

## برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی با هدف بیشینه‌سازی سود خودروها و اپراتور ایستگاه در شرایط عدم قطعیت

پویا حسین‌زاده<sup>۱</sup>، خلیل گرگانی فیروزجاه<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا شیخ الاسلامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

poya.h36@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابل، ایران

k.gorgani@umz.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

asheikh@nit.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، فرایند برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ با هدف حداکثرسازی سود صاحبان خودروها و اپراتور ایستگاه شارژ، در دو مرحله انجام شده است. نخست، مدل کاملی برای فرمول‌بندی مسئله شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه‌های شارژ و در بازه ۲۴ ساعته روز بعد، پیشنهاد شده است. هدف از برنامه‌ریزی، افزایش سود صاحبان خودروها و سود ایستگاه شارژ است. در این برنامه‌ریزی، رفتار صاحبان خودروها مانند زمان ورود به ایستگاه شارژ، میزان شارژ اولیه در زمان ورود، زمان خروج از ایستگاه شارژ و میزان انرژی درخواستی به‌عنوان ورودی‌های مسئله انتخاب شده است. در مرحله دوم، رفتار صاحبان خودروها مدنظر قرار گرفته است. برای مدل‌سازی این مسئله، از روش مونت کارلو و برای بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. خروجی مرحله اول، بار ساعتی بهینه کل ایستگاه شارژ بوده است. در مرحله دوم، مکان بهینه ایستگاه شارژ با بار به‌دست‌آمده روی شبکه توزیع استاندارد، تعیین گشته به‌طوری که اهداف شبکه مانند تلفات و شاخص انحراف ولتاژ، حداقل شده و شاخص پایداری ولتاژ حداکثر شده است.

**واژه‌های کلیدی:** خودروی الکتریکی، برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ، تابع سود، عدم قطعیت.

۱. مقدمه

صرفه اقتصادی باشد [۱۴]. در نتیجه، نقش  $V2G$  در هموارسازی دره‌ها و قله‌های منحنی بار پررنگ خواهد بود [۱۵]. شارژ و دشارژ  $V2G$  ها و میزان حرکت و مسافت طی شده آن‌ها از جمله مواردی است که رفتاری تصادفی<sup>۶</sup> دارد. از این رو مسئله عدم قطعیت<sup>۷</sup> برای آن‌ها باید بررسی شود. در جدول (۱) برخی از روش‌های مورد استفاده در این خصوص به اختصار ذکر شده است. در حوزه خودروهای الکتریکی به علت وجود رابطه همبستگی<sup>۸</sup> بین متغیرهای مسئله، برای ارائه مدل دقیق‌تر، ناگزیر به استفاده از روش‌هایی است که این همبستگی را به خوبی مدل کنند. بهترین روش در ایجاد این همبستگی، استفاده از توابع چندمتغیره<sup>۹</sup> است.

مسائل زیست محیطی، کاهش منابع و وابستگی به انرژی موجب به وجود آمدن ایده تغییر در ساختار حمل و نقل، و جایگزینی خودروهای الکتریکی<sup>۱</sup> شده‌اند [۱]. شارژ این خودروها با الکتریسته صورت پذیرفته و امکان استفاده از انرژی ذخیره شده تا مسافت مشخصی فراهم می‌شود [۲]. آنچه سبب شده این خودروها مورد توجه ویژه قرار گیرند، فناوری اتصال خودرو به شبکه<sup>۲</sup> ( $V2G$ ) است که توانایی تبادل الکتریکی را با شبکه برق امکان‌پذیر می‌کند.  $V2G$  ها به دلیل دارا بودن قابلیت ذخیره‌سازی انرژی، می‌توانند جایگزین بخشی از ذخیره تأمین شده توسط واحدهای فسیلی شوند. در نتیجه، بهره‌گیری از انرژی ذخیره شده در ساعات پیک می‌تواند پشتیبان حضور منابع تجدیدپذیر باشد [۸]. این مسئله لزوم برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها را روشن می‌سازد. برنامه‌ریزی  $V2G$  ها به صورت مستقل از هم و ناهماهنگ، موجب خشی شدن اثر مثبت آن‌ها و تضعیف شاخص‌های عملکرد بهینه شبکه می‌شود [۴]. در این میان، ایستگاه شارژ<sup>۳</sup> می‌تواند به عنوان تجمیع‌کننده به منظور کنترل بهینه شارژ  $V2G$  ها و اتصال آن‌ها به کار گرفته شود [۷]. در مرجع [۹] با در نظر گرفتن ایستگاه با هدف بیشینه‌سازی درآمد، سطح نفوذ  $V2G$  ها در بازار تنظیم مشخص شد. مطابق مرجع [۱۰]، ارتباط یک طرفه فناوری خودرو با شبکه از طرف مصرف‌کننده، مورد استقبال خواهد بود. در مرجع [۱۱]، چگونگی وضعیت باتری خودروها در روز با استفاده از مدلی احتمالاتی ارائه شده تا علاوه بر جلوگیری از ایجاد بار اضافه در شبکه، امکان اتخاذ تصمیمات مؤثر را از جانب ایستگاه فراهم آورد. در مرجع [۱۲]، تأثیر خودروها بر بازار بررسی شد. هر چند خودروها سبب افزایش سود در بازار می‌شوند، منجر به اشباع بازار تنظیم می‌شوند. همچنین افزایش هزینه اولیه به کارگیری خودروها را به دنبال خواهند داشت. از سویی مطابق مرجع [۱۳]، اتصال تعداد کافی از خودروهای با قابلیت  $V2G$  می‌تواند اجرای برنامه‌های مدیریت سمت مصرف<sup>۴</sup> را فراهم کند. لیکن بایستی انگیزه لازم برای خودروها فراهم شود.  $V2G$  ها با توجه به ویژگی‌های خود می‌توانند در هموارسازی منحنی بار<sup>۵</sup> شبکه مشارکت داشته باشند. با توجه بالاتر بودن هزینه تولید توان توسط خودروهای الکتریکی در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی، استفاده از توان خودروها در ساعات پیک می‌تواند توأم با

جدول (۱): روش‌های مورد استفاده در مسائل عدم قطعیت

روش	مرجع	مشخصات و موارد استفاده	مزایا و معایب
سناریوسازی از روی چگالی احتمال متغیرها و عدم قطعیت	[۱۷]	تولید سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت برق و رفتار خودروها در ایستگاه‌های شارژ	+ سادگی در مدل‌سازی عدم قطعیت و ملاحظه حالت‌های ممکن به صورت گسسته - عدم ایجاد ارتباط دقیق بین متغیرها
منطق فازی	[۱۹]	در نظر گرفتن یک تابع عضویت برای میزان احتمال رخ دادن هر متغیر	+ ایجاد فضای احتمالاتی مناسب - عدم ارتباط بین متغیرها
توابع چندمتغیره	[۲۱]	ایجاد تابع احتمال چندمتغیره با داشتن تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر در مسئله مدل‌سازی بار تحمیلی خودروهای الکتریکی	+ ارائه مدل دقیق‌تر در مسائلی که بین متغیرهای همبستگی وجود ندارد. - ایجاد داده‌های زیاد از روی نمونه‌های کم
زنجیره مارکوف	[۲۰]	ارائه مدلی برای مدل‌سازی رفتار و وضعیت خودروها به صورت یک مدل چندحالتی در مسئله شارژ	+ مدل‌سازی رفتار خودروها در حالت پارک - نیاز به نمونه‌های واقعی جهت تخمین
مونت کارلو	[۲۱]	استفاده از توابع توزیع احتمال متغیرهای ورودی (سرعت باد و تابش خورشید) در طراحی سیستم تجدیدپذیر ترکیبی	+ سادگی و تقریب خوب - عدم لحاظ کردن وابستگی بین متغیرها
برنامه‌نویسی شانس محدود	[۱۹]	استفاده از توزیع احتمال تجمعی متغیرهای ورودی شامل توان نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در طراحی سیستم	+ زمان کم محاسبات در مقایسه با مونت کارلو

6. Stochastic  
7. Uncertainty  
8. Correlation  
9. Multivariate Functions  
10. Unit Commitment

1. Electric Vehicle  
2. Vehicle 2 Grid  
3. Charging Station  
4. Demand Side Management  
5. Load Curve Smoothing

این مورد، درخواست ضروری خود را در مورد سطح شارژ<sup>۱</sup> نهایی مورد نظر ارائه می‌دهند. اگر ایستگاه شارژ قادر به تأمین SOC نهایی درخواست شده نباشد، *USOCP* (جریمه شارژ تحقق نیافته<sup>۲</sup>) باید به صاحبان خودرو پرداخت شود. *USOCP* بر اساس ارزش برق از نظر صاحبان خودرو که برابر است با حداکثر قیمتی که صاحبان خودرو برای شارژ خودروهای خود پرداخت می‌کنند، تعیین شده است. ۲. ممکن است به دست آوردن حداکثر سود<sup>۳</sup> با شارژ در ارزان‌ترین دوره زمانی و دشارژ در گران‌ترین دوره زمانی باشد. با توجه به محدودیت قدرت ایستگاه شارژ که بین ایستگاه شارژ و سیستم توزیع در هر دوره زمانی مبادله شده است، اپراتور ایستگاه شارژ نمی‌تواند تمام خودروها را در ارزان‌ترین دوره‌ها شارژ کند و دشارژ تمام آن‌ها را در گران‌ترین دوره‌ها انجام دهد. از این رو خودروها ممکن است این فرصت را برای خرید انرژی در دوره‌های زمانی ارزان، و فروش در دوره گران از دست بدهند. پس، اپراتور ایستگاه شارژ نباید خودروهای بیش از تقاضای ایستگاه را قبول کند، در غیر این صورت، به پرداخت *LOP* (جریمه فرصت از دست رفته<sup>۴</sup>) به خودروهایی که فرصت خرید ارزان و فروش گران را از دست داده‌اند، موظف است. در نتیجه، تابع هدف ارائه شده در معادله (۱) حداکثر سود ایستگاه شارژ<sup>۵</sup> (*CSP*) را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$CSP = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_v} \left( w_{G2V} \times \$_{G2V}^t \times P_{G2V}^{i,t} + w_{V2G} \times \$_{V2G}^t \times P_{V2G}^{i,t} - LOP^i - USOCP^i \right) \quad (1)$$

$$LOP^i = \begin{cases} 0 & Bill_{Act}^i - Bill_{Exp}^i \leq 0 \\ Bill_{Act}^i - Bill_{Exp}^i & Bill_{Act}^i - Bill_{Exp}^i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Bill_{Act}^i = \sum_{t=t_d}^{t_d} \left( (1 + w_{G2V}) \times \$_{G2V}^t \times P_{G2V}^{i,t} \right) \quad (3)$$

اگر *SOC* نهایی آن کمتر از *SOC* نهایی درخواست شده باشد، تابع جریمه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$USOCP^i = \begin{cases} 0 & SOC_{EXP}^i \leq SOC_{ACT}^i \\ \$_{Max}^i (SOC_{EXP}^i - SOC_{ACT}^i) & SOC_{EXP}^i > SOC_{ACT}^i \end{cases} \quad (4)$$

بر اساس بررسی‌های انجام شده، *V2G*ها به علت محدودیت‌های اجتماعی، دارای رفتار ثابت و مشخصی برای زمان شارژ و میزان مسافت طی شده در روز نیستند. در مسائل مربوط به عدم قطعیت، متغیرهایی با رفتار تصادفی وجود دارند که از لحاظ رفتاری با سایر متغیرها همبستگی دارند. یافتن تابع توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهای ورودی، معمولاً کار پیچیده‌ای نیست. اما یافتن یک تابع چندمتغیره که بیانگر وابستگی بین متغیرها باشد، لازم است. بنابراین اهداف مربوط به این مقاله عبارت‌اند از:

- بررسی برنامه‌ریزی روزانه شارژ و دشارژ خودروها (در ایستگاه) برای حداکثرسازی سود ایستگاه و صاحبان خودروها؛
- مدل‌سازی رفتار تصادفی خودروها (زمان ورود خودروها به ایستگاه، میزان شارژ درخواستی خودروها، و زمان توقف در ایستگاه) به وسیله توابع چندمتغیره؛
- یافتن مکان بهینه ایستگاه شارژ در شبکه توزیع مورد مطالعه ساختار مقاله عبارت است از: در بخش ۲، مدلی برای برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه شارژ الکتریکی پیشنهاد می‌شود. در مدل پیشنهادی، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، حداکثرسازی سود ایستگاه است. در ادامه نیز به بررسی عدم قطعیت‌های موجود و روش حل آن پرداخته می‌شود. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. نتایج عددی در بخش ۳، ارائه و تحلیل‌ها بر نتایج انجام می‌شود. نتیجه‌گیری در بخش ۴ بیان می‌شود.

## ۲. الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، مسئله برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ *V2G*ها در ایستگاه‌های شارژ و مکان آن در شبکه توزیع با هماهنگی قبلی صاحبان خودروها، فرمول‌بندی و تابع هدف و محدودیت‌ها بیان می‌شود. در ادامه نیز روش حل مسئله بهینه‌سازی تشریح می‌شود.

### ۱.۲. بهینه‌سازی مرحله اول: برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ

#### ۱.۱.۲. تابع هدف در فرایند بهینه‌سازی

ایستگاه شارژ به عنوان یک تجمیع‌کننده، می‌تواند در ساعاتی که قیمت برق در بازار بالاست، از انرژی موجود در باتری خودروها برای مشارکت در بازار برق استفاده کند. از طرف دیگر، در ساعاتی که قیمت برق در بازار پایین است، انرژی بیشتری خریداری کند. به‌طور کلی، صاحبان خودرو از ایستگاه شارژ به دو دلیل استفاده می‌کنند: ۱. آن‌ها می‌خواهند خودروی خود را به منظور رانندگی تا مقصد شارژ کنند. در

1. State of Charge (SOC)
2. Unrealized SOC Penalty (USOCP)
3. Maximum Profit
4. Lost Opportunity Penalty (LOP)
5. Charging Station Profit (CSP)

ث. سطح شارژ نهایی درخواستی توسط صاحبان خودرو یکی از درخواست‌های ارائه شده توسط صاحبان خودروها، هنگام ورود به ایستگاه تعیین SOC نهایی آن‌هاست. هنگامی که خودروهای الکتریکی با شارژ اولیه کم، وارد ایستگاه‌های شارژ می‌شوند، تمایل به افزایش SOC شان دارند. از سوی دیگر، هنگامی که آن‌ها با SOC بالا به ایستگاه می‌رسند، معمولاً تمایل به دشارژ و دریافت سود دارند، صاحبان خودرو می‌توانند SOC نهایی شان را در گستره مشخص شده انتخاب کنند. این گستره به پارامترهایی مانند مدت زمان حضور در ایستگاه، محدودیت‌های توان شارژ و دشارژ شده بستگی دارد.

$$\begin{aligned} \text{if } SOC_d^i \geq SOC_a^i &\rightarrow SOC_d^i - SOC_a^i \leq \Delta t \times P_{G2V}^{\max} \\ \text{if } SOC_a^i \geq SOC_d^i &\rightarrow SOC_a^i - SOC_d^i \leq \Delta t \times P_{V2G}^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

## ۲.۲. بهینه‌سازی مرحله دوم: مکان ایستگاه در شبکه

این بخش به یافتن مکان ایستگاه اختصاص یافته است، به طوری که توابعی مانند تلفات انرژی و شاخص ولتاژ، حداقل و شاخص پایداری ولتاژ شبکه، بهینه شوند.

### الف. تلفات انرژی اکتیو

میزان تلفات توان از برنامه پخش بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تغییر ۲۴ ساعت بار ایستگاه، تلفات انرژی تابع هدف نهایی است.

$$f_1 = \text{Minimize} \left( \sum_{t=1}^{N_t} P_{\text{loss}}^t \right) \quad (13)$$

### ب. شاخص پایداری ولتاژ در سیستم‌های توزیع شعاعی

به منظور یافتن شینی از شبکه توزیع که بیشترین حساسیت را به سقوط ولتاژ دارد، شاخص پایداری ولتاژ برای هر شین تعیین می‌شود. شاخص کوچک‌تر نشان‌دهنده فروپاشی ولتاژ است. شاخص VSI برای شین S (متصل به شین R)، از معادله زیر به دست می‌آید [۲۳].

$$VSI_s = \left( \frac{2V_s^2 V_r^2 - V_r^4 - |Z|^2 (P^2 + Q^2)}{2V_r^2 (PR_{sr} + QX_{sr})} \right) \quad (14)$$

P و Q توان دریافتی در محل شین S هستند. پس از تعیین مقادیر VSI تمام شین‌ها، شاخص VSI شینی که دارای کمترین شاخص است به دست می‌آید:

$$VSI_{\min} = \text{Minimum} \left( VSI \Big|_{i=1,2,\dots,N_B} \right) \quad (15)$$

به منظور کاهش ناپایداری ولتاژ شین‌ها، بایستی بیشترین مقدار برای مینیمم مقدار شاخص پایداری ولتاژ به دست آید.

$$f_2 = \text{Maximize} (VSI_{\min}) \quad (16)$$

هریک از خودروها می‌توانند با دو هدف رسیدن به سطح خاصی از شارژ و مشارکت در بازار و بردن سود در ایستگاه حضور یابند. در حالت اول باید پول بابت دریافت انرژی پرداخت کنند و در حالت دوم، با فروش انرژی ذخیره شده در باتری پول دریافت می‌کنند. بنابراین، باید با توجه به قیمت بازار و فرصتی که در ساعات حضور خود در ایستگاه شارژ برای شارژ و دشارژ دارد، مقدار بهینه تراکنش خود را محاسبه کند. بنابراین، این مسئله بهینه‌سازی باید برای هر یک از خودروها حل شود تا هر یک از صاحبان خودروها میزان تراکنش‌های مالی خود را تخمین بزنند. این مسئله بهینه‌سازی قبل از فرایند بهینه‌سازی برای حداکثرسازی سود کل ایستگاه شارژ اجرا می‌شود.

تابع هدف این زیر مسئله به صورت فرمول زیر است.

$$Bill_{Exp}^i = \sum_{t=t_0}^{t_d} \left( (1 + w_{G2V}) \times \$_{G2V}^t \times P_{G2V.Exp}^{i,t} \right) - \sum_{t=t_0}^{t_d} \left( (1 - w_{V2G}) \times \$_{V2G}^t \times P_{V2G.Exp}^{i,t} \right) \quad (5)$$

در این زیرمسئله، تمامی محدودیت‌های مسئله اصلی به جز محدودیت شارژ و دشارژ ایستگاه شارژ در نظر گرفته است.

## ۲.۱.۲. قیود در فرایند بهینه‌سازی

### الف. شارژ و دشارژ هم‌زمان هر خودرو

خودروها در هر بازه زمانی، تنها می‌توانند در یک حالت شارژ و یا دشارژ باشند و شارژ و دشارژ هم‌زمان در یک بازه زمانی، غیرممکن است. این قید به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [۱۸]:

$$State_{G2V}^{i,t} + State_{V2G}^{i,t} \leq 1 \quad ; \quad \begin{aligned} State_{G2V}^{i,t} &\in \{0,1\} \\ State_{V2G}^{i,t} &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (6)$$

### ب. انرژی خریداری شده از شبکه بالادست

به علت محدودیت بسترهای انتقالی و اثرات سوء فروش بیش از حد انرژی در یک ناحیه بر روی شاخص‌های شبکه، همواره محدودیتی برای فروش در هر ناحیه وجود دارد.

$$\sum_{i=1}^{N_t} P_{G2V}^{i,t} \leq P_{G2S}^{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_t} |P_{V2G}^{i,t}| \leq P_{S2G}^{\max} \quad (8)$$

### پ. انرژی ذخیره شده در باتری خودروها

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

### ت. محدودیت حداکثر توان شارژ و دشارژ در ساعت

$$P_{G2V}^{i,t} \leq P_{G2V}^{\max} \quad (10)$$

$$P_{V2G}^{i,t} \leq P_{V2G}^{\max} \quad (11)$$

### پ. انحراف ولتاژ شبکه

یکی دیگر از اهداف مسئله در دومین مرحله، قرار دادن ایستگاه شارژ در شینی است که منجر به کمترین انحراف ولتاژ در تمامی بازه‌های زمانی گردد که به صورت رابطه (۱۷) فرمول‌بندی می‌شود.

$$\Delta V_{Max} = \text{Maximum}(|V_i - 1|_{i=1,2,\dots,N_b}) \quad (17)$$

$$f_3 = \text{Minimize}(\Delta V_{Max}^{t=1,2,\dots,N})$$

### ت. محدودیت توازن توان اکتیو و راکتیو

محدودیت توازن توان بر اساس کل توان تولیدی، تلفات و بار:

$$P_{Grid}^{Total} - P_{Loss}^{Total} - P_{Load}^{Total} = 0 \quad (18)$$

$$Q_{Grid}^{Total} - Q_{Loss}^{Total} - Q_{Load}^{Total} = 0 \quad (19)$$

محدودیت ولتاژ شین‌های سیستم

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (20)$$

محدودیت توان عبوری از شبکه

$$|S_i| \leq |S_i^{max}| \quad (21)$$

### ۳.۲ شبیه‌سازی آماری برنامه حضور خودروها در ایستگاه

آگاهی از عدم قطعیت‌های موجود در هر مسئله، شرایط را برای تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک، مناسب‌تر می‌سازد. در این مقاله، عدم قطعیت بار اعمالی از سمت خودروها در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت موجود در بار ایستگاه شارژ می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- عدم قطعیت موجود در حداقل شارژ مورد تقاضای خودروها
- خودروهایی که به یک ایستگاه مراجعه می‌کنند، ممکن است در طول روز مسافت‌های متفاوتی را طی کنند. خودروهایی که مسافت بیشتری در روز طی می‌کنند، نیاز به شارژ بیشتری دارند. بنابراین، میزان شارژ میانگین درخواستی خودروهای مراجعه‌کننده در هر ساعت متغیری تصادفی است که می‌تواند با تابع توزیع احتمالی<sup>۱</sup> مدل گردد.
- عدم قطعیت مرتبط با تعداد خودروهای مراجعه‌کننده به ایستگاه شارژ در بازه زمانی  $t$
- عدم قطعیت مربوط به زمان انتظار خودروها

به‌منظور شبیه‌سازی آماری اطلاعات خودروها در ایستگاه از روش مونت‌کارلو<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا تابع توزیع احتمالات عدم قطعیت‌ها تعیین می‌شود. در مرحله دوم ابتدا تعداد اجراهای شبیه‌سازی تعیین می‌شوند. سپس شبیه‌سازی‌ها به تعداد دفعات معین تکرار می‌شود تا توزیع متغیر تصادفی خروجی به دست آید. در هر تکرار، ابتدا متغیرهای دارای عدم قطعیت توسط توابع توزیع احتمال

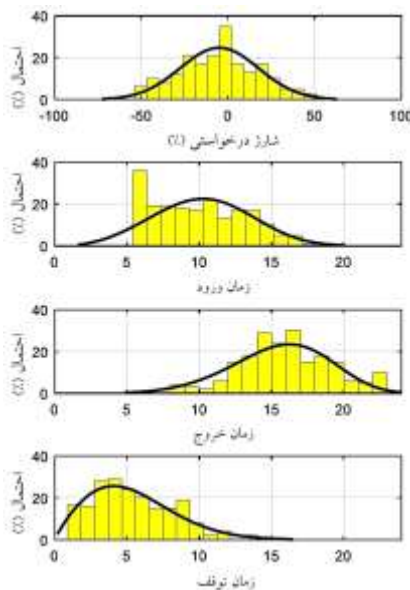
متناظر خود، مقدار می‌گیرند. سپس، مسئله مورد نظر حل شده و خروجی به دست می‌آید. با تکرار این فرایند، خروجی‌های متفاوتی به دست می‌آید که رفتار سیستم را به‌ازای عدم قطعیت‌ها نشان می‌دهد.

### ۴.۲ مراحل پیاده‌سازی الگوریتم

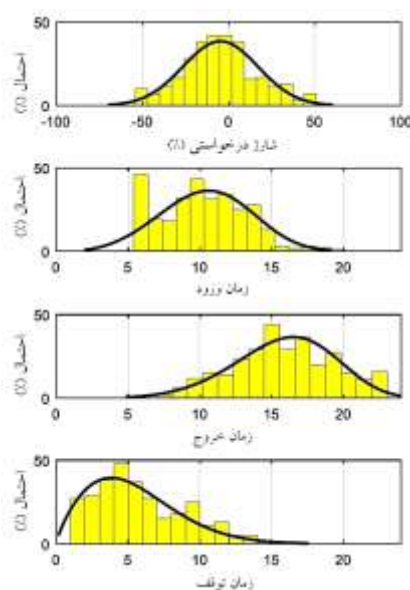
- دریافت اطلاعات ورودی خودروهای نمونه برای تولید توابع توزیع احتمال برای سه متغیر زمان ورود، زمان خروج، و میزان شارژ درخواستی خودروها و قیمت ۲۴ ساعته بازار برق)
- برای تعیین پول پرداختی مورد انتظار هر خودرو، الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود. در الگوریتم مراحل زیر به انجام رسیده است.
  - تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک: حداکثر تکرار الگوریتم، تعداد جمعیت، درصد تقاطع، نرخ جهش؛
  - محاسبه تابع هدف به‌ازای جمعیت اولیه؛
  - شروع حلقه تکرار اصلی الگوریتم ژنتیک؛
  - اجرای عملگر تقاطع روی والدین انتخاب‌شده برای تقاطع؛
  - اجرای عملگر جهش روی جمعیت انتخاب‌شده؛
  - انتهای حلقه اصلی الگوریتم ژنتیک در مسئله فرعی بهینه‌سازی یکی از خودروها برای محاسبه پرداختی مورد انتظار خودروها.
- بهینه‌سازی در ایستگاه شارژ توسط اپراتور ایستگاه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود که فرایند اجرای آن مانند الگوریتم ژنتیک استاندارد است و تنها باید متغیرهای ورودی و خروجی این مسئله و نحوه محاسبه تابع هدف معرفی شود.
  - متغیرهای ورودی این مسئله، انرژی مبادله‌شده خودروها در ۲۴ ساعت است.
  - متغیر خروجی این قسمت از مسئله بار ساعتی کل ایستگاه شارژ است که باید در یک شین از شبکه قرار گیرد.
  - نحوه محاسبه تابع هدف سود ایستگاه، مطابق رابطه (۱) است. البته برای مدل‌سازی عدم قطعیت باید نمونه‌های تصادفی از طریق توابع توزیع احتمال مشخص‌شده در چندین تکرار مونت‌کارلو ایجاد شود و برای هر نمونه تولیدشده، سود بهینه به دست آید. سود بهینه نهایی در تکرار مونت‌کارلو، میانگین جواب‌های به‌دست‌آمده در تکرارهای مختلف است.
- پس از محاسبه بار ایستگاه در مرحله قبل، این بار ۲۴ ساعته بر روی شین‌های مختلف سیستم اعمال و اثرات آن روی شاخص‌های شبکه مانند تلفات، نمایه ولتاژ و پایداری ولتاژ تعیین و مکان بهینه ایستگاه با توجه به این اهداف تعیین می‌شود.

شده است. به علاوه، حداقل زمان حضور خودرو در ایستگاه، ۱ ساعت است. بنابراین، زمان خروج خودروها از ایستگاه بین ساعات ۷ صبح تا ۱۱ شب است. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مرحله اول استفاده شده است. تعداد خودروهایی که در هر ساعت در ایستگاه حضور دارند، مطابق شکل (۳) شبیه‌سازی می‌شوند.

قیمت ۲۴ ساعته بازار برق در شکل (۴) ارائه شده و در فرایند برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه لحاظ شده است. پس از مشخص شدن متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی برای حداکثرسازی سود خودروها و سود کلی ایستگاه آغاز می‌شود. خروجی فرایند بهینه‌سازی، برنامه شارژ و دشارژ ساعتی خودروها در ایستگاه است.



شکل (۱): توابع توزیع احتمال حضور ۲۰۰ خودرو در ایستگاه شارژ



شکل (۲): توابع توزیع احتمال حضور ۳۰۰ خودرو در ایستگاه شارژ

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج برنامه‌ریزی یک ایستگاه شارژ در شبکه توزیع ارائه شده است. در این مسئله، از آنجایی که تعداد خودروها و رفتار آن‌ها در هر منطقه به‌طور قطعی مشخص نیست، از روش مونت‌کارلو استفاده می‌شود. در هر منطقه، توابع توزیع احتمال مربوط به متغیرها و رابطه بین متغیرهای مختلف از طریق نمونه‌ای از اطلاعات کوچک معلوم است. با استفاده از نمونه‌گیری از توابع توزیع احتمال متناظر با متغیرهای تصادفی، اطلاعات ورودی تأمین شده و بار ایستگاه محاسبه می‌شود. این محاسبه به اندازه تعداد تکرارهای الگوریتم مونت‌کارلو تکرار شده و میانگین آن به‌عنوان تابع هدف نهایی است.

شبکه مورد مطالعه، شبکه توزیع شعاعی استاندارد ۳۳ شین IEEE است. فرایند حل مسئله در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. مشخصات سخت‌افزاری کامپیوتر مورد استفاده برای شبیه‌سازی شامل پردازنده ۲ گیگاهرتزی (Intel core i7) و حافظه ۸ گیگابایتی بوده است. برای پیاده‌سازی روابط از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. با توجه به قابلیت MATLAB در به‌کارگیری تکنیک پردازش موازی در پردازنده‌های چند هسته‌ای، دستورات پردازش موازی برای جست‌وجوی سریع‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرایند از دو مرحله کلی تشکیل شده است:

- محاسبه بار ۲۴ ساعته ایستگاه شارژ در شین مورد نظر به‌طوری که سود ایستگاه حداکثر شود.
- محاسبه شاخص‌ها با قرار دادن ایستگاه در شین مورد نظر.

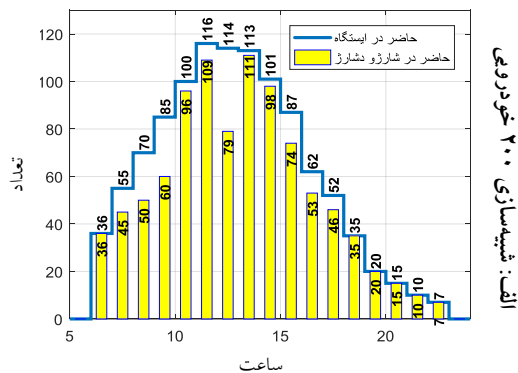
با توجه به وجود عدم قطعیت در زمان ورود و خروج و میزان شارژ درخواستی، یک تابع توزیع احتمال چندمتغیره برای مدل‌سازی متغیرها تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از توابع توزیع چندمتغیره، ابتدا نیاز به اطلاعات واقعی برای به دست آوردن درجه همبستگی بین توابع توزیع احتمال است. توابع توزیع احتمال متناظر با هریک از متغیرهای تصادفی فوق به‌ازای ۲۰۰ و ۳۰۰ خودرو در ایستگاه در شکل (۱) و (۲) ارائه شده‌اند. اطلاعات ایستگاه شارژ مورد مطالعه در این مقاله و زمان ورود و زمان خروج خودروهای الکتریکی از مرجع [۱۸] اتخاذ شده است. بر اساس اطلاعات حضور خودرو در ایستگاه طبق مرجع ذکر شده، تابع توزیع احتمال شارژ درخواستی از تابع نرمال پیروی کرده است. همچنین، متغیرهای زمان ورود، توقف و خروج از توزیع وایبول<sup>۱</sup> پیروی می‌کنند.

ظرفیت اولیه خودروها بین ۲۰ تا ۸۰٪ ظرفیت نامی  $50 \text{ kWh}$  فرض شد. زمان رسیدن به ایستگاه بین ۶ صبح تا ۱۰ شب، در لحاظ

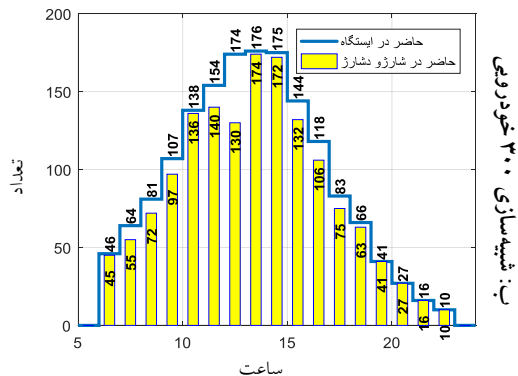
1. Weibull Distribution



زیادی خودرو است. درحالی که قیمت برق در این ساعت در حداقل مقدار خود قرار ندارد. علت این رخداد این است که در ساعات ۱۰، ۱۱ و ۱۲ قیمت برق در بالاترین مقدار خود قرار دارد. بنابراین، تعداد زیادی از خودروها که انرژی در باتری خود دارند باید جهت حداکثرسازی سود خود و ایستگاه شارژ، دشارژ شوند.

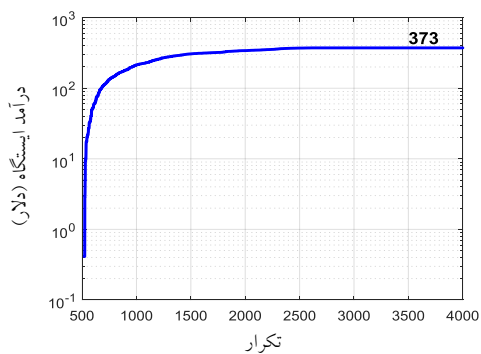


شکل (۴): شماری خودروها در ایستگاه شارژ

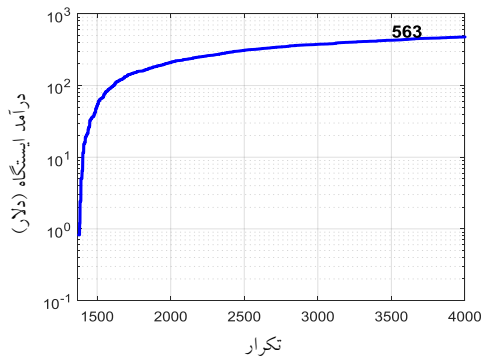


شکل (۵): شماری خودروها در ایستگاه شارژ

شکل (۵): تعداد خودروها در هر بازه زمانی در ایستگاه شارژ

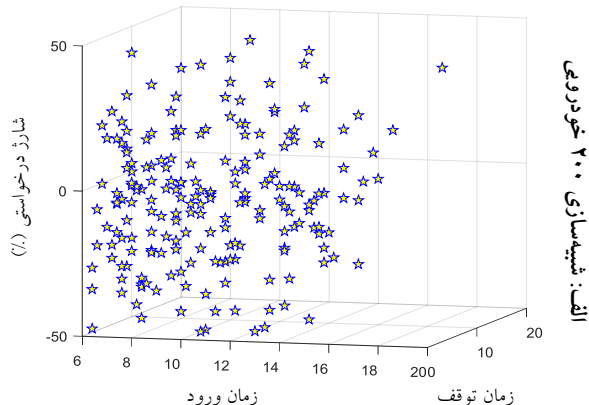


شکل (۶): درآمد ایستگاه شارژ

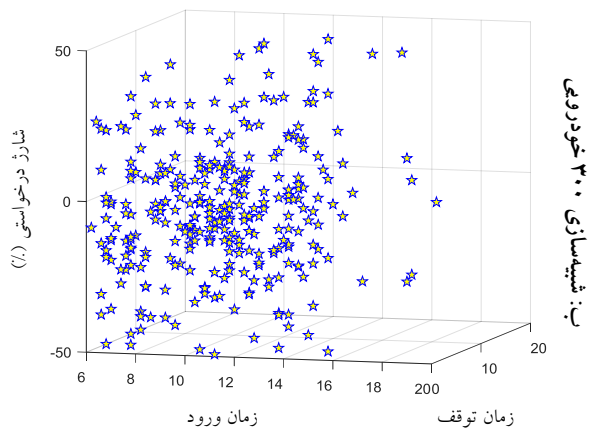


شکل (۷): درآمد ایستگاه شارژ

شکل (۶): نمودار همگرایی برای حداکثرسازی سود ایستگاه شارژ

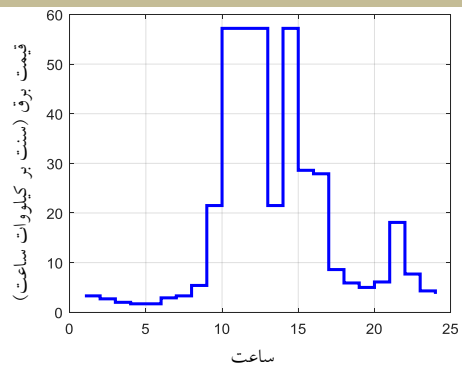


شکل (۸): شماری خودروها در ایستگاه شارژ



شکل (۹): شماری خودروها در ایستگاه شارژ

شکل (۳): نمونه‌های تصادفی برای یک منطقه



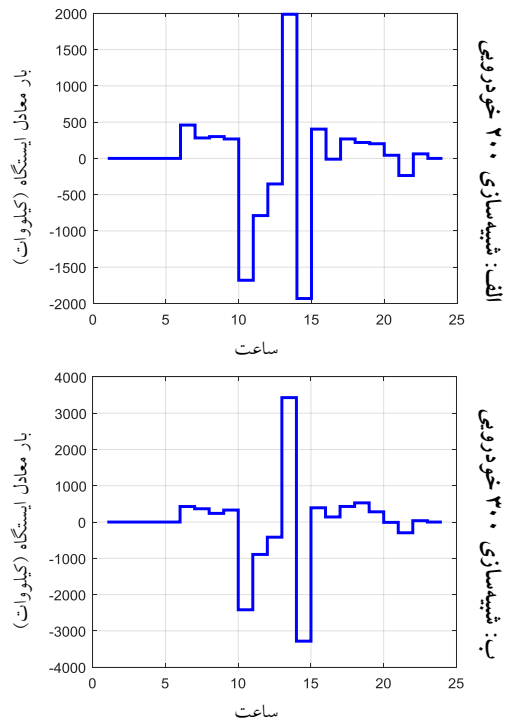
شکل (۴): قیمت ۲۴ ساعته برق در بازار

شکل (۵) تعداد خودروهای موجود در ایستگاه در هر ساعت را در مقابل تعداد شرکت‌کننده در برنامه شارژ نشان می‌دهد. نمودار همگرایی برای حداکثرسازی سود ایستگاه شارژ در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس بهینه‌سازی صورت گرفته و برنامه شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه، منحنی بار معادل ایستگاه قابل استخراج خواهد بود. این منحنی به‌ازای ۲۰۰ و ۳۰۰ خودرو در ایستگاه در شکل (۷) ارائه شده است. مطابق شکل (۷) در ساعات با قیمت برق پایین، خودروها شارژ شده و بار ایستگاه مثبت می‌شود. در ساعاتی با قیمت برق بالا، اکثر خودروها دشارژ شده و توان ایستگاه منفی است. در ساعت ۱۳، توان ایستگاه شارژ، بالاست که نشان‌دهنده شارژ تعداد

## برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی با هدف بیشینه‌سازی سود خودروها و... ۹

هریک گزینه‌ها شاخص تلفات و ولتاژ شبکه است. نمودار مربوط به هر یک از شاخص‌های تلفات انرژی، انحراف ولتاژ روزانه و شاخص پایداری ولتاژ به‌ازای اعمال بار معادل ایستگاه ۲۰۰ و ۳۰۰ خودروی در شین‌ها به‌ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در منحنی مربوط به شاخص ولتاژ، ستون‌های تیره‌رنگ، شرایط متناظر با عدم تجاوز بیشترین مقدار تغییرات ولتاژ از بازه مجاز ۱۰٪ را نشان می‌دهد. مقایسه دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت ایستگاه، جانمایی آن در شین‌ها رفتار متفاوتی خواهد داشت. با افزایش ظرفیت، شین‌هایی که در مطالعه قبلی افت ولتاژ کمتری داشته‌اند، اینک افت ولتاژی بیشتر از حد مجاز دارند.

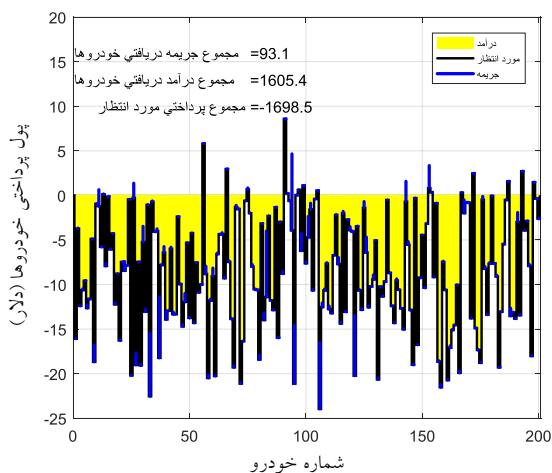
در ادامه مطالعه، اثر بارگذاری ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع، اعمال هم‌زمان ایستگاه‌های با ۲۰۰ و ۳۰۰ خودرو به شبکه توزیع ۳۳ شین *IEEE* بررسی می‌شود. در شکل (۱۱)، شاخص حداکثر تغییرات ولتاژ شین‌ها نشان داده شده است. در شکل ارائه‌شده، نتایج به‌ازای تک‌تک شین‌ها ارائه شده است. لیکن به‌منظور کاهش پیچیدگی شکل ارائه‌شده، تنها نقاط با تغییرات ولتاژ کمتر از ۱۰٪ نشان داده شده‌اند.



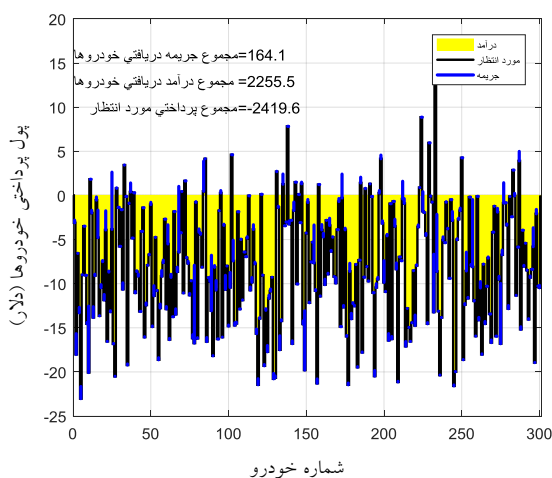
شکل (۷): بار معادل ایستگاه شارژ

دشارژ شدن خودروها در ۳ ساعت متوالی موجب کاهش انرژی ذخیره‌شده در بسیاری از آن‌ها می‌شود. از طرفی دیگر، در ساعت ۱۴ و ۱۵ نیز قیمت برق در مقادیر بسیار بالایی قرار دارد که زمان خوبی برای دشارژ شدن و افزایش سود خودروهاست. بنابراین، به‌ناچار تعداد زیادی خودرو در ساعت ۱۳ باید شارژ شوند تا توان از دست‌رفته خود در ساعات قبلی را جبران کنند و آماده فروش برق در دو ساعت بعدی نیز باشند. به عبارت ساده‌تر، در جاهایی که دره قیمتی وجود داشته باشد، چنین جهشی در شارژ خودروها و بار ایستگاه شارژ به وجود خواهد آمد.

شکل (۸) پرداختی خودروها در ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. مقدار منفی نشان‌دهنده دریافت پول توسط خودرو از ایستگاه به‌واسطه فروش توان است. در برخی از موارد، خودروهایی وجود دارند که پول دریافتی مورد انتظارشان از مجموع درآمد حاصل از فروش توان و جریمه دریافتی از ایستگاه به دست می‌آید. پس از محاسبه بار معادل ایستگاه که حاصل از برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروها در ایستگاه است، اثرگذاری آن روی شبکه توزیع ۳۳ شین استاندارد *IEEE* بررسی می‌شود. بر این اساس، منحنی بار شکل (۷) به شبکه اعمال می‌گردد. مطالعات با فرض اعمال مستقل هر یک از بارها که معادل ایستگاه‌هایی با تعداد ۲۰۰ و ۳۰۰ خودرو در برنامه روزانه صورت می‌پذیرد. پس از این، مکان بهینه برای قرارگیری هم‌زمان دو ایستگاه در شبکه توزیع ۳۳ شین بررسی می‌شود. معیار مقایسه برای



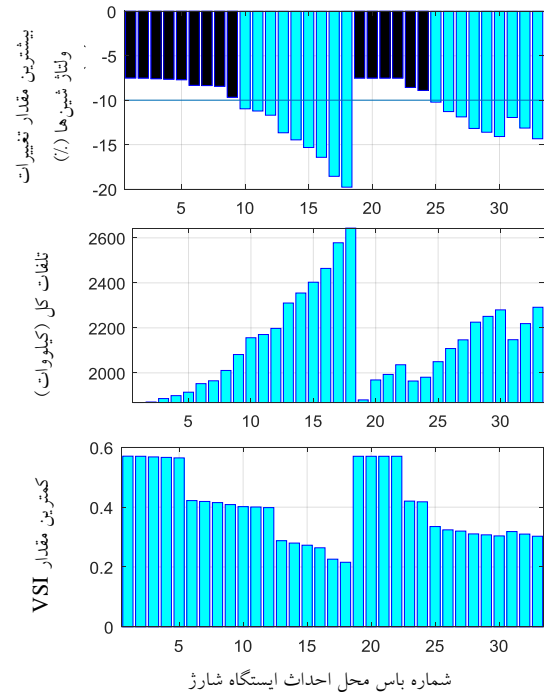
الف: شبیه‌سازی ۲۰۰ خودروی



ب: شبیه‌سازی ۳۰۰ خودروی

شکل (۸): تراکنش‌های مالی خودروها با ایستگاه شارژ





شکل (۹): شاخص‌ها به‌ازای ایستگاه ۲۰۰ خودروی در شین‌ها

9,089	9,088	9,087	9,077																	9,107	8,889			
8,775	8,774	8,774	8,773																	9,689	8,731	8,566		
8,441	7,752	7,52	7,52						8,586	7,8	7,61	7,52	7,5							8,55	7,8	7,61	7,52	7,5
	7,87	7,52	7,52						8,55	7,8	7,61	7,52	7,5							8,55	7,8	7,61	7,52	7,5
									7,52	7,52	7,52									8,55	7,8	7,61	7,52	7,5
																				9,21	8,48	7,7	7,68	
																			9,54	8,04	7,65	7,65		
																			9,11	8,35		7,59	7,57	
																			8,55	7,79	7,61		7,5	
																			8,45	7,69	7,59	7,5		

محل احداث ایستگاه شارژ با ظرفیت ۳۰۰ خودرو

محل احداث ایستگاه شارژ با ظرفیت ۲۰۰ خودرو

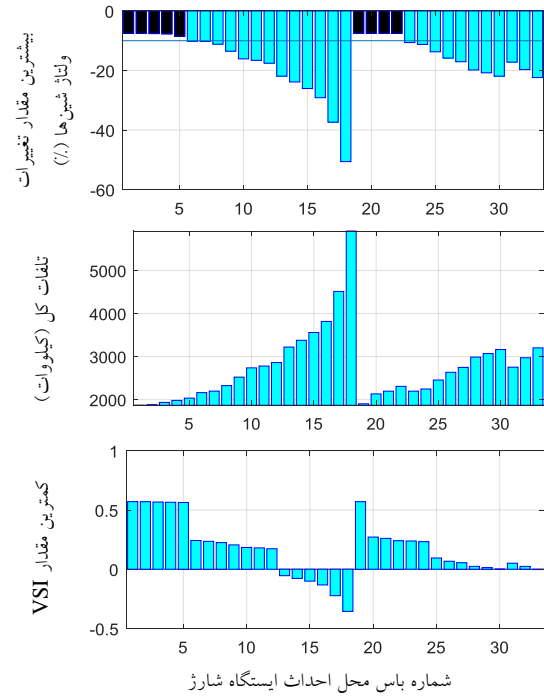
شکل (۱۱): شاخص حداکثر تغییرات ولتاژ شین‌ها به‌ازای اعمال هم‌زمان دو ایستگاه به شین‌ها

2,444	2,32	2,26	2,03																			2,11	1,98
2,42	2,31	2,24	2,01						2,45	1,99	1,96								2,22	2,16	2,42	2,06	2,03
2,86	2,78	2,64	2,11						2,17	2,12	2,07	2,02	1,99						2,15	2,1	2,05	1,99	1,96
	2,75	2,63	2,05						2,06	2,01	1,96	1,9	1,88						2,05	2	1,95		1,87
																			2,03	1,98	1,93	1,87	
																			2,22	2,1	1,94	1,91	1,88
																			2,26	2,08	1,92	1,89	
																			2,37	2,26	2,19	1,96	
																			2,35	2,24	2,18	1,95	
																			2,34	2,23	2,16	1,93	
																			2,32	2,21	2,15	1,92	
																			2,3	2,19	2,13	1,9	

محل احداث ایستگاه شارژ با ظرفیت ۳۰۰ خودرو

محل احداث ایستگاه شارژ با ظرفیت ۲۰۰ خودرو

شکل (۱۲): شاخص تلفات کل شبکه در ۲۴ ساعت به‌ازای اعمال هم‌زمان دو ایستگاه به شین‌ها (کیلووات)



شکل (۱۰): شاخص‌ها به‌ازای ایستگاه ۳۰۰ خودروی در شین‌ها

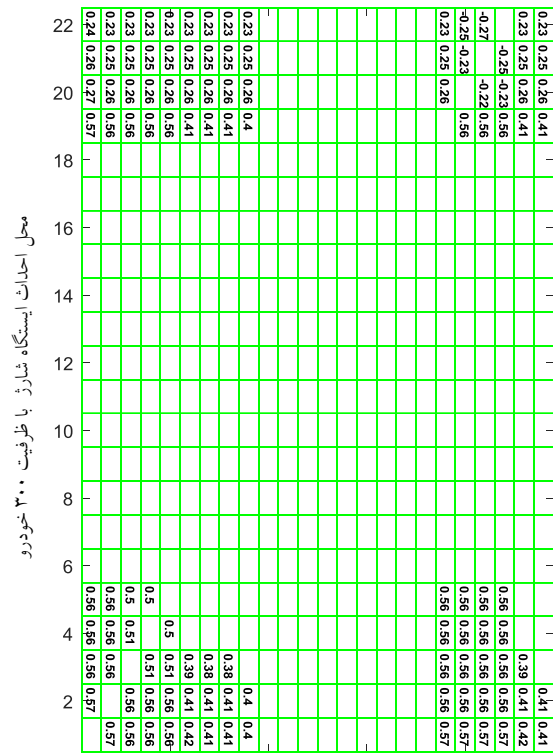
متناظر با شکل (۱۱)، نتایج برای شاخص تلفات کل شبکه برحسب کیلووات در ۲۴ ساعت در شکل (۱۲) ارائه شده است. همچنین نتایج برای شاخص پایداری ولتاژ در شکل (۱۳) ارائه شده است. نتایجی که به‌عنوان نقاط مطلوب از نظر حداکثر تغییرات ولتاژ و تلفات کل شبکه کم و از نظر شاخص پایداری ولتاژ مقادیر بالاتری دارند (پایداری‌ترند) به شرح جدول (۲) قابل بیان خواهند بود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی بهینه یک ایستگاه شارژ در شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE، در سه بخش بررسی شده است. شبیه‌سازی آماری اطلاعات حضور خودرو در دو نمونه ایستگاه با ظرفیت ۲۰۰ و ۳۰۰ از طریق فرایند مونت کارلو و توابع توزیع چندمتغیره با در نظرگیری ارتباطات بین متغیرها انجام شده است. سهم مقاله، یافتن بار ایستگاه ناشی از شارژ و دشارژ خودروها با استفاده از اطلاعات و توابع توزیع احتمال هر منطقه و بررسی اثرات احداث ایستگاه‌ها روی شین‌های مختلف شبکه بر اساس شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ بوده است. در این مطالعه، حداقل‌سازی تلفات، انحراف ولتاژ و همچنین حداکثرسازی شاخص پایداری ولتاژ، بررسی شده و مکان بهینه ایستگاه با در نظرگیری این اهداف به همراه سود ایستگاه و خودروها به دست آمده است. مطابق با نتایج، با برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها علاوه بر تأمین شارژ مورد نیاز، سود ایستگاه و خودروها نیز افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که در ایستگاه ۲۰۰ خودرویی، ۳۷۳ دلار و در ایستگاه ۳۰۰ خودرویی ۵۶۳ دلار درآمد ایستگاه تحقق یافته است. این در حالی است که به‌صورت خالص، ۱۶۹۸ دلار مجموع پول پرداخت شده به خودروها بوده که از این میان، ۱۶۰۵ دلار از محل فروش انرژی و ۹۳ دلار از محل پرداخت جریمه تحقق یافته است. در ایستگاه دوم نیز ۲۴۱۹ دلار جمع پرداختی به خودروها بوده که ۲۲۵۵ دلار از محل فروش انرژی و ۱۶۴ دلار از محل جریمه پرداختی تحقق یافت. با تعیین مکان بهینه ایستگاه، شاخص‌های شبکه نیز به‌طور هم‌زمان با سود ایستگاه و خودروها، بهبود یافته است. بر اساس نتایج عددی، در بارگذاری ایستگاه با ۲۰۰ خودرو، ۱۵ شین قابلیت نصب با حفظ شرایط و شاخص‌ها را داشته‌اند، درحالی‌که با ایستگاه ۳۰۰ خودرویی، ۹ شین قابلیت نصب یافته‌اند.

#### فهرست علائم

قیمت خرید برق از سیستم توزیع در دوره t	$S_{G2V}^t$
توان شارژشده خودرو i در دوره t	$P_{G2V}^{i,t}$
توان دشارژشده توسط خودرو i در دوره t	$P_{V2G}^{i,t}$
توان مورد انتظار برای شارژ خودرو i در دوره t	$P_{G2V,Exp}^{i,t}$
توان مورد انتظار برای دشارژ خودرو i در دوره t	$P_{V2G,Exp}^{i,t}$
درصد سود ایستگاه شارژ به هنگام فروش توان	$w_{V2G}$
تعداد کل خودروهای الکتریکی	$N_V$
تعداد کل دوره‌های زمانی	$N_t$
وضعیت شارژ خودرو i در t امین دوره زمانی	$State_{G2V}^{i,t}$
وضعیت دشارژ خودرو i در t امین دوره زمانی	$State_{V2G}^{i,t}$
قیمت خرید برق از خودروها در دوره t	$S_{V2G}^t$
درصد سود ایستگاه در خرید توان از شبکه	$w_{G2V}$



محل احداث ایستگاه شارژ با ظرفیت ۲۰۰ خودرو

شکل (۱۳): شاخص پایداری ولتاژ به‌ازای اعمال هم‌زمان دو ایستگاه

جدول (۲): بیست نقطه منتخب برای مکان دو ایستگاه

VSI	تلفات کل (kW)	تغییرات ولتاژ (%)	محل ایستگاه با ۳۰۰ خودرو	محل ایستگاه با ۲۰۰ خودرو
۰/۵۷۰	۱۸۷۱	۷/۵۱	۱	۲
۰/۵۷۰	۱۸۷۸	۷/۵۱	۲	۱
۰/۵۷۰	۱۸۸۰	۷/۵۱	۱	۱۹
۰/۵۷۰	۱۹۰۲	۷/۵۱	۱۹	۱
۰/۵۶۸	۱۸۸۶	۷/۵۸	۱	۳
۰/۵۷۰	۱۹۰۷	۷/۵۲	۲	۱۹
۰/۵۷۰	۱۹۲۲	۷/۵۲	۱۹	۲
۰/۵۶۶	۱۸۹۹	۷/۶۳	۱	۴
۰/۵۶۸	۱۹۱۳	۷/۶۰	۲	۳
۰/۵۷۰	۱۹۶۹	۷/۵۱	۱	۲۰
۰/۵۶۷	۱۹۳۵	۷/۶۰	۳	۱
۰/۵۶۸	۱۹۳۸	۷/۶۰	۱۹	۳
۰/۵۶۶	۱۹۲۷	۷/۶۵	۲	۴
۰/۵۶۵	۱۹۱۴	۷/۶۹	۱	۵
۰/۵۷۰	۱۹۹۳	۷/۵۱	۱	۲۱
۰/۵۶۷	۱۹۵۵	۷/۶۱	۳	۲
۰/۵۷۰	۱۹۹۶	۷/۵۲	۲	۲۰
۰/۵۶۷	۱۹۶۵	۷/۶۱	۳	۱۹
۰/۵۶۶	۱۹۵۲	۷/۶۵	۱۹	۴
۰/۵۶۴	۱۹۴۳	۷/۷۱	۲	۵

سطح شارژ خودرو $i$ در زمان خروج	$SOC_d^i$	هزینه فرصت ازدست رفته خودرو $i$	$LOP^i$
حداکثر تغییرات (انحراف) ولتاژ شین‌ها	$\Delta V_{Max}$	پول انتظاری قابل پرداخت خودرو $i$ به ایستگاه	$Bill_{Exp}^i$
تلفات کل شبکه در بازه زمانی $t$	$P_{Loss}^i$	پول پرداختی خودرو $i$ به ایستگاه در پایان روز	$Bill_{Act}^i$
تلفات ظاهری کل سیستم	$S_{LossTotal}$	زمان ورود خودرو $i$ به ایستگاه	$t_a^i$
تلفات ظاهری خطوط	$S_{LossLine}$	زمان خروج خودرو $i$ از ایستگاه	$t_d^i$
ولتاژ شین ارسال و دریافت	$V_s, V_r$	زمان ماندن خودرو $i$ در ایستگاه	$\Delta t^i$
امپدانس، مقاومت و راکتانس خط ارتباطی بین شین $S$ و $r$	$Z, R, X$	جریمه ایستگاه به خودرو $i$	$USOCP^i$
توان اکتیو و راکتیو دریافتی در محل شین $S$	$P, Q$	SOC درخواست شده خودرو $i$ در زمان خروج	$SOC_{Exp}^i$
شاخص پایداری ولتاژ برای شین $S$	$VSI_s$	SOC واقعی خودرو $i$ در زمان خروج	$SOC_{Act}^i$
توان اکتیو تولیدی کل	$P_{Grid}^{Total}$	حداکثر بهای مورد پذیرش صاحب خودرو $i$ برای شارژ	$\$_{max}^i$
توان راکتیو تولیدی کل	$Q_{Grid}^{Total}$	حداکثر توان قابل جذب ایستگاه از شبکه توزیع	$P_{G2S}^{max}$
تلفات اکتیو کل	$P_{Loss}^{Total}$	حداکثر توان قابل تزریق ایستگاه به شبکه توزیع	$P_{S2G}^{max}$
تلفات راکتیو کل	$Q_{Loss}^{Total}$	حداکثر توان قابل جذب خودرو از شبکه در هر دوره	$P_{G2V}^{max}$
بار اکتیو کل	$P_{Load}^{Total}$	حداکثر توان قابل تزریق خودرو به شبکه در هر دوره زمانی	$P_{V2G}^{max}$
بار راکتیو کل	$Q_{Load}^{Total}$	سطح شارژ خودرو $i$ در زمان ورود	$SOC_a^i$

## مراجع

- [۱] اجتهاد، سید حسین، خوبی آرانی، سعید، حلوائی نیاسر، ابوالفضل، حاجی زاده، امین، «مدیریت بهینه توان در خودروی برقی با دو منبع انرژی با استفاده از کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال ششم، شماره ۳، صفحه ۳۴-۴۵، ۱۳۹۵.
- [2] Kempton, W., Tomic, J., "Vehicle-to-Grid Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue", Journal of Power Sources, Vol. 144, pp. 268-279, 2005.
- [3] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., "Multi-Objective Scheduling of Electric Vehicles in Smart Distribution System", Energy Conversion and Management, Vol. 79, pp. 43-53, 2014.
- [۴] رضایی، پوریا، تلاوت، وحید، گلشن‌نواز، سجاد، حمیدی، امیر، «بررسی تأثیر کاهش محافظه کارانه ولتاژ بر برنامه ریزی بهره برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور خودروهای الکتریکی»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال هشتم، شماره ۲، صفحه ۲۶-۳۷، ۱۳۹۷.
- [5] Guille, C., Gross, G., "A Conceptual Framework for the Vehicle-to-Grid V2G Implementation", Energy Policy, vol. 37, pp. 4379-4390, 2009.
- [6] Hutson, C., Venayagamoorthy, G. K., Corzine, K. A., "Intelligent Scheduling of Hybrid and Electric Vehicle Storage Capacity in A Parking Lot for Profit Maximization in Power Transactions", in Procc. IEEE, pp. 1-8, 2008.
- [7] Han, S., Sezaki, K., "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp. 65-72, 2010.
- [8] Kempton, W., Tomic, J., "Vehicle-to-Grid Poer Implementation: from Stabilizing the Grid to Supporting Large-Scale Renewable Energy", Journal of Power Source, vol. 144, pp.280-294, 2005.
- [9] Jang, S., Han, S., Han, S.H. and Sezaki, K., "Optimal Decision on Contract Size for V2G Aggregator Regarding Frequency Regulation", in Procc. IEEE, 2010.
- [10] Sortomme, E. and El-Sharkawi, M.A., "Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 2, No. 1, pp. 131-138, 2011.
- [11] Abolfazli, M., Bahmani, M.H., Afsharnia, S. and Ghazizadeh, M.S., "A Probabilistic Method to Model PHEV for Participation in Electricity Market", in Procc. IEEE, 2011.
- [12] Andersson, S.L., Elofsson, A.K., Galus, M.D., Göransson, L., Karlsson, S., Johnsson, F. and Andersson, G., "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.
- [13] Kempton, W. and Letendre, S.E., "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.
- [14] Kempton, W., Tomic, J., Letendre, S., Brooks, A. and Lipman, T., "Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicle as Resource for Distributed Electric Power in California", 2001.
- [15] Karnama, A., "Analysis of Integration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Distribution Grid", Master's thesis, Sweden: Royal Institute of Technology, 2009.
- [16] Lund, H., Kempton, W., "Integration of Renewable Energy into the Transport and Electricity Sectors Through V2G", Energy Policy, Vol. 36, pp. 3578-3587, 2008.
- [17] Inage, S., "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment", IEA Energy Papers, 2010.
- [18] Mirzaei, M.J., Kazemi, A. and Homaei, O., "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.
- [19] Zhang, N., Hu, Z., Han, X., Zhang, J. and Zhou, Y., "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.
- [20] Kim J, Son SY, Lee JM, Ha HT., "Scheduling and Performance Analysis Under a Stochastic Model for Electric Vehicle Charging Stations", Omega, Vol. 66, 2016
- [21] Pashajavid, E. and Golkar, M.A., "Non-Gaussian

*Multivariate Modeling of Plug-in Electric Vehicles Load Demand*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 61, pp. 197-207, 2014.

- [22] Saber, A.Y. and Venayagamoorthy, G.K., "*Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles*", IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 1, 2012.
- [23] Eminoglu U, Hocaoglu MH., "*A Voltage Stability Index for Radial Distribution Networks*", in Procc. IEEE, UPEC, pp. 408-413, 2007.