

بررسی پاسخ‌گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه

جمشید آقایی^۱، دانشیار؛ سیداحسان باقری^۲، کارشناس ارشد؛ سجاد شفیعی^۳، کارشناس ارشد؛ طاهر نیکنام^۴، استاد؛ سیدمحسن باقری^۵، دانشجوی دکتری

۱- ۴- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - aghaei@sutech.ac.ir, niknam@sutech.ac.ir

۲- ۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه فنی و حرفه‌ای امام رضا (ع) - نورآباد ممسنی - ایران - e.bagheri@sutech.ac.ir, shafiees90@yahoo.com

۵- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج - یاسوج - ایران - bagheri_mohsen65@yahoo.com

چکیده: در این مقاله یک مدل جامع و دقیق برای بررسی تأثیر خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه بر روی شبکه توزیع مسکونی ارائه شده است. به منظور ارزیابی تأثیر این خودروها بر روی شبکه توزیع، مشخصات آن‌ها به صورت دقیق مدل شده است. این مشخصات شامل ظرفیت باتری، مشخصه حالت شارژ و مقدار انرژی موردنیاز برای شارژ باتری است. به منظور ارزیابی و بررسی تأثیر نرخ رشد سطح نفوذ خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه بر روی شبکه توزیع، مدل ارائه شده بر روی یک سیستم ۳۳ باسه اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد، که به علت افزایش سطح نفوذ این خودروها مقدار بیشینه بار، تلفات و نسبت بیشینه به متوسط بار افزایش می‌یابد. بنابراین به منظور کاهش مقدار بیشینه بار، تلفات و نسبت بیشینه به متوسط بار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. برای اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، برنامه زمان استفاده در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار باعث کاهش مقدار پیک‌بار، تلفات و نسبت پیک‌بار به متوسط بار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خودروی الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه، برنامه پاسخ‌گویی بار، قیمت زمان استفاده، تلفات شبکه، نسبت پیک‌بار به متوسط بار.

Assessment of Smart Distribution System Response to Operating Characteristics of Plug-in Hybrid Electric Vehicles

J. Aghaei¹, Associate Professor; S. E. Bagheri², MSc; S. Shafiee³, MSc; T. Niknam⁴, Professor; S. M. Bagheri⁵, PhD Student

1, 4- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Emails: aghaei@sutech.ac.ir, niknam@sutech.ac.ir

2, 3- Electrical Engineering Department, Technical University of Imam Reza, Mamasani, Iran, Emails: e.bagheri@sutech.ac.ir, shafiees90@yahoo.com

5- Electrical Engineering Department, Islamic Azad University of Yasuj Branch, Yasuj, Iran, Email: bagheri_mohsen65@yahoo.com

Abstract: In this paper a comprehensive and accurate study is proposed to investigate the PHEVs impact on residential distribution network. In order to evaluate the impact of PHEVs on distribution network, characteristics of PHEVs are accurately modeled. PHEVs characteristics including battery capacity, state of charge (SOC), and the amount of energy required for charging PHEVs. The proposed model is applied to a 33-bus system in order to evaluate and investigate the growth rate of PHEVs penetration levels on distribution network. Results demonstrate that the amount of peak load, loss, and peak to average ratio (PAR) increment due to PHEVs penetration growth. So, in order to reduce the peak load, loss, and PAR, demand response (DR) programs are proposed. Time of use (TOU) program is considered for performing demand response programs. Results depict that DR programs decrease the amount of peak load, loss, and PAR.

Keywords: Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), demand response (DR), time-of-use (TOU), network losses, and peak to average ratio (PAR).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰

نام نویسنده مسئول: جمشید آقایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق.

علائم		
$A(i)$	مقدار تشویقی برنامه پاسخ‌گویی بار در پریود i ام.	مقدار اندوکتانس در سطر i و ستون j از ماتریس ادمیتانس.
$B_0(i)$	مقدار درآمد ناشی از مصرف برق به‌اندازه d_0 در پریود i ام (Rials).	$ Y_{ij} $
$B(d(i))$	مقدار درآمد ناشی از استفاده برق در تولید کالا در پریود i ام (Rials).	ad
$C_{battery}$	ظرفیت باتری PHEV (kWh).	σ
$d_0(i)$	بار اولیه (مصرف قبل از اجرای برنامه در پریود i ام).	$\Delta d(i)$
$d_{DR}(i)$	بار لحظه‌ای (مصرف بعد از اجرای برنامه در پریود i ام).	δ_i, δ_j
$E(i, i)$	کشسانی خودی بار.	η
$E(i, j)$	کشسانی متقابل بار.	θ_{ij}
E_{grid}	مقدار انرژی واقعی موردنیاز برای شارژ PHEV از طریق شبکه.	μ
I_i	جریان حقیقی شاخه‌ها.	μ_{Pen}
N_{Br}	تعداد خطوط موجود در شبکه قدرت مورد مطالعه.	ζ
$N_{Household}$	تعداد خانه‌ها در سیستم.	
N_{PHEV}	تعداد PHEV در سطح نفوذ داده شده.	
$P_0(i)$	قیمت برق قبل از کاهش بار (Rials/kWh).	۱- مقدمه
$P_{ch/dis}$	نرخ شارژ باتری برحسب (kW).	انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا در مناطق شهری و وابستگی به سوخت‌های فسیلی از جمله چالش‌هایی هستند که توسعه پایدار در بخش حمل‌ونقل را به خطر انداخته‌اند. فناوری‌های خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه (PHEV) یکی از نویدبخش‌ترین راه‌حل‌ها برای مقابله با این وضعیت است. انتظار می‌رود که در آینده‌ای نزدیک به دلایل زیست‌محیطی و اقتصادی، استفاده از PHEV‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد. این خودروها به‌عنوان یک آینده اجتناب‌ناپذیر در صنعت حمل‌ونقل، می‌تواند فواید و مضرات گوناگونی داشته باشند. با وجود این‌که استفاده از این خودروها در صنعت حمل و نقل کلان‌شهرها باعث بهبود آلودگی‌های صوتی و هوا می‌شود، از طرف دیگر، آن‌ها می‌توانند به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای ذخیره انرژی الکتریکی مطرح گردند، که باعث استفاده از انرژی پاک الکتریکی، در حمل‌ونقل شده و آثار زیست‌محیطی مخرب خودروهای بنزینی را بهبود می‌بخشند، ولی درعین حال میزان نفوذهای متفاوت این خودروها به‌عنوان یک چالش برای بهره‌برداری شبکه‌های برق مطرح می‌شود. یکی از مسائلی که در ارتباط با حضور خودروهای الکتریکی قابل‌توجه است، بررسی تأثیر شارژ این خودروها بر روی شبکه برق که شامل بخش تولید، انتقال و توزیع است که در این مقاله، بررسی تأثیر شارژ این خودروها بر روی شبکه توزیع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین، کنترل پیک‌بار ناشی از شارژ PHEV‌ها و دیگر بارها امری ضروری به‌نظر می‌رسد که برای برنامه‌ریزی بهینه شارژ این خودروها برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، ارائه شده است. اجرای موفق برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DR) نیازمند وجود مصرف‌کنندگانی فعال و علاقه‌مند است، که با کم کردن مصرف خود در زمان‌های اوج بار (قیمت زیاد برق) و انتقال مصرف خود به ساعت کم باری، به برنامه‌های DR پاسخ دهند. امکان شرکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با توجه به زیرساخت‌های شبکه هوشمند فراهم خواهد شد [۱].
$P(i)$	قیمت برق بعد از کاهش بار (Rials/kWh).	
P_{ij}^{branch}	توان اکتیو جاری شده بین باس i ام و j ام.	
$P_{ij, max}^{branch}$	ماکزیمم توان اکتیو جاری شده بین باس i ام و j ام.	
$P_{grid}(i)$	مقدار انرژی موردنیاز برای تأمین بارهای پاسخ‌گو، غیر پاسخ‌گو و شارژ PHEV‌ها، از طریق شبکه.	
$P_{PHEV}(i)$	مقدار انرژی واقعی موردنیاز برای شارژ PHEV از طریق شبکه.	
$P(\Delta d(i))$	مجموع مشوق‌های مشتریان برای شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار در پریود i ام.	
Q_i	توان راکتیو بار در باس i ام.	
r	مقدار انرژی مصرفی به‌ازای هر مایل (kwh/mile)	
R_i	مقاومت شاخه‌ها.	
$S(d_{DR}(i))$	سود مشتریان در برنامه پاسخ‌گویی بار در پریود i ام.	
S_{li}	بار خط i ام.	
S_{li}^{max}	بیشترین مقدار ممکن برای بار خط i ام.	
T	بازه زمانی (hour).	
V_i	اندازه ولتاژ در باس i ام.	
V_{min}, V_{max}	بیشینه و کمینه ولتاژ مجاز در هر شین.	
X	مقدار مایل طی شده توسط PHEV در طول روز.	
X_{Penet}	درصد سطح نفوذ PHEV.	

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

مقالات مختلفی فواید و موانع حضور گسترده PHEV را در شبکه توزیع بررسی کرده‌اند. در [۲]، مطالعه جامعی برای تأثیرات PHEV بر روی شبکه توزیع صورت گرفته است. برای این کار مشخصات PHEV و دیگر فرضیات موردنیاز از گزارش‌های حمل‌ونقل و دیگر گزارش‌ها استخراج گردیده است. در [۳]، مطالعه‌ای جامع و کامل برای بررسی تأثیر شارژ PHEV با استفاده از روش مونت‌کارلو بر روی یک شبکه توزیع بررسی شده است. همچنین، در این مقاله بیان شده است، که شارژ کنترل نشده PHEV (خودروها به محض رسیدن به خانه شروع به شارژ شدن می‌کنند) به صورت قابل توجهی روی تلفات و تغییرات ولتاژ شبکه تأثیر می‌گذارد. در [۴]، منحنی بار تعداد بالایی از PHEV با AERهای مختلف (۲۰، ۳۰ و ۴۰) به دست آمده است. در این مقاله، برای بررسی دقیق تر رفتار PHEV از اطلاعات گزارش حمل‌ونقل آمریکا به نام NHTS2001 استفاده شده است. همچنین، در این مقاله بیان شده است، که شارژ بدون کنترل PHEV در طول شبانه‌روز دارای بیشینه باری در ساعت ۹ الی ۱۱ شب است. در [۵]، تأثیر شارژ PHEV بر روی ناحیه‌ای در آمریکا مطالعه شده است. در این مطالعه، ۲ حالت شارژ کنترل شده (شارژ در هر زمانی و شارژ در هر مکانی) مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تحت دو سناریوی ارائه شده، تلفات شبکه و پیکبار افزایش می‌یابد. در [۶]، تأثیرات اساسی که PHEV بر اساس مشخصاتشان روی شبکه توزیع دارند، با استفاده از استراتژی هماهنگی بهینه مورد بررسی قرار داده شده است. در این مقاله، با استفاده از این استراتژی به دنبال جابجایی زمان شارژ این خودروها به کم‌باری به منظور کاهش پیکبار و کنترل حالت‌های شارژ و دشارژ در مقیاس بزرگ بوده است. در [۷]، به برنامه‌ریزی برای بارهای خانگی در پاسخ به تعرفه متغیر با زمان، با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مشتری پرداخته می‌شود. این برنامه‌ریزی با عنوان مشارکت بار خانگی برای تعیین زمان استفاده از وسایل پاسخ‌گو و نیز بازه‌های شارژ و دشارژ باتری‌های ذخیره‌ساز و PHEV برای روز آینده طرح‌ریزی می‌شود. در [۸]، با برنامه‌ریزی شارژ خودروها در خانه صاحبان خودرو و با در نظر گرفتن تعرفه‌های متغیر برق، زمان و سطح شارژ باتری‌ها کنترل می‌گردد. هدف از برنامه‌ریزی، کمینه‌سازی هزینه پرداختی شارژ باتری خودرو از دیدگاه مشترک است. در [۹]، تأثیر شارژ PHEV روی پروفیل بار بررسی شده است. در این مطالعه دو سناریو شارژ (شارژ در خانه و شارژ در محل کار) در نظر گرفته شده است. همچنین برای تصمیم‌گیری در زمان شارژ خودروها، بر اساس مدت‌زمان پارک ماشین در پارکینگ و مشخصه حالت شارژ از یک سیستم فازی استفاده شده است. در [۱۰]، تأثیر شارژ و دشارژ PHEV تحت دو سناریوی شارژ و دشارژ هماهنگ، در حضور انرژی‌های نو بررسی شده است، که باعث افزایش بازده واحدهای تولیدی می‌شود. ایده اصلی بر یک ارتباط دوطرفه بین خودرو و شبکه است. در واقع در یک بازه‌های زمانی، از شبکه و انرژی‌های نو برای شارژ این خودروها استفاده می‌شود و در بازه‌های زمانی دیگری

معمولاً پیکبار مقداری از این انرژی به شبکه تزریق می‌شود. در [۱۱]، مسئله شارژ PHEVها و تأثیرات آن‌ها بر روی شبکه توزیع با توجه به اطلاعات مربوط به پروفایل سفرهای روزانه، با استفاده از یک روش مدل‌سازی آماری، ارائه شده است. پروفایل سفرهای روزانه شامل زمان شروع سفر روزانه، کل مسافت طی شده روزانه و زمان بازگشت از آخرین سفر در نظر گرفته شده است. در [۱۲]، از یک سیستم انتقال انرژی الکتریکی بدون تماس القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی به منظور افزایش کارایی این خودروها استفاده شده است.

۱-۲- نوآوری‌های مقاله

با توجه به بررسی انجام‌شده بر روی مراجع در قسمت قبل، کارهای بسیاری بر روی بررسی تأثیر شارژ PHEVها بر روی پروفیل بار در زمان کم باری انجام شده است، اما کارهای کمتری بر روی بررسی تأثیر شارژ PHEVها در زمان پیکبار بر روی عملکرد شبکه (تلفات شبکه، پروفیل بار) در زمان پیکبار انجام شده است. با وارد شدن PHEVها در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت باید برخی ویژگی‌های این خودروها نظیر زمان بازگشت خودرو پس از آخرین سفر روزانه، مدت‌زمان موردنیاز برای شارژ و میزان انرژی الکتریکی موردنیاز برای شارژ PHEVها در نظر گرفته شود. بنابراین، در این مقاله به منظور بررسی تأثیر شارژ PHEVها بر روی عملکرد شبکه توزیع، ابتدا مدلی جامع برای رفتار این خودروها ارائه می‌شود، که این مدل شامل مسافت طی شده توسط PHEVها در طول سفر روزانه بر اساس تحلیل اطلاعات NHTS، مدت‌زمان لازم برای شارژ باتری‌ها و مقدار انرژی موردنیاز برای شارژ PHEVها است. برخلاف بسیاری از مقالات که به منظور شارژ بهینه این خودروها زمان شارژ PHEVها را به زمان‌های دیگری شیف می‌دهند، در این مقاله، با شیف دادن بارهای پاسخ‌گو از زمان‌های پیکبار به زمان‌های کم باری، شرایط برای شارژ PHEVها در زمان پیکبار فراهم می‌شود به گونه‌ای که با در نظر گرفتن این استراتژی اثرات نامطلوب ناشی از شارژ PHEVها بر روی عملکرد شبکه توزیع در پیکبار کاهش می‌یابد. به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌ها این مقاله را به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- مدل کردن عدم قطعیت‌های مربوط به PHEVها بر اساس تحلیل اطلاعات NHTS و روش مونت‌کارلو.
- ۲- ارائه مدل جامع برای به دست آوردن مقدار انرژی موردنیاز برای شارژ PHEVها و مدت‌زمان لازم برای شارژ باتری PHEVها.
- ۳- بررسی تأثیر شارژ PHEVها تحت سطح نفوذهای مختلف بر روی تلفات، نسبت پیکبار به متوسط بار و منحنی پیکبار.
- ۴- ارائه مدل جامع برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن روش TOU برای مدیریت بهره‌برداری در شبکه توزیع به منظور حداقل کردن تلفات انرژی الکتریکی روزانه در شبکه‌ها توزیع و حداقل کردن پیک منحنی بار، حداقل کردن نسبت پیکبار به متوسط بار با شیف دادن بارهای پاسخ‌گو از زمان‌های پیکبار به زمان‌های کم باری.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

۲-۶- محدودیت توان عبوری از خطوط

توان عبوری از خطوط نباید از مقدار حد ماکزیمم آن بیشتر باشد.

$$|P_{ij}^{\text{line}}| < P_{ij, \max}^{\text{line}} \quad (6)$$

۳- مدل‌سازی PHEV ها

مدل‌سازی PHEV ها بر اساس مشخصات آن‌ها صورت می‌گیرد. برای ارزیابی تأثیر شارژ PHEV ها بر روی شبکه توزیع، تعیین مشخصات PHEV ها حائز اهمیت است. این مشخصات در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است، مشخصات PHEV ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد؛ دسته اول مشخصاتی هستند که به رفتار مردم و الگوی رفتار آن‌ها بستگی دارد، مانند زمان رسیدن PHEV ها به خانه پس از آخرین سفر روزانه، مسافت طی‌شده توسط خودرو و زمان شارژ باتری PHEV است. دسته دوم مشخصاتی هستند که به ویژگی‌های خودروها و کارخانه‌های سازنده آن‌ها بستگی دارد، مانند ظرفیت باتری PHEV، کلاس خودرو و مسافت تمام الکتریک (AER).

۳-۱- زمان رسیدن PHEV ها به خانه پس از آخرین سفر روزانه

در این مقاله، فرض شده است که هر خودرو در طول روز یک‌بار شارژ می‌شود [۲، ۱۳]. همچنین بر اساس [۱۴]، زمان شارژ خودروها مصادف با پیک‌بار در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل ۲ زمان بازگشت اکثر خودروها به خانه پس از آخرین سفر روزانه بین ساعت ۱۶ تا ۲۱ است، بنابراین زمان شارژ خودروها مصادف با پیک‌بار، ساعت ۱۸ در نظر گرفته شده است. نکته قابل‌توجه این‌که، تمرکز این مطالعه بر روی تأثیرات شارژ PHEV ها بر روی شبکه توزیع است، به همین دلیل زمان شارژ خودروها، مصادف با زمان شارژ خودروها، مصادف با زمان پیک‌بار در نظر گرفته شده است که مشکلات ناشی از نفوذ PHEV ها در زمان پیک‌بار موردبررسی قرار گیرد، به این دلیل که افزایش پیک‌بار، منجر به افزایش هزینه‌های شبکه می‌شود. شکل ۲، زمان بازگشت اکثر خودروها به خانه پس از آخرین سفر روزانه بین ساعت ۱۶ تا ۲۱ است، بنابراین زمان شارژ خودروها مصادف با پیک‌بار، ساعت ۱۸ در نظر گرفته شده است. نکته قابل‌توجه، این‌که تمرکز این مطالعه بر روی تأثیرات شارژ PHEV ها بر روی شبکه توزیع است، به همین دلیل زمان شارژ خودروها، مصادف با زمان پیک‌بار در نظر گرفته شده است، که مشکلات ناشی از نفوذ PHEV ها در زمان پیک‌بار موردبررسی قرار گیرد، به این دلیل که افزایش پیک‌بار، منجر به افزایش هزینه‌های شبکه می‌شود. همچنین بر اساس [۱۵]، تحلیل گزارش ملی سفر خانوار (NHTS) که اطلاعات را برای کمک به طراحان حمل‌ونقل و کسانی که نیاز به اطلاعات جامع و کامل در زمینه الگوی مسافرت و حمل و نقل افراد در ایالات متحده دارند، فراهم می‌کند. تابع چگالی احتمال (pdf) برای زمان رسیدن خودروها به خانه پس از آخرین سفر روزانه به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

۱-۳- ساختار مقاله

در این مقاله، در بخش ۳ توابع هدف بیان شده است. در ادامه در بخش ۴ به نحوه مدل‌سازی PHEV ها پرداخته شده است. برنامه‌پاسخ‌گویی بار و مدل اقتصادی مربوط به برنامه پاسخ‌گویی بار در بخش ۵ ارائه شده است. در بخش ۶ شبکه مورد مطالعه و فرضیات موردنظر در این مطالعه آورده شده است. در نهایت، در بخش ۷ نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده است.

۲- توابع هدف و معادلات شبکه

کمین‌سازی تلفات توان، پیک‌بار و نسبت پیک‌بار به متوسط بار توابع هدف در نظر گرفته‌شده در این مطالعه می‌باشند. تمام توابع هدف برای یک دوره ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. توابع هدف مربوط به‌صورت زیر بیان شده است:

۲-۱- تلفات مقاومتی

تابع هدف تلفات اکتیو توان به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_1(X) = \sum_{i=1}^{N_{Br}} R_i \times |I_i|^2 \quad (1)$$

۲-۲- نسبت پیک‌بار به متوسط بار (PAR)

$$f_2(X) = \frac{\max(P_t)}{\left(\sum_{t=1}^T P_t / T\right)} \quad (2)$$

۲-۳- معادلات پخش بار

معادلات مربوط به توان اکتیو راکتیو به‌منظور پخش بار به‌صورت معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ Q_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \end{cases} \quad (3)$$

۲-۴- حدود توان

خطوط در سیستم‌های قدرت به‌دلیل محدودیت‌هایی نظیر حد حرارتی خطوط، باید در یک محدوده مشخص توان را منتقل کنند که به‌صورت رابطه (۴) نشان داده شده است.

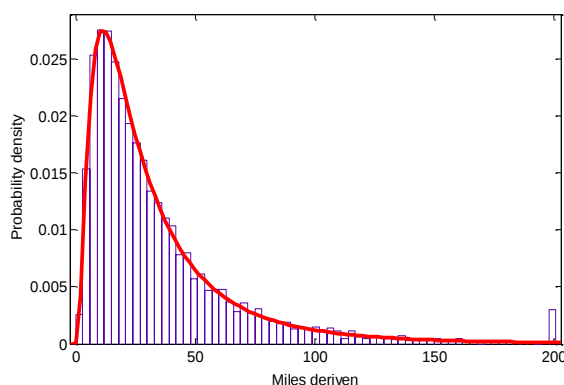
$$S_{li} \leq S_{li}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{Br} \quad (4)$$

۲-۵- حدود ولتاژ شین

یکی از مهم‌ترین قیدهایی که رعایت می‌شود، قید محدودیت ولتاژ در یک محدوده معین است که در رابطه (۵) نشان داده شده است.

بنابراین برای هر سطح نفوذ، تعداد خودروهای PHEV به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود. ظرفیت باتری یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده بر روی مقدار مسافتی است که خودرو به صورت الکتریکی می‌تواند طی کند، ظرفیت هر باتری بر اساس AER آن مشخص می‌شود. نوع PHEV را می‌توان بر اساس مقدار مسافت تمام الکتریک PHEVها مشخص نمود. به طور کلی، PHEV-X یعنی یک PHEV-X که می‌تواند X مایل را به صورت تمام الکتریک طی کند.

مقدار مایلی که یک PHEV به صورت تمام الکتریک می‌تواند طی کند، عامل مهمی است که تأثیر مستقیم بر روی ظرفیت باتری PHEV دارد. مقدار SOC باتری هر PHEV، زمانی که خودرو پس از آخرین سفر روزانه به خانه برمی‌گردد، به مقدار مسافت طی شده توسط صاحب خودرو بستگی دارد که در شکل ۳، تابع چگالی احتمال درصد خودروها بر اساس مسافت روزانه طی شده در طول روز ارائه شده است.



شکل ۳: تابع چگالی احتمال درصد خودروها بر اساس مسافت روزانه طی شده در طول روز

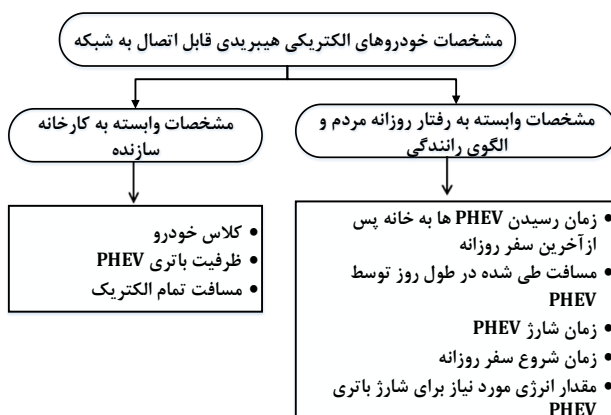
مشخصه حالت شارژ، درصد انرژی باقیمانده در باتری PHEV، پس از بازگشت از آخرین سفر روزانه است. مقدار SOC برای هر PHEV به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$SOC = \begin{cases} \left(1 - \frac{\alpha r C_{battery}^{-1}}{x \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}\right) & 0 < \alpha X < 0.7AER \\ 30\% & \alpha X \geq 0.7AER \end{cases} \quad (10)$$

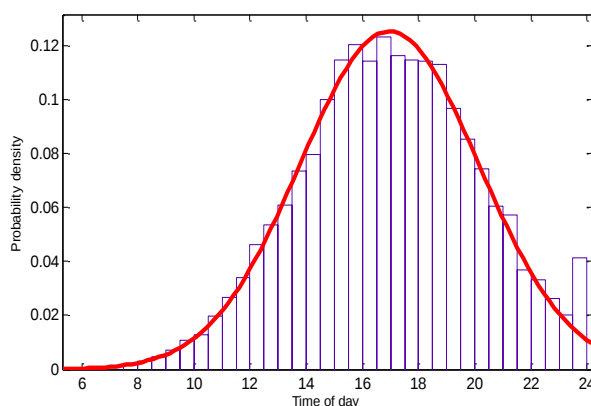
هر خودرو سفر روزانه خود را در حالت الکتریکی با شارژ کامل شروع می‌کند و زمانی که مقدار SOC، از ۳۰ درصد کمتر شود [۱۶] به دلیل افزایش عمر باتری، مقدار انرژی مورد نیاز برای سیستم رانشی خودرو توسط موتور احتراق داخلی تأمین می‌شود. انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری هر PHEV، توسط دو فاکتور مهم، نوع خودرو و مقدار SOC هر PHEV تعیین می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، بر اساس رابطه (۱۰)، مقدار SOC هر PHEV به مقدار مسافت طی شده خودرو در طول روز بستگی دارد، بنابراین مقدار انرژی مورد نیاز برای شارژ هر PHEV به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$E_{charging} = \begin{cases} \frac{\alpha r}{x \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & 0 < \alpha X < 0.7AER \\ (70 \times C_{battery})\% & \alpha X \geq 0.7AER \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{arrival\ time}(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad 0 < t < 24 \quad (7)$$



شکل ۱: دسته‌بندی مشخصات PHEVها



شکل ۴: تابع چگالی احتمال خودروها بر اساس زمان بازگشت از آخرین سفر روزانه

۳-۲- مسافت روزانه طی شده توسط PHEV

مسافت روزانه طی شده توسط PHEV، یکی از مهم‌ترین فاکتورها در تعیین میزان انرژی مورد نیاز برای شارژ توسط شبکه است، بنابراین، مقدار انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری PHEV و میزان SOC هر PHEV به مقدار مسافت روزانه طی شده توسط خودرو وابسته است. همچنین بر اساس تحلیل اطلاعات NHTS تابع چگالی احتمال برای مسافت روزانه طی شده بر اساس شکل ۳ به صورت یک تابع لگاریتمی است، که رابطه آن به صورت (۸) بیان می‌شود [۱۵].

$$y = \frac{1}{x \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x > 0 \quad (8)$$

لازم به ذکر است که تعداد خودروهای PHEV موجود در شبکه برای سطح نفوذهای مختلف به صورت (۹) محاسبه می‌شود [۳].

$$N_{PHEV} = X_{Penet} \times N_{Household} \times \mu_{Pen} \quad (9)$$

بهبود قابلیت اطمینان شبکه. پاسخ‌گویی بار می‌تواند شکل مصرف انرژی الکتریکی را تغییر دهد به نحوی که بارها مدیریت شوند، پیک سیستم کاهش یافته و یا مصارف به ساعات غیرپیک منتقل شوند. به‌طور کلی، به توانایی مصرف‌کننده الکتریکی گفته می‌شود که در طی آن مصرف‌کننده می‌تواند مصرف خود را در پاسخ به تغییرات قیمت یا شرایط بازار تغییر دهد. پاسخ‌گویی بار درواقع نشان‌دهنده خروجی عملی است که یک مصرف‌کننده برق در پاسخ به مشوق‌ها انجام می‌دهد و عموماً شامل تغییر رفتارها و الگوی مصرف است. با این وجود، ارزش آن برای جامعه ناشی از تأثیر یک جای آن بر کل سیستم قدرت است. در نتیجه، فهم هر یک از این دو منظر (مصرف‌کننده و کل سیستم) و وفق دادن آن‌ها کلید اصلی توصیف و ارزش‌گذاری و پاسخ‌گویی بار و تشخیص محدودیت‌های آن است. بر اساس [۱۹]، پاسخ‌گویی بار را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: پاسخ‌گویی بار بر مبنای قیمت و پاسخ‌گویی بار بر مبنای تشویق. تعرفه‌های متغیر بازمان خرده‌فروشی برق را که شامل نرخ‌های زمان استفاده (TOU)، زمان حقیقی (RTP) و قیمت‌گذاری پیک بحرانی (CPP) هستند می‌توان بانام «پاسخ‌گویی بار بر مبنای قیمت» مشخص کرد. در این نوع تعرفه‌ها قیمت برق با توجه به تغییر هزینه‌های مربوط به تولید برق نوسان می‌کند. دسته دوم پاسخ‌گویی بار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر مبنای تشویق هستند که می‌توان آن را بدین گونه طبقه‌بندی کرد: کنترل مستقیم بار، سرویس‌های قابل قطع/قابل کاهش، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری، برنامه‌های بازار ظرفیت، برنامه‌های قیمت‌دهی/بازخريد تقاضا و برنامه‌های بازارهای خدمات جانبی. در واقع، در این برنامه‌ها به مصرف‌کنندگان مشارکت‌کننده مشوق‌هایی در ازای کاهش بار پرداخت می‌شود که جدا از نرخ خرده‌فروشی برق و ممکن است ثابت یا متغیر با زمان باشد.

۴-۱- برنامه‌های تعرفه زمانی

بر اساس این برنامه‌ها، مشترکان علاقه دارند تا در زمان‌هایی که قیمت برق بالاست، مصرف خود را کاهش دهند. این برنامه‌ها به‌منظور یکنواخت کردن مصرف برق در ساعات مختلف طراحی شده‌اند. معروف‌ترین این برنامه‌ها عبارت‌اند از:

الف: برنامه‌های قیمت زمان استفاده

در این روش قیمت انرژی حداقل در سه حالت پیک، بار میانه و بار پایه بر اساس قیمت متفاوت انرژی در هر حالت محاسبه و دریافت می‌شود. این تعرفه می‌تواند در ساعات مختلف از هر روز و یا روزهای متفاوت هفته و یا ایام متفاوت سال حساب شود.

ب: برنامه‌های قیمت زمان واقعی

در این برنامه، به‌صورت ساعتی قیمت با هزینه انرژی مرتبط می‌شود. این ارتباط در بازار زمان حقیقی یا در بازار یک روز قبل برقرار می‌شود. دو روش مرسوم در این برنامه روش قیمت یک‌قسمتی و روش قیمت

که در رابطه (۱۱)، مقدار انرژی مبادله‌شده بین شبکه توزیع و PHEV از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت با بازدهی ζ است، بنابراین مقدار انرژی موردنیاز برای شارژ PHEV که باید از شبکه تأمین شود به‌صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود.

$$E_{grid} = \begin{cases} \frac{\alpha r \zeta^{-1}}{x \sigma \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & 0 < \alpha X < 0.7AER \\ (70 \times C_{battery} \zeta^{-1})\% & \alpha X \geq 0.7AER \end{cases} \quad (12)$$

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، میزان انرژی موردنیاز برای شارژ باتری PHEV پس از بازگشت از آخرین سفر روزانه، به مقدار SOC باتری بستگی دارد. همچنین بر اساس مقدار انرژی موردنیاز برای شارژ کامل باتری PHEV و نرخ شارژ، مدت‌زمان موردنیاز برای شارژ باتری PHEV، به‌صورت رابطه (۱۳) بیان می‌شود.

$$T_{charging} = \begin{cases} \frac{\alpha r \zeta^{-1}}{x \sigma P_{ch/dis} \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & 0 < \alpha X < 0.7AER \\ (70 \times C_{battery} P_{ch/dis}^{-1} \zeta^{-1})\% & \alpha X \geq 0.7AER \end{cases} \quad (13)$$

نرخ شارژ سرعت پر شدن باتری را مشخص می‌کند. بسته به این‌که راننده خودرو در کجا برای شارژ خودروی خود اقدام کند، سطح شارژ متفاوت خواهد بود. به‌طور مثال، اگر راننده خودرو در پارکینگ (ایستگاه‌های شارژ) برای شارژ خودروی خود اقدام کند، از سطح شارژ سریع برای شارژ آن استفاده می‌شود. در واقع، سطح شارژ در نظر گرفته برای شارژ خودروها در پارکینگ سطح شارژ سریع است، در مقابل سطح شارژ در خانه‌هایی که مجهز به شارژر می‌باشند سطح شارژ آهسته در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات مختلف با توجه به ساختارهای مختلف شبکه قدرت، نرخ شارژهای مختلفی برای شارژ باتری در نظر گرفته شده است. در [۴، ۱۷] نرخ شارژهای ۱۱۰ ولت / ۱۵ آمپر و ۲۴۰ ولت / ۳۰ آمپر به ترتیب به‌عنوان نرخ شارژهای نرمال و سریع معرفی شده است. در [۱۸] بر اساس شبکه استاندارد بلژیک (۳۳۰ ولت، ۲۰ آمپر)، نرخ شارژ ۴ کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. سطح شارژ تأثیر مستقیمی بر روی مدت‌زمان شارژ باتری PHEVها دارد. به‌عنوان مثال، اگر راننده‌ای برای شارژ باتری خودرو خود از دو سطح شارژ آهسته و سریع استفاده کند، شارژ سریع، مدت‌زمان برای شارژ کامل خودرو را کاهش می‌دهد. سطح شارژ در این مقاله بر اساس [۴]، ۷/۸۶ کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

۴-۲ پاسخ‌گویی بار

مطابق تعریف سازمان انرژی جهانی پاسخ‌گویی بار عبارت است از توانایی مشترکین صنعتی، تجاری و مسکونی برای بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی در زمان‌های پیک‌بار به‌منظور نیل به قیمت‌های مناسب و

مورد نیاز برای شارژ PHEVها است. اگر مقدار مصرف برق قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار را به ترتیب $d_0(i)$ و $d(i)$ فرض کنیم، بنابراین داریم:

$$\Delta d(i) = d_{DR}(i) - d_0(i) \quad (۱۶)$$

فرض کنید که مقدار $A(i)$ در پیوند i ام به منظور کاهش سطح منحنی بار به عنوان تشویق به مشتری پرداخت می‌کند، بنابراین مقدار کل مشوق در نظر گرفته شده برای شرکت در برنامه‌های تشویقی به صورت رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$P(\Delta d(i)) = A(i) \cdot (d_0(i) - d_{DR}(i)) \quad (۱۷)$$

بنابراین تابع سود مشتری یعنی $S(d_{DR}(i))$ به صورت رابطه (۱۸) خواهد بود.

$$S(d_{DR}(i)) = B(d_{DR}(i)) - d_{DR}(i) \cdot P(i) + P(\Delta d(i)) \quad (۱۸)$$

در شرایط بهینه، بهترین میزان مصرف، به منظور دستیابی به ماکزیمم سود، با مساوی صفر قرار دادن مشتق سود یعنی S نسبت به مصرف یعنی $d_{DR}(i)$ به صورت رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \forall d_{DR}(i) \geq 0 \\ \frac{\partial S(d_{DR}(i))}{\partial d_{DR}(i)} = \frac{\partial B(d_{DR}(i))}{\partial d_{DR}(i)} - P(i) + \frac{\partial P(\Delta d(i))}{\partial d_{DR}(i)} = 0 \quad (۱۹) \\ \frac{\partial B(d_{DR}(i))}{\partial d_{DR}(i)} = P(i) + A(i) \end{aligned}$$

تابع سود مشتری معمولاً به صورت یک تابع درجه دوم از توان مصرفی به صورت رابطه (۲۰) در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$\begin{aligned} B(d_{DR}(i)) = B_0(i) + [P_0(i) \cdot (d_{DR}(i) - d_0(i))] \\ \cdot \left(1 + \frac{d_{DR}(i) - d_0(i)}{2E(i, i)d_0(i)} \right) \quad (۲۰) \end{aligned}$$

با مشتق از رابطه (۲۰) و جایگذاری آن در رابطه (۱۹) داریم:

$$P(i) = P_0(i) \cdot \left(1 + \frac{d_{DR}(i) - d_0(i)}{E(i, i)d_0(i)} \right) \quad (۲۱)$$

در نهایت مصرف کننده با توجه به قیمت برق به اندازه مصرف می‌کند که سودش ماکزیمم شود. با استفاده از رابطه (۲۱) مدل تک‌پریودی بار به صورت زیر به دست می‌آید:

$$d_{DR}(i) = d_0(i) \cdot \left(1 + \frac{E(i, i)(P(i) - P_0(i))}{P_0(i)} \right) \quad (۲۲)$$

دوقسمتی می‌باشند. در روش یک‌قسمتی قیمت به صورت ساعتی یا لحظه‌ای محاسبه می‌شوند.

ج: برنامه‌های قیمت زمان پیک بحرانی

این برنامه در حقیقت از روی هم قرار دادن برنامه TOU و قیمت ثابت به دست آمده است و از قیمت‌های زمان حقیقی در هنگام جهش‌های پیک استفاده می‌کند.

۴-۲- مدل اقتصادی بار پاسخ‌گو

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به منظور بالا بردن حساسیت مشترکین نسبت به تغییرات قیمت بازار طراحی گردیده‌اند. حساسیت میزان مصرف به قیمت را کشسانی قیمتی تقاضا، یعنی E می‌نامند و بر اساس رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & \dots & E_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{n1} & \dots & E_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{pmatrix} \quad (۱۴)$$

هنگامی که قیمت انرژی الکتریکی در پریودهای مختلف متفاوت باشد، بار نسبت به آن دو نوع واکنش نشان می‌دهد. بارهایی که امکان جابجایی در پریودهای مختلف را ندارند و فقط می‌توانند روشن یا خاموش باشند (مانند بارهای روشنایی). این نوع واکنش بار در مقابل قیمت، حساسیت تک پریودی نامیده شده و با کشسانی خودی ارزیابی می‌شود (عناصر قطری ماتریس کشسانی). علامت این ضریب همواره منفی است، زیرا هنگامی که قیمت افزایش می‌یابد مقدار تقاضا در همان پریود کم می‌شود. بارهایی که می‌توانند در پریودهای مختلف جابجا شوند، یعنی مصرف می‌تواند از زمان پیک به زمان میان باری یا کم‌باری منتقل شود (مانند بارهای تهویه مطبوع، آب گرم‌کن‌های برقی، ماشین لباس‌شویی، ...). این نوع واکنش بار در مقابل قیمت، حساسیت چند پریودی نامیده شده و با کشسانی متقابل ارزیابی می‌شود (عناصر غیرقطری ماتریس کشسانی). علامت این ضریب همواره مثبت است، زیرا هنگامی که در یک پریود خاص قیمت افزایش می‌یابد، مقدار تقاضا در همان پریود کم می‌شود.

الف: مدل تک‌پریودی

کشسانی خودی پریود i ام نسبت به همان پریود، یعنی حساسیت میزان بار در پریود i ام به قیمت برق در همان پریود به صورت (۱۵) تعریف می‌شود [۲۰].

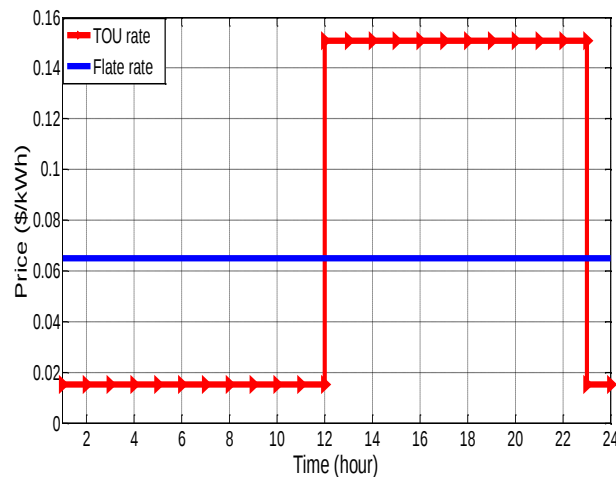
$$E(i, i) = \frac{\partial d_0(i)}{\partial P_0(i)} \cdot \frac{P_0(i)}{d_0(i)} \quad i = 1, 2, \dots, 24 \quad (۱۵)$$

نکته قابل ذکر، مقدار بار قبل از اجرای برنامه پاسخ‌گویی در طول دوره ۲۴ ساعته، شامل بارهای پاسخ‌گو، بارهای غیر پاسخ‌گو و مقدار شارژ

تصادفی در نظر گرفته شده است و در هر بار که خودروها به صورت تصادفی بر روی باس‌ها قرار گرفته شده است، پخش بار صورت گرفته شده است و سپس در مجموع یک متوسط‌گیری برای ۱۰۰ حالت تصادفی انجام شده است. برای مدل کردن مسافت طی شده توسط PHEV‌ها بر اساس اطلاعات NHTS مسافت طی شده به صورت یک تابع لگاریتمی مدل شد و سپس با استفاده از روش مونت کارلو از روی این تابع لگاریتمی ۱۰۰۰ بار نمونه‌برداری شده است. مقدار کشسانی خودی و متقابل برای اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار بر اساس جدول ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، شکل ۴ مقدار قیمت انرژی در سه حالت پیک، بار میانه و بار پایه را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی تأثیر شارژ PHEV‌ها بر روی عملکرد شبکه ۲ سناریو برای شارژ ۲ سناریو برای شارژ PHEV‌ها در نظر گرفته شده است. در سناریو اول که به عنوان حالت نمونه پایه در نظر گرفته شده است تحت سطح نفوذهای ۱۱/۳٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ تأثیر شارژ PHEV‌ها بر روی عملکرد شبکه توزیع بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار مورد بررسی قرار داده می‌شود. در سناریوی دوم تأثیر شارژ PHEV‌ها با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار (TOU) بر روی عملکرد شبکه توزیع مورد نظر مورد بررسی قرار داده می‌شود.

جدول ۱: مقدار کشسانی خودی و متقابل

پیک‌بار	میان‌باری	کم‌باری
۰/۱۲	۰/۰۱۶	-۰/۱
۰/۰۱	-۰/۱	۰/۰۱۶
-۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۱۲



شکل ۴: نرخ قیمت‌گذاری روش TOU [۲۴]

۵-۱- سناریوی اول

در این سناریو، که به عنوان سناریوی پایه در نظر گرفته شده است تأثیر شارژ PHEV‌ها تحت سطح نفوذهای ۱۱/۳٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ بر روی بیشینه بار، تلفات و PAR مورد ارزیابی قرار داده شده است. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش سطح نفوذ PHEV‌ها مقدار پیک بار، تلفات و PAR افزایش می‌یابد.

ب: مدل چندپریودی

کشسانی متقابل پریود i ام نسبت به پریودهای t ام، یعنی حساسیت میزان بار در پریود i ام به قیمت برق در پریودهای t ام به صورت (۲۳) تعریف می‌شود [۲۰].

$$E(i, t) = \frac{\partial d_0(i)}{\partial P_0(t)} \cdot \frac{P_0(t)}{d_0(i)} \quad i, t = 1, 2, \dots, 24 \quad (23)$$

کشسانی متقابل، بیان می‌کند که میزان بار در پریود i ام به مقدار قیمت در تک‌تک پریودهای دیگر وابسته است، لذا برای یک پریود ثابت i ، حساسیت نسبت به تمامی پریودها (۲۴، ۲۳، ۲۲، ...) باید محاسبه شود. در نتیجه مدل ارائه شده برای مدل پاسخ‌گویی بار چند پریودی طبق رابطه (۲۴) تعریف می‌شود.

$$d_{DR}(i) = d_0(i) + \sum_{\substack{t=1 \\ i \neq t}}^{24} E(i, t) \left[\frac{d_0(i)(P(t) - P_0(t))}{P_0(t)} \right] \quad (24)$$

۴-۳- مدل نهایی برنامه پاسخ‌گویی بار

چنانچه رابطه (۲۲)، به عنوان تابع مصرف مشتری با توجه به کشسانی بار، در رابطه (۲۴)، به عنوان تابع سودمندی مشترک، جایگذاری شود، میزان مصرف بهینه مشتری با توجه به قیمت برق در هر پریود به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌شود [۲۲].

$$d_{DR}(i) = (1 - \eta)d_0(i) + \eta d_0(i) \left\{ 1 + \frac{E(i, i)(P(i) - P_0(i))}{P_0(i)} + \sum_{\substack{t=1 \\ i \neq t}}^{24} E(i, t) \frac{P(t) - P_0(t)}{P_0(t)} \right\} \quad (25)$$

بنابراین مقدار انرژی مورد نیاز برای شارژ مورد نیاز PHEV‌ها، مقدار مصرف بارهای پاسخ‌گو و غیر پاسخ‌گو که در پریود t ام باید از طریق شبکه فراهم شود به صورت رابطه (۲۶) بیان می‌شود.

$$P_{grid}(i) = [P_{PHEV}(i) + (1 - \eta)d_0(i)] + \eta d_0(i) \left\{ 1 + \frac{E(i, i)(P(i) - P_0(i))}{P_0(i)} + \sum_{\substack{t=1 \\ i \neq t}}^{24} E(i, t) \frac{P(t) - P_0(t)}{P_0(t)} \right\} \quad (26)$$

۵- مشخصات شبکه مورد مطالعه

تأثیر شارژ PHEV‌ها بر روی مشخصه‌های مختلف شبکه تست ۳۳ باسه IEEE، که اطلاعات این شبکه در [۲۳]، در دسترس است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین نکته در ارزیابی تأثیر شارژ PHEV‌ها بر روی شبکه توزیع مشخص نمودن تعداد خودروهای موجود در شبکه است، به همین منظور در این مقاله فرض شده است، که به هر خانه ۲ خودرو اختصاص داده می‌شود، بنابراین با توجه به این که شبکه توزیع در نظر گرفته شده دارای ۳۲ نقطه بار است، تعداد خانه‌های شبکه و تعداد خودروهای موجود در شبکه به ترتیب برابر ۶۴ و ۱۳۲ در نظر گرفته شده است. قرار گرفتن خودروها بر روی باس‌ها کاملاً تصادفی در نظر گرفته شده است، درواقع برای قرار گرفتن خودروها بر روی باس‌ها ۱۰۰ حالت

در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در سناریوی اول نتایج نشان داد، با افزایش سطح نفوذ PHEV تلفات شبکه، پیک‌بار و PAR افزایش می‌یابد. جدول ۳، مقدار بیشینه تلفات شبکه، پیک‌بار و PAR در طول روز را با سطوح نفوذ مختلف PHEV برای ۱۰۰ حالت تصادفی برای α های مختلف $0.5 \leq \alpha \leq 1$ با استفاده از روش TOU نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج جدول ۳ مشخص است، با استفاده از روش TOU مقدار پیک تلفات شبکه، پیک‌بار و PAR ناشی از رشد سطح نفوذ PHEV با افزایش α های مختلف $0.5 \leq \alpha \leq 1$ کاهش می‌یابد. بنابراین روش TOU باعث مدیریت صحیح تأثیرات نامطلوب ناشی از شارژ همزمان PHEV با پیک‌بار می‌شود.

جدول ۳: مشخصات شبکه با سطح نفوذهای مختلف به‌ازای α های

مختلف با TOU

		without PHEV	۱۱/۳٪ PHEV	۳۵٪ PHEV	۴۵٪ PHEV
$\alpha = 0.5$	PAR	۱/۴۹۹	۱/۵۳	۱/۵۸۵۹	۱/۶۲۴۶
	Peak load (kW)	۲۰۷۰/۲۷	۲۱۰۴/۴	۲۱۸۷/۳	۲۲۴۸/۰
	Peak loss (kW)	۲۱۵/۷۹	۲۲۴/۶۱	۲۴۰/۰۷	۲۴۸
$\alpha = 0.7$	PAR	۱/۴۹۹	۱/۵۳۷۳	۱/۶۱۲۹	۱/۶۵۰۱
	Peak load (kW)	۲۰۷۰/۲۷	۲۱۱۴/۱	۲۲۲۷/۷۲	۲۲۸۷/۹
	Peak loss (kW)	۲۱۵/۷۹	۲۲۵/۲۶	۲۴۱/۸۴	۲۵۰/۴۷
$\alpha = 0.8$	PAR	۱/۴۹۹	۱/۵۴۲	۱/۶۳۱۲	۱/۶۶۵۱
	Peak load (kW)	۲۰۷۰/۲۷	۲۱۲۱/۲	۲۲۵۵/۹۱	۲۳۱۱/۹
	Peak loss (kW)	۲۱۵/۷۹	۲۲۵/۸۵	۲۴۳/۳۹	۲۵۲/۴۹
$\alpha = 0.9$	PAR	۱/۴۹۹	۱/۵۴۶۶	۱/۶۵۳	۱/۶۸۲۵
	Peak load (kW)	۲۰۷۰/۲۷	۲۱۲۸/۳	۲۲۸۹/۳	۲۳۳۹/۷
	Peak loss (kW)	۲۱۵/۷۹	۲۲۶/۲۵	۲۴۴/۵۴	۲۵۴/۰۶
$\alpha = 1.0$	PAR	۱/۴۹۹	۱/۵۷۵۲	۱/۶۶۳۴	۱/۶۹۴۹
	Peak load (kW)	۲۰۷۰/۲۷	۲۱۳۳/۰	۲۳۰۵/۴۱	۲۳۵۸/۶
	Peak loss (kW)	۲۱۵/۷۹	۲۲۶/۵۹	۲۴۵/۶۲	۲۵۵/۵۱

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر شارژ PHEVها تحت ۳ سطح نفوذ ۱۱/۳٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ بر روی عملکرد شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE در یک دوره ۲۴ ساعته بر روی پیک‌بار موردبررسی قرار داده شد. همان‌طور که نتایج نشان داد، با افزایش سطح نفوذ PHEVها مقدار تلفات، نسبت پیک بار به متوسط بار و پیک بار افزایش یافت. برای کاهش تأثیرات نامطلوب ناشی از رشد سطح نفوذ PHEVها برنامه پاسخ‌گویی بار ارائه شد که هدف در این

همچنین، با توجه به نتایج جدول ۲ با افزایش ضریب α مقدار بیشینه تلفات، پیک‌بار و PAR برای سطح نفوذهای مختلف در سناریوی اول افزایش می‌یابد. افزایش پیک‌بار شبکه به این دلیل است که تمام افراد در بازه زمانی که مصادف با اوج مصرف خانگی است، خودروی خود را به شبکه متصل می‌کنند. مطلوب آن است که PAR به عدد یک نزدیک باشد، به این دلیل که افزایش PAR منجر به افزایش هزینه‌های شبکه می‌شود. این افزایش هزینه‌ها ناشی از سرمایه‌گذاری در بخش تولید و انتقال برای تأمین افزایش بار است. علاوه بر آن هزینه‌های شبکه ناشی از هزینه‌های بهره‌برداری و راه‌اندازی نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش تلفات نه تنها از دیدگاه بهره‌بردار شبکه توزیع نامطلوب است، بلکه موجب افزایش تعرفه برق برای جبران هزینه ناشی از تلفات نیز شده و افزایش آن از دیدگاه مصرف‌کننده نیز نامناسب است. البته دقت شود که نتایج ارائه‌شده برای انواع پاسخ‌گویی بار قابل‌بررسی است و طبیعتاً باید مدل ریاضی نوع پاسخ‌گویی بار تغییر نماید و مطالعات مجدداً صورت گیرد.

جدول ۴: مشخصات شبکه با سطح نفوذهای مختلف به‌ازای α های

مختلف بدون TOU

		without PHEV	۱۱/۳٪ PHEV	۳۵٪ PHEV	۴۵٪ PHEV
$\alpha = 0.5$	PAR	۱/۵۵	۱/۵۷۹۵	۱/۶۳۶۱	۱/۶۷۵۸
	Peak load (kW)	۲۱۷۱/۴	۲۲۰۷/۲۹	۲۲۹۴/۱۵	۲۳۵۷/۸
	Peak loss (kW)	۲۳۲/۲۲	۲۴۱/۰۳	۲۵۸/۰۱	۲۶۶/۸۴
$\alpha = 0.7$	PAR	۱/۵۵	۱/۵۸۶	۱/۶۶۳۸	۱/۷۰۲
	Peak load (kW)	۲۱۷۱/۴	۲۲۱۷/۴۳	۲۲۳۶/۵۴	۲۳۹۹/۶
	Peak loss (kW)	۲۳۲/۲۲	۲۴۱/۷۳	۲۶۰/۰۹	۲۶۹/۶۳
$\alpha = 0.8$	PAR	۱/۵۵	۱/۵۹۰۸	۱/۶۸۲۷	۱/۷۱۷۴
	Peak load (kW)	۲۱۷۱/۴	۲۲۴/۸۸	۲۳۶۶/۱۱	۲۴۲۴/۸
	Peak loss (kW)	۲۳۲/۲۲	۲۴۲/۲۶	۲۶۱/۷۷	۲۷۱/۸۵
$\alpha = 0.9$	PAR	۱/۵۵	۱/۵۹۵۶	۱/۷۰۵۱	۱/۷۳۵۳
	Peak load (kW)	۲۱۷۱/۴	۲۲۳۲/۳۳	۲۴۰۱/۱۳	۲۴۵۴
	Peak loss (kW)	۲۳۲/۲۲	۲۴۲/۷۳	۲۶۳/۰۶	۲۷۳/۷۲
$\alpha = 1.0$	PAR	۱/۵۵	۱/۵۹۸۷	۱/۷۱۵۸	۱/۷۴۴۸
	Peak load (kW)	۲۱۷۱/۴	۲۲۳۷/۲۴	۲۴۱۸/۰۳	۲۴۷۳/۸
	Peak loss (kW)	۲۳۲/۲۲	۲۴۳/۱۱	۲۶۴/۲۹	۲۷۵/۲۶

۵-۲- سناریوی دوم

در این سناریو، به‌منظور ارزیابی تأثیر شارژ PHEVها تحت سطح نفوذهای ۱۱/۳٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ بر روی پیک‌بار، تلفات و PAR روش TOU

- [11] T.-K. Lee, Z. Bareket, T. Gordon, and Z. S. Filipi, "Stochastic modeling for studies of real-world PHEV usage: Driving schedule and daily temporal distributions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1493–1502, 2012.
- [۱۲] پدرام شهریاری‌نسب، معین پرستگاری و مهدی معلم، «استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال توان بدون تماس به‌روش القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۹–۲۰، ۱۳۹۲.
- [13] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, 2010.
- [14] L. P. Fernandez, T. G. S. Román, R. Cossent, C. M. Domingo, and P. Frias, "Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 206–213, 2011.
- [15] *NHTS Home Page*, [Online]. Available: <http://nhts.ornl.gov/>. [Accessed: 06-Oct-2015].
- [16] N. Shidore, T. Bohn, M. Duoba, H. Lohse-Busch, and P. Sharer, "PHEV 'all electric range' and fuel economy in charge sustaining mode for low SOC operation of the JCS VL41M Li-ion battery using Battery HIL," in *Proceeding of the Electric Vehicle Symposium*, vol. 23, pp. 2–5, 2007.
- [17] K. Zhou, and L. Cai, "Randomized PHEV charging under distribution grid constraints," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 879–887, 2014.
- [18] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 371–380, 2010.
- [19] M. Lee, O. Aslam, B. Foster, D. Kathan, J. Kwok, L. Medearis, R. Palmer, P. Sporborg, and M. Tita, "Assessment of demand response and advanced metering," *Fed. Energy Regul. Comm. Tech Rep*, 2013.
- [20] D. Kirschen, and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2004.
- [21] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabors, and R. E. Bohn, *Spot pricing of electricity*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] D. S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 520–527, 2003.
- [23] M. Narimani, A. Vahed, R. Azizpanah-Abarghoee, and M. Javidsharifi, "Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 1, pp. 55–69, 2014.
- [24] S. Shao, T. Zhang, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1–6, 2010.
- برنامه کمینه کردن پیک‌های نامطلوب و تلفات ناشی از رشد سطح نفوذ مختلف PHEV ها بود. همان‌طور که از نتایج مشاهده شد، با استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار تأثیرات نامطلوب ناشی از رشد سطح نفوذ PHEV ها کاهش یافت. همچنین یک آنالیز حساسیت برای ضریب α به‌منظور ارزیابی تأثیر این ضریب بر روی مقدار تلفات، پیک‌بار و PAR انجام شد. همان‌طور که نشان داده شد، افزایش ضریب α باعث افزایش مقدار بیشینه تلفات برای سطح نفوذهای مختلف در سناریو اول شد که با استفاده از استراتژی برنامه پاسخ‌گویی بار تأثیرات نامطلوب ناشی از رشد سطح نفوذ PHEV ها در زمان پیک‌بار کاهش یافت.

مراجع

- [۱] میلاد ضیایی، احد کاظمی، محمود فیروزآبادی و مسعود پروانیا، «تأمین پاسخ تقاضا از طریق پیاده‌سازی کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع خانگی توسط خرده‌فروشان توان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۲، شماره ۱، صفحات ۲۷–۳۸، ۱۳۹۱.
- [2] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1351–1360, 2013.
- [3] M. S. El-Nozahy, and M. M. Salama, "A comprehensive study of the impacts of PHEVs on residential distribution networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 332–342, 2014.
- [4] Z. Darabi, and M. Ferdowsi, "Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 501–508, 2011.
- [5] D. Wu, D. C. Aliprantis, and K. Gkritza, "Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 738–746, 2011.
- [6] Z. Luo, Z. Hu, Y. Song, Z. Xu, and H. Lu, "Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—Part I: Enabling techniques," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3546–3555, 2013.
- [7] M. Rastegar, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Outage Management in Residential Demand Response Programs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1453–1462, 2015.
- [8] A. Alahyari, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rastegar, "Incorporating customer reliability cost in PEV charge scheduling schemes considering vehicle to home capability," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 7, pp. 2783–2791, 2015.
- [9] S. Shahidinejad, S. Filizadeh, and E. Bibeau, "Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 135–141, 2012.
- [10] K. J. Dyke, N. Schofield, and M. Barnes, "The impact of transport electrification on electrical networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3917–3926, 2010.

فهرست کلمات اختصاری

SOC	State of charge
TOU	Time of use
NHTS	National household travel survey

AER	All electric range
CPP	Critical peak pricing
DR	Demand Response
ISO	Independent system operator
PAR	Peak to average ratio
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
RTP	Real time pricing