس طبق شکل (۶) محدودیت پست توزیع نقشی سرنوشت ساز پیدا می‌کند، و خودروها مجبور به کاهش نرخ شارژ و به تعویق‌اندازی آن می‌شوند. به منظور جبران این عقب ماندگی اولیه‌ی روش پاسخ‌گویی بار نسبت به روش سنتی، شاهد شارژ مورد یک و دو 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 هر یک از خطوط در شکل (۷) نمایش داده شده است. 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 نهایتاً شارژ نمایند؛ بنابراین منحنی آن‌ها بر یکدیگر منطبق شده است. خطوط ۲۶ تا ۳۲ مربوط به نواحی مسکونی هستند که تاثیر برنامه پاسخ‌گویی بار در آن‌ها کاملاً مشخص است و شارژ یا دشارژ 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 هستند) نیز عبور می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد، جریان عبوری از خطوط انتقال در محدوده مجاز خود قرار گرفته است و هیچ‌یک به طور ۱۰۰ درصد دچار ازدحام نشده‌اند. بیشترین درصد ازدحام، حدود ۹۰ درصد می‌باشد.

متوسط پروفیل ولتاژ شبکه نیز در شکل (۸) ترسیم شده است. 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، ولتاژ بر اساس توان عبوری از خطوط افت پیدا می‌کند. اگر در این مثال پست توزیع قابلیت افزایش ولتاژ خود به ۱/۰۵ پریونیت را نداشت و به طور مثال در ولتاژ ۱ پریونیت تنظیم می‌شد، آنگاه یا مساله جواب نداشت (یعنی خطوط قابلیت انتقال توان را با رعایت محدودیت ولتاژ نداشتند) و یا نیاز به بارزدایی بیشتر برای کاهش توان عبوری از خطوط و حفظ پروفیل ولتاژ بود.

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 محدودیت های فنی و اقتصادی شبکه و با هدف کاهش هزینه‌های شارژ صورت می‌گیرد. نتیجه پیاده‌سازی روش در دو حالت 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 برنامه پاسخ‌گویی بار در مساله 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 هزینه‌ی 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 شود، توان عبوری از پست شبکه توزیع نیز کاهش یافته و ظرفیت آن آزادتر می‌شود. بنابراین دیگر نیازی به احداث پست جدید و یا تقویت همان پست نیست و هزینه‌های توسعه شبکه توزیع، معوّق خواهد شد. در صورت ادغام برنامه پاسخ‌گویی بار در مساله نیز، امکان مدیریت موثّرتر پیک بار شبکه و هزینه‌های شارژ فراهم خواهد شد.

به عنوان 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.

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 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

[28] Nodeh, Mohammad Taqi, Hossein Gholizade-Narm, and Amin Hajizadeh. "Predictive control strategy for power management in parallel hybrid-electric vehicle." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 13.3 (2016): 49-56.

[29] Ghayeni, Mohesn. "Improving Fast Charging Methods Using Genetic Algorithm and Coordination between Chargers in Fast Charging Station of Electric Vehicles in Order to Optimal Utilization of Power Capacity of Station." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 16.1 (2019): 21-29.

[30] Varshosaz, Farshid, Majid Moazzami, and Bahador Fani. "Scheduling and Stochastic Capacity Estimation of an EV Charging Station with PV Rooftop Using Queuing Theory and Random Forest." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 16.1 (2019): 31-39.