

مدل سازی احتمالاتی تقاضای شارژ خودروهای برقی تجمیع شده در شبکه توزیع خانگی

جابر پولادی^۱، مربی، محمدباقر بناء شریفیان^۲، استاد، سودابه سلیمانی^۳، استادیار

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران - Pouladi.jaber@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - Sharifian@tabrizu.ac.ir

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران - s.soleymani@srbiau.ac.ir

چکیده: تخمین تقاضای شارژ خودروهای برقی تجمیع شده برای طراحی بهتر شبکه‌های توزیع آینده ضروری است. با توجه به این که هم‌اکنون ضریب نفوذ خودروهای برقی بسیار پایین است بنابراین اطلاعات آماری دقیقی برای تعیین وضعیت شارژ اولیه خودروهای برقی وجود ندارد. در این مقاله مدل جدیدی برای محاسبه وضعیت شارژ اولیه خودروهای برقی پیشنهاد می‌گردد که تابعی از میزان مصرف سوخت بنزین خودروهای معمولی است. آمار واقعی مصرف خودروهای معمولی مشخص است لذا در مدل پیشنهادی تمامی رفتارهای روزانه رانندگی مثل استفاده از سیستم تهویه مطبوع، سرعت خودرو، شیب جاده و غیره در قالب مصرف روزانه بنزین مربوطه تخمین زده می‌شود. همچنین برای ارزیابی روش پیشنهادی و نیز بررسی تأثیر شارژ خودروها بر شبکه توزیع، برخلاف اکثر مقالات موجود که خروجی‌های ثابت و مشخصی برای پارامترهای مهم شبکه ارائه نموده‌اند، در این مقاله پارامترهای مذکور به صورت توابع احتمال ارائه می‌گردد. نهایتاً روش پیشنهادی بر روی سیستم توزیع ۳۷ باسه IEEE تست و ارزیابی شده و با روش‌های موجود مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه، مدل سازی عدم قطعیت، پخش بار احتمالاتی، شبکه توزیع

Probabilistic Modeling of Aggregated Electric Vehicle Charging Demand in Residential Distribution Network

Jaber Pouladi, Master¹, M.B Bannae Sharifian, Professor², Soodabeh Soleymani, Assistant Professor³

1- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Pouladi.jaber@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Sharifian@tabrizu.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, s.soleymani@srbiau.ac.ir

Abstract: Estimation of aggregated electric vehicle charging demand is essential for better design of future distribution networks. Given that the penetration level of electric vehicles is currently very low, Hence, the precise statistical data are not available to determine the initial state of charge related to electric vehicles. this paper proposes a new model for calculating the initial state of charge in electric vehicles. The proposed model is a function of fuel consumption of the conventional gasoline vehicles and all driving behaviors such as the use of air conditioning, vehicle speed, road slope etc. have been considered. Also, unlike most of the papers that have specific outputs for the distribution network parameters, in this paper, the mentioned parameters are presented as probability functions. Finally, the proposed method is applied to the IEEE-37 node test feeder and simulation results are presented to illustrate its performance.

Keywords: Plug-in electric vehicles, uncertainty modeling, probabilistic load flow, distribution network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۱ و ۱۳۹۵/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۷

نام نویسنده مسئول: محمدباقر بناء شریفیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

توسعه و پیشرفت شبکه‌های هو شمند و نیز مشکلات مربوط به تولید گازهای گلخانه‌ای باعث شده است که رغبت دولت‌ها و نیز عموم مردم برای استفاده از خودروهای برقی در صنعت حمل‌ونقل روز به روز بیش‌تر شود [۱]. این خودروها مزایای زیادی برای مالکان خودرو و نیز شرکت‌های برقی دارند. از جمله این مزایا می‌توان به رانندمان بالا در مصرف انرژی، هزینه‌های پایین بهره‌برداری و نیز کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای اشاره نمود. هر چند مطالعات اخیر نشان می‌دهد که با وجود مزایای فوق، شارژ غیرهماهنگ خودروها می‌تواند باعث افزایش پیک‌بار، تلفات و نیز افت ولتاژ در شبکه گردد [۲-۵]. با بررسی مقالات مرتبط می‌توان گفت که در تعدادی از مقالات از رفتار مالکان خودرو به عنوان یکی از مؤثرترین پارامترها بر منحنی شارژ خودروهای برقی چشم‌پوشی شده و یا به طور ناقص در نظر گرفته شده است. مثلاً در تعدادی از تحقیقات انجام شده و در جهت ساده کردن تحلیل فرضیاتی غیرواقع در نظر گرفته شده و یا از پارامتر موردنظر چشم‌پوشی شده است که می‌تواند بر نتایج خروجی تأثیرگذار باشد. به عنوان مثال مرجع [۶] تأثیر شارژ خودروهای برقی را روی شبکه توزیع خانگی و با استراتژی‌های شارژ متفاوت و نیز سطح نفوذ مختلف خودروها مورد بررسی قرار داده است. زمان شروع شارژ بین ۵ تا ۷ بعد از ظهر فرض شده است بدون این که رفتار مالکان خودرو در نظر گرفته شود. در مرجع [۷] بی‌توجه به زمان ورود خودروها فرض کرده است که ۸۵٪ خودروها در طی مواقع کم باری و ۱۵٪ خودروها در مواقع پیک‌بار شارژ می‌شوند که در عمل نادرست است. علاوه بر این اکثر محققین فرضیات گوناگونی برای اندازه باتری خودروهای برقی دارند. به عنوان مثال مراجع [۸-۱۰] و باتری‌های با اندازه یکسان برای همه خودروها به کار برده‌اند که در عمل امکان‌پذیر نیست. قابل ذکر است ظرفیت باتری یک خودروی برقی به کلاس خودرو و محدوده رانندگی در حالت الکتریکی بستگی دارد که با عنوان AER^1 شناخته می‌شود. هر چند در مرجع [۱۱] ظرفیت باتری خودروها به صورت یک عدد تصادفی یکنواخت بین ۶ kWh تا ۲۵ kWh در نظر گرفته می‌شود ولی هیچ گونه دلیل مشخصی برای آن ذکر نمی‌شود و باید توزیع احتمال مربوط به اندازه باتری خودروها در نظر گرفته شود. مرجع [۱۲]، مدل جامع و دقیقی برای بررسی تأثیر خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه بر روی شبکه توزیع مسکونی ارائه می‌کند. ولی در مدل پیشنهاد شده احتمال استفاده از خودرو در حالت‌های بنزینی یا برقی، در نظر گرفته نشده است و فرض می‌شود که خودرو در طول روز به صورت الکتریکی بهره‌برداری می‌شود. مشابه باتری خودروها، در مراجع [۱۳، ۱۴] مدل تجمیعی خودروها و تأثیرشان روی سیستم توزیع بررسی شده و اعداد تصادفی برای مدت زمان شارژ خودروها در نظر می‌گیرد و این در حالی است که مسافت روزانه طی شده خودروها و نیز مدت زمان شارژ مجدد آن‌ها در محدوده مشخصی تغییر می‌کنند. همچنین مراجع [۸، ۱۵، ۱۶] فرض نموده‌اند که موقع رسیدن خودرو به منزل، باتری آن کاملاً خالی شده

است که در عمل در دست نبوده و ظرفیت باقی‌مانده باتری مربوط به هر خودرو باید موقع ورود به منزل در نظر گرفته شود. در مرجع [۹] نیز مدل جدیدی برای تجمیع خودروها و تأثیر آن‌ها بر سیستم توزیع ارائه شده است ولی AER خودروها یکسان فرض شده و برای محاسبه وضعیت شارژ از مسافتی که خودرو در دو حالت بنزینی و برقی طی می‌کند به عنوان مسافت طی شده خودرو استفاده می‌شود. در مرجع [۱۷] نیز تأثیر شارژ کنترل نشده خودروهای برقی برای ضرایب نفوذ مختلف خودروهای برقی، در فصول مختلف سال و با در نظر گرفتن رشد بار در سیستم‌های توزیع بررسی شده است ولی از وضعیت اولیه شارژ باتری و مدیریت توان داخلی خودروهای برقی چشم‌پوشی می‌شود. در مرجع [۱۰] مدلی برای مصرف انرژی برق تجمیع خودروها ارائه شده است که رفتار رانندگی، مشخصات خودروهای برقی و دمای محیط (کارکرد و مصرف بخاری و کولر ماشین و تأثیر بر وضعیت شارژ خودرو) را در مدل سازی مربوطه لحاظ نموده است. اما در مدل سازی انجام گرفته برای تأثیر تجمیع خودروها فقط مسافت کل طی شده توسط خودرو در محاسبه وضعیت اولیه شارژ در نظر گرفته شده و دیگر موارد مؤثر مثل حالت کارکرد خودرو (بنزینی یا برقی) و استراتژی مدیریت توان داخلی خودروهای برقی در نظر گرفته نشده است. همچنین برای ظرفیت باتری خودروها اعداد تصادفی فرض نموده است که درست نیست و از تأثیر مواردی مثل سطح شارژ، ضریب نفوذ خودروها نیز صرف نظر شده است.

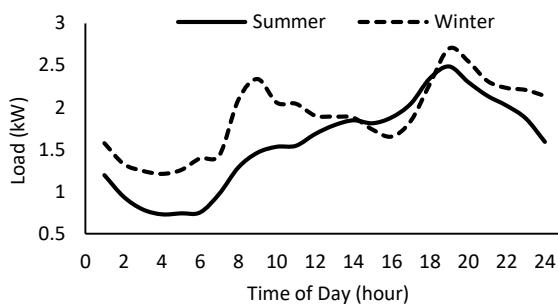
در مقالات مختلف [۴، ۹، ۱۵، ۱۷، ۱۸] برای ارزیابی مدل تجمیع خودروهای برقی، ابتدا عدم قطعیت مرتبط با خودروها و دیگر اطلاعات مورد نیاز به صورت ورودی‌های ثابت توسط مدل مربوطه دریافت شده و بعد از اجرا، خروجی‌های ثابتی ارائه می‌شود که در عمل درست نیست و یکی از مشکلات مقالات موجود است. شایان ذکر است خروجی‌های الگوریتم با توجه به عدم قطعیت مربوط به خودروهای برقی و نیز پروفیل بار در یک شبکه توزیع، ثابت نبوده و باید به صورت توابع احتمال ارائه گردد. از این رو برای تعیین نتایج خروجی باید از پخش بار احتمالاتی استفاده نمود. به طور کلی پخش بار احتمالاتی به سه دسته شبیه سازی مونت کارلو، روش‌های تحلیلی مثل تکنیک‌های کانولوشن و روش‌های تقریبی مثل روش برآورد نقطه‌ای (PEM) قابل تقسیم‌بندی است [۱۹]. روش مونت کارلو بسیار زمان‌بر است [۲۰]. روش‌های تحلیل جهت ساده سازی مسئله نیاز به فرضیات ریاضی دارند [۲۱] و روش‌های تقریبی که مشخصه‌های آماری مربوط به خروجی‌های مسئله را با دقت قابل قبول و سرعت مناسب ارائه می‌کنند [۱۹، ۲۲-۲۴]. در این مقاله با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای عدم قطعیت مربوط به خروجی‌های الگوریتم تعیین می‌شود.

بنابراین ارائه یک مدل جامع و دقیق بر اساس فرضیات و آمار واقعی برای تجمیع خودروهای برقی و تأثیر احتمالاتی آن‌ها بر روی شبکه توزیع هدف این مقاله خواهد بود. بدون توجه به فرضیات قبلی سعی خواهد شد تحلیل آماری از اطلاعات حمل‌ونقل و نیز بارهای

انتخاب می شود [۱۷]. پروفیل مذکور بر اساس متوسط پروفیل بار در روزهای کاری هفته در فصل تابستان تعیین می گردد. پروفیل های مشابهی برای دیگر روزهای سال نیز می توان تعیین کرد.

$$f(P_d(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-\left(\frac{(P_d(t)-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right)} \quad (1)$$

که P_d تقاضای بار حقیقی مشترک و σ, μ به ترتیب برابر با مقدار متوسط و انحراف معیار مربوط تابع توزیع مربوطه می باشند.



شکل ۱: مقدار متوسط پروفیل بار خانگی در روزهای کاری هفته

۲-۲-۲-۱ مدل کردن عدم قطعیت مرتبط با خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه

با توجه به طبیعت احتمالاتی خودروهای برقی منحنی شارژ خودروهای برقی به عوامل متعددی بستگی دارد. این عوامل شامل مسافت روزانه طی شده، زمان ورود و خروج، ظرفیت باتری، وضعیت شارژ باتری (SOC)، سطح شارژ موجود و الگوریتم شارژ می باشند که در ادامه تشریح می گردد.

۲-۲-۲-۱-۱ مسافت روزانه طی شده

مسافتی که هر خودرو در طول روز طی می کند یک پارامتر تصادفی است که به رفتار رانندگی بستگی دارد. چگالی تابع احتمال (PDF) مربوط به این پارامتر بر اساس مرجع [۲۸] به صورت معادله (۲) تعیین می گردد که در مراجع [۴، ۹، ۱۷] نیز تأیید شده است.

$$f(d^i) = \frac{1}{d^i \sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln d^i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad d^i > 0 \quad (2)$$

که d مسافت روزانه طی شده توسط خودرو و σ, μ به ترتیب برابر با مقدار متوسط و انحراف معیار تابع توزیع مربوطه می باشند.

۲-۲-۲-۲ میزان مصرف سوخت

با توجه به مرجع [۲۸] و پارامتر GSYRGAL که بیانگر میزان سوخت مصرف شده سالیانه هر خودرو می باشد می توان با تقسیم آن بر عدد ۳۶۵ میزان مصرف سوخت روزانه هر خودرو را محاسبه نمود. تابع احتمال مربوط به این پارامتر به صورت تابع توزیع Generalized Expected Value با پارامترهای $k=0.16$ ، $\sigma=0.7$ و $\mu=1/0.3$ و مطابق معادله (۳) قابل محاسبه است.

واقعی سیستم انجام گیرد و توزیع احتمال موارد مؤثر بر پروفیل شارژ خودروها با کمترین خطای ممکن محاسبه گردد که طبیعتاً نتایج خروجی دقیقی نیز در پی خواهد داشت. نتایج به دست آمده برای تخمین تقاضای شارژ خودروهای برقی در طول روز بسیار مفید خواهد بود. این پیش بینی بار برای طراحان و نیز بهره برداران شبکه توزیع بسیار مفید خواهد بود. طراحان شبکه می توانند در طراحی های صورت گرفته تقاضای شارژ خودروهای برقی را نیز در نظر بگیرند و بهره برداران شبکه نیز می توانند اولاً تأثیر خودروهای برقی بر شبکه توزیع را تحلیل و بررسی نمایند و ثانیاً اقدامات پیشگیرانه جهت بهره برداری مناسب و حتی جلوگیری از ناپایداری شبکه انجام دهند. بدین منظور گزارش های مختلفی مثل گزارش ISO^۳ نیویورک [۲۵]، گزارش PNNL^۴ [۲۶]، گزارش EPRI^۵ [۲۷]، گزارش دپارتمان حمل و نقل آمریکا [۲۸] برای تعیین رفتار مالکان خودرو، مشخصات خودروهای برقی و دیگر پارامترهای مورد نیاز مثل رشد بار و غیره به کار برده می شود. همچنین با استفاده از روش احتمالاتی برآورد نقطه ای، خروجی های مسئله در قالب توابع احتمال بیان می شوند. بنابراین بر اساس موارد بحث شده، چارچوب مطالعاتی ما به صورت زیر خلاصه می گردد:

- مدل سازی احتمالاتی رفتار رانندگی مالکان خودرو، مشخصات خودروهای برقی و دیگر عوامل مؤثر بر تقاضای شارژ خودروهای برقی.
- ارائه مدلی جدید برای تخمین انرژی روزانه مصرفی خودروهای برقی بر اساس مصرف بنزین خودروهای معمولی.
- مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی تجمیع شده و ارزیابی تأثیرات آن بر سیستم توزیع.
- مدل سازی تقاضای شارژ خودروهای برقی به صورت بارهای تک فاز در سیستم توزیع نامتعادل.

در ادامه و در بخش ۲ عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مؤثر بر تقاضای شارژ خودروهای برقی تشریح می گردد. مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی در بخش ۳ ارائه می شود. بخش ۴ نتایج شبیه سازی را بحث می کند و نهایتاً بخش ۵ نتیجه گیری مقاله را نشان می دهد. مؤثر

۲-۲-۲-۲ مدل کردن پارامترهای مؤثر بر تقاضای شارژ خودروهای برقی

۲-۲-۲-۱-۱ مدل کردن عدم قطعیت تقاضای بار

با توجه به ماهیت احتمالاتی تقاضای بار در سیستم های توزیع برق لازم است که عدم قطعیت مرتبط با آن محاسبه گردد. معمولاً عدم قطعیت مربوط به تقاضای بار در شبکه به صورت تابع توزیع نرمال با ضریب توان ثابت مطابق معادله (۱) مدل می شود [۲۲-۲۴]. مقدار μ در هر ساعت بر اساس متوسط پروفیل بار در یک روز مشخص تعیین می شود. همچنین مقدار σ در هر ساعت برابر ۵٪ مقدار متوسط آن فرض می گردد [۲۳، ۱۹]. در این مقاله جهت مدل سازی احتمالاتی شارژ خودروها، پروفیل بار مربوط به هر مشترک مسکونی مطابق شکل ۱

ب- مدل پیشنهادی بر اساس مصرف سوخت بنزین

رابطه‌ای که برای محاسبه وضعیت شارژ اولیه خودروها در مقالات ارائه می‌گردد تابعی از مسافت روزانه طی شده، کلاس خودرو و ظرفیت باتری آن می‌باشد و این در حالی است که سرعت رانندگی، شیب مسیرهای طی شده، استفاده از سیستم سرمایش و گرمایش خودرو و دیگر عوامل که مستقیماً بر مصرف باتری خودرو تأثیرگذار است در نظر گرفته نشده است. با توجه به این که وضعیت شارژ یک باتری در خودروی برقی بسیار مشابه صفحه نمایش وضعیت سوخت در خودروهای احتراق داخلی است بنابراین وضعیت شارژ اولیه باتری خودروها با استفاده از مصرف روزانه بنزین خودروهای معمولی قابل محاسبه است. با بررسی آماری مصرف روزانه سوخت بنزین مربوط به خودروهای موجود، می‌توان رفتار رانندگی مالکان خودروها را با دقت قابل قبولی در طول روز مدل سازی و شناسایی نمود و این در حالی است که آمار واقعی مصرف انرژی الکتریکی خودروها به دلیل ضریب نفوذ پایین آن‌ها فعلاً در دسترس نمی‌باشد. در مدل به دست آمده مجموعه رفتارهای راننده خودرو مثل مسافت روزانه طی شده، سرعت رانندگی، شیب مسیرهای طی شده، استفاده از سیستم سرمایش/گرمایش و غیره در قالب میزان مصرف روزانه سوخت خودرو بیان می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت درصد بنزین باقی مانده در باک خودروهای معمولی با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر بر میزان مصرف خودرو، معادل میزان شارژ باقی مانده در باتری خودروهای الکتریکی یا همان وضعیت شارژ اولیه است با این تفاوت که در صد مصرف برق و بنزین یک خودرو برای طی مسافت یکسان برابر نبوده و باید در نظر گرفته شود. وضعیت شارژ اولیه مرتبط با خودروهای برقی به صورت معادله (۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$SOC_0^i = (1 - PEC^i) \times 100\%$$

$$PEC^i = \frac{\text{Daily Electric Consumption}}{\text{Battery Capacity}} \times 100 \quad (7)$$

که PEC^{ia} برابر با درصد انرژی برق مصرفی خودرو می‌باشد. به منظور تعیین درصد روزانه مصرف برق خودرو، در اولین گام درصد انرژی یا بنزین باقی مانده در خودروهای معمولی را می‌توان با استفاده از مصرف روزانه سوخت بنزین خودروها که آمار واقعی مصرف روزانه سوخت برای خودروها مشخص بوده و تابع احتمال آن در قسمت قبل محاسبه شده است و همچنین با در نظر گرفتن ظرفیت باک خودروها مطابق معادله (۸) محاسبه نمود.

$$PFC^i = \frac{\text{Daily Fuel Consumption}}{\text{Fuel Capacity}} \times 100\% \quad (8)$$

که PFC^{ia} برابر با درصد مصرف سوخت در خودروهای معمولی می‌باشد. در گام بعدی با بررسی خودروهای هیبریدی مختلف و مقایسه در صد مصرف خودروها برای دو حالت بنزینی و برقی در یک مسافت ثابت ۱۰۰ مایل می‌توان نتیجه گرفت که مصرف انرژی یک خودرو در حالت برقی بسیار متفاوت از مصرف بنزین برای طی همان مسافت یکسان می‌باشد که مصرف انرژی چند نمونه از خودروهای مر سوم در بازار نیز

$$f(g^i) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(g^i - \mu)}{\sigma} \right)^{-(1 + \frac{1}{k})} e^{-\left(1 + k \frac{(g^i - \mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}}} \quad g^i > 0 \quad (3)$$

که g مصرف روزانه بنزین و μ ، σ و k به ترتیب برابر با پارامترهای موقعیت، مقیاس و فرم تابع توزیع مربوطه می‌باشند.

۲-۳- زمان ورود و خروج خودرو

در صورتی که با اتمام آخرین سفر انجام شده در طول روز خودرو به شبکه متصل شود. آنگاه می‌توان زمان آخرین ورود خودرو به منزل را به عنوان زمان شروع شارژ در نظر گرفت. PDF مربوط به این پارامتر بر اساس مرجع [۲۸] به صورت معادله (۴) قابل محاسبه است که در مراجع [۹، ۱۷] نیز به عنوان زمان شروع شارژ در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مقاله زمان خروج خودرو به صورت یک پارامتر تصادفی بین ۷ تا ۱۰ مطابق معادله (۵) فرض می‌شود زیرا اکثر مردم سفر روزانه خود را صبح شروع می‌کنند.

$$f(t_s^i) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(t_s^i - \mu)}{\sigma} \right)^{-(1 + \frac{1}{k})} e^{-\left(1 + k \frac{(t_s^i - \mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}}} \quad t_s^i > 0 \quad (4)$$

$$f(t_e^i) = \frac{1}{b - a} \quad a \leq t_e^i \leq b \quad a = 7, b = 10 \quad (5)$$

که t_s و t_e به ترتیب زمان شروع و اتمام شارژ و μ ، σ و k نیز به ترتیب برابر با پارامترهای موقعیت، مقیاس و فرم تابع توزیع مربوطه می‌باشند.

۲-۴- وضعیت اولیه شارژ**الف- مدل مرسوم و قدیمی**

مقدار SOC^i اولیه در یک خودروی برقی برابر است با نسبت انرژی موجود در باتری به ظرفیت کامل باتری که بر اساس مسافت طی شده و نیز AER خودرو به صورت معادله (۶) تعیین می‌گردد [۵، ۸، ۹، ۱۷، ۲۹]. قابل ذکر است AER یک خودروی هیبریدی برابر حداکثر مسافت طی شده خودرو در حالت الکتریکی است که برحسب مایل بیان می‌شود. به طور کلی خودروهای برقی هیبریدی به سه دسته PHEV-30 و PHEV-40 و PHEV-60 تقسیم بندی می‌شوند. در این مقاله در صد خودروهای با AER متفاوت به صورت جدول ۱ می‌باشد [۱۷].

$$SOC_0^i = \begin{cases} 0 & d^i > AER^i \\ \left(1 - \frac{d^i}{AER^i} \right) \times 100\% & d^i \leq AER^i \end{cases} \quad (6)$$

که برای خودروی i ، SOC_0^i وضعیت اولیه شارژ خودرو و AER^i حداکثر مسافت طی شده در حالت الکتریکی می‌باشد.

جدول ۱: درصد توزیع خودروهای هیبریدی

PHEV-x	PHEV-30	PHEV-40	PHEV-60
The percentage of PHEV	٪۲۱	٪۵۹	٪۲۰

۲-۲-۵- انرژی موردنیاز برای شارژ باتری

انرژی مورد نیاز جهت شارژ مجدد هر خودرو بعد از ورود به منزل به SOC اولیه خودرو، SOC نهایی و ظرفیت باتری خودرو بستگی دارد. این انرژی به صورت معادله (۱۱) قابل محاسبه می باشد. انرژی محاسبه شده جهت شارژ خودروها از طریق شبکه توزیع برق و بر اساس سطح شارژ موجود تأمین می شود.

$$E^i = \frac{C^i}{\eta_{\text{Charger}}^i} \times (SOC_f^i - SOC_0^i) \times \text{MaxDOD} \quad (11)$$

که E^i انرژی کل موردنیاز برای شارژ خودروی i برحسب kWh، SOC_f^i ، برابر با وضعیت شارژ نهایی خودروها و η_{Charger}^i برابر با راندمان باتری شارژر خودروها که حداقل مقدار آن یعنی ۹۰٪ فرض شده است [۳۲]. قابل ذکر است MaxDOD بر اساس استراتژی مدیریت توان داخلی خودروها تعیین می گردد و باتری های مرسوم در بازار برای خودروهای با کلاس متفاوت مطابق جدول ۳ می باشد [۳۳]. در این مقاله PDF مربوط به ظرفیت باتری انواع مختلف خودروهای برقی مطابق معادله (۱۲) به صورت تابع احتمال نرمال مدل می شود که پارامترهای آن نیز بر اساس جدول ۳ تعیین می گردد. همچنین MaxDOD و SOC_f به ترتیب برابر ۸۰٪ و ۱۰۰٪ فرض می شود [۳۴].

جدول ۳: مشخصات انواع مختلف خودروهای برقی [۳۳]

CLASS	MARKET SHARE	$C_{\min}$ (kWh)	$C_{\max}$ (kWh)
MICRO CAR	۰/۲	۸	۱۲
ECONOMY CAR	۰/۳	۱۰	۱۴
MID-SIZE CAR	۰/۳	۱۴	۱۸
LIGHT TRUCK/SUV	۰/۳	۱۹	۲۳

$$\mu_{C^i} = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2}, \quad \sigma_{C^i} = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{4} \quad (12)$$

که μ_{C^i} و σ_{C^i} به ترتیب برابر با مقدار متوسط و انحراف معیار تابع توزیع نرمال مرتبط با هر کلاس خودرو می باشند.

۲-۳- تخمین تعداد خودروهای برقی در سیستم

قبل از تعیین پروفیل شارژ خودروهای تجمیع شده لازم است که تعداد کل خودروهای برقی در سیستم تعیین شود. تعداد خودروهای برقی موجود در سیستم توزیع و برای ضرایب نفوذ مختلف با استفاده از معادله (۱۳) به دست می آید [۹، ۱۷].

$$N_{\text{PHEV}} = X_{\text{Penetration}} \times N_{\text{Household}} \times A \quad (13)$$

که N_{PHEV} تعداد کل خودروهای برقی در شبکه، $X_{\text{Penetration}}$ درصد ضریب نفوذ خودروهای برقی ($\frac{N_{\text{PHEV}}}{N_{\text{Household}}}$)، $N_{\text{Household}}$ تعداد خانوارها در سیستم مورد مطالعه و A تعداد متوسط خودرو در هر خانه می باشد. بنابراین برای هر درصدی از ضریب نفوذ خودروها، تعداد خودروهای برقی در سیستم تحت تست مطابق معادله (۱۳) محاسبه خواهد شد.

در جدول ۲ نشان داده شده است. بنابراین جهت بررسی بیشتر و دقیق تر و با توجه به مراجع [۳۰، ۳۱] و با در نظر گرفتن تعداد زیاد خودروی هیبریدی می توان تابع احتمال مربوط به نسبت مصرف برق به بنزین ($REFC$) خودروهای هیبریدی را محاسبه نمود که با استفاده از تابع احتمال Generalized Extreme Value مطابق معادله (۹) و با کمترین خطا قابل محاسبه است. چگالی تابع احتمال مربوط به نسبت مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.

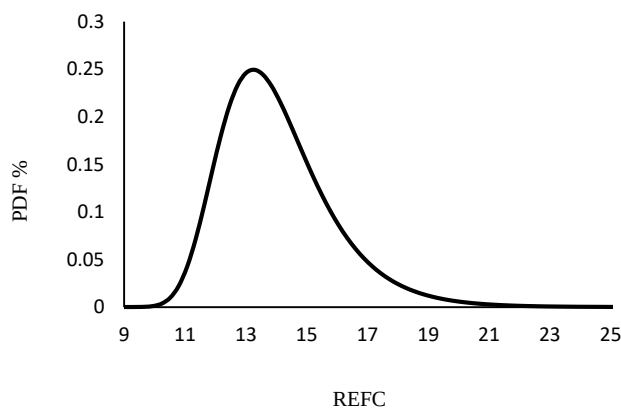
$$f(REFC) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(REFC - \mu)}{\sigma} \right)^{-(1 + \frac{1}{k})} e^{-\left(1 + k \frac{(REFC - \mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}}} \quad t_s > 0 \quad (9)$$

که $REFC$ نسبت مصرف برق به بنزین و μ ، σ و k به ترتیب برابر با پارامترهای موقعیت، مقیاس و فرم تابع توزیع مربوطه می باشند. و نهایتاً در گام آخر می توان وضعیت شارژ خودروهای برقی را با اعمال نسبت مصرف برق به بنزین به صورت معادله (۱۰) محاسبه نمود.

$$SOC_0^i = (1 - PEC^i) = (1 - REFC \times PFC^i) \quad (10)$$

جدول ۲: مصرف سوخت چند نمونه از خودروهای هیبریدی

نوع خودرو	مصرف برق (kWh/100 mile)	مصرف بنزین (gal/100 mile)
2016 Hyundai Sonata Plug-in Hybrid	۳۴	۲/۵
2016 Audi A3 e-tron ultra	۳۸	۲/۶
2016 Ford Fusion Energi Plug-in Hybrid	۳۷	۲/۶
2016 Audi A3 e-tron	۴۰	۲/۹
2016 Cadillac ELR	۳۹	۳/۱
2016 Cadillac ELR Sport	۴۳	۳/۳
2016 Mercedes-Benz S550e	۵۹	۳/۸
2016 BMW X5 xDrive40e	۵۹	۴/۲
2016 Porsche Cayenne S e-Hybrid	۶۹	۴/۹
2016 Chevrolet Volt	۳۱	۲/۴



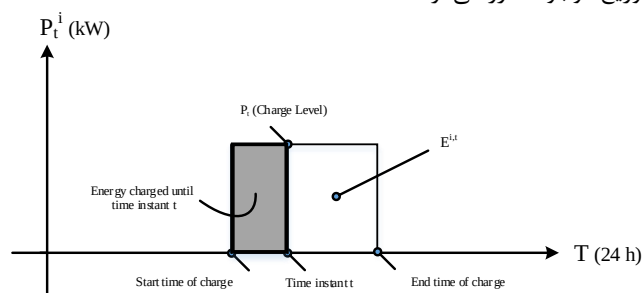
شکل ۲: نسبت مصرف برق به بنزین در خودروهای هیبریدی

۴-۲- تعیین پروفیل شارژ زمانی

پروفیل شارژ زمانی یک خودروی برقی بر اساس سه کمیت زمان ورود، زمان خروج و انرژی موردنیاز محاسبه می شود. همان طور که پیش تر گفته شد، فرض می گردد مالکان خودرو مایل هستند به محض رسیدن به منزل، خودروی خود را به برق وصل نمایند. بنابراین زمان ورود خودرو به منزل به عنوان زمان شروع شارژ در نظر گرفته می شود. سطح توان شارژ به ساختار سیستم توزیع و نیز سیستم کنترل شارژر بستگی دارد و مدت زمان شارژ باتری توسط دو پارامتر مهم E^i و سطح توان شارژ موجود تعیین می گردد. بنابراین اگر زمان شروع شارژ مشخص باشد، منحنی شارژ زمانی برای هر خودروی برقی با دقت مناسب قابل محاسبه خواهد بود و سپس این روند برای همه خودروها تکرار خواهد شد. بنابراین برای هر خودروی برقی i ماتریس P_{ch}^i به عنوان برنامه شارژ آن خودرو و به صورت ماتریس (۱۴) تعریف می گردد.

$$P_{ch}^i = [P_{ch}^i(1), P_{ch}^i(2), \dots, P_{ch}^i(t), \dots, P_{ch}^i(T)] \quad (14)$$

که T دوره زمانی شارژ یعنی ۲۴ ساعت و $P_{ch}^i \geq 0$ برابر با مصرف توان خودروی i ام در زمان t است. در صورتی که t_s^i و t_e^i را به ترتیب به عنوان زمان شروع (اتصال یا ورود خودرو) و پایان شارژ (خروج خودرو) خودروی برقی i فرض شود آنگاه فاصله زمانی بین t_s^i و t_e^i به عنوان بازه زمانی موجود برای شارژ خودرو خواهد بود و در بیرون بازه مذکور اصولاً باید $P_{ch}^i = 0$ باشد. بنابراین برای محاسبه بار تجمیعی خودروها باید برای هر خودروی برقی نموداری به صورت شکل ۳ محاسبه شود. از طرف دیگر E^i برابر انرژی موردنیاز برای شارژ خودروی i ام بوده و برابر با سطح زیر نمودار شکل ۳ می باشد که با در نظر گرفتن زمان شروع و پایان شارژ و نیز توان مصرفی خودرو برابر معادله (۱۵) خواهد بود. قابل ذکر است در حالت کنترل نشده و با اتصال خودرو به برق، باتری خودرو بر اساس حداکثر توان یا حداکثر سطح توان سیستم توزیع موجود شارژ می گردند.

شکل ۳: منحنی شارژ روزانه خودروی i

$$E^i = \sum_{t=t_s^i}^{t_e^i} P_{ch}^i(t) \times \Delta t \quad (15)$$

که Δt برابر با گام زمانی مربوط به توان شارژ خودرو بر حسب ساعت می باشد.

۳- مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی تجمیع شده با

استفاده از روش برآورد نقطه‌ای

همان طور که قبلاً اشاره گردید روش مونت کارلو یک روش شبیه سازی بسیار مر سوم برای بررسی پدیده های احتمالاتی است. این روش برای رسیدن به همگرایی مطلوب نیاز به تکرار بسیار زیاد دارد و از این رو بسیار زمان بر می باشد. برخلاف روش مونت کارلو، روش برآورد نقطه‌ای یک روش تقریبی می باشد که با دقت مناسب، زمان محاسباتی پایینی نیاز دارد. در این مقاله تقاضای شارژ خودروهای برقی با استفاده از روش PEM ($2m+1$) انجام می شود. در این روش برای هر متغیر تصادفی ورودی ۳ نقطه نماینده بنام Concentration محاسبه می گردد. همچنین برای اعمال تأثیر هر کدام از نقاط در متغیر خروجی، ضرایب وزنی مربوطه نیز محاسبه می شود. حال با استفاده از این نقاط و تابع پخش بار که ارتباط بین ورودی و خروجی را مشخص می کند، می توان متغیر تصادفی خروجی را محاسبه نمود. در ادامه نحوه محاسبه مشخصه های آماری متغیر خروجی به صورت گام به گام تشریح می شود.

- محاسبه k مین concentration مربوط به متغیر تصادفی ورودی x_i که مطابق معادله (۱۶) می باشد.

$$P_{l,k} = \mu_{x_i} + \xi_{l,k} \times \sigma_{x_i}, \quad (l=1,2,\dots,m \text{ and } k=1,2) \quad (16)$$

که $\xi_{l,k}$ برابر مکان استاندارد و μ_{x_i} ، σ_{x_i} به ترتیب برابر متوسط و انحراف معیار متغیرهای تصادفی ورودی x_i می باشند. $\xi_{l,k}$ و ضرایب وزنی مربوطه به ترتیب به صورت معادلات (۱۷) و (۱۸) قابل محاسبه است [۱].

$$\xi_{l,k} = \frac{\lambda_{l3}}{2} + (-1)^{(3-k)} \cdot \sqrt{\left(\lambda_{l4} - \frac{3}{4}\lambda_{l3}^2\right)} \quad (17)$$

$$w_{l,k} = \frac{(-1)^{(3-k)}}{\xi_{l,k}(\xi_{l1} - \xi_{l2})} \quad (18)$$

قابل ذکر است λ_{l3} و λ_{l4} به ترتیب برابر چولگی (skewness) و کشیدگی (kurtosis) متغیر تصادفی ورودی می باشند.

- محاسبه پخش بار برای هر نقطه نماینده به صورت معادله (۱۹) که رابطه غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار می کند. شایان ذکر است تعداد کل نقطه های نماینده برابر $2m$ می باشد.

$$Z_{l,s} = LF(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, P_{l,s}, \dots, \mu_{x_m}) \quad (19)$$

که $Z_{l,s}$ بردار متغیر تصادفی خروجی مربوط به نقطه $P_{l,s}$ می باشد.

- معادله (۱۹) با فرض مقادیر متوسط برای همه متغیرهای تصادفی ورودی مجدداً اجرا می شود که ضریب وزنی این پخش بار نیز به صورت معادله (۲۰) می باشد.

$$Z_0 = LF(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_m}) \quad (20)$$

$$w_0 = 1 - \sum_{l=1}^m \frac{1}{\lambda_{l4} - \lambda_{l3}^2}$$

۴- نتایج شبیه سازی

در این قسمت تقاضای شارژ خودروهای برقی مرتبط با مدل های قدیمی و پیشنهادی محاسبه و تأثیر آن بر مشخصه های مهم سیستم توزیع تحلیل می شود. بار شبکه بدون خودروهای برقی و نیز روش مر سوم به عنوان حالات پایه برای مقایسه در نظر گرفته می شود. روش پیشنهادی بر روی شبکه شعاعی ۳۷ با سه تست و ارزیابی می گردد [۳۵]. در صورتی که توان ظاهری ۵kVA برای هر خانوار در نظر گرفته شود می توان تعداد خانوارهای نقاط بار شبکه را بر اساس توان نامی مربوطه محاسبه کرد که برابر ۵۶۲ مشترک خانگی می باشد. در صورتی که متوسط تعداد خودرو در هر منزل مسکونی برابر ۲/۱۱ عدد فرض شود [۳۶، ۱۷]، با توجه به ضریب نفوذ خودروهای برقی می توان تعداد خودروهای موجود در هر نقطه بار و تقاضای شارژ مربوطه را محاسبه نمود. در ادامه برای ارزیابی روش پیشنهادی فرض می شود که ضریب نفوذ خودروهای برقی ۵۰٪ بوده و شارژ خودروها در یک روز کاری تابستان انجام می شود.

۴-۱- انرژی مورد نیاز جهت شارژ خودروهای برقی

همان طور که قبلاً اشاره گردید، در روش پیشنهاد شده برای مدل سازی تجمع خودروهای برقی سعی شده است که بر اساس مقالات مختلف و گزارش های فنی موجود تمامی پارامترهای مؤثر بر تقاضای شارژ خودروها در نظر گرفته شود. این پارامترها شامل مسافت های مختلف طی شده با خودرو در طول روز، سرعت رانندگی روزانه، استفاده از سیستم تهویه مطبوع خودرو و غیره می باشد. عوامل ذکر شده در قالب مصرف روزانه سوخت بنزین مدل می شوند که باعث کاهش بیش تر وضعیت شارژ خودرو و در نتیجه آن نیاز به انرژی الکتریکی بیش تر جهت شارژ مجدد دارد. چگالی تابع احتمال مربوط به کاهش وضعیت شارژ اولیه خودروها موقع ورود به منزل و نیز افزایش انرژی مورد نیاز جهت شارژ مجدد بر اساس نتایج شبیه سازی احتمالاتی به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۵ می توان گفت که مقدار متوسط وضعیت شارژ خودروها با اعمال مدل پیشنهادی بر اساس مصرف بنزین کاهش بیشتری یافته و از مقدار ۵۱۹/۰ به ۳۳۷/۰ رسیده است. به عبارت دیگر، پارامترهای مؤثر در مصرف باتری خودرو مثل مصرف سیستم تهویه مطبوع، شیب مسیرهای طی شده، سرعت رانندگی و غیره باعث کاهش بیش تر وضعیت شارژ خودروها می شود. کاهش وضعیت شارژ خودروها باعث افزایش انرژی مورد نیاز جهت شارژ مجدد آن ها می گردد که در شکل ۶ برای مدل مر سوم و نیز مدل پیشنهادی ارائه شده است. با توجه به شکل می توان گفت که مقدار متوسط انرژی روزانه مصرفی خودروها برای مدل های مر سوم و پیشنهادی به ترتیب برابر ۸/۵۰ kWh و ۱۰/۶۴ kWh می باشد.

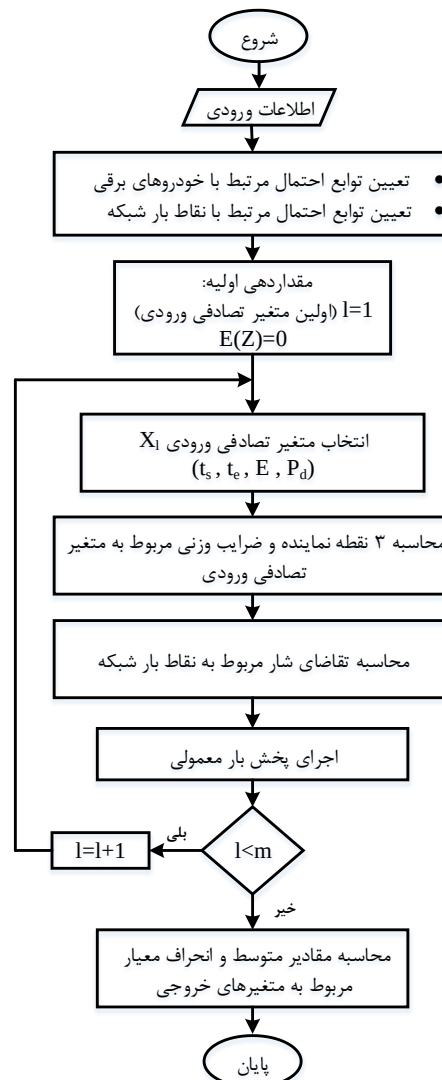
- بنابراین در این روش $2m+1$ بار پخش بار اجرا می شود و گشتاورهای آماری مربوط به متغیر خروجی به صورت معادله (۲۱) محاسبه می گردد.

$$E(Z^j) = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^2 \left(w_{l,k} (Z_{l,k})^j \right) + (w_0 (Z_0)^j) \quad (21)$$

فلوچارت روش پیشنهادی برای مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین برای ارزیابی دقت روش برآورد نقطه ای می توان از معادله (۲۲) استفاده نمود که در آن روش مونت کارلو به عنوان روش مرجع برای محاسبه خطا استفاده می شود.

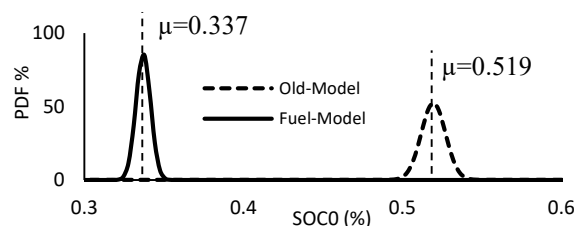
$$err_{\mu_{v_i}} = \left| \frac{(\mu_{MC_{v_i}} - \mu_{PEM_{v_i}})}{\mu_{PEM_{v_i}}} \right| \times 100\% \quad (22)$$

که مقدار متوسط متغیر خروجی v_i برای روش های مونت کارلو و برآورد نقطه ای به ترتیب برابر $\mu_{MC_{v_i}}$ و $\mu_{PEM_{v_i}}$ می باشد.

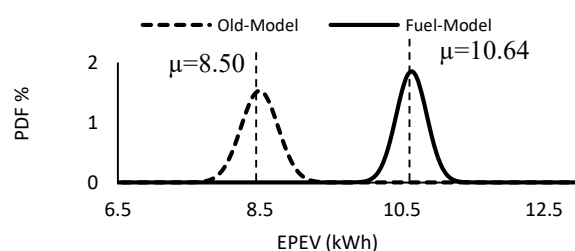


شکل ۴: فلوچارت روش پیشنهادی برای مدل سازی احتمالاتی خودروهای برقی تجمیع شده

پیشنهادی مقدار توان مصرفی بیشتری از مدل مر سوم دارد. بنابراین می توان گفت اگرچه متوسط مقدار بار شبکه در حضور خودروهای برقی افزایش یافته است ولی در صد افزایش آن در ساعات پیک بار یعنی ۱۸-۲۰ عصر بیش تر از سایر ساعات روز بوده است. از این رو در ادامه، شبکه TAPC در ساعات پیک بار با جزئیات تشریح می گردد. مقایسه مقدار TAPC بین روش های مونت کارلو و برآورد نقطه ای در ساعات مختلف روز و بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروهای برقی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور می توان گفت، برای مدل های مختلف، حداکثر خطای نسبی محاسبه شده برای مقدار متوسط TAPC برابر ۰/۳۵ می باشد. همچنین تابع احتمال مربوط به مقدار TAPC در ساعت ۱۹ عصر (ساعت پیک بار) که توسط ترانسفورماتور شبکه تغذیه می شود و با ضریب نفوذ ۵۰٪ خودروهای برقی در شکل ۸ نشان داده می شود که برای مدل های پایه، قدیمی و پیشنهادی مقدار متوسط TAPC به ترتیب برابر ۱/۹۳MVA، ۲/۵۲MVA و ۲/۶۳MVA می باشد. قابل ذکر است با توجه به شکل مذکور می توان برای مدل های مختلف مرتبط با خودروها، احتمال اضافه بار شدن ترانسفورماتور را تعیین نمود که برای مهندسان طراح شبکه نیز بسیار مهم و مفید خواهد بود. بدین منظور این احتمال را با عبارت $UI\%$ نمایش داده و برای محاسبه آن می توان سطح زیر منحنی تابع احتمال مربوطه را محاسبه نمود. نتایج به دست آمده نشان می دهد که احتمال اضافه بار شدن ترانسفورماتور از ظرفیت نامی یعنی ۲/۵MVA برای مدل های پایه، مر سوم و پیشنهادی به ترتیب برابر ۰/۰، ۰/۷۰/۶ و ۰/۹۹/۹ می باشد. این احتمال با در نظر گرفتن ۹۰٪ ظرفیت نامی ترانسفورماتور یعنی ۲/۲۵MVA برای مدل های پایه، مر سوم و پیشنهادی، به ترتیب برابر ۰/۰، ۰/۹۹/۹ و ۰/۱۰۰ می باشد.



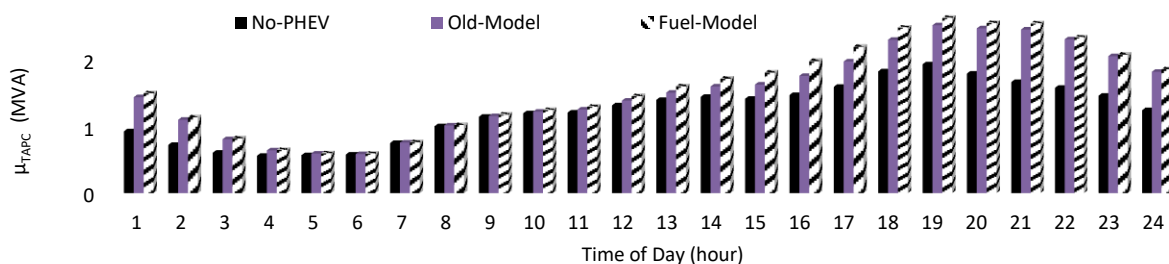
شکل ۵: چگالی تابع احتمال مربوط به وضعیت شارژ اولیه خودروها بر اساس مدل های مختلف



شکل ۶: چگالی تابع احتمال مربوط به انرژی روزانه مورد نیاز یک خودرو بر اساس مدل های مختلف

۴-۲- مصرف توان ظاهری کل شبکه ($TAPC$)

مقدار متوسط مصرف توان ظاهری کل شبکه برای حالات پایه، مر سوم و پیشنهادی در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که از شکل مشخص می باشد برای مدل های مختلف، حضور خودروهای برقی باعث افزایش TAPC و نیز جابه جایی پیک بار شبکه به اوایل شب شده است. زیرا زمان ورود خودروها به منزل و زمان پیک شبکه تقریباً همزمان می باشد. همچنین با توجه به بحث های انجام شده مشاهده می گردد که مقدار متوسط TAPC در مدل های مختلف در بازه زمانی ۹-۱۱ صبح یکسان می باشد و این در حالی است که در ساعات پیک بار مدل های



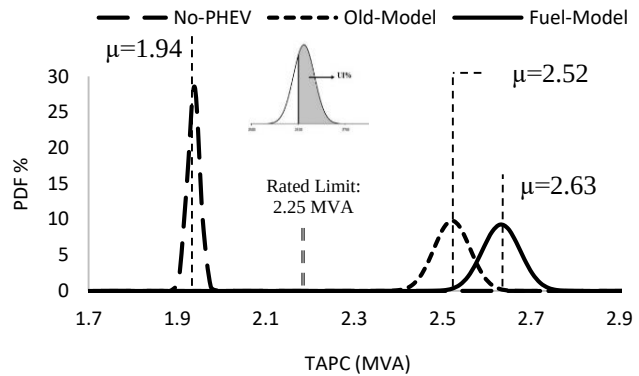
شکل ۷: مقدار متوسط مربوط به توان مصرفی ظاهری کل شبکه بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

جدول ۴: مقایسه مقادیر متوسط و انحراف معیار پارامتر TAPC بین روش های مونت کارلو و برآورد نقطه ای در ساعات مختلف روز و بر اساس

مدل های مختلف تجمیع خودروهای برقی

TAPC (MVA)												
Times	6 AM			12 AM			6 PM			12 PM		
Methods	No PHEV	Old MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	Old MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	Old MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	Old MODEL	FUEL MODEL
MC: μ	۰/۵۸۰۹	۰/۵۸۸۷	۰/۵۹۴۸	۱/۳۲۴۷	۱/۳۹۲۶	۱/۴۵۶۸	۱/۸۳۱۹	۲/۲۹۸۳	۲/۴۹۳۲	۱/۲۵۰۸	۱/۸۲۰۶	۱/۸۶۷۴
PEM: μ	۰/۵۸۰۷	۰/۵۸۷۵	۰/۵۹۴۷	۱/۳۲۲۵	۱/۳۹۳۴	۱/۴۶۲۰	۱/۸۳۲۹	۲/۳۰۴۶	۲/۴۸۸۳	۱/۲۵۰۲	۱/۸۲۵۵	۱/۸۶۵۲
MC: σ	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۷۸	۰/۰۲۵۲	۰/۰۱۲۶	۰/۰۴۰۱	۰/۰۴۶۷	۰/۰۱۰۱	۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۲۶
PEM: σ	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۸۸	۰/۰۲۶۶	۰/۰۱۰۵	۰/۰۴۳۱	۰/۰۳۵۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۲۸۱	۰/۰۱۹۸
Err: μ %	۰/۰۳۸۸	۰/۱۹۸۹	۰/۰۱۰۹	۰/۱۶۵۹	۰/۰۶۱۸	۰/۳۵۱۸	۰/۰۵۰۷	۰/۲۷۶۱	۰/۱۹۹۷	۰/۰۵۰۱	۰/۲۶۶۹	۰/۱۱۵۵

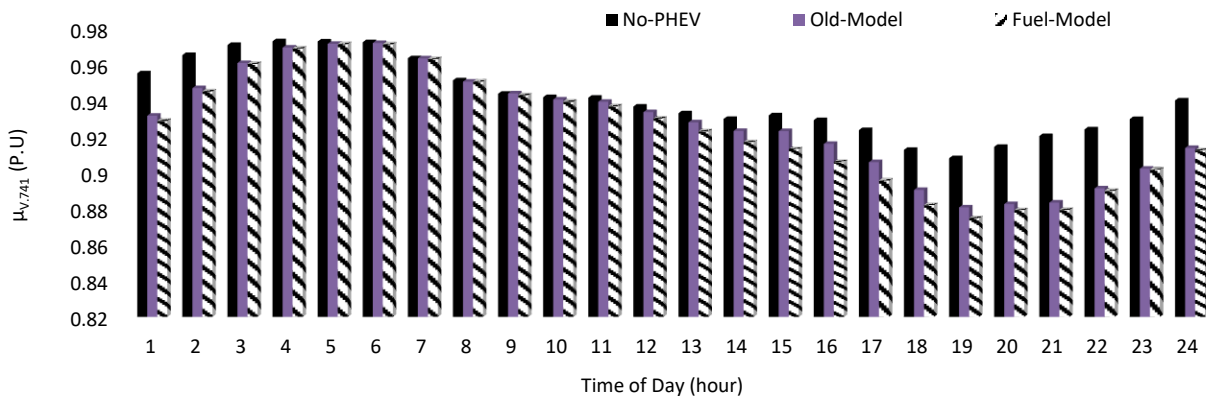
خودروهای برقی با در نظر گرفتن مدل های مختلف تأثیر ملموسی بر ولتاژ شبکه حتی در بازه زمانی پیک بار نداشته است. زیرا جبران کننده های متعددی در پست فشارقوی و نیز شبکه توزیع وجود دارند که مانع تخطی ولتاژ از مقادیر مورد قبول در شبکه می شوند. برخلاف دیگر پارامترهای شبکه و بر اساس روش احتمالاتی برآورد نقطه ای می توان گفت که حتی با حضور خودروهای برقی، مقدار متوسط ولتاژ، در بدترین نقطه بار شبکه مطابق جدول ۵ تغییرات بسیار کمی در ساعات مختلف روز دارد. با توجه به جدول ۵ و بررسی خطاهای نسبی محاسبه شده می توان گفت که روش برآورد نقطه ای در مقایسه با روش مرجع مونت کارلو دقت قابل قبولی دارد. برای بررسی دقیق تر و مقایسه مدل های مختلف تجمیع خودروهای برقی، تابع احتمال مربوط به پارامتر TAPC در ساعت ۱۹ عصر بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها



شکل ۸: چگالی تابع احتمال مربوط به پارامتر TAPC در ساعت ۱۹ عصر بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

۴-۳- ولتاژ شبکه

یکی از مهم ترین مسائل مرتبط با خودروهای برقی در شبکه های توزیع مربوط به افت ولتاژ در نقاط انتهایی شبکه می باشد. در شکل ۹ با فرض ضریب نفوذ ۵۰٪ خودروهای برقی، مقدار متوسط ولتاژ مربوط به بدترین نقطه بار شبکه (یعنی Node: ۷۴۱) در طول روز و برای مدل های مختلف مرتبط با خودروهای برقی نشان داده شده است. برای نقاط دیگر شبکه نیز می توان شکل مشابهی تعیین نمود. با توجه به شکل مذکور می توان گفت، اگرچه حداکثر افت ولتاژ در بازه زمانی پیک بار شبکه رخ می دهد ولی واقعیت این است که تقاضای شارژ



شکل ۹: مقدار متوسط ولتاژ مربوط به دورترین نقطه بار (۷.۷۴۱) بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

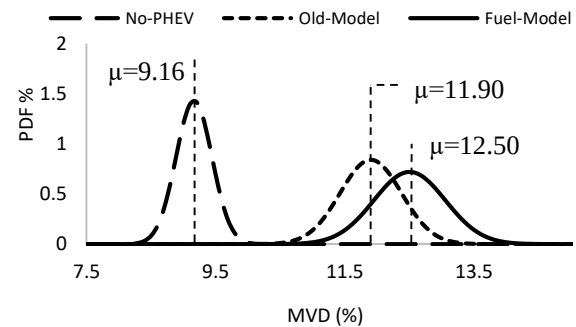
جدول ۵: مقایسه مقادیر متوسط و انحراف معیار ولتاژ ۷.۷۴۱ بین روش های مونت کارلو و برآورد نقطه ای در ساعات مختلف روز و بر اساس

مدل های مختلف تجمیع خودروهای برقی

V-741 (p.u.)												
Times	6 AM			12 AM			6 PM			12 PM		
Methods	No PHEV	OLD MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	OLD MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	OLD MODEL	FUEL MODEL	No PHEV	OLD MODEL	FUEL MODEL
MC: μ	۰/۹۷۲۳	۰/۹۷۲۰	۰/۹۷۱۷	۰/۹۳۶۴	۰/۹۳۳۲	۰/۹۳۰۵	۰/۹۱۳۲	۰/۸۹۱۶	۰/۸۸۲۷	۰/۹۳۹۸	۰/۹۱۳۸	۰/۹۱۱۶
PEM: μ	۰/۹۷۲۶	۰/۹۷۲۱	۰/۹۷۱۴	۰/۹۳۶۹	۰/۹۳۳۸	۰/۹۳۰۳	۰/۹۱۳۰	۰/۸۹۰۷	۰/۸۸۲۳	۰/۹۴۰۳	۰/۹۱۴۰	۰/۹۱۲۷
MC: σ	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴۲
PEM: σ	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۹
Err: μ %	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۹۹	۰/۰۲۲۵	۰/۰۵۶۱	۰/۰۶۱۵	۰/۰۲۵۲	۰/۰۲۴۱	۰/۰۹۶۲	۰/۰۴۹۵	۰/۰۴۹۸	۰/۰۱۷۶	۰/۱۱۵۷

$$VUI^t = \frac{1}{N_n} \sum_{n \in N_n} \left(\frac{|V_-^t(n)|}{|V_+^t(n)|} \right) \quad (23)$$

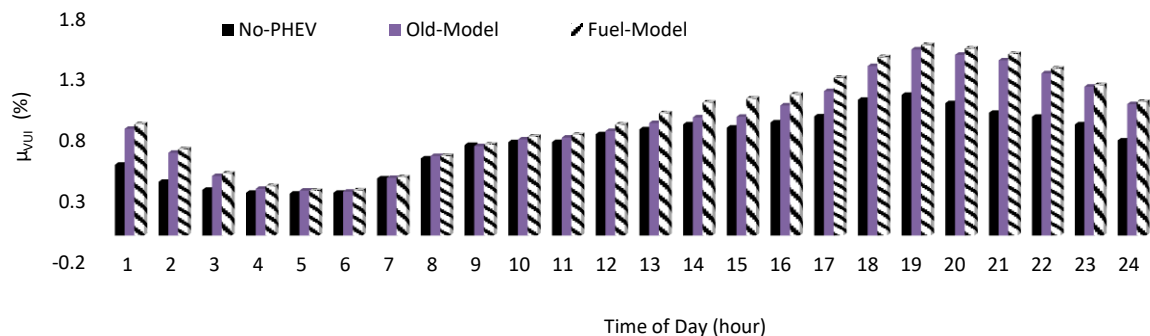
که n برابر است با شماره نقطه بار شبکه، t برابر با گام زمانی مورد مطالعه، $V_+^t(n)$ و $V_-^t(n)$ به ترتیب برابر با مؤلفه منفی و مثبت ولتاژ مربوط به نقطه بار n در گام زمانی t و VUI^t برابر با متوسط شاخص نامتعادلی ولتاژ در گام زمانی t می باشد. در شکل ۱۱ متوسط مقدار نامتعادلی ولتاژ شبکه در حضور خودروهای برقی نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می باشد که شاخص نامتعادلی ولتاژ در شبکه با ورود خودروهای برقی افزایش یافته است. زیرا خودروهای برقی به صورت بارهای تک فاز تصادفی می باشند که منجر به افزایش نامتعادلی بارهای مرتبط با فازهای مختلف شبکه می شوند. مشابه پارامترهای دیگر شبکه، برای ارزیابی روش برآورد نقطه ای، می توان مقادیر محاسبه شده برای پارامتر VUI بر اساس مدل های مختلف خودروهای برقی را با روش مرجع مونت کارلو مطابق جدول ۶ مقایسه نمود. نتایج به دست آمده بیانگر این واقعیت است که روش برآورد نقطه ای خطای بسیار ناچیزی نسبت به روش تکراری و زمان بر مونت کارلو دارد. نهایتاً با فرض ضریب نفوذ ۵۰٪ خودروهای برقی، تابع احتمال مربوط به پارامتر VUI در ساعت ۱۹ برای مدل های مختلف خودروهای برقی در شکل ۱۲ با هم مقایسه شده اند. شکل مذکور نشان می دهد که برخلاف دیگر پارامترهای مهم شبکه، مدل های مختلف ارائه شده برای تجمیع خودروها تأثیر چندانی بر روی شاخص نامتعادلی ولتاژ ندارند. این شاخص برای حالت پایه حدود ۱/۱۵٪ و برای دیگر مدل های معرفی شده حدود ۱/۵٪ می باشد.



شکل ۱۰: چگالی تابع احتمال مربوط به پارامتر MVD در ساعت ۱۹ عصر بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

۴-۴- شاخص نامتعادلی ولتاژ (VUI^t)

نامتعادلی ولتاژ در کنار اضافه و یا افت ولتاژ یکی از مشکلات کیفیت ولتاژ می باشد به طوری که به عنوان یک پدیده شایع در شبکه های قدرت سه فاز شناخته می شود. از جمله عوامل نامتعادلی ولتاژ می توان از توزیع نامتوازن بارهای تک فاز در شبکه سه فاز، امپدانس های نامتقارن سیم پیچی ترانسفورماتورها، بانک های ترانسفورماتوری با اتصالات ستاره باز و یا مثلث باز، جابه جایی ناکامل خطوط انتقال قدرت، فیوزهای معیوب در بانک های خازنی و غیره نام برد. با توجه به این که تقاضای بار مشترکین در حضور خودروهای برقی به صورت تک فاز و متغیر با زمان می باشد بنابراین استفاده از شاخص نامتعادلی ولتاژ برای ارزیابی مدل های مختلف خودروهای برقی بسیار سودمند است. شاخص VUI (نامتعادلی ولتاژ) بر اساس منابع [۳۷، ۳۸] به صورت معادله (۲۳) تعریف می شود.



شکل ۱۱: مقدار متوسط شاخص نامتعادلی شبکه بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

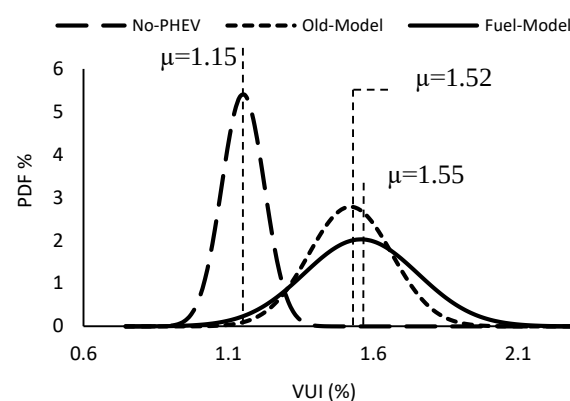
جدول ۶: مقایسه مقادیر متوسط و انحراف معیار پارامتر VUI بین روش های مونت کارلو و برآورد نقطه ای در ساعات مختلف روز و بر اساس

مدل های مختلف تجمیع خودروهای برقی

Times	VUI (%)											
	6 AM			12 AM			6 PM			12 PM		
	No PHEV	Old Model	Fuel Model	No PHEV	Old Model	Fuel Model	No PHEV	Old Model	Fuel Model	No PHEV	Old Model	Fuel Model
MC: μ	۰/۳۵۵۰	۰/۳۶۰۶	۰/۳۶۳۴	۰/۸۲۸۳	۰/۸۷۰۹	۰/۹۰۶۲	۱/۰۹۸۳	۱/۳۵۰۳	۱/۴۶۲۳	۱/۷۸۶۷	۱/۰۸۴۲	۱/۱۱۱۶
PEM: μ	۰/۳۵۰۱	۰/۳۵۸۹	۰/۳۶۹۳	۰/۸۲۹۰	۰/۸۵۴۸	۰/۹۰۷۹	۱/۱۱۰۵	۱/۳۸۵۹	۱/۴۵۹۴	۱/۷۷۷۴	۱/۰۷۴۴	۱/۰۹۳۱
MC: σ	۰/۰۲۵۰	۰/۰۲۹۷	۰/۰۳۱۰	۰/۰۵۹۴	۰/۰۶۹۵	۰/۰۸۴۷	۰/۰۷۵۷	۰/۱۴۷۸	۰/۱۶۸۲	۰/۰۵۴۲	۰/۱۴۶۰	۰/۱۵۱۶
PEM: σ	۰/۰۲۶۱	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۱۴	۰/۰۴۷۲	۰/۰۸۸۱	۰/۰۹۴۷	۰/۰۶۱۵	۰/۱۴۱۲	۰/۲۰۸۳	۰/۰۴۱۹	۰/۱۳۶۰	۰/۱۲۴۱
Err: μ	۱/۳۸۰۶	۰/۴۶۶۹	۰/۶۳۷۶	۰/۰۷۴۴	۱/۸۵۰۴	۰/۱۹۰۹	۱/۱۱۱۰	۲/۶۳۹۷	۰/۱۹۸۲	۱/۱۶۱۳	۰/۰۰۰۳	۱/۶۶۷۷

همچنین مدل های مختلف مربوط به تجمیع خودروهای برقی رفتار مشابهی در ضرایب نفوذ مختلف دارند. ضریب نفوذ بالاتر خودروهای برقی منجر به افزایش بیش تر مصرف توان کل شبکه می شود. از این رو با افزایش ضریب نفوذ خودروها در شبکه احتمال اضافه بار شدن ترانسفورماتور شبکه بیش تر می شود. این احتمال با پارامتر UI_{TAPC} نشان داده شده که برای مدل های مختلف تجمیع خودروها متفاوت بوده و در جدول ۷ ارائه شده است. شرایط مشابه برای حداکثر افت ولتاژ شبکه روی می دهد که با پارامتر UI_{MVD} نشان داده شده است. مطابق با جدول ۷ می توان گفت، ترانسفورماتور شبکه تقریباً برای ضرایب نفوذ ۵۰٪ به بالا دچار اضافه بار خواهد شد. افت ولتاژ شبکه با افزایش ضریب نفوذ خودروها بدتر می شود و افت ولتاژ بیش از حد باعث اختلال در عملکرد تجهیزات برقی خانگی می گردد. شاخص نامتعادلی ولتاژ نیز مشابه دیگر پارامترهای شبکه با افزایش ضریب نفوذ خودروها افزایش می یابد. زیرا افزایش تقاضای شارژ خودروها تقریباً به صورت نامساوی بین فازهای شبکه اعمال می گردد و این توزیع نامساوی باعث افزایش شاخص نامتعادلی ولتاژ در شبکه می شود.

شایان ذکر است تحلیل های بالا برای پروفیل مصرف خانوارها در روزهای کاری زمستان نیز قابل انجام است که نتایجی مشابه جدول ۷ خواهد داشت. تفاوت این است که در مدل پیشنهادی، مصرف روزانه بنزین خودروها در فصل زمستان جایگزین مصرف آن ها در تابستان می گردد. با فرض ضرایب نفوذ مختلف برای خودروهای برقی، می توان پارامترهای مهم شبکه را بر اساس روش احتمالاتی برآورد نقطه ای برای روش های مختلف مدل سازی تجمعی خودروها در ساعت ۱۹ مطابق جدول ۸ محاسبه نمود. با توجه به جدول های ۷ و ۸ می توان نتیجه گیری کرد که برای مدل پیشنهادی، پارامترهای شبکه برای فصول تابستان و زمستان به طور متوسط به ترتیب تا ۰/۶٪ و ۰/۴٪ نسبت به مدل قدیمی و مرسوم افزایش داشته اند.



شکل ۱۲: چگالی تابع احتمال مربوط به پارامتر VUI در ساعت ۱۹ عصر بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها

۴-۵- تحلیل حساسیت مربوط به مدل سازی

در قسمت های قبلی تمامی شبیه سازی ها با فرض ضریب نفوذ ۵۰٪ خودروهای برقی و متوسط پروفیل مصرف خانوارها در روزهای کاری تابستان انجام شده است. با توجه به این که ضریب نفوذ خودروهای برقی در شبکه های توزیع مختلف ممکن است متفاوت باشد و از آنجاکه ضریب نفوذ مختلف خودروها منجر به نتایج شبیه سازی کاملاً متفاوت می شود لذا لازم است که در ادامه تحلیل حساسیت مرتبط با تأثیر ضرایب نفوذ مختلف خودروها بر مشخصه های مهم شبکه توزیع در نظر گرفته شود. بدین منظور در این مقاله، تأثیر خودروهای برقی بر روی شبکه توزیع در ساعت ۱۹ (زمان پیک بار) برای ضرایب نفوذ ۰٪-۱۰۰٪ در گام های ۲۰٪ تحلیل می شود. در جدول ۷ نتایج احتمالاتی مربوط به پارامترهای مهم شبکه برای ضرایب نفوذ مختلف خودروها در ساعت ۱۹ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور، بسیار واضح است که تمامی پارامترهای شبکه با افزایش ضریب نفوذ خودروها بدتر شده اند.

جدول ۷: نتایج احتمالاتی مربوط به مقادیر متوسط پارامترهای شبکه توزیع در فصل تابستان بر اساس مدل های مختلف تجمیع خودروها و ضرایب نفوذ متفاوت آن ها در ساعت ۱۹ عصر

PHEV PENET.	CHARACTERISTICS OF THE NETWORK (μ)									
	μ_{TAPC} (MVA)		μ_{MVD} (%)		μ_{VUI} (%)		UI_{TAPC} (%)		UI_{MVD} (%)	
	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL
No-PHEV	۱/۹۴		۹/۱۵		۱/۱۴		۰		۰/۲۳	
30%	۲/۳۰	۲/۳۷	۱۰/۷۴	۱۱/۰۹	۱/۳۲	۱/۳۶	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۹
50%	۲/۵۱	۲/۶۳	۱۱/۷۸	۱۲/۴۵	۱/۴۴	۱/۵۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
70%	۲/۷۵	۲/۸۷	۱۲/۹۵	۱۳/۳۸	۱/۵۹	۱/۶۶	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
90%	۲/۹۵	۳/۱۳	۱۳/۹۳	۱۴/۸۱	۱/۷۳	۱/۸۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
100%	۳/۰۵	۳/۲۷	۱۴/۳۴	۱۵/۲۸	۱/۷۸	۱/۸۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

تخمین رفتارهای رانندگی و محاسبه وضعیت شارژ اولیه خودروهای برقی پیشنهاد گردید. روش ارائه شده باعث افزایش تقاضای شارژ خودروهای برقی شده و بسیاری از موارد مؤثر بر تقاضای شارژ خودروهای برقی که در مقالات مختلف در نظر گرفته نشده است را

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از اطلاعات ثبت شده برای مصرف روزانه بنزین خودروهای معمولی که در دسترس می باشند، روش جدیدی برای

متوسط باعث افزایش پارامترهای شبکه برای فصول تابستان و زمستان به ترتیب تا ۶٪ و ۴٪ نسبت به مدل قدیمی و مرسوم می شود.

پوشش می دهد. همچنین با توجه به رفتار احتمالاتی تقاضای شارژ خودروهای برقی و تقاضای بار مشترکین در شبکه توزیع، مدل احتمالاتی تجمع خودروها و ارزیابی تأثیر آن بر پارامترهای مهم شبکه توزیع بر اساس روش احتمالاتی برآورد نقطه ای پیشنهاد می گردد. روش مذکور از طریق سیستم توزیع ۳۷ باسه IEEE مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که استفاده از روش برآورد نقطه ای با داشتن بار محاسباتی کمتر، دقت قابل قبولی نسبت به روش مونت کارلو دارد. همچنین برای شبکه تحت تست می توان نتیجه گیری کرد که مدل احتمالاتی پیشنهاد شده برای تجمع خودروهای برقی، به طور

جدول ۸: نتایج احتمالاتی مربوط به مقادیر متوسط پارامترهای شبکه توزیع در فصل زمستان بر اساس مدل های مختلف تجمع خودروها و ضرایب نفوذ متفاوت آن ها در ساعت ۱۹ عصر

PHEV PENET.	CHARACTERISTICS OF THE NETWORK (μ)									
	$P_{TARC}(MVA)$		$\mu_{MVD}(\%)$		$\mu_{VUI}(\%)$		$UI_{TARC}(\%)$		$UI_{MVD}(\%)$	
	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL	OLD MODEL	FUEL MODEL
NO-PHEV	۲/۰۹		۹/۸۷		۱/۲۳		۰/۰۰		۲۹/۲۴	
30%	۲/۴۶	۲/۵۳	۱۱/۵۹	۱۲/۰۱	۱/۴۳	۱/۴۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
50%	۲/۷۰	۲/۸۰	۱۲/۶۸	۱۳/۰۸	۱/۵۵	۱/۶۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
70%	۲/۹۳	۳/۰۶	۱۳/۸۰	۱۴/۳۱	۱/۷۳	۱/۸۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
90%	۳/۱۵	۳/۳۳	۱۴/۸۰	۱۵/۶۷	۱/۸۸	۱/۹۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
100%	۳/۲۷	۳/۴۵	۱۵/۳۰	۱۶/۱۲	۱/۸۵	۱/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

- [11] S. Wencong and C. Mo-Yuen, "Performance Evaluation of an EDA-Based Large-Scale Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Algorithm," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 308-315, 2012.

[۱۲] جمشید آقایی، احسان باقری، سجاد شفیع، طاهر نیکنام و محسن باقری، "بررسی پاسخ گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۰-۱۱، ۱۳۹۶.

- [13] Q. Kejun, Z. Chengke, M. Allan and Y. Yue, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 802-810, 2011.
- [14] P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, I. Grau, L. M. Cipcigan and N. Jenkins, "Predicting Electric Vehicle impacts on residential distribution networks with Distributed Generation," in *Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-5, 2010.
- [15] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses and M. A. S. Masoum, "Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 456-467, 2011.
- [16] S. Masoum, S. Deilami, P. S. Moses, M. A. S. Masoum and A. Abu-Siada, "Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, pp. 877-888, 2011.
- [17] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Rastegar, "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1351-1360, 2013.

[۱۸] مهدی تورانی، محمدرضا آقابراهیمی و حمیدرضا نجفی، "برنامه ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه بر پایه مسافرت

مراجع

- [1] S. D. O. Energy, "One Million Electric Vehicles by 2015: February 2011 Status Report," *United States Department of Energy*. Accessed December, vol. 5, p. 2013, 2011.
- [2] L. Gan, U. Topcu and S. H. Low, "Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 940-951, 2013.
- [3] J. Glueck and H. T. Le, "Impacts of Plug-in Electric Vehicles on local distribution feeders," in *Proceedings of Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2015.
- [4] S. Hajforoosh, M. A. Masoum and S. M. Islam, "Real-time charging coordination of plug-in electric vehicles based on hybrid fuzzy discrete particle swarm optimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 128, pp. 19-29, 2015.
- [5] N. H. Tehrani and P. Wang, "Probabilistic estimation of plug-in electric vehicles charging load profile," *Electric Power Systems Research*, vol. 124, pp. 133-143, 2015.
- [6] 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 T&D*, pp. 1-6, 2010.
- [7] L. Pieltain Fernandez, T. Gomez San Roman, R. Cossent, C. Mateo Domingo and P. Frias, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 206-213, 2011.
- [8] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 371-380, 2010.
- [9] M. S. ElNozahy and M. M. A. Salama, "A Comprehensive Study of the Impacts of PHEVs on Residential Distribution Networks," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 332-342, 2014.
- [10] M. F. Shaaban, Y. M. Atwa, and E. F. El-Saadany, "PEVs modeling and impacts mitigation in distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 1122-1131, 2013.

- [28] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *National Household Travel Survey*, 2009, [Online]. <http://nhts.orl.gov>.
- [29] Z. Darabi and M. Ferdowsi, "Aggregated Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Electricity Demand Profile," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 501-508, 2011.
- [30] *Natural Resources Canada* [Online], <http://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/transportation/cars-light-trucks/buying/7487>.
- [31] U.S. Department of Energy, [Online], <http://www.fueleconomy.gov/feg/alternatives.shtml>.
- [32] Z. Jinghong, W. Xiaoyu, M. Kun, Z. Chun and Z. Shouzheng, "Aggregation Model-Based Optimization for Electric Vehicle Charging Strategy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1058-1066, 2013.
- [33] G. Li and X.-P. Zhang, "Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 492-499, 2012.
- [34] H. Kamankesh, V. G. Agelidis and A. Kavousi-Fard, "Optimal scheduling of renewable micro-grids considering plug-in hybrid electric vehicle charging demand," *Energy*, vol. 100, pp. 285-297, 2016.
- [35] Radial Test Feeder, *IEEE Distribution System Analysis Subcommittee* [Online], <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders>.
- [36] J. Pouladi, M. B. Bannae Sharifian and S. Soleymani, "Determining charging load of PHEVs considering HVAC system and analyzing its probabilistic impacts on residential distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 300-312, 12// 2016.
- [37] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, pp. 50-51, 2001.
- [38] F. Shahnia, A. Ghosh, G. Ledwich and F. Zare, "Predicting voltage unbalance impacts of plug-in electric vehicles penetration in residential low-voltage distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, pp. 1594-1616, 2013.
- روزانه خودروها، "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحات ۶۵-۷۶، ۱۳۹۵.
- [19] J. M. Morales and J. Perez-Ruiz, "Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1594-1601, 2007.
- [20] G. Carpinelli, P. Caramia and P. Varilone, "Multi-linear Monte Carlo simulation method for probabilistic load flow of distribution systems with wind and photovoltaic generation systems," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 283-295, 2015.
- [21] Schellenberg, W. Rosehart and J. Aguado, "Cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF) with Gaussian and gamma distributions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 773-781, 2005.
- [22] F. Ruiz-Rodriguez, J. Hernández and F. Jurado, "Voltage unbalance assessment in secondary radial distribution networks with single-phase photovoltaic systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 646-654, 2015.
- [23] S. Shargh, B. Mohammadi-ivatloo, H. Seyedi and M. Abapour, "Probabilistic multi-objective optimal power flow considering correlated wind power and load uncertainties," *Renewable Energy*, vol. 94, pp. 10-21, 2016.
- [24] S. M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Jalilzadeh and S. Nojavan, "A two-point estimate method for uncertainty modeling in multi-objective optimal reactive power dispatch problem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 194-204, 2016.
- [25] N. ISO, "Alternate route: Electrifying the transportation sector," *New York ISO, NY, Tech. Report*, June, 2009.
- [26] M. Kintner-Meyer, K. Schneider and R. Pratt, "Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids, Part 1: Technical analysis," *Pacific Northwest National Laboratory*, pp. 1-20, 2007.
- [27] M. Duvall, E. Knipping, M. Alexander, L. Tonachel and C. Clark, "Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles," *EPRI*, July, 2007.

زیر نویس ها

⁸ Percentage of Electric Consumption

⁹ Percentage of Fuel Consumption

¹⁰ Maximum Depth of Discharge

¹¹ Total Apparent Power Consumption

¹² Maximum Voltage Drop

¹³ Voltage Unbalance Index

¹ All Electric Range

² Point Estimate Method

³ Independent System Operator

⁴ Pacific Northwest National Laboratory

⁵ Electric Power Research Institute

⁶ Probability Density Function

⁷ State of Charge