

## **Economic Charging of Plug-In Electric Vehicles at the Charging Station and its Evaluation in Distribution Network Considering Possible Scenarios**

Khalil Gorgani Firouzjah<sup>1</sup>, Poya Hosseinzadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran,  
k.gorgani@umz.ac.ir

<sup>2</sup>. Faculty of Engineering & Technology, Mazandaran University of Science and Technology,  
Babol, Iran  
poya\_h36@gmail.com

### **Abstract**

In this paper, the effect of connecting the charging station of electric vehicles is investigated considering the optimal charging and discharging scheduling at the station. Accordingly, in the first section, the planning process of the station aimed at maximizing the mutual benefits. In the second part, uncertainty was noted in the program's presence at the station based on the production of different scenarios. The statistical simulation method has been used to model the uncertainties in the problem. Possible scenarios are selected from generated scenarios considering the diversity of vehicle presence plans, station's load curves, market price, and network load levels. Therefore, the equivalent load is calculated. In the third section, the effect of station loading on the distribution network was investigated based on equivalent loads (extracted based on optimal planning of the first part). Comparison of the station loading effect is carried out for IEEE 33-bus network in the MATLAB based on the loss indexes (loss cost) and the voltage drop of the buses. The results indicate loss reduction due to optimal planning at the station and its application in appropriate buses.

**Keywords:** Charging Station Scheduling, Profit, Plug-in Electric Vehicle, Possible Scenarios.

## مدیریت اقتصادی شارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه در ایستگاه شارژ و بررسی آن در شبکه توزیع در سناریوهای محتمل خلیل گرگانی فیروزجاه<sup>۱</sup>، پویا حسینزاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

k.gorgani@umz.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

poya.h36@gmail.com

**چکیده:** در این مقاله، اثر اتصال ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی با وجود برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ بهینه در ایستگاه بررسی می‌شود. بر اساس این، در بخش نخست، فرایند برنامه‌ریزی ایستگاه با هدف حداکثرسازی سود طرفین، ارائه و در بخش دوم، نداشتن قطعیت در برنامه حضور خودروها در ایستگاه برپایه تولید سناریوهای مختلف ملاحظه می‌شود. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله از روش شبیه‌سازی آماری استفاده می‌شود. سناریوهای محتمل از بین سناریوهای تولیدشده با تنوع سطح و منحنی بار ایستگاه، قیمت برق در بازار، سطح بار شبکه استخراج و بار معادل هریک محاسبه می‌شود. در بخش سوم، اثر بارگذاری ایستگاه بر شبکه توزیع براساس بارهای معادل (استخراج‌شده برپایه برنامه‌ریزی بهینه بخش نخست) بررسی می‌شود. اثر بارگذاری ایستگاه در شین‌های شبکه ۳۳ شین IEEE در نرم‌افزار MATLAB برپایه شاخص‌های تلفات (هزینه تلفات) و افت ولتاژ شین‌ها مقایسه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ، سود، خودروی الکتریکی متصل به شبکه، سناریوهای محتمل

### ۱- مقدمه

خودروهای برقی شده است که توانایی تبادل الکتریکی را با شبکه در چهارچوب تعریفی جدید امکان‌پذیر می‌کند [۲]. V2Gها به دلیل داشتن قابلیت ذخیره انرژی، جایگزین مناسبی برای ذخیره تأمین شده نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر خواهند بود [۳]؛ درحالی‌که برنامه زمان‌بندی شارژ و دشارژ V2Gهای منفرد تا حد زیادی نامعین است. این امر، اثر مثبت آنها بر شبکه را خنثی می‌کند [۴]؛ البته در برخی شرایط، ارتباط یک‌طرفه فناوری خودرو با شبکه از طرف مصرف‌کننده اقبال بیشتری دارد [۵]. به منظور کنترل بهینه شارژ V2G، ایستگاه شارژ، تجمیع‌کننده معرفی شده است [۶]. مدل حضور V2Gها علاوه بر جلوگیری از ایجاد بار اضافه در شبکه، گرفتن تصمیمات مؤثر از جانب ایستگاه

مسائل زیست‌محیطی، کاهش منابع و وابستگی به انرژی، نظریه تغییرات بزرگ در ساختار کلی ناوگان حمل‌ونقل را به وجود آورده و خودروهای الکتریکی را جایگزین مسئله پیشنهاد کرده است [۱]. در این میان، مفهوم فناوری اتصال خودرو به شبکه (V2G) سبب اقبال

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲

نام نویسنده مسئول: خلیل گرگانی فیروزجاه

نشانی نویسنده مسئول: ایران، بابلسر، دانشگاه مازندران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق.

داشتن تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر در مسئله مدل‌سازی بار ناشی از V2G‌های یک شهرک در منبع [۱۶] صورت گرفته است. این روش ارائه مدل بسیار دقیق‌تر در مسائلی را امکان‌پذیر می‌کند که بین متغیرهای مسئله همبستگی وجود داشته باشند؛ اما ایجاد داده‌های زیاد از روی نمونه‌های کم نقطه‌ضعف آن است. در [۱۷] روندی برای مدل‌سازی رفتار خودروها به صورت مدل چندحالتی در مسئله شارژ بهینه ارائه شده است. این روش توانایی مدل‌سازی رفتار خودروها در حالت شارژ را دارد؛ اما به تعداد کافی از نمونه‌های واقعی نیازمند است. روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۱۶]، با وجود سادگی، همانند دیگر روش‌ها قادر به ملاحظه وابستگی بین متغیرها نیست و زمان محاسبات آن در خور توجه است؛ در حالی که منبع [۱۵] با به‌کارگیری توابع توزیع احتمال تجمعی متغیرهای ورودی در مسئله طراحی سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی زمان محاسبات را کاهش داده است.

جمع‌بندی روش‌های ارائه شده در مراجع فوق، ضعف آنها در ایجاد ارتباط دقیق بین متغیرها را بیان می‌کند؛ بنابراین، ملاحظه ارتباط بین متغیرهای تصادفی حضور خودرو در ایستگاه شارژ شامل زمان ورود و خروج، شارژ اولیه و شارژ درخواستی در شبیه‌سازی جامع مسئله ضروری خواهد بود.

بر اساس این، در مقاله حاضر اثر اتصال V2G‌ها بر شبکه توزیع برپایه ارزش تلفات در افق زمانی و در سناریوهای احتمالاتی مختلف بررسی می‌شود. نوآوری مقاله در سه بخش بیان می‌شود؛ نخست، برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی متصل به شبکه با هدف حداکثرسازی سود طرفین؛ دوم، شبیه‌سازی اطلاعات خودرو در ایستگاه شارژ براساس ارتباط آماری بین متغیرها و ملاحظه عدم قطعیت در برنامه حضور؛ سوم، بررسی اثر اتصال ایستگاه شارژ به شبکه توزیع و محاسبه ارزش تلفات در افق زمانی برپایه روابط اقتصادی.

در بخش دوم، روش پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۲-۱، فرمول‌بندی مسئله شامل توابع هدف و محدودیت‌های

شارژ را ممکن کرده است؛ البته چگونگی وضعیت باتری V2G‌ها در ساعات مختلف روز اهمیت دارد که در منبع [۷]، مدلی احتمالاتی برای آن ارائه شده است. در منبع [۸]، سطح نفوذ V2G در بازار تنظیم با ملاحظه پیشینه‌سازی درآمد ایستگاه مشخص شده است. همچنین، تأثیر V2G‌ها بر بازار تنظیم در [۹] بررسی شده است. V2G‌ها سود را در بازار افزایش می‌دهند؛ ولی به اشباع بازار منجر می‌شوند. از سویی مطابق منبع [۱۰]، اتصال تعداد کافی V2G، اجرای برنامه‌های مدیریت سمت مصرف را فراهم می‌کند؛ اما انگیزه لازم برای خودروها باید فراهم شود.

از جمله ویژگی‌های V2G، مشارکت در هموارسازی منحنی بار شبکه است [۱۱]؛ اگرچه توان تولیدی آن نسبت به نیروگاه‌های فسیلی گران‌تر است؛ در نتیجه از لحاظ اقتصادی لازم است توان مورد نیاز در ساعات پیک از طریق تولیدکنندگان با هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر تأمین شود [۱۲]. از سوی دیگر، شارژ و دشارژ V2G و مسافت طی شده آنها رفتاری تصادفی دارند؛ بنابراین، ملاحظه مسئله عدم قطعیت ضروری خواهد بود.

برخی روش‌های ارائه شده در این زمینه شامل سناریوسازی از روی تابع چگالی احتمال متغیرها و رخداد عدم قطعیت [۱۳] و [۱۴]، منطق فازی [۱۵]، توابع چندمتغیره [۱۶]، زنجیره مارکوف [۱۷]، شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۱۶] و برنامه‌نویسی شانس محدود [۱۵] هستند.

در منبع [۱۳] روش تولید سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت بازار و رفتار خودروها در مسئله ایستگاه‌ها ارائه شده است. مزیت این روش، سادگی مدل‌سازی عدم قطعیت و عیب آن ایجاد نکردن ارتباط دقیق بین متغیرها است. همچنین در منبع [۱۴] روش تولید سناریو در مسئله در مدار آوردن نیروگاه‌ها با حضور V2G با مزیت ایجاد فضای احتمالاتی مناسب ارائه شده است. در منبع [۱۵] با استفاده از منطق فازی برای احتمال رخداد هر متغیر تابع عضویت ارائه شده است. ایجاد فضای احتمالاتی مناسب مزیت این روش است. ایجاد تابع احتمال چندمتغیره با

• تابع هدف سود خودروها

حضور V2G در ایستگاه و تبادل توان با شبکه با رسیدن به سطح شارژ مطلوب (پرداخت هزینه شارژ) و مشارکت در بازار (فروش انرژی ذخیره شده در باتری) همراه است؛ بنابراین، با توجه به قیمت برق و فرصت حضور خودرو، مقدار بهینه تراکنش توان محاسبه می شود. هزینه پرداختی خودروها (مقدار منفی: فروش و مثبت: خرید توان)، مطابق رابطه (۱)، تابع هدف تعریف می شود.

$$C_{Exp}^i = \sum_{t=t_{Arrival}}^{t=t_{Departure}} \left( \rho_{kWh}^t \times (1 + \alpha_{station}^{Sale}) \times P_{Exp-Buy}^{i,t} + \rho_{kWh}^t \times (1 + \alpha_{station}^{Buy}) \times P_{Exp-Sale}^{i,t} \right) \quad (1)$$

ضرب میزان برق در کارمزد ایستگاه و میزان توان تبادل شده، سود موردانتظار خودرو بیان شده است.

• تابع هدف سود ایستگاه شارژ

ایستگاه شارژ به منزله تجمیع کننده توان، امکان شارژ (دشارژ) خودروها را در قیمت برق کم (زیاد) فراهم می کند. اگر ایستگاه، سطح شارژ نهایی درخواستی خودروها را تأمین نکند، جریمه شکست تأمین سطح شارژ به خودرو پرداخت می شود. جریمه براساس ارزش برق از نظر خودرو (حداکثر قیمت پرداختی خودرو برای شارژ) تعیین می شود. با توجه به محدودیت قدرت تبدلی با شبکه، ایستگاه، تمام خودروها را در ارزان ترین دوره ها نمی تواند شارژ و در گران ترین دوره ها دشارژ کند؛ بنابراین، برخی خودروها فرصت خرید ارزان و فروش گران را از دست می دهند؛ در این صورت، ایستگاه به پرداخت هزینه فرصت ازدست رفته موظف است. بر اساس این، تابع هدف سود ایستگاه در رابطه (۲) ارائه می شود [۱۸].

$$f = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_V} \left( \alpha_{station}^{Sale} \times P_{Bought}^{i,t} \times \rho_{kWh}^t + \alpha_{station}^{Buy} \times P_{Sold}^{i,t} \times \rho_{kWh}^t - \frac{SOC_{Failure}^i}{Penalty^i} + \frac{opportunity^i}{Penalty^i} \right) \quad (2)$$

$$\frac{opportunity^i}{Penalty^i} = \begin{cases} 0 & C_{Act}^i \leq C_{Exp}^i \\ C_{Act}^i - C_{Exp}^i & C_{Act}^i > C_{Exp}^i \end{cases} \quad (3)$$

موجود در برنامه ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برق با هدف حداکثرسازی سود خودرو و ایستگاه شارژ ارائه می شود. در ادامه، اثر اتصال ایستگاه شارژ با برنامه تصادفی خودروها در سناریوهای مختلف بر شبکه توزیع بررسی می شود. در بخش ۲-۲، روش حل مسئله شامل الگوریتم های روش پیشنهادی ارائه می شوند.

در بخش ۳، نتایج مقایسه ای در نرم افزار MATLAB برای مدل برنامه ریزی پیشنهادی در شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE ارائه می شود.

۲- روش پیشنهادی

در این بخش ابتدا مسئله برنامه ریزی شارژ و دشارژ V2G ها بررسی شده است و الگوریتم بهینه سازی دو مرحله ای با هدف حداکثرسازی سود هر خودرو در مرحله اول و حداکثرسازی سود ایستگاه شارژ در مرحله دوم ارائه می شود. در بخش دوم، اثر بارگذاری ایستگاه شارژ بر شبکه توزیع براساس بار معادل ایستگاه بررسی می شود که برپایه برنامه ریزی بهینه خودروها در ایستگاه استخراج شده است. به منظور مدل سازی رفتار خودروها و عدم قطعیت در برنامه حضور آنها در ایستگاه، سناریوهای مختلف تولید می شوند. سپس بار معادل در هر سناریو، محاسبه و به شبکه توزیع اعمال می شود. اثر بارگذاری ایستگاه در شین های شبکه نمونه برپایه شاخص تلفات (ارزش تلفات) و افت ولتاژ مقایسه می شود.

۲-۱- تعریف مسئله

۲-۱-۱- برنامه ریزی شارژ و دشارژ خودروها

مسئله پیشنهادی برای برنامه ریزی شارژ و دشارژ V2G ها الگوریتمی دو مرحله ای با هدف حداکثرسازی سود هر خودرو و حداکثرسازی سود ایستگاه شارژ است؛ بدین منظور توابع هدف هریک از مراحل بهینه سازی و محدودیت های مسئله به شرح ذیل تعریف می شوند.

مدیریت اقتصادی شارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه در ایستگاه شارژ و بررسی آن در ...

به ایستگاه می‌رسد، معمولاً به دشارژ تمایل دارد؛ بنابراین، حد پایین تر سطح شارژ مورد نیاز در زمان خروج را اعلام می‌کند. خودرو باید سطح شارژ نهایی را در محدوده‌ای انتخاب کند که براساس مدت زمان حضور در ایستگاه و حداکثر توان قابل شارژ و دشارژ تعیین شود:

$$\Delta t^i = t_{\text{Arrival}}^i - t_{\text{Departure}}^i \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\text{SOC}_{\text{Arrival}}^i - \Delta t^i \times P_{\text{Discharge}}^{\text{Max}}) &\leq \text{SOC}_{\text{Exp}}^i \\ &\leq (\text{SOC}_{\text{Arrival}}^i + \Delta t^i \times P_{\text{Charge}}^{\text{Max}}) \end{aligned} \quad (11)$$

## ۲-۱-۲- بارگذاری ایستگاه شارژ بر شبکه توزیع

در این بخش، اثر ایستگاه با ملاحظه عدم قطعیت در تعداد، زمان ورود و خروج و شارژ درخواستی خودروها بر شبکه بررسی می‌شود. ملاحظه سطوح قیمتی همراه با سناریوهای مختلف حضور خودرو در ایستگاه، مدل جامع تری را در مطالعه اثر ایستگاه بر شبکه در اختیار می‌گذارد. اعمال بار معادل ایستگاه به ملاحظات شامل اثر ایستگاه بر تلفات شبکه و ولتاژ شین‌ها نیازمند است. از سویی، به دلیل ماهیت برنامه‌ریزی مسئله حضور ایستگاه، مطالعه بلندمدت ضروری است؛ بنابراین، محاسبه میزان تلفات شبکه با حضور ایستگاه در شین‌های مختلف با ملاحظه تغییر سطح بار شبکه و ایستگاه توأم با میزان تورم در دوره‌های مطالعه شده اهمیت می‌یابد. بنابراین، سناریوها در  $N_{\text{price}}$  سطح قیمتی و  $N_{\text{level}}$  دوره  $N_y$  ساله بر شبکه اعمال می‌شوند. سپس به‌ازای سناریوهای کاهش یافته، مقدار بار معادل ایستگاه در سطح  $i_{\text{level}}$  در ۲۴ ساعت مطالعه شده مربوط به سطح قیمت  $i_{\text{price}}$  با بار شین محل نصب ایستگاه جمع می‌شود. پس از آن، پخش بار پسر و - پیش‌رو در شبکه با اطلاعات بارها (ایستگاه + شبکه) حل و تلفات در ۲۴ ساعت و هزینه تلفات روزانه براساس قیمت برق (در سطح قیمتی مطالعه شده  $i_{\text{price}}$ ) محاسبه می‌شوند.

$$\text{Loss}_{(i_{\text{level}}, i_{\text{price}}, i_{\text{scenario}})} = \sum_{t=1}^{24} P_{\text{Loss}}^t \times \rho_{\text{kWh}}^t \quad (12)$$

$$C_{\text{Act}}^i = \sum_{t=\tau_a}^{\tau_d} \rho_{\text{kWh}}^t \times (1 + \alpha_{\text{station}}^{\text{sale}}) \times P_{\text{Bought}}^{i,t} + \sum_{t=\tau_a}^{\tau_d} \rho_{\text{kWh}}^t \times (1 - \alpha_{\text{station}}^{\text{buy}}) \times P_{\text{Sold}}^{i,t} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\text{SOC}_{\text{Failure}}^i}{\text{Penalty}^i} \\ &= \rho_{\text{kWh}}^{\text{max}} \begin{cases} \text{SOC}_{\text{Exp}}^i - \text{SOC}_{\text{Act}}^i & \text{SOC}_{\text{Exp}}^i < \text{SOC}_{\text{Act}}^i \\ 0 & \text{SOC}_{\text{Exp}}^i \geq \text{SOC}_{\text{Act}}^i \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

### • محدودیت‌های مسئله

خودروها در هر لحظه، تنها شارژ یا دشارژ می‌شوند. مسئله دیگر، شارژ و دشارژ نشدن به دلیل حداکثر قیمت شارژ (توقف شارژ در صورت بالاتر بودن قیمت از این مقدار) و حداقل قیمت دشارژ (توقف دشارژ در صورت پایین‌تر بودن قیمت از این مقدار) است؛ بنابراین، تعداد ساعات شارژ یا دشارژ متغیر خواهد بود. به علت ظرفیت خطوط و اثرات سوء فروش بیش از حد انرژی، محدودیت فروش به وجود می‌آید. توان تبدیلی ایستگاه با شبکه در حالت شارژ (دشارژ) در هر ساعت از مجموع توان خرید (فروش) خودروها به دست آمده و از حداکثر توان جذبی و تزریقی کمتر است.

$$\sum_{i=1}^{N_y} P_{\text{Bought}}^{i,t} \leq P_{\text{Net2Station}}^{\text{Max}} \quad \sum_{i=1}^{N_y} P_{\text{Exp-Buy}}^{i,t} \leq P_{\text{Net2Station}}^{\text{Max}} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_y} P_{\text{Sold}}^{i,t} \leq P_{\text{Station2Net}}^{\text{Max}} \quad \sum_{i=1}^{N_y} P_{\text{Exp-Sale}}^{i,t} \leq P_{\text{Station2Net}}^{\text{Max}} \quad (7)$$

محدودیت دیگری با عنوان انرژی ذخیره شده در باتری مورد ملاحظه در فرایند بهینه‌سازی خواهد بود. این محدودیت، حداکثر توان قابل شارژ و دشارژ (قابل خرید و فروش) تک تک خودروهای موجود در ایستگاه را بیان می‌کند.

$$P_{\text{Bought}}^{i,t} \leq P_{\text{Charge}}^{\text{Max}} \quad P_{\text{Exp-Buy}}^{i,t} \leq P_{\text{Charge}}^{\text{Max}} \quad (8)$$

$$P_{\text{Sold}}^{i,t} \leq P_{\text{Discharge}}^{\text{Max}} \quad P_{\text{Exp-Buy}}^{i,t} \leq P_{\text{Discharge}}^{\text{Max}} \quad (9)$$

مسئله دیگر در بهینه‌سازی، سطح شارژ درخواستی خودروهاست. هنگامی که خودرو با شارژ اولیه کم وارد ایستگاه می‌شود به افزایش سطح شارژ تمایل دارد؛ بنابراین، حد بالاتر یا ماکزیمم شارژ مورد نیاز در زمان خروج را اعلام می‌کند. از سوی دیگر، هنگامی که خودرو با سطح شارژ بالا

یک تبدیل می‌شود. سپس در هر سطح، افزایش  $\Gamma$  درصدی مدل‌سازی می‌شود.

$$P_{Bus} = \frac{P_{Bus}}{(1+r)^{N_{level}-1}} \quad (17)$$

$$P_{Bus} = P_{Bus} \times (1+r)^{i_{level}-1} \quad (18)$$

## ۲-۲- روش حل مسئله

### ۲-۲-۱- برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها

#### • حداکثرسازی سود خودروها

بر این اساس، مسئله بهینه‌سازی برای هر یک از خودروها (با هدف کمینه‌سازی هزینه پرداختی به ایستگاه) مطابق شکل (۱) حل می‌شود. این مسئله قبل از برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ایستگاه به منزله بهینه‌سازی مرحله اول اجرا می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی سود V2G در شکل (۱) ارائه شده است.

#### • حداکثرسازی سود ایستگاه شارژ

الگوریتم برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ ایستگاه در شکل (۲) ارائه شده است. متغیر تصمیم در فرایند بهینه‌سازی، متغیر پیوسته  $N_V \times 24$  تعریف می‌شود (P) که هر سطر به ترتیب به هر یک از  $N_V$ ، مرتبط و بیان‌کننده میزان توان تبدیلی هر خودرو با ایستگاه است. زیرالگوریتم محاسبه سود ایستگاه مطابق روابط (۱-۵) است.

بر اساس برآزندگی به دست آمده در زیرالگوریتم ارائه شده، فرایند بهینه‌سازی ژنتیک انجام می‌گیرد. نتیجه الگوریتم‌های شکل (۱) و (۲)، ارائه برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروهای موجود در ایستگاه در بازه زمانی ۲۴ ساعت خواهد بود.

همچنین، بیشترین مقدار انحراف ولتاژ در شین‌ها در ۲۴ ساعت متناسب با مرحله مطالعه (شماره سناریوی کاهش یافته، سطح قیمت برق و سطح بار ایستگاه) از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\Delta V_{(i_{level}, i_{price}, i_{scenario})} = \max(1 - V^t) \quad (13)$$

$$t = \{1, \dots, 24\}$$

هزینه تلفات سالانه در هر سطح بار از مجموع ضرب هزینه هر سناریو در احتمال رخدادش محاسبه می‌شود. سپس میزان تلفات انرژی در هر سال براساس میزان تورم سالانه  $k$  به ارزش خالص آینده در سال آخر تبدیل می‌شود تا معیار مناسبی برای مقایسه هزینه تلفات کلی مسئله ارائه شود.

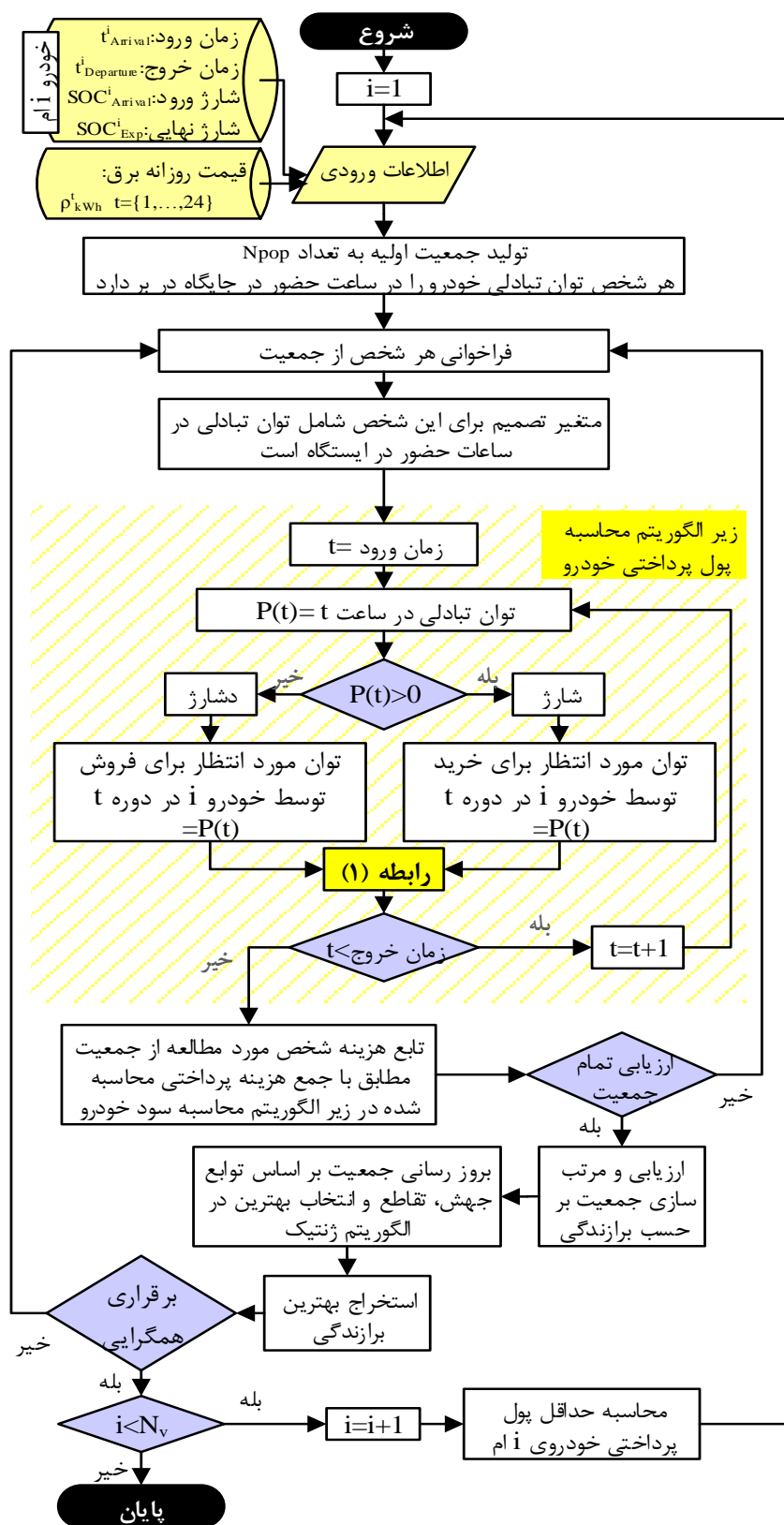
$$\Psi = \left( \frac{365}{N_{price}} \right) \times \sum_{i_p=i_{price}}^{N_{price}} \left( \sum_{i_{Rs}=i_{scenario}}^{N_{scenario}} (prob_{(i_t, i_p, i_s)} \times Loss_{(i_t, i_p, i_s)}) \right) \quad (14)$$

$$Loss_{NFV} = \sum_{i_t=i_{level}}^{N_{level}} \left( \Psi \times \sum_{j=1}^{N_y} ((1+k)^{(N_{level}-i_t-1) \times N_y - j}) \right) \quad (15)$$

بیشترین انحراف ولتاژ در کل از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\Delta V_{Max} = \max(\Delta V_{(1:N_{level}, 1:N_{price}, 1:N_{scenario})}) \quad (16)$$

همچنین، بار شبکه در هر دوره  $N_y$  ساله به اندازه  $\Gamma$  درصد افزایش دارد. برای انجام مطالعات روی شبکه و ملاحظه میزان افزایش بار، فرض بر رسیدن بار شبکه در سطح  $N_{level}$  ام به مقدار بار استاندارد است. بر اساس این با استفاده از رابطه (۱۷)، بار استاندارد به مقدار بار در سطح



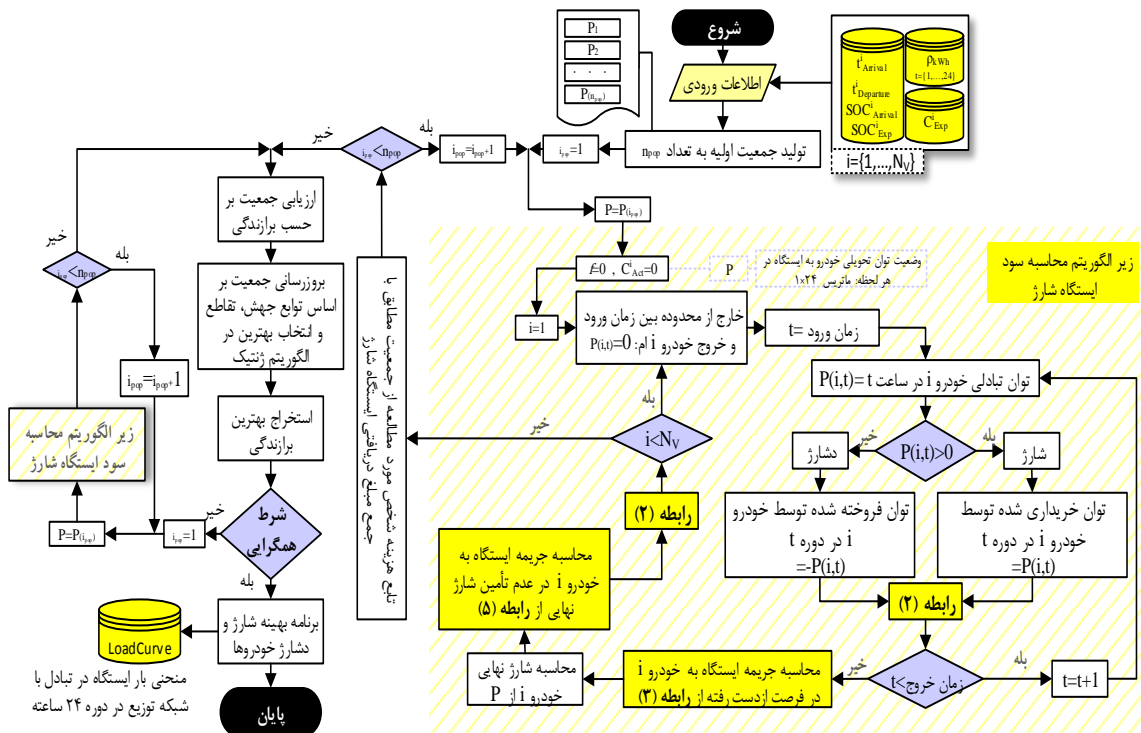
شکل (۱): محاسبه حداکثر سود مورد انتظار خودروها

۲-۲-۲- تولید برنامه حضور خودروها در ایستگاه

در این مقاله، فرض عدم قطعیت در بار ایستگاه شامل شارژ درخواستی، تعداد خودروها در هر ساعت و زمان انتظار است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از شبیه‌سازی آماری استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا تابع توزیع احتمالات عدم قطعیت‌ها تعیین می‌شود. در مرحله بعد، ابتدا تعداد تکرار شبیه‌سازی، تعیین و سپس برای محاسبه توزیع متغیر تصادفی خروجی اجرا می‌شود. روند شبیه‌سازی اطلاعات حضور  $N_V$  خودرو در ایستگاه با بررسی توزیع احتمالاتی بین متغیرهای یک ایستگاه نمونه (استخراج شده از آمارهای میدانی) در شکل (۳) ارائه شده است. توابع ارائه در شکل، بر اساس دستورات نرم‌افزار MATLAB هستند.

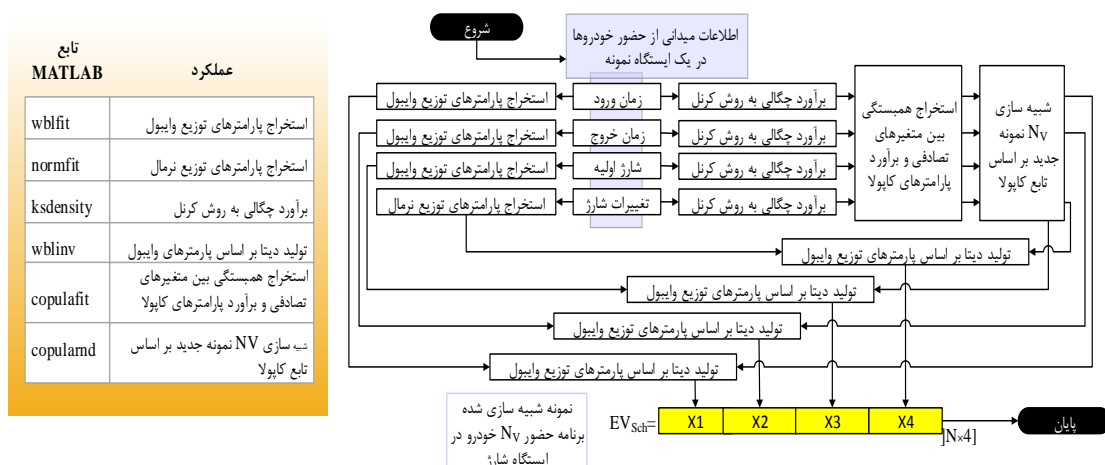
۲-۲-۳- مطالعه اثر ایستگاه شارژ بر شبکه توزیع

حضور خودروها در ساعات مختلف در شرایط متنوع قیمت برق و سطح بار شبکه به نتایج مختلفی در بارگذاری ایستگاه بر شبکه منجر می‌شود. الگوریتم تولید بارهای معادل ایستگاه و احتمال رخداد آن در تبادل با شبکه در سطوح مختلف قیمت برق و بار ایستگاه در شکل (۴) ارائه شده است که شامل تعداد خودروها در هر دوره است. مطابق شکل، سناریوهای مختلفی از حضور خودروها در ایستگاه در سطوح مختلف قیمت برق تولید می‌شوند. هریک از سناریوهای تولیدی به الگوریتم استخراج برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه (شکل (۲)) اعمال می‌شوند؛ بنابراین، خروجی هر برنامه حضور و قیمت بازار، منحنی بار ۲۴ ساعت ایستگاه خواهد بود. به منظور ملاحظه عدم قطعیت در برنامه حضور خودروها، تعداد  $N_{scenario}$  سناریو تولید می‌شود و در نتیجه تعداد  $N_{scenario}$  منحنی بار در اختیار خواهد بود.

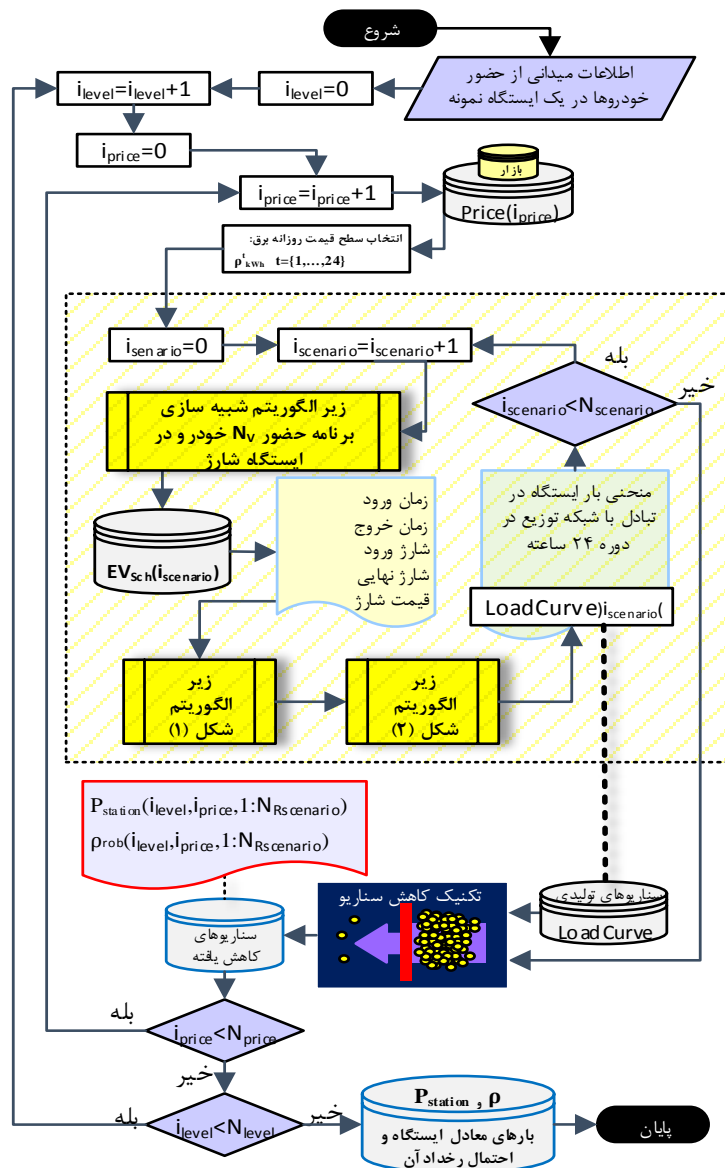


شکل (۲): بهینه‌سازی برنامه شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه به منظور حداکثرسازی سود ایستگاه





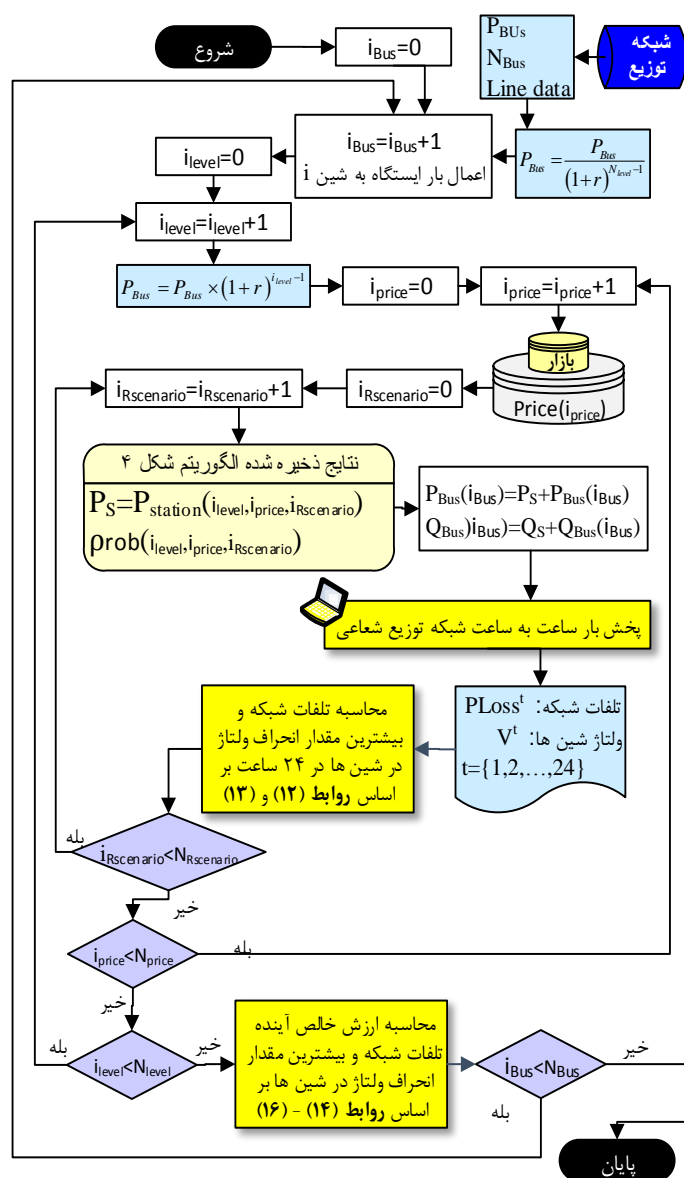
شکل (۳): روند شبیه‌سازی اطلاعات حضور N خودرو در ایستگاه شارژ از روی اطلاعات میدانی یک ایستگاه نمونه



شکل (۴): الگوریتم تولید بارهای معادل ایستگاه شارژ با ملاحظه عدم قطعیت در تعداد خودروها در ایستگاه

شبکه با حضور ایستگاه در شین های مختلف با ملاحظه تغییر سطح بار شبکه و ایستگاه توأم با میزان تورم در دوره های مطالعه شده (پیاده سازی بخش ۲-۱-۲) در شکل (۵) ارائه شده است.

باتوجه به تعدد سناریوهای تولیدی، با الگوریتم کاهش سناریو،  $N_{Rscenario}$  سناریو از روی  $N_{scenario}$  منحنی بار ایستگاه به همراه احتمال رخداد هر سناریو ( $\rho_{rob}$ ) استخراج می شود. در نهایت، فلوچارت محاسبه میزان تلفات



شکل (۵): الگوریتم اعمال بارهای معادل ایستگاه به شبکه توزیع

اطلاعات حضور  $N$  خودرو در ایستگاه شارژ از روی اطلاعات میدانی یک ایستگاه نمونه در شکل (۳) شبیه سازی می شود. در این الگوریتم، سناریوهای مختلفی از حضور خودرو در ایستگاه تولید می شوند. پردازش نهایی اطلاعات در الگوریتم شکل (۵) صورت می گیرد؛ اما باید الگوریتم

### ۲-۲-۴- ارتباط بین بخش های الگوریتم پیشنهادی

قسمت های مختلف الگوریتم پیشنهادی در بخش قبل به تفصیل شرح داده شد. ارتباط بین بخش های مختلف الگوریتم کلی به شرح ذیل است.

با استفاده از نمونه‌گیری از توابع توزیع احتمال متناظر با متغیرهای تصادفی، اطلاعات ورودی، تأمین و بار ایستگاه محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه زمان ورود و خروج و میزان شارژ درخواستی قطعیت ندارند باید از طریق توابع توزیع احتمال معرفی شوند.

برای ایجاد ورودی تصادفی، تابع توزیع احتمال برای متغیرهای تصادفی ایجاد می‌شود. برای استفاده از توابع توزیع چندمتغیره، ابتدا به اطلاعات واقعی برای محاسبه درجه همبستگی بین توابع نیاز است. اطلاعات ایستگاه و زمان ورود و خروج خودروها از منبع [۱۸] گرفته شده است. تمامی خودروها از نوع تویوتا با ظرفیت نامی ۵۰ kw و شارژ اولیه در محدوده ۷/۵ kw تا ۵۰ kw لحاظ شده‌اند. تعداد خودرو در ایستگاه در چهار سطح به ترتیب برابر ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ در روز است. جدول (۱) اطلاعات شبیه‌سازی شده ایستگاه در سطح ۱ را نشان می‌دهد. زمان رسیدن به ایستگاه به‌طور تصادفی بین ۶ تا ۲۲ و زمان خروج خودروها بین ساعات ۷ تا ۲۴ است.

شکل (۴) و شکل‌های (۱) و (۲) به‌منزله مرحله پیش‌پردازش اجرا شوند. روند کار به این صورت است که سناریوهای تولیدی توسط الگوریتم شکل (۳) به الگوریتم‌های ارائه‌شده در شکل (۱) و (۲) اعمال می‌شوند. نتیجه این فرایند، بار معادل ایستگاه در هر سناریو و قیمت برق و سطح بار است. سپس در الگوریتم شکل (۴) بارهای معادل ایستگاه در سناریوهای مختلف براساس الگوریتم کاهش سناریو به سناریوهای اصلی کاهش می‌یابند. درنهایت، بارگذاری ایستگاه در سناریوهای کاهش‌یافته در الگوریتم شکل (۵) به شبکه توزیع، اعمال و براساس روابط مربوطه، ارزش تلفات در افق زمانی محاسبه می‌شود.

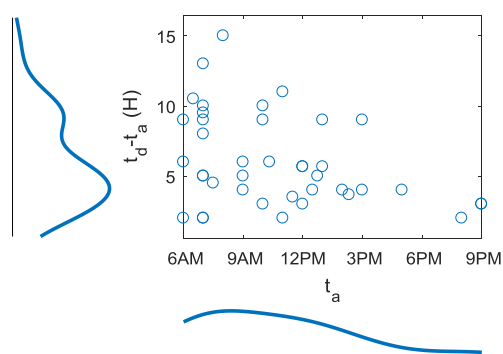
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

#### ۳-۱- برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها

نخستین مرحله از شبیه‌سازی اثر ایستگاه، گرفتن برنامه حضور خودروها براساس مدل آماری است. در هر منطقه، توابع توزیع احتمال مربوطه به متغیرها و رابطه بین متغیرهای مختلف از طریق نمونه‌ای از اطلاعات کوچک معلوم است.

جدول (۱): اطلاعات شبیه‌سازی شده ۴۰ خودرو در ایستگاه شارژ

شارژ (kW)					شارژ (kW)				
زمان		شارژ (kW)			زمان		شارژ (kW)		
ردیف	ورود	خروج	ورود	خروج	ردیف	ورود	خروج	ورود	خروج
۱	۷	۱۷	۱۳	۸	۲۱	۷	۹	۵۰	۲۰
۲	۶	۸	۱۶	۱۳	۲۲	۹	۱۴	۱۶	۳۸
۳	۱۰	۱۹	۲۲	۱۰	۲۳	۱۴	۱۸	۳۸	۳۵
۴	۱۰	۲۰	۳۳	۱۷	۲۴	۱۴	۱۸	۲۳	۳۲
۵	۸	۲۳	۱۷	۱۵	۲۵	۱۰	۱۶	۱۱	۲۱
۶	۷	۹	۱۰	۲۶	۲۶	۶	۱۲	۲۱	۱۶
۷	۷	۱۶	۲۳	۹	۲۷	۷	۱۷	۵۰	۶
۸	۱۳	۱۷	۲۳	۴۰	۲۸	۷	۱۷	۲۵	۱۰
۹	۷	۲۰	۲۴	۲۰	۲۹	۷	۱۲	۳۰	۱۴
۱۰	۱۲	۱۵	۵۰	۷	۳۰	۱۲	۱۸	۱۰	۴۱
۱۱	۱۲	۱۵	۳۲	۲۰	۳۱	۶	۱۵	۲۲	۳۰
۱۲	۷	۱۵	۲۶	۳۶	۳۲	۹	۱۵	۱۹	۱۶
۱۳	۱۱	۲۲	۲۰	۲۹	۳۳	۱۵	۱۹	۲۵	۱۳
۱۴	۲۱	۲۴	۱۰	۴۶	۳۴	۸	۱۲	۴۰	۱۳
۱۵	۱۳	۱۹	۱۳	۲۸	۳۵	۲۰	۲۲	۳۷	۴۱
۱۶	۱۲	۱۸	۱۷	۲۴	۳۶	۱۰	۱۳	۱۱	۳۸
۱۷	۹	۱۳	۲۶	۳۰	۳۷	۱۵	۲۴	۲۳	۲۲
۱۸	۱۳	۱۸	۳۲	۲۵	۳۸	۲۱	۲۴	۱۳	۳۱
۱۹	۱۱	۱۳	۲۹	۵	۳۹	۱۳	۲۲	۲۶	۲۸
۲۰	۷	۱۲	۴۰	۲۲	۴۰	۱۷	۲۱	۴۹	۴۰

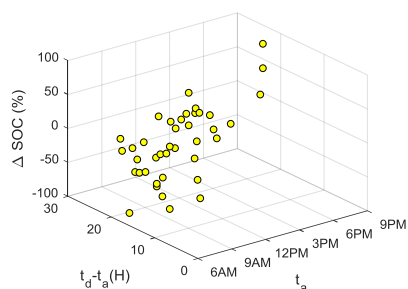


شکل (۶): توزیع زمان ورود به مدت حضور

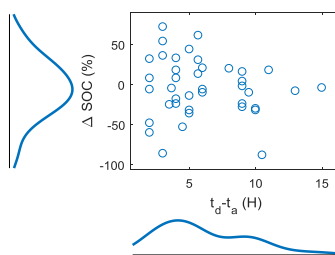
پردازنده ۲ گیگاهرتزی (intel core i7) و حافظه ۸ گیگابایتی از مشخصات سخت‌افزاری کامپیوتر استفاده شده برای شبیه‌سازی است. برای پیاده‌سازی روابط از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. باتوجه به قابلیت MATLAB در پردازش موازی در پردازنده‌های چند هسته‌ای از دستورات پردازش موازی برای جستجوی سریع‌تر استفاده شده است.

مطابق الگوریتم شکل (۱)، باتوجه به قیمت برق و فرصت حضور خودرو، مقدار بهینه تراکنش توان به منظور کمینه‌سازی پول پرداختی خودرو به ایستگاه شارژ محاسبه می‌شود. بر اساس این، منحنی همگرایی هزینه پرداختی هریک از خودروهای نمونه جدول (۱) مطابق شکل (۱۱-الف) حل می‌شود

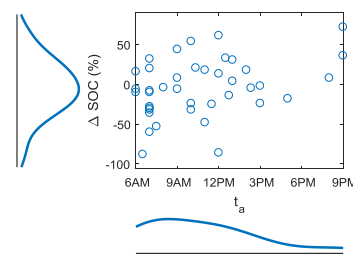
توزیع آماری متناظر با زمان ورود به مدت حضور خودرو و درصد شارژ درخواستی در شکل (۶) و (۷) ارائه شده‌اند. همچنین، توزیع آماری مدت زمان حضور خودرو در ایستگاه و درصد شارژ درخواستی به زمان ورود در شکل (۸) ارائه شده است. تابع توزیع احتمال زمان ورود و مدت زمان حضور خودرو در ایستگاه به تغییرات شارژ هنگام خروج نسبت به زمان ورود در شکل (۹) ارائه شده است. یکی از ورودی‌های اصلی برای تصمیم‌گیری، قیمت برق در بازار است. بر اساس این، آمار ساعتی برق در بازار Ontario در سال ۲۰۱۷، اطلاعات ورودی، انتخاب و با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی، سه سطح قیمتی مطابق شکل (۱۰) استخراج می‌شود. پس از تولید ورودی‌های مسئله، شامل تعداد و برنامه حضور خودروها در ایستگاه شارژ و قیمت ۲۴ برق در بازار، نتایج الگوریتم‌های شکل (۱) و (۲) با اجرای شبیه‌سازی‌های کامپیوتری ارائه می‌شوند. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با تکرار ۳۰۰ و جمعیت ۵۰ انجام شده است.



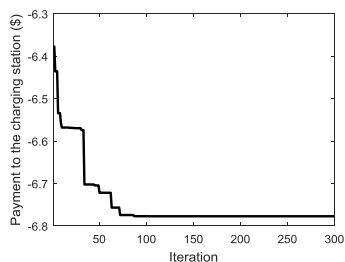
شکل (۹): توزیع زمان ورود و حضور به تغییرات شارژ



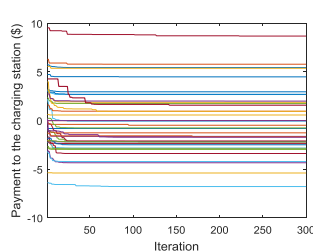
شکل (۸): توزیع مدت حضور به تغییرات شارژ



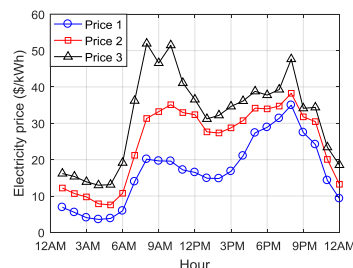
شکل (۷): توزیع زمان ورود به تغییرات شارژ



ب: خودروی ردیف ۲۷ از جدول (۱)



الف: خودروهای نمونه جدول (۱)



شکل (۱۰): سطوح قیمت برق در بازار

شکل (۱۱): منحنی همگرایی هزینه پرداختی

ایستگاه شارژ به‌ازای برنامه‌ریزی بهینه جدول (۲) در شکل (۱۲) ارائه شده است. پول پرداختی موردانتظار خودروها به ایستگاه در مقایسه با پول واقعی پرداخت‌شده هر خودرو در شکل (۱۳) ارائه شده است.

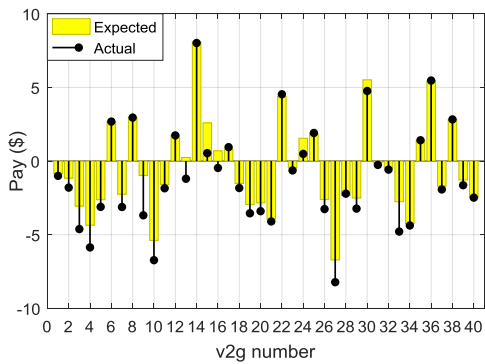
مطابق برنامه‌ریزی، پول پرداختی خودروها از مقدار موردانتظار کمتر است. در مقادیر منفی (فروش انرژی خودرو به ایستگاه) نیز سود واقعی از سود انتظاری بیشتر است. مجموع توان‌های تبادلی ایستگاه با خودروها در هر ساعت بیان‌کننده بار معادل ایستگاه است. بر اساس این، می‌توان بار معادل ایستگاه با خودروهای نمونه جدول (۱) را مطابق شکل (۱۴) محاسبه کرد. مقادیر منفی بیان‌کننده تزریق توان از ایستگاه به شبکه است.

در شکل (۱۱-ب)، منحنی همگرایی هزینه پرداختی خودروی ردیف ۲۷ در جدول (۱) ارائه شده است. خودروی مدنظر در ساعات حضور خود در ایستگاه شارژ، درخواست ۲۲ kW شارژ را دارد. این درخواست در کمینه‌ترین شرایط میزان پرداخت خودرو به ایستگاه، برابر ۶/۷ دلار محاسبه شده است. پس از محاسبه حداکثر سود موردانتظار خودروها با نتایج شکل (۱۱)، بهینه‌سازی برنامه شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه اجرا می‌شود. نتیجه برنامه‌ریزی بهینه ۴۰ خودروی نمونه در جدول (۲) ارائه شده است. مقادیر جدول (۲)، میزان شارژ دریافتی هر یک از خودروها را در هر ساعت نشان می‌دهد. مقادیر منفی بیان‌کننده دشارژ خودروهاست. منحنی همگرایی سود

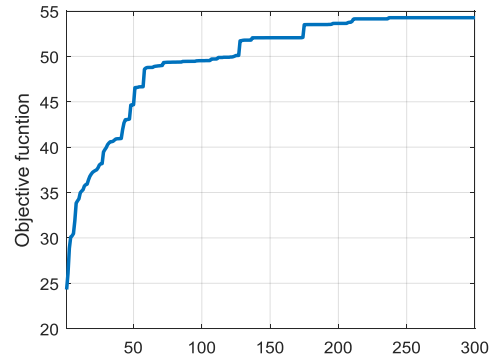
جدول (۲): برنامه‌ریزی بهینه ۴۰ خودروی نمونه

ردیف	ساعت																	
	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳
۱	۰	۰	-۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲۰	-۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	-۲۵	-۸	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱۲	۰	-۲۱	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۲۵	۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱۸	۰	۰	-۱۷	۰	۰	۰
۶	۰	۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۷	۰	۰	-۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	-۲۵	-۴	-۱	۰	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۲۵	-۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۲۱	۰	۰	۰
۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۳	۱۵	۲۵
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۱۲	۰	۰	-۱۳	-۹	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۰	۸	۰	۰	-۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰

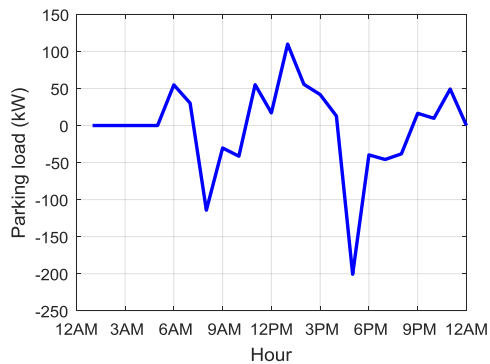
۱۹	.	.	.	.	.	.	.	-۲۲	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۰	.	-۴	-۱۴	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۱	.	-۱۵	-۱۰	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۲	.	.	.	.	.	.	۲۲	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-۲	.	.	.	.	.	.	.
۲۴	.	.	.	.	.	.	.	.	۱۰	۱۷	.	-۱۷	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۵	.	.	.	.	.	.	۹	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۶	۲۵	۴	.	-۲۵	-۱۸	۱۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۷	.	-۳	-۱۴	-۲	-۲۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۸	.	۲۵	-۲۵	-۱۸	.	.	۱۰	۱۵	-۲۵	۶	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۲۹	.	.	۱۶-	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۰	.	.	.	.	.	.	.	۲۲	۱۳	۵	.	-۹	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۱	۱۰	۱۸	-۲۵	.	-۱۸	.	.	.	.	۲۵	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۲	.	.	.	.	-۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۳	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-۱۸	.	.	.	.	.	.	.
۳۴	.	.	۱۱	-۱۱	-۱۱	-۱۴	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۵	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۴	.
۳۶	.	.	.	.	۳	.	۲۴	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۷	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱۴	۱۳	.	-۱۹	-۲۴	.	۱۵	.	.	.	.
۳۸	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-۶	۲۴
۳۹	.	.	.	.	.	.	.	۲۵	.	.	.	.	-۲۱	-۱	.	.	.	.	.	.
۴۰	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-۹	.	.	.	.	.	.	.



شکل (۱۳): پول پرداختی خودروها به ایستگاه



شکل (۱۲): منحنی همگرایی برای سود ایستگاه شارژ

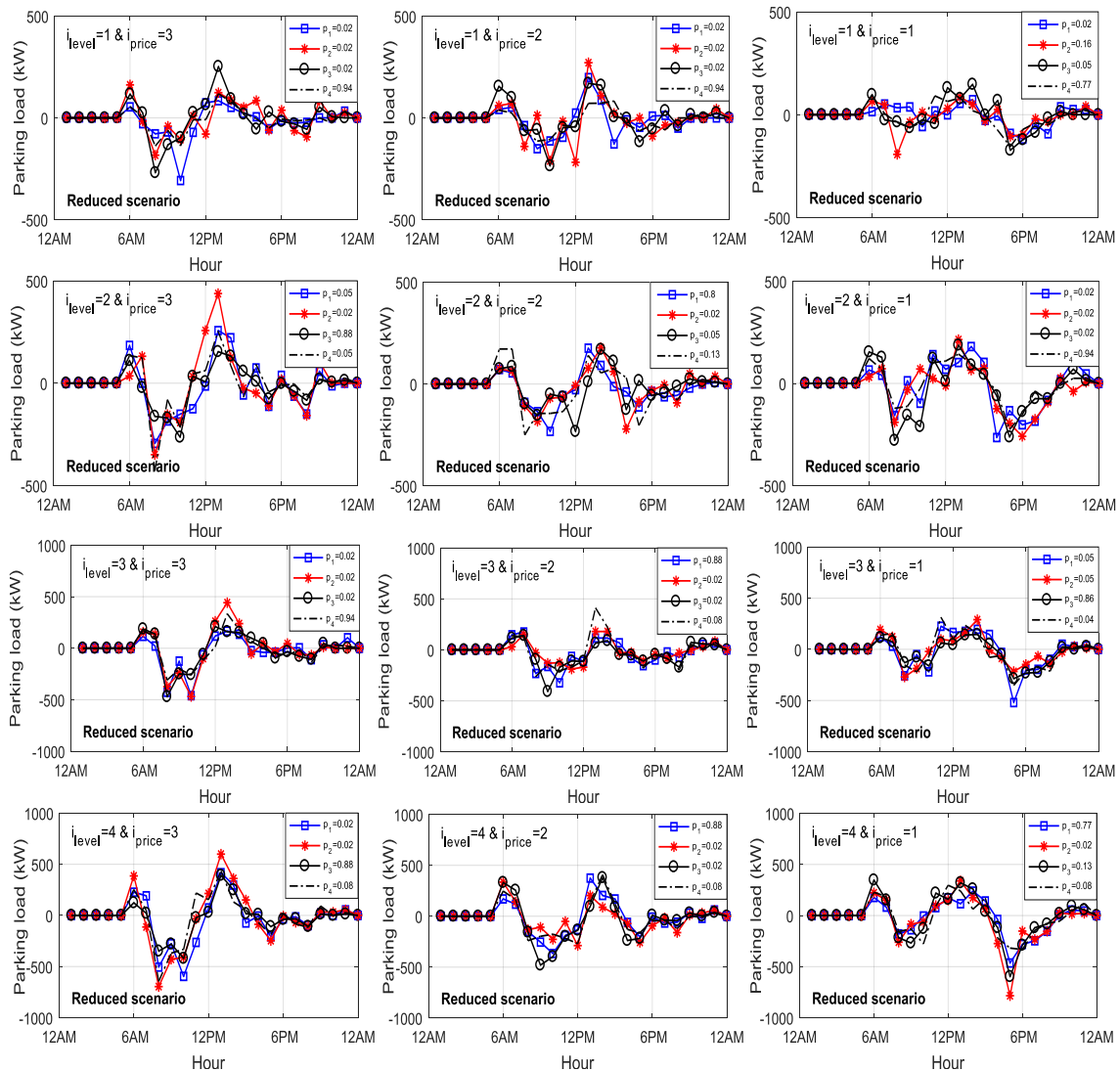


شکل (۱۴): منحنی بار ایستگاه برای خودروهای جدول (۱)

### ۲-۳- شبیه‌سازی اثر ایستگاه بر شبکه توزیع

#### ۱-۲-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت در بار ایستگاه

در این بخش، عدم قطعیت در تعداد، زمان ورود و خروج و شارژ درخواستی خودروها همراه با ملاحظه سه سطح قیمت برق (شکل (۱۰)) بر شبکه بررسی می‌شود. بر اساس این، به‌زای چهار سطح بار (ارائه‌شده در بخش ۱-۳) و سه سطح قیمتی که در مجموع ۱۲ حالت است، ۴۰ سناریو شبیه‌سازی می‌شود. نتیجه برنامه‌ریزی بهینه برای هر سناریو، منحنی ۲۴ ساعته بار ایستگاه است. بر اساس شکل (۴)، ۴۰ سناریوی تولیدشده در هر حالت به

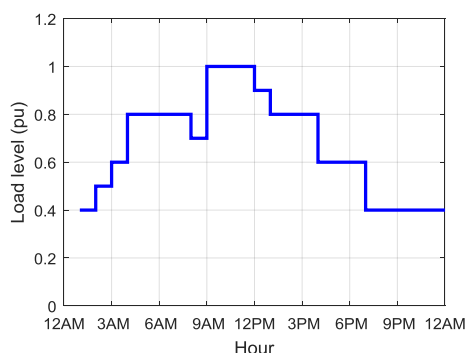


شکل (۱۵): سناریوهای محتمل به تفکیک سطح بار و قیمت

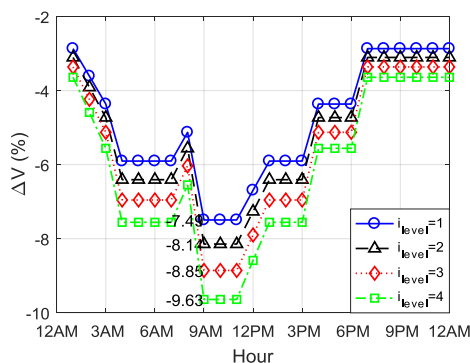
چهار سناریو کاهش می‌یابند. انتخاب تعداد سناریوهای کاهش‌یافته به پراکندگی منحنی‌های بار بستگی دارد. با توجه به اینکه تولید سناریوها (برنامه حضور خودروها) بر اساس توزیع آماری مشخص است، شباهت نسبی بین سناریوها مشاهده نشده است و افزایش سناریوهای کاهش‌یافته در تنوع کلاسترها تفاوت چندانی ندارد. با بررسی نتایج الگوریتم کاهش سناریو، تعداد چهار سناریو مدنظر قرار گرفته است. سناریوهای تولیدی به تفکیک سطح بار و قیمت در شکل (۱۵) ارائه شده‌اند.

### ۳-۲-۲- شبیه‌سازی اثر ایستگاه شارژ بر شبکه

تورم سالانه ۱۰٪ نشان می‌دهد. نسبت ارزش آینده تلفات به انرژی کل برابر ۴/۳۶٪ است. نتیجه اعمال بارهای معادل به شبکه، محاسبه ارزش تلفات در هر دوره و ارزش آینده تلفات در انتهای دوره در جدول (۴) درج شده است. برای مقایسه بارگذاری ایستگاه در شین‌ها، ارزش آینده تلفات، انرژی کل مبادله‌ای شبکه و بیشترین مقدار افت ولتاژ شین‌ها در جدول (۵) آمده است.



شکل (۱۶): منحنی بار روزانه شبکه



شکل (۱۷): افت ولتاژ شبکه بدون اعمال بار ایستگاه

در این بخش، اثر ایستگاه با عدم قطعیت بار آن بر شبکه توزیع ۳۳ شین IEEE بررسی می‌شود. سناریوهای شکل (۱۵) به‌منزله بارهای معادل ایستگاه براساس الگوریتم شکل (۵) به شین‌های شبکه اعمال می‌شوند. بار پایه شبکه بدون حضور خودروها از ۸۰٪ بار شبکه استاندارد آغاز می‌شود و در هر سطح به میزان ۸٪ تا چهار سطح افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی‌ها براساس اجرای پخش بار پس‌رو - پیش‌رو با اعمال بار ایستگاه به هر شین شبکه در سطوح مختلف بار و قیمت و محاسبه هزینه تلفات در هر حالت صورت گرفته است. به‌ازای قرارگیری بار معادل (شکل (۱۵)) در شین‌ها، ارزش آینده تلفات در هر سطح بار محاسبه می‌شود. در نهایت، ارزش تلفات در انتهای دوره مطالعه، معیاری برای مقایسه بارگذاری ایستگاه در شبکه است. به‌منظور مدل‌سازی بار روزانه شبکه، منحنی شکل (۱۶)، ضریبی در بار شبکه استفاده شده است. یکی از معیارهای بررسی اثر ایستگاه بر شبکه توزیع، شاخص افت ولتاژ است. پیش از اعمال بار ایستگاه به شبکه توزیع، پخش بار روی شبکه استاندارد در سطوح بار انجام شده و افت ولتاژ ( $\Delta V$ ) در ۲۴ ساعت مطابق شکل (۱۷) به دست آمده است. مطابق شکل، شبکه استاندارد در سطوح بار، بیشترین افت ولتاژ از ۷/۴۹٪ تا ۹/۶۳٪ را دارد. نتیجه پخش بار شبکه در چهار سطح بار، تلفات کل و انرژی کل تبدیلی در ابتدای فیدر را در اختیار قرار می‌دهد. جدول (۳) هزینه تلفات و انرژی مبادله‌ای شبکه بدون اعمال بار ایستگاه در هر دوره به همراه ارزش آینده هر دوره (در انتهای چهار دوره) را با میزان

جدول (۳): هزینه تلفات در چهار سطح بار بدون بار ایستگاه

پارامتر	تلفات سطح ۱		تلفات سطح ۲		تلفات سطح ۳		تلفات سطح ۴	
	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده
تلفات	۱۷۱	۳۰۴	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۱	۲۸۱	۲۸۱
انرژی کل	۴۴۲۵	۷۸۳۹	۴۷۹۶	۷۰۲۲	۵۱۹۹	۶۲۹۱	۵۶۳۹	۵۶۳۹
ارزش آینده تلفات کل			۱۱۶۸					
ارزش آینده انرژی کل			۲۶۷۹۱					

\* مقادیر به ۱۰۰۰ دلار می‌باشند



جدول (۴): هزینه تلفات در چهار سطح بار

شین	تلفات سطح ۱		تلفات سطح ۲		تلفات سطح ۳		تلفات سطح ۴	
	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده	ارزش دوره	ارزش آینده
۱	۱۷۱	۳۰۴	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۸	۲۸۱	۲۸۱
۲	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۷	۲۸۰	۲۸۰
۳	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۱	۲۹۴	۲۳۶	۲۸۶	۲۷۹	۲۷۹
۴	۱۷۱	۳۰۲	۲۰۰	۲۹۳	۲۳۶	۲۸۵	۲۷۸	۲۷۸
۵	۱۷۰	۳۰۲	۲۰۰	۲۹۳	۲۳۵	۲۸۴	۲۷۷	۲۷۷
۶	۱۷۰	۳۰۱	۱۹۹	۲۹۱	۲۳۳	۲۸۲	۲۷۵	۲۷۵
۷	۱۷۰	۳۰۰	۱۹۹	۲۹۱	۲۳۳	۲۸۲	۲۷۵	۲۷۵
۸	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۱	۲۳۳	۲۸۲	۲۷۵	۲۷۵
۹	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۰	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۱	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۲	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۳	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۴	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۵	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۱۶	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۵	۲۷۵
۱۷	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۲	۲۸۱	۲۷۵	۲۷۵
۱۸	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۳	۲۸۱	۲۷۵	۲۷۵
۱۹	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۷	۲۸۰	۲۸۰
۲۰	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۸	۲۸۱	۲۸۱
۲۱	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۸	۲۸۱	۲۸۱
۲۲	۱۷۱	۳۰۳	۲۰۲	۲۹۵	۲۳۸	۲۸۸	۲۸۱	۲۸۱
۲۳	۱۷۰	۳۰۰	۱۹۹	۲۹۱	۲۳۳	۲۸۲	۲۷۵	۲۷۵
۲۴	۱۶۹	۳۰۰	۱۹۸	۲۹۰	۲۳۳	۲۸۱	۲۷۴	۲۷۴
۲۵	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۸	۲۸۹	۲۳۱	۲۸۰	۲۷۳	۲۷۳
۲۶	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲
۲۷	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲
۲۸	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲
۲۹	۱۶۸	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲
۳۰	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲
۳۱	۱۶۹	۲۹۹	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۸	۲۷۲	۲۷۲
۳۲	۱۶۸	۲۹۸	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۸	۲۷۲	۲۷۲
۳۳	۱۶۸	۲۹۸	۱۹۷	۲۸۸	۲۳۰	۲۷۹	۲۷۲	۲۷۲

\* مقادیر به ۱۰۰۰ دلار هستند.

جدول (۵): ارزش آینده تلفات و انرژی کل

شین	ارزش تلفات	ارزش انرژی	نسبت تلفات به انرژی (%)	بیشینه افت ولتاژ (%)
۱	۱۱۶۷	۲۶۷۹۱	۴/۳۵۷	۹/۶۴
۲	۱۱۶۶	۲۶۴۰۰	۴/۴۱۸	۹/۶۵
۳	۱۱۶۲	۲۶۳۹۶	۴/۴۰۲	۹/۷۱
۴	۱۱۵۹	۲۶۳۹۲	۴/۳۹۰	۹/۷۶
۵	۱۱۵۵	۲۶۳۸۹	۴/۳۷۹	۹/۸۱
۶	۱۱۴۹	۲۶۳۸۲	۴/۳۵۴	۹/۹۲
۷	۱۱۴۸	۲۶۳۸۲	۴/۳۵۲	۹/۹۲
۸	۱۱۴۷	۲۶۳۸۱	۴/۳۴۸	۹/۹۲
۹	۱۱۴۶	۲۶۳۸۰	۴/۳۴۴	۹/۹۳
۱۰	۱۱۴۵	۲۶۳۷۹	۴/۳۴۱	۹/۹۳

۱۱	۱۱۴۵	۲۶۳۷۹	۴/۳۴۰	۹/۹۳
۱۲	۱۱۴۵	۲۶۳۷۸	۴/۳۴۰	۹/۹۳
۱۳	۱۱۴۴	۲۶۳۷۸	۴/۳۳۸	۹/۹۴
۱۴	۱۱۴۴	۲۶۳۷۸	۴/۳۳۸	۹/۹۴
۱۵	۱۱۴۴	۲۶۳۷۸	۴/۳۳۹	۹/۹۴
۱۶	۱۱۴۵	۲۶۳۷۹	۴/۳۴۰	۹/۹۴
۱۷	۱۱۴۶	۲۶۳۷۹	۴/۳۴۳	۹/۹۸
۱۸	۱۱۴۶	۲۶۳۸۰	۴/۳۴۵	۱۰/۲۵
۱۹	۱۱۶۶	۲۶۴۰۰	۴/۴۱۸	۹/۶۵
۲۰	۱۱۶۷	۲۶۴۰۰	۴/۴۱۹	۹/۶۵
۲۱	۱۱۶۷	۲۶۴۰۰	۴/۴۱۹	۹/۶۵
۲۲	۱۱۶۷	۲۶۴۰۱	۴/۴۲۱	۹/۶۵
۲۳	۱۱۴۸	۲۶۳۸۱	۴/۳۵۰	۹/۹۴
۲۴	۱۱۴۶	۲۶۳۸۰	۴/۳۴۵	۹/۹۸
۲۵	۱۱۴۱	۲۶۳۷۵	۴/۳۲۷	۱۰/۱۳
۲۶	۱۱۳۸	۲۶۳۷۲	۴/۳۱۴	۱۰/۲۴
۲۷	۱۱۳۷	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۳	۱۰/۲۴
۲۸	۱۱۳۷	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۲	۱۰/۳۶
۲۹	۱۱۳۷	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۲	۱۰/۴۰
۳۰	۱۱۳۸	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۴	۱۰/۴۴
۳۱	۱۱۳۷	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۱	۱۰/۳۱
۳۲	۱۱۳۶	۲۶۳۷۰	۴/۳۰۹	۱۰/۴۲
۳۳	۱۱۳۷	۲۶۳۷۱	۴/۳۱۲	۱۰/۵۴

\* مقادیر ارزش آینده تلفات و انرژی کل به ۱۰۰۰ دلارند.

ایستگاه برای حداکثرسازی سود طرفین ارائه شد. در برنامه‌ریزی پیشنهادی، ایستگاه بهترین برنامه برای شارژ و دشارژ خودروها را به منظور حداکثرسازی سود خود برپایه الگوریتم ژنتیک استخراج کرده است. پس از این، مسئله عدم قطعیت در برنامه حضور خودروها، مطرح و سناریوهای متعددی برپایه سطوح مختلف بار ایستگاه و قیمت برق براساس شبیه‌سازی آماری تولید شد. هریک از سناریوها به بخش برنامه‌ریزی وارد شد و بار معادل ایستگاه در هر سناریو به دست آمد. در ادامه، سناریوها کاهش یافتند و بار معادل به شین‌های شبکه اعمال شدند. مقایسه اثر بارگذاری ایستگاه در شین‌ها برپایه هزینه تلفات و افت ولتاژ شین‌ها انجام شد. نتایج براساس ارزش آینده تلفات و انرژی مبادله‌ای شبکه براساس شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB روی شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE ارائه شدند. مطابق نتایج، برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ به کاهش ارزش تلفات به انرژی کل شبکه به‌ازای بارگذاری ایستگاه در برخی شین‌ها منجر شده است. همچنین، شاخص افت ولتاژ در شین‌ها در محدوده مجاز حفظ شده است.

سطرهای قرمز، نتایج کاهش ولتاژ بیشتر از ۱۰٪ به‌ازای بارگذاری ایستگاه در شین‌ها را نشان می‌دهد. سطرهای آبی، نتیجه بارگذاری را با نسبت ارزش آینده تلفات به انرژی کل کمتر از مقدار ۴/۳۶٪ (مقدار متناسب با نسبت مربوطه در شبکه استاندارد بدون بارگذاری ایستگاه) نشان می‌دهد. اثر بارگذاری ایستگاه در این شین‌ها به لحاظ هزینه تلفات و شاخص ولتاژ، مشابه است. در نهایت، شین‌های مربوطه برای بارگذاری ایستگاه پیشنهاد می‌شوند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر اتصال V2Gها به شبکه توزیع با ملاحظه سیستم‌های برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ برای حداکثرسازی سود اقتصادی خودروها و ایستگاه شارژ بررسی شد. ایستگاه در تعامل با شبکه، متأثر از برنامه‌ریزی خودروهای موجود بوده است. بار معادل ایستگاه از برنامه شارژ و دشارژ خودروها و این برنامه از توابع هدف اقتصادی تأثیر گرفته است. بر اساس این در بخش نخست مقاله، الگوریتم برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای موجود در

### ۵- فهرست علائم

### مراجع

[1] A.Y. Saber, G. k. vanayagamoorthy, "One million plug-in electric vehicles on the road by 2015", Intelligent Transportation System Conf, IEEE, 2009.	V2G	Vehicle-to-grid
[2] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-Grid fundamentals: Calculating capacity and net revenue", Journal of Power Sources, Vol. 144, No. 1, pp. 268-279, 2005.	SOC	State of charge
[3] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-Grid poer implementation: From stabilizing the grid to supporting Large-scale renewable energy", Journal of Power Source, Vol. 144, No. 1, pp.280-294, 2005.	$N_V$	تعداد کل V2G ها
[4] C. Guille, G. Gross, "Design of Conceptual Framework for the V2G Implementation", Energy 2030 Conference, IEEE, 2008.	$N_t$	تعداد کل دوره‌های زمانی
[5] E. Sortomme and M. A. El-Sharkawi, "Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid", "IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 2, No. 1, pp.131-138, 2010.	$\rho_{kWh}^i$	قیمت برق در دوره t
[6] S. Han and K. Sezaki, "Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation", IEEE Trans. Smart Grid Vol. 1, No. 1, pp. 65-72, 2010.	$P_{Bought}^{i,t}$	توان خریداری شده خودرو i در دوره t
[7] M. Abolfazli, et al., "A probabilistic method to model PHEV for participation in electricity market," ICEE, IEEE, 2011.	$P_{Sold}^{i,t}$	توان فروخته شده خودرو i در دوره t
[8] S. Jang, et al., "Optimal decision on contract size for V2G aggregator regarding frequency regulation", Optimization of electronic Equipment Conf, pp.54-62, IEEE, 2010.	$\alpha_{station}^{Sale}$	درصد سود ایستگاه به هنگام فروش توان به خودرو
[9] S. L. Andersson, et al., "Plug-in-Hybrid electric vehicles as regulating power providers: Case studies of Sweden and Germany," Energy Policy, Vol. 38, No. 6, pp. 2751-2762, 2010.	$\alpha_{station}^{Buy}$	درصد سود ایستگاه در خرید توان از خودرو
[10] W. Kempton and S. E. Letendre, "Electric vehicles as a new power source for electric utilities," Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 2, No. 3, pp. 157-175. 1997.	opportunity Penalty <sup>i</sup>	جریمه ایستگاه به خودرو i در فرصت ازدست رفته
[11] A. Karnama, "Analysis of integration of plug-in hybrid electric vehicles in the distribution grid." Master's thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2009.	$SOC_{Failure}^{Penalty}^i$	جریمه ایستگاه به خودرو i در عدم تأمین شارژ نهایی
[12] W. Kempton, et al., "Vehicle-to-Grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicle as resource for distributed electric power in California", 2001.	$P_{Exp-Buy}^{i,t}$	توان موردانتظار برای خرید با خودرو i در دوره t
[13] S. Inage, "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment," IEA Energy Papers, 2010.	$P_{Exp-Sale}^{i,t}$	توان موردانتظار برای فروش با خودرو i در دوره t
[14] A. Saber, G. K. Venayagamoorthy, "Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles," IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 1, 2012.	$C_{Exp}^i$	پول پرداختی موردانتظار خودرو i به ایستگاه
[15] N. Zhang, Z. Hu, X. Han, J. Zhang, Y. Zhou, "A fuzzy chance-constrained program for unit commitment problem considering demand response, electric vehicle and wind power" , Electrical Power & Energy Systems, Vol. 65, pp. 201-209, 2015.	$C_{Act}^i$	پول پرداختی خودرو i به ایستگاه در پایان روز
	$t_{Arrival}^i$	زمان ورود خودرو i به ایستگاه
	$t_{Departure}^i$	زمان خروج خودرو i از ایستگاه
	$\Delta t^i$	مدت زمان حضور خودرو i در جایگاه
	$SOC_{Arrival}^i$	SOC خودرو i در زمان ورود
	$SOC_{Exp}^i$	SOC درخواستی خودرو i در زمان خروج
	$SOC_{Act}^i$	SOC واقعی خودرو i در زمان خروج
	$\rho_{kWh}^{i,max}$	حداکثر قیمت قابل پرداخت خودرو i برای شارژ
	$P_{Net2Station}^{Max}$	حداکثر توان قابل جذب ایستگاه از شبکه توزیع
	$P_{Station2Net}^{Max}$	حداکثر توان قابل تزریق ایستگاه به شبکه توزیع
	$P_{Charge}^{Max}$	حداکثر توان قابل جذب خودرو i در هر دوره
	$P_{Discharge}^{Max}$	حداکثر توان قابل تزریق خودرو i در هر دوره

- [18] M. J. Mirzaei, A. Kazemi, O. Homaei, "Real-world based approach for optimal management of electric vehicles in an intelligent parking lot considering simultaneous satisfaction of vehicle owners and parking operator" ,Energy, Vol. 76, pp. 345-356, 2014.
- [16] E. Pashajavid, M.A. Golkar, "Non-Gaussian multivariate modeling of plug-in electric vehicles load demand," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 61, pp. 197–207, 2014.
- [17] J. Kim, S.Y. Son, J.M. Lee, H.T. Ha, "Scheduling and performance analysis under a stochastic model for electric vehicle charging stations," Omega, 2016.

