

## مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاددهی قیمت بهینه تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع

محمد رضا فلاح زاده<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد؛ علی زنگنه<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی-تهران- ایران

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی-تهران- ایران - a.zanganeh@srttu.edu

**چکیده:** در این مقاله مدلی جهت پیشنهاددهی قیمت یک تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع به منظور فروش انرژی V2G ارائه شده است. قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده جهت فروش V2G از طریق مدل مسئله بهینه‌سازی دوسطحی میان بهره‌بردار مستقل شبکه توزیع (DSO) و تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی و با استفاده از مفهوم مسئله تئوری بازی استکلبرگ تعیین می‌گردد. در مدل دوسطحی پیشنهادشده، تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی قیمت پیشنهادی فروش V2G و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها را باهدف بیشینه نمودن سود خود در سطح بالای مسئله ارائه می‌دهد. از سوی دیگر در سطح پایین مسئله، بهره‌بردار شبکه توزیع با توجه به قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده و قیمت بازار برق و باهدف کمینه سازی هزینه‌ها، برنامه‌ریزی جهت تعیین سهم تأمین انرژی موردنیاز خود از شبکه سراسری یا تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی را انجام می‌دهد. در نقطه تعادل این بازی، قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده و انرژی موردنیاز بهره‌بردار شبکه جهت دریافت از V2G و شبکه سراسری تعیین می‌گردد. با استفاده از شرایط بهینگی کیروش کاهن تا کر م مسئله بهینه سازی دو سطحی پیشنهادی به یک مسئله ریاضی تک سطحی غیرخطی با شرایط مساوی تبدیل می‌شود. نتایج عددی به دست آمده جهت بررسی کارایی مدل پیشنهاددهی قیمت تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی تحلیل شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی، برنامه‌ریزی دوسطحی، اتصال خودرو به شبکه، شبکه توزیع.

## A Bilevel Programming Model of Electric Vehicles' Aggregator for Bidding Strategy in the Distribution Network

Mohammad Reza Fallahzadeh<sup>1</sup>, MSc; Ali Zangeneh, Assistant Professor<sup>2</sup>

1- Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: a.zanganeh@srttu.edu

**Abstract:** In this paper, a bidding strategy model is presented for electric vehicles' (EVs) aggregator to sell the aggregated energy in the distribution network. The bidding price of the EVs' Aggregator is determined through the Stackelberg game theory. It is modeled based on a bilevel programming problem between distribution system operator (DSO) and the aggregator. In the upper level of proposed bilevel model, the aggregator offered its optimal bidding price and EVs' charge and discharge scheduling to maximize its profit. On the other hand, according to the price of the electricity market and bidding by the aggregator, DSO tries to optimally schedule the portion of energy which is supplied from either main grid or EVs' aggregator to minimize its cost. In the equilibrium point of the problem, the optimal bidding price of the aggregator and the purchased energy from the aggregator and main grid is determined. The proposed bilevel programming problem is transformed into a single level mathematical programming problem with equilibrium constraints (MPEC) using the Karush-Kuhn-Tucker optimality conditions. The obtained numerical results is used to assess the proposed bidding strategy of EVs' aggregator.

**Keywords:** Electric vehicles' aggregator, bilevel programming, vehicle to grid (V2G), distribution network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۳ و ۱۳۹۶/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۱

نام نویسنده مسئول: علی زنگنه

نشانی نویسنده مسئول: تهران- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

در یک‌صد سال گذشته، انتشار بیش‌ازحد گازهای گل‌خانه‌ای توسط کارخانه‌ها و خودروهای درون‌سوز، باعث تغییرات بی‌سابقه‌ای در آب‌وهوای کره زمین شده است. یکی از این تغییرات، گرم شدن آب‌وهوای کره زمین و به مخاطره افتادن حیات گیاهی و جانوری کره زمین هست. دولت‌ها و طرفداران حفاظت از محیط‌زیست از دهه‌های گذشته تلاش‌های گسترده‌ای برای کاهش آلاینده‌های جوی شروع کرده‌اند. قسمتی از این تلاش‌ها در راستای کاهش استفاده از خودروهای درون‌سوز و جای‌گزینی این خودروها با خودروهای الکتریکی است [۱-۲].

در حال حاضر با توجه به نوپا بودن صنعت خودروهایی برقی و عدم وجود زیرساخت‌های شارژ و دشارژ و هزینه‌های بالای مربوط به باتری این خودروها، این نوع از خودروها از مقبولیت کمی در بین مردم برخوردارند [۳]، همچنین پایین بودن مسافت طی شده که با یک‌بار شارژ کامل انجام می‌شود در مقایسه با خودروهای درون‌سوز عامل مهم دیگری در کاهش مقبولیت این نوع از خودروهاست. یکی از راه‌های تشویق مردم به استفاده از این خودروها و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی برجسته کردن مزایای این خودروهاست، که در این بین می‌توان به قابلیت ذخیره انرژی و آزادسازی آن در زمان‌های موردنیاز و شرکت در بازار برق و در نهایت کسب درآمد اشاره نمود [۴].

باتری خودروهای الکتریکی را می‌توان به‌عنوان یک‌بار انعطاف‌پذیر در نظر گرفت که می‌تواند دارای مصرف مثبت انرژی (عمل شارژ) و یا مصرف منفی (عمل دشارژ) باشد و در نتیجه امکان استفاده از انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروها در شرایط لزوم را فراهم نماید. این ویژگی که اصطلاحاً "خودرو به شبکه" (V2G) نامیده می‌شود، خودروهای الکتریکی را قادر می‌سازد تا در بازارهای تنظیم، ذخیره و غیره شرکت نموده و مزایای فنی و اقتصادی را برای بازیگران مختلف بازار فراهم نماید [۵-۷].

چنانچه هر خودرو بخواهد به‌طور ناهم‌هنگ و در زمان‌های دل‌خواه خود به شبکه متصل شده و عمل شارژ و دشارژ را انجام دهد، ممکن است شبکه را با چالش‌ها و محدودیت‌هایی مواجه نماید. با افزایش زیاد تعداد خودروهای برقی در آینده نزدیک، این مسئله می‌تواند تأثیرات مخربی بر هزینه تولید انرژی، بار مشتریان شبکه توزیع، پرشدگی خطوط، افزایش تلفات شبکه، افت ولتاژ باس‌ها و موارد مشابه دیگر داشته باشد. بنابراین در صورت عدم وجود برنامه هماهنگ و مدونی برای شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، اضافه شدن این خودروها نه تنها کمکی به بهبود شاخص‌های شبکه توزیع نمی‌کند بلکه ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری نیز به شبکه توزیع وارد نماید [۸-۱۰].

به منظور حل این مشکل، در [۱۱] جهت هماهنگی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، روشی مبتنی بر قیمت‌های چند تعرفه‌ای جهت انتقال بار ناشی از شارژ خودروهای الکتریکی به زمان‌های غیر اوج مورد بررسی قرار گرفته است. در روش ارائه شده در مقاله مذکور، مالک خودرو آزاد است تا خودروی خود را در هر زمان شارژ نموده و بنابراین ممکن

## نمادسازی

## اندیس‌ها

$N$ : تعداد کل خودروهای الکتریکی درون پارکینگ

$i$ : اندیس مربوط به هر خودرو

$H$ : تعداد کل ساعات شبیه‌سازی (۲۴ ساعت)

$h$ : اندیس مربوط به هر ساعت

$S$ : بالانویس مربوط به سناریوها

## ثابت‌ها

$\rho_{co}^s(h)$ : قیمت ثابت قراردادی جهت شارژ خودروهای الکتریکی

$soc_0^s(i)$ : مقدار شارژ اولیه خودرو در هنگام ورود به پارکینگ

$C_{EV}(i)$ : ظرفیت باتری خودروی  $i$  ام

$\overline{ch}(i, h)$ : بیشینه مقدار نرخ شارژ برای هر خودرو و هر ساعت

$\overline{dch}(i, h)$ : بیشینه مقدار نرخ دشارژ برای هر خودرو و هر ساعت

$soc_{min}$ : کمینه میزان وضعیت شارژ باتری خودروی الکتریکی

$P_T(h)$ : حداکثر توان عبوری از ترانسفورماتور بالادستی شبکه توزیع

$h = arrival$ : زمان ورود خودروها به پارکینگ

$h = departure$ : زمان خروج خودروها از پارکینگ

## متغیرها

$ch^s(i, h)$ : شارژ خودروی  $i$  در ساعت  $h$  ام از سناریوی  $S$

$dch^s(i, h)$ : دشارژ خودروی  $i$  در ساعت  $h$  ام از سناریوی  $S$

$\rho_{V2G}^s(h)$ : قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده برای فروش V2G در

ساعت  $h$  ام از سناریوی  $S$

$P_W^s(h)$ : توان خریداری شده DSO از بازار عمده‌فروشی در سناریوی  $S$

## پارامترها

$soc^s(i, h)$ : وضعیت شارژ باتری خودروی الکتریکی  $i$  ام در ساعت  $h$  ام از

سناریوی  $S$

$P_{dch}^s(i, h)$ : توان دشارژ خودروی  $i$  ام در ساعت  $h$  ام در سناریوی  $S$

$P_{ch}^s(i, h)$ : توان شارژ خودروی  $i$  ام در ساعت  $h$  ام در سناریوی  $S$

$\rho_W^s(h)$ : قیمت انرژی الکتریکی برحسب دلار بر مگاوات ساعت در

سناریوی  $S$

$P_D^s(h)$ : تقاضای توان شبکه توزیع در ساعت  $h$  ام

## ضرایب لاگرانژ

$\delta^s(h)$ : متغیر دوگان مربوط به قید تعادل تولید و مصرف است.

$\xi^s(h)$ : متغیر دوگان متناسب با قید حداکثر توان خریداری شده از شبکه

توان و هم قابلیت مصرف توان را دارد. تجمیع‌کننده مورد نظر این مقاله دارای دو هدف است: اول: کمینه کردن هزینه‌های شارژ خودرو. دوم: بیشینه نمودن سود خود.

با توجه به راه‌اندازی بازارهای خرده‌فروشی و وجود نهادها و بازیگران مختلف در این بازارها، لزوم در نظر گرفتن یک مدل تصمیم‌گیری غیرمتمرکز که دیدگاه بازیگران مختلف بازار همچون تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی با قابلیت خرید و فروش توان زیر نظر بهره‌بردار شبکه توزیع را در نظر بگیرد، ضروری است [۱۹].

در این مقاله یک مدل دوسطحی متشکل از دو نهاد تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی و بهره‌بردار شبکه توزیع (DSO) به منظور مدل‌سازی نحوه مشارکت V2G در بازار انرژی و تأمین بخشی از تقاضای شبکه توزیع ارائه شده است. در سطح بالای مسئله، هدف تجمیع‌کننده خودروها بیشینه کردن سود خود از طریق خرید انرژی در ساعات غیراوج با قیمت پایین و ذخیره آن در باتری خودروها به منظور فروش در ساعات اوج و با قیمت پیشنهادی پذیرش شده توسط DSO می‌باشد. از طرف دیگر در سطح پایین مدل دوسطحی ارائه‌شده DSO به‌عنوان تنها بهره‌بردار سیستم توزیع که وظیفه تأمین انرژی مشترکین شبکه را برعهده دارد با هدف کمینه نمودن هزینه خود می‌تواند تمام انرژی مورد نیاز خود را از شبکه سراسری تهیه نموده و یا بخشی از آن را با توجه به قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی از طریق V2G تأمین نماید. در این مصالحه، تجمیع‌کننده باید قیمت بهینه V2G را به DSO پیشنهاد داده تا سود خود را بیشینه نماید. اگر قیمت پیشنهادی بالا باشد، DSO این قیمت را نپذیرفته و تمام انرژی مورد نیاز خود را از طریق شبکه سراسری تأمین می‌نماید و به‌طور عکس اگر قیمت پیشنهادی بسیار پایین باشد، تجمیع‌کننده بیشینه سود خود را کسب نخواهد کرد. به همین خاطر در این مدل مشابه تئوری بازی استکلبرگ، در نقطه مصالحه به‌دست آمده، قیمت پیشنهادی فروش تجمیع‌کننده و میزان خرید DSO نقطه تعادل بهینه خواهد بود.

در مدل پیشنهاد شده فرض گردیده که مالکین خودروها با رضایت در این طرح شرکت نموده و پرداخت تشویقی و هزینه استهلاک باتری خودروها در نظر گرفته نشده است. برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروها به قیمت انرژی در طول ۲۴ ساعت روز بعد، محدودیت مالکان خودروهای الکتریکی و همچنین وضعیت اولیه شارژ باتری خودروها در هنگام ورود بستگی دارد.

مهم‌ترین موضوعاتی که در این مقاله به آن پرداخته شده است عبارتند از:

۱. ارائه یک مدل تصمیم‌گیری غیرمتمرکز مبتنی بر برنامه‌ریزی دوسطحی تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی و بهره‌بردار سیستم توزیع به منظور برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای الکتریکی.
۲. ارائه پیشنهاد بهینه قیمت فروش انرژی خودروهای الکتریکی به شبکه جهت به‌کارگیری قابلیت V2G خودروها. در این

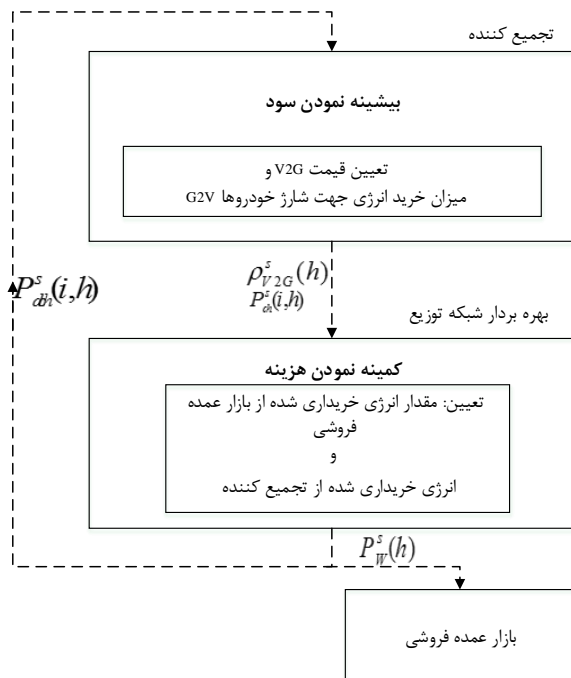
است موجب ایجاد مشکلاتی برای شبکه گردد. در [۱۲] تمرکز مقاله بر ارائه یک برنامه‌ریزی برخط و دسته‌بندی خودروهای الکتریکی در گروه‌های اولویت‌دار و هماهنگی شارژ خودروهای الکتریکی در زمان‌های غیراوج جهت کاهش هزینه‌های شارژ است؛ اما انرژی حاصل از V2G در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته و تنها به مسئله هماهنگی شارژ خودروهای الکتریکی پرداخته شده است. آقای تورانی و همکاران [۱۳] با هدف بهبود قابلیت اطمینان ریزش‌بکه، کاهش تلفات و افزایش بهره‌وری ریزش‌بکه و با در نظر گرفتن میزان مسافت جابه‌جایی خودروها مدلی جهت برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها ارائه داده‌اند.

آنچه مسلم است جهت بهره‌مندی از مزایای شارژ و دشارژ هماهنگ خودروهای الکتریکی نیاز به وجود یک نهاد واسط جهت برنامه‌ریزی فرایند شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در شبکه می‌باشد. در [۱۴] با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی به ارائه مدلی جهت برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها مبتنی بر کاهش هزینه پرداخته شده است. آقای عسکری و همکاران [۱۵]، نقش یک تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی جهت شرکت در بازار خدمات جانبی را مورد بررسی قرار داده که قادر به پیشنهاددهی تولید و مصرف در بازار قبل و بازار لحظه‌ای است؛ اما رفتار و عادات رانندگی خودروهای الکتریکی و همچنین تعامل تجمیع‌کننده با بهره‌بردار شبکه توزیع (DSO) در نظر گرفته نشده است. در [۱۶-۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ارائه شده است که سطح بالایی مسئله مربوط به کمینه کردن هزینه‌های خرید انرژی جهت شارژ خودروها توسط تجمیع‌کننده و سطح پایینی مربوط به کمینه کردن هزینه تولیدکننده‌های انرژی است. در این تحقیق تجمیع‌کننده اقدام به پیشنهاددهی قیمت جهت خرید توان به منظور شارژ خودروها می‌نماید در حالی که هیچ برنامه‌ای جهت دشارژ خودروها در نظر گرفته نشده است.

در [۱۸] تجمیع‌کننده‌ای مورد بررسی قرار گرفته که هدف آن پیشنهاد بهینه خرید انرژی برای شارژ خودروهای الکتریکی و در کل کمینه کردن هزینه‌های خود از طریق شرکت در بازار انرژی و تنظیم است. همچنین در این تحقیق قیمتی از طریق تجمیع‌کننده جهت فروش و یا خرید انرژی به بازار پیشنهاد داده نشده و نقش بهره‌بردار شبکه توزیع به عنوان یک نهاد هماهنگ‌کننده تولید و مصرف نادیده گرفته شده است.

تفاوت مدل ارائه شده در این مقاله با تحقیقات و مقالات دیگر در این است که در اینجا یک مدل پویا از رفتار تجمیع‌کننده در مواجهه با بهره‌بردار شبکه توزیع ارائه شده است، در این مدل تجمیع‌کننده با پیش‌بینی میزان تقاضای شبکه توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی اقدام به خرید توان در ساعات ارزان قیمت می‌نماید و از طرفی در ساعات اوج بار شبکه برای کمک به بهره‌بردار شبکه توزیع همانند یک نیروگاه مجازی کوچک عمل کرده و با پیشنهاد قیمت به تجمیع‌کننده اقدام به فروش توان و کسب سود می‌نماید. در کل تجمیع‌کننده مورد نظر این مقاله همانند یک بازیگر جدید در بازار برق است که هم قابلیت تولید

مقاله تجمیع‌کننده الکتریکی در نقش رهبر، برای هر ساعت پیشنهاد قیمت بهینه فروش V2G را به DSO ارائه می‌دهد. DSO با قبول یا رد قیمت پیشنهادی، در مورد مقدار و زمان انرژی خریداری از تجمیع‌کننده یا شبکه سراسری به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌نماید که هزینه‌اش کمینه گردد [۲۲].



شکل ۱: ساختار مدل دوسطحی

### ۳- مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی

#### ۳-۱- تابع هدف سطح بالا: بیشینه نمودن سود تجمیع‌کننده خودروها

تابع هدف سود نهاد تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در رابطه (۱) ارائه شده است. این تابع شامل سه بخش درآمد حاصل از فروش V2G به DSO با قیمت بهینه پیشنهاد شده، درآمد ناشی از شارژ خودروها با قیمت قراردادی ثابت و هزینه خرید انرژی الکتریکی از DSO جهت شارژ الکتریکی خودروها می‌باشد.

$$f_{upper} : \max_{P_{ch}^s, P_{V2G}^s} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N \left[ P_{deh}^s(i, h) \cdot \rho_{V2G}^s(h) + P_{ch}^s(i, h) \cdot \rho_{co}^s(h) - P_{ch}^s(i, h) \cdot \rho_w^s(h) \right] \quad (1)$$

که در آن  $P_{deh}^s(i, h)$ : توان حقیقی دشارژ خودروی  $i$ ام در ساعت  $h$ ام از سناریوی  $S$ ،  $\rho_{V2G}^s(h)$ : قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده برای فروش انرژی حاصل از دشارژ در ساعت  $h$ ام.  $P_{ch}^s(i, h)$ : توان مورد نیاز برای شارژ خودروی  $i$ ام در ساعت  $h$ ام از سناریوی  $S$  است،  $\rho_{co}^s(h)$ : قیمت ثابت قراردادی جهت شارژ خودروهای الکتریکی موجود در پارکینگ بوده که در شبیه‌سازی‌ها به‌صورت سه مقدار ثابت مختلف (۳۵-۴۵-۵۰ دلار

حالت، تجمیع‌کننده می‌تواند از تفاوت قیمت ساعت اوج و غیراوج بهره‌مند شده و با پیشنهاد قیمت مناسب سود خود را حداکثر نماید. از طرف دیگر بهره‌بردار سیستم توزیع هم قادر خواهد بود در ساعت اوج با داشتن گزینه دیگر تأمین انرژی، بخشی از هزینه‌های خود را کاهش دهد.

۳. رفتار تصادفی مالکین خودروها از طریق تولید داده‌های تصادفی و عدم قطعیت پارامترهای قیمت انرژی بازار عمده‌فروشی و تقاضای توان شبکه توزیع با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  مدل شده است.

در ادامه این مقاله، بخش ۲ شامل معرفی ساختار کلی مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی می‌باشد. در بخش ۳ مدل ریاضی و روابط مسئله ارائه گردیده است. نتایج عددی حالت‌های مطالعاتی مختلف در بخش ۴ بررسی و تحلیل گردیده و سرانجام در بخش پنجم نتیجه‌گیری مباحث ارائه شده است.

### ۲- چهارچوب کلی مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاددهی قیمت تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی

با راه‌اندازی بازارهای خرده‌فروشی و با توجه به تنوع بیشتر بازیگران این بازار، در نظر گرفتن مدل‌های تصمیم‌گیری غیرمتمرکز جهت تحلیل رفتار صحیح آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است [۲۰]. در این بخش چارچوب کلی مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاددهی قیمت فروش V2G تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی معرفی می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، در سطح بالای مسئله، تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی با هدف بیشینه نمودن سود خود، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها را انجام می‌دهد. این برنامه‌ریزی متأثر از قیمت انرژی الکتریکی بازار، وضعیت شارژ اولیه خودروهای الکتریکی و زمان ورود و خروج آن‌ها می‌باشد. در این سطح، تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در تابع هدف بهینه‌سازی خود، دو متغیر قیمت پیشنهادی V2G و شارژ خودروها را برای هر ساعت تعیین می‌نماید. این متغیرها در سطح پایین مسئله برنامه‌ریزی که از دید بهره‌بردار سیستم توزیع است به صورت پارامترهایی معلوم وارد می‌شوند. در این سطح بهره‌بردار سیستم توزیع با هدف کمینه‌سازی هزینه کل تأمین انرژی مورد نیاز شبکه خود و با توجه به قیمت انرژی الکتریکی در بازار انرژی و قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده، دو متغیر سهم خرید انرژی از شبکه سراسری و خرید انرژی حاصل از دشارژ خودروها را تعیین می‌نماید. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده متغیر میزان خرید انرژی دشارژ خودروها (V2G) به عنوان پارامتری معلوم برای تجمیع‌کننده در سطح بالای مسئله ارسال می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا نقطه تعادل بهینه که مورد مصالحه و قبول هر دو نهاد هست حاصل گردد. برنامه‌ریزی دوسطحی بسیار شبیه به تئوری بازی استکلبرگ است. در این تئوری دو نوع نهاد یکی به عنوان رهبر و دیگری پیرو (دنبال‌کننده) وجود دارد. رهبر حرکت اول را انجام داده و منتظر واکنش پیرو است. سپس پیرو با شناخت حرکت رهبر اقدام به حرکت می‌کند [۲۱]. در این

$$f_{lower} : \quad \text{Min}_{P_{dch}^s, P_W^s} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N P_{dch}^s(i, h) \cdot \rho_{V2G}^s(h) + \sum_{h=1}^H P_W^s(h) \cdot \rho_W^s(h) \quad (9)$$

که  $\rho_W^s(h)$  و  $P_W^s(h)$  به ترتیب قیمت انرژی الکتریکی و توان خریداری شده توسط DSO از شبکه سراسری در ساعت  $h$  از سناریو  $S$  است. قید تعادل تولید و مصرف شبکه توزیع تحت مدیریت DSO در رابطه (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از آنجایی که در مدل ارائه شده شبکه توزیع به صورت تنها یک باس از محل اتصال پارکینگ الکتریکی به شبکه مدل گردیده، اثر تلفات شبکه در این محدودیت لحاظ نشده است [۱۵].

$$P_D^s(h) + \sum_{i=1}^N [P_{ch}^s(i, h) - P_{dch}^s(i, h)] = P_W^s(h) \quad \forall h \in H, \forall i \in N : \delta^s(h) \quad (10)$$

که  $P_D^s(h)$  تقاضای توان شبکه توزیع در ساعت  $h$  و  $\delta^s(h)$  ضریب لاگرانژ نظیر این محدودیت است. رابطه (۱۱) بیان‌گر محدودیت حداکثر توان عبوری از ترانسفورماتور بالادستی شبکه توزیع ( $P_T(h)$ ) است که بر روی توان خریداری شده DSO از بازار عمده فروشی ( $P_W^s(h)$ ) تاثیرگذار است.  $\xi(h)$  ضریب لاگرانژ متناسب با این قید است.

$$P_W^s(h) - P_T(h) \leq 0 \quad \forall h \in H : \xi(h) \quad (11)$$

### ۳-۳- مسئله تک‌سطحی معادل

روش‌های زیادی برای حل مسائل دوسطحی وجود دارد که یکی از روش‌های متداول استفاده از شرایط بهینگی کیروش-کاهن-تاکر (KKT) جهت تبدیل مسئله بهینه‌سازی دوسطحی به یک مسئله تک‌سطحی معادل است. در این روش، سطح پایینی مسئله بهینه‌سازی با شرایط بهینگی معادل KKT جای‌گزین شده و مدل مورد نظر به یک مسئله بهینه‌سازی تک سطحی تبدیل می‌گردد [۲۳-۲۵]. شرایط KKT در صورتی اعمال می‌شود که سطح پایینی مسئله بهینه‌سازی در متغیرهای پیوسته محدب باشد. مسئله بهینه‌سازی تک سطحی شده معادل علاوه بر قیود سطح بالای مسئله بهینه‌سازی دارای قیود مساوی کاهن تاکر (سطح پایینی) نیز می‌باشد [۲۶].

$f_{upper} : \text{profit of EV aggregator}$

$$\max_{P_{dch}^s, P_{ch}^s, P_W^s} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N \left[ P_{dch}^s(i, h) \cdot \rho_{V2G}^s(h) + P_{ch}^s(i, h) \cdot \rho_{co}^s(h) - P_W^s(h) \cdot \rho_W^s(h) \right] \quad (12)$$

Subject to :

Eq.(3-6) & (10-11) and KKT conditions :

$$\rho_{V2G}^s(h) - \delta^s(h) = 0 \quad (13)$$

$$\rho_W^s(h) - \delta^s(h) + \xi^s(h) = 0 \quad (14)$$

برمگاوات) در نظر گرفته شده است.  $N$  تعداد کل خودروهای الکتریکی درون پارکینگ و  $H$  تعداد کل ساعات شبیه‌سازی (۲۴ ساعت) است.
 

تجمیع‌کننده متعهد هست که خودروها در هنگام خروج از پارکینگ دارای مقدار انرژی مشخصی (۸۵٪ درصد ظرفیت باتری خودرو) باشند. رابطه (۲)، قید شرایط مرزی وضعیت انرژی خودروها (SOC) در هنگام خروج از پارکینگ را نشان می‌دهد [۱۵].

$$\sum_{h=arrival}^{h=departure} [ch^s(i, h) - dch^s(i, h)] + soc_0^s(i) = 0.85 \times C_{EV}(i) \quad \forall h \in H, \forall i \in N \quad (2)$$

که  $ch^s(i, h)$  و  $dch^s(i, h)$  به ترتیب میزان شارژ و دشارژ خودروی  $i$  در ساعت  $h$ ،  $soc_0^s(i)$  مقدار شارژ اولیه خودرو  $i$  در هنگام ورود به پارکینگ،  $C_{EV}(i)$  ظرفیت باتری خودروی  $i$  است.

با توجه به محدودیت‌های مربوط به باتری خودروهای الکتریکی قیود ۳ تا ۵ شرایط مرزی شارژ و دشارژ و SOC را به ترتیب نشان می‌دهد [۱۹].

$$0 \leq ch^s(i, h) \leq \bar{ch}(i, h) \quad \forall h \in H, \forall i \in N \quad (3)$$

$$0 \leq dch^s(i, h) \leq \bar{dch}(i, h) \quad \forall h \in H, \forall i \in N \quad (4)$$

$$soc_{min} \leq soc^s(i, h) \leq C_{EV}(i) \quad \forall h \in H, \forall i \in N \quad (5)$$

رابطه (۶) بیان‌گر SOC خودرو  $i$  در ساعت  $h$  است؛ که از SOC ساعت قبل به اضافه شارژ خودرو  $i$  در ساعت  $h$  منهای دشارژ خودرو  $i$  در ساعت  $h$  تشکیل می‌شود [۱۹].

$$soc^s(i, h) = soc^s(i, h-1) + ch^s(i, h) - dch^s(i, h) \quad \forall h \in H, \forall i \in N \quad (6)$$

رابطه‌های (۷) و (۸) مقدار حقیقی توان مورد نیاز جهت شارژ و دشارژ را با توجه به بازده مبدل نشان می‌دهد. که در آن  $\eta$  بازده مبدل در هر دو حالت شارژ و دشارژ فرض شده است [۱۵ و ۱۹].

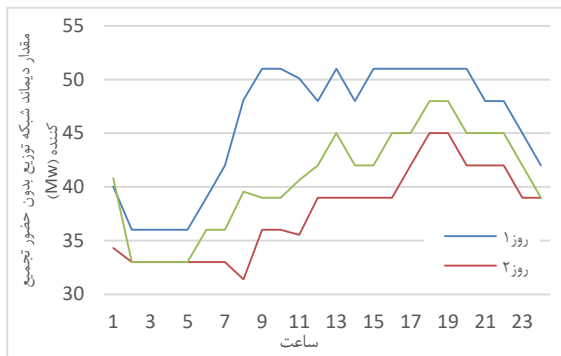
$$P_{ch}^s(i, h) = ch^s(i, h) / \eta \quad (7)$$

$$P_{dch}^s(i, h) = dch^s(i, h) \cdot \eta \quad (8)$$

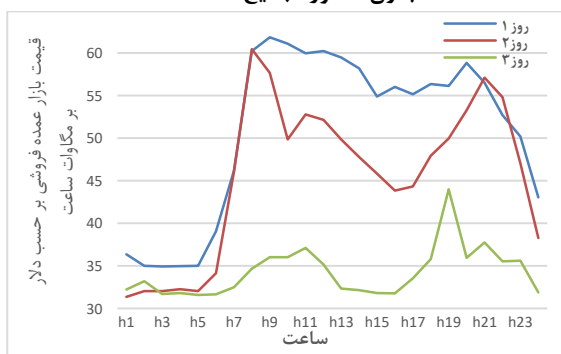
### ۳-۳- تابع هدف سطح پایین: کمینه نمودن هزینه بهره‌بردار سیستم توزیع

رابطه (۹) تابع هدف بهره‌بردار سیستم توزیع را در سطح دوم مسئله نمایش می‌دهد. این تابع، شامل دو عبارت هزینه تأمین انرژی از شبکه سراسری و تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی می‌باشد. در این تابع، دو متغیر میزان خرید انرژی از شبکه سراسری ( $P_W^s(h)$ ) و میزان خرید انرژی از تجمیع‌کننده ( $P_{dch}^s(i, h)$ ) با توجه به قیمت معلوم بازار انرژی و قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده از سطح بالای مسئله تعیین می‌گردند.

از روش 2m است [۲۹]. همچنین در روش 2m مقدار استاندارد متغیرها به مقدار m که متغیرهای ورودی عدم قطعیت هستند بستگی دارد در حالی که روش 2m+1 کاملاً مستقل است [۲۹]. نتایج به‌دست‌آمده در روش 2m+1 به خوبی روش 4m+1 است در حالی که توابع ارزیابی کم‌تری نسبت به روش 4m+1 مورد نیاز بوده و در نتیجه بسیار سریع‌تر از روش 4m+1 است [۳۱-۳۰]. با در نظر گرفتن مزایای روش تخمین نقطه‌ای 2m+1 نسبت به روش‌های دیگر تخمین نقطه‌ای، در این مقاله از این روش قوی، کارآمد و سریع جهت مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت استفاده می‌شود. در این مقاله m برابر دو مقدار است:  $P_w^s(h)$  و  $P_{dch}^s(i, h)$ . بنابراین پنج حالت برای تخمین داده‌های ورودی تولید خواهد شد. این سناریو برای تجمیع‌کننده‌ای با تعداد ۵۰۰ خودروی الکتریکی شبیه‌سازی شده است. منحنی بار شبکه توزیع و منحنی قیمت بازار عمده‌فروشی بر اساس اطلاعات سه روز نمونه از بازار Nordpool [۲۷] برای سناریوی اول و دوم، به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. شکل ۴ منحنی توان تأمین شده شبکه توزیع را با حضور تجمیع‌کننده در روزهای مختلف نشان می‌دهد، با مقایسه این شکل و شکل ۲ مشاهده می‌شود که اضافه‌شدن برنامه‌ریزی شده خودروهای الکتریکی نه تنها به شبکه آسیبی نمی‌رساند بلکه باعث بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع نیز می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نواحی دره بار با توجه به این که قیمت انرژی در این ساعات کم‌تر از ساعات دیگر است پر شده و در ساعات اوج مصرف با توجه به این که قیمت بازار عمده‌فروشی بالاست تجمیع‌کننده اقدام به پیشنهاد بهینه قیمت و فروش انرژی حاصل از دشارژ خودروها می‌نماید و نواحی اوج مصرف منحنی بار کم‌تر شده است.



شکل ۲: منحنی روزانه تقاضای توان شبکه توزیع در سه روز نمونه و بدون حضور تجمیع‌کننده



شکل ۳: منحنی روزانه قیمت بازار عمده‌فروشی در سه روز نمونه

$$\delta^s(h) \cdot \left\{ P_D^s(h) - P_W^s(h) + \sum_{i=1}^N [P_{dch}^s(i, h) - P_{ch}^s(i, h)] \right\} = 0 \quad (15)$$

$$\xi^s(h) \cdot \left\{ P_T(h) - P_W^s(h) \right\} = 0 \quad (16)$$

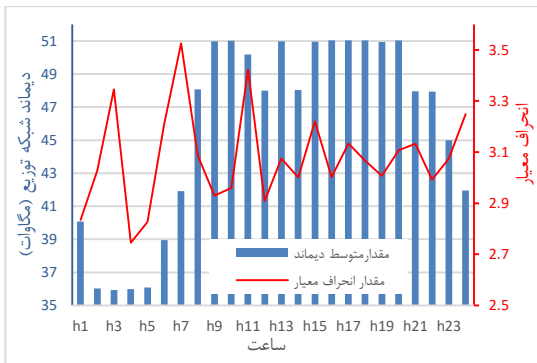
#### ۴- نتایج عددی

به منظور تحلیل و بررسی کارایی مدل ارائه شده، شبکه توزیع به صورت یک باس منفرد در محل اتصال پارکینگ به شبکه توزیع مدل شده که از طریق یک ترانسفورماتور به شبکه سراسری متصل می‌گردد. تقاضای بار معادل شبکه توزیع و تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی بر روی این باس معادل در نظر گرفته شده است. تجمیع‌کننده دارای حداکثر ظرفیت مجموع ۵۰۰ خودروی الکتریکی است و هر خودروی الکتریکی مجهز به باتری با ظرفیت ۳۲ کیلووات ساعت می‌باشد. برای همه خودروها، بیشینه نرخ شارژ و دشارژ ۳/۲ کیلو وات بر ساعت و بازده مبدل در حالت شارژ و دشارژ ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است [۱۵]. قیمت قراردادی جهت فروش انرژی به خودروها ۴۵ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است. سه سناریوی مختلف برای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی ارائه شده است.

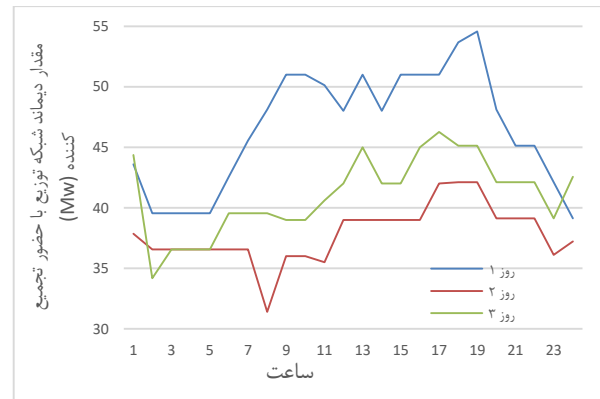
سناریوی اول: در این سناریو زمان ورود و خروج خودروها به ترتیب ساعت ۱۶ و ۷ صبح روز بعد می‌باشد. همچنین میزان شارژ اولیه خودروها هنگام ورود به پارکینگ ۱۹/۸ کیلووات ساعت فرض شده است؛ مقدار بار شبکه توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی برای سه روز نمونه از اطلاعات بازار Nordpool استخراج شده است این سه روز نمونه دارای الگوی پرباری، کم‌باری و میان‌باری مختلفی هستند که قیمت بازار نیز به طبع آن دارای سه منحنی تغییرات متفاوت می‌باشد [۲۷]. این سناریو برای تجمیع‌کننده‌ای با تعداد ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ خودروی الکتریکی شبیه‌سازی شده است.

سناریوی دوم: در این سناریو زمان ورود و خروج خودروها و همچنین میزان شارژ اولیه خودروها هنگام مراجعه به تجمیع‌کننده با استفاده از تابع توزیع نرمال و به صورت اعداد تصادفی در نرم افزار Matlab تولید شده و به مدل اعمال می‌گردد. داده‌های مربوط به تقاضای شبکه توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی همانند سناریوی اول فرض می‌شود. این سناریو برای تجمیع‌کننده‌ای با تعداد ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ خودروی الکتریکی شبیه‌سازی شده است.

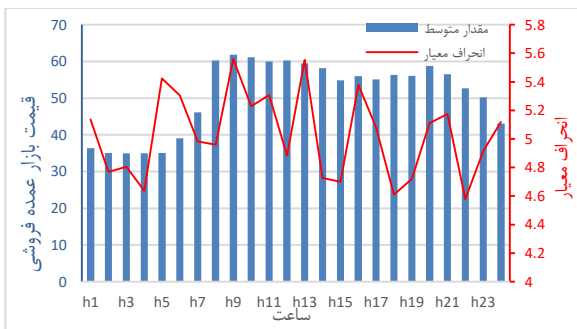
سناریوی سوم: زمان ورود و خروج و میزان شارژ اولیه خودروها هنگام مراجعه به تجمیع‌کننده همانند سناریوی دوم در نظر گرفته شده؛ در حالی که تقاضای شبکه توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی برای هر روز با استفاده از روش تخمین دنقطه‌ای 2m+1 به مدل اعمال شده است. روش تخمین نقطه‌ای PEM 2m در مسائل با متغیرهای ورودی تصادفی برای مدل سازی عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۸]. روش تخمین نقطه‌ای 2m+1 روشی دیگر از تخمین نقطه‌ای است که یک تابع ارزیابی بیش‌تر نسبت به روش تخمین نقطه‌ای 2m داراست. روش 2m+1 نقطه اوج متغیرهای ورودی عدم قطعیت را در نظر گرفته و بسیار دقیق‌تر



شکل ۶: مقدار متوسط و انحراف معیار تقاضای توان شبکه توزیع از روش تخمین نقطه‌ای در روز اول از سناریوی سوم

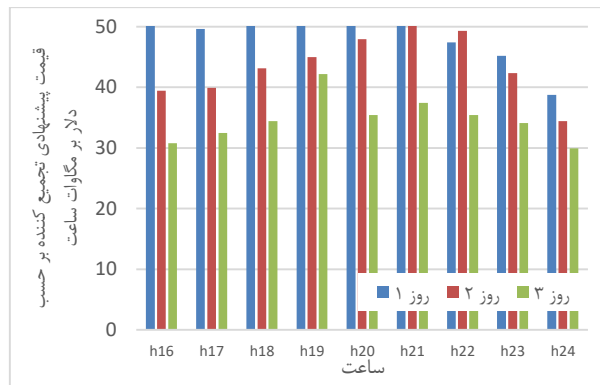


شکل ۴: منحنی روزانه تقاضای توان شبکه توزیع در سه روز نمونه و با حضور تجمیع کننده با تعداد ۵۰۰ خودروی الکتریکی و در سناریوی ۱



شکل ۷: مقدار متوسط و انحراف معیار قیمت بازار عمده‌فروشی از روش تخمین نقطه‌ای در روز اول از سناریوی سوم

با توجه به این‌که در این مقاله تجمیع کننده در ساعات اوج همانند یک تولیدکننده توان عمل کرده و اقدام به پیشنهاددهی قیمت جهت فروش انرژی می‌کند؛ بنابراین این قیمت پیشنهادی باید به گونه‌ای باشد تا بیشینه سود تجمیع کننده را منجر شود. قیمت پیشنهادی تجمیع کننده در ساعات مختلف روز و در سناریوی دوم در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود قیمت پیشنهادی تجمیع کننده از قیمت بازار عمده‌فروشی در هر ساعت کمتر است.

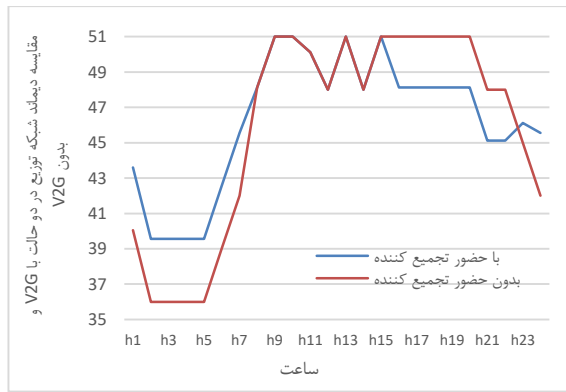


شکل ۵: قیمت پیشنهادی تجمیع کننده به DSO جهت فروش انرژی حاصل از دشارژ خودروها در ساعات و روزهای مختلف و در سناریوی ۲

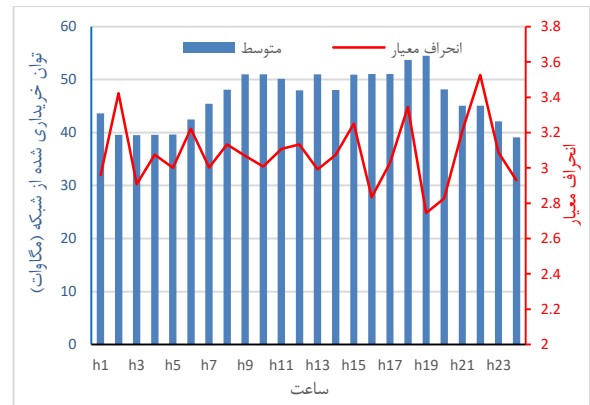
با توجه به تقاضای توان شبکه توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی، راهبرد بهینه جهت تعیین سهم خرید توان از هر بازار عمده‌فروشی یا تجمیع کننده توسط بهره‌بردار شبکه توزیع تعیین می‌شود. شکل ۸ مقدار توان خریداری شده از شبکه بالادستی توسط بهره‌بردار شبکه توزیع را نشان می‌دهد. شرکت توزیع با خرید این مقدار توان از شبکه بالادستی و خرید میزان مشخصی توان از تجمیع کننده هزینه‌های خود را کمینه کرده و در عین حال تقاضای مشترکان شبکه توزیع را تأمین می‌نماید. شکل ۹ مقدار SOC اولیه ۲۰ خودروی نمونه را در سناریوی دوم و سوم و برای سه روز مفروض نشان می‌دهد. با توجه به مسافت طی شده هر خودرو در طول روز، ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی و میزان مصرف انرژی خودرو در هر کیلومتر، میزان SOC اولیه هر خودرو هنگام مراجعه به تجمیع کننده قابل محاسبه است. بر اساس SOC اولیه خودروها، زمان ورود و خروج از پارکینگ، ظرفیت باتری هر خودرو، زمان مورد نیاز برای شارژ کامل هر خودرو و همچنین قیمت انرژی الکتریکی در بازار انرژی، بهره‌بردار پارکینگ در مورد نحوه برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ بهینه خودروها و همچنین بهره‌مندی از قابلیت فروش انرژی خودروها تصمیم‌گیری می‌نماید. با توجه به این‌که زمان ورود و خروج و میزان مسافت طی شده خودروها در هر روز متفاوت است بنابراین میزان SOC اولیه خودروها هنگام مراجعه به تجمیع کننده نیز متفاوت و تصادفی در نظر گرفته شده است.

در سناریوی سوم، با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای، تقاضای شبکه‌ی توزیع و قیمت بازار عمده‌فروشی در ۵ تخمین توسط نرم‌افزار MATLAB تولید شده و سپس شبیه‌سازی برای هر ۵ تخمین به‌طور مجزا اجرا و در نهایت مقدراً متوسط و انحراف معیار نتایج محاسبه می‌گردد. شکل ۶ مقدار متوسط تقاضای شبکه توزیع را برای روز اول و در سناریوی سوم نشان می‌دهد. همچنین مقدار انحراف معیار مقادیر بر روی شکل مشخص شده است.

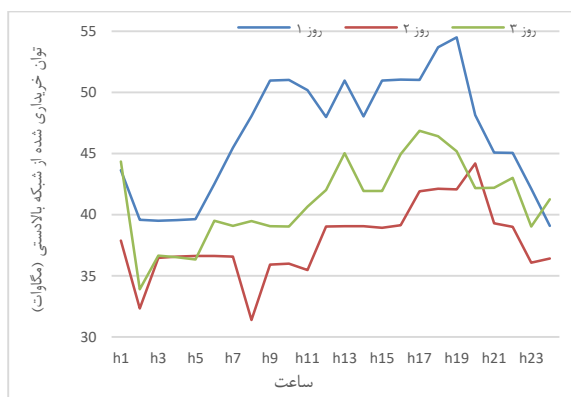
مقدار متوسط و انحراف معیار مربوط به قیمت بازار عمده‌فروشی در شکل ۷ نشان داده شده که جهت اجتناب از ازدیاد اطلاعات، منحنی‌های مربوط به دو روز دیگر نمایش داده نشده است.



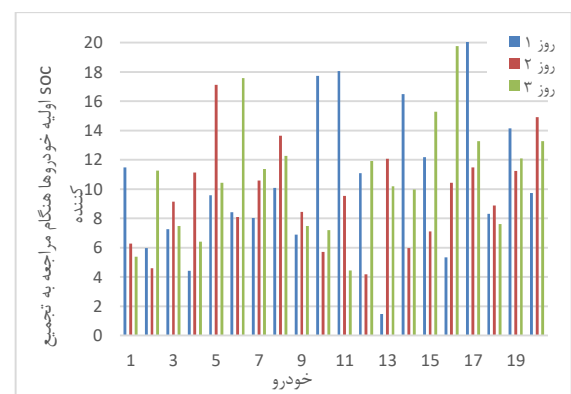
شکل ۱۰: انرژی خریداری شده از بازار در دو حالت بدون حضور تجمیع کننده و با حضور تجمیع کننده با ظرفیت ۵۰۰ خودرو در روز اول و سناریوی اول



شکل ۸: توان خریداری شده از شبکه بالادستی به همراه انحراف معیار در روز اول و سناریو سوم شبیه‌سازی

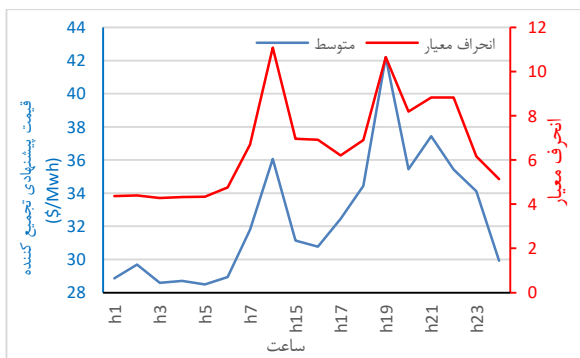


شکل ۱۱: متوسط توان خریداری شده از شبکه به منظور تغذیه بارهای شبکه توزیع و تجمیع کننده خودروهای برقی



شکل ۹: SOC اولیه ۲۰ خودرو نمونه هنگام مراجعه به تجمیع کننده در روزهای مختلف در سناریوی ۲ و ۳

از تعامل میان بهره‌بردار شبکه توزیع و تجمیع کننده در مدل دوسطحی ارائه شده، قیمت بهینه پیشنهادی V2G مورد قبول واقع شده و تجمیع کننده با این قیمت اقدام به فروش انرژی حاصل از دشارژ خودروها به DSO می‌نماید. شکل ۱۲ متوسط قیمت پیشنهادی تجمیع کننده به همراه انحراف معیار آن را در ساعات و روزهای مختلف از سناریوی سوم و با تجمیع کننده‌ای با ظرفیت ۵۰۰ خودروی الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: متوسط قیمت پیشنهادی تجمیع کننده به DSO جهت فروش V2G در روز سوم و سناریو سوم

اضافه شدن تجمیع کننده به شبکه توزیع و برنامه‌ریزی مناسب و هماهنگ شارژ و دشارژ منجر به کاهش اوج بار شبکه و پر شدن نواحی دره منحنی بار خواهد شد. شکل ۱۰ این مسئله را به خوبی برای سناریوی اول نشان می‌دهد. در این شکل تقاضای شبکه توزیع را در دو حالت با حضور تجمیع کننده و بدون حضور تجمیع کننده نشان داده می‌شود. با توجه به استراتژی تجمیع کننده و بهره‌بردار شبکه توزیع که هدف هر کدام به ترتیب بیشینه نمودن سود و کمینه نمودن هزینه خود است؛ نواحی دره منحنی تقاضا پر شده و در نواحی اوج بار شبکه توزیع، تجمیع کننده با تولید توان به کمک بهره‌بردار شبکه توزیع آمده و نواحی اوج بار کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۱۱ منحنی تقاضای شبکه توزیع با حضور تجمیع کننده در روزهای مختلف از سناریوی سوم را با ظرفیت ۵۰۰ خودروی الکتریکی در پارکینگ نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی روز اول شکل ۱۱ با شکل ۶ ملاحظه می‌شود که در سناریوی سوم نیز با اضافه شدن تجمیع کننده به شبکه توزیع وضعیت منحنی بار شبکه توزیع بهبود پیدا خواهد نمود. تجمیع کننده با پیش‌بینی نواحی اوج قیمت و بار شبکه توزیع اقدام به برنامه‌ریزی جهت خرید و فروش توان در ساعات اوج و دره منحنی بار می‌نماید.



هر چه تعداد خودروهای درون پارکینگ بیش‌تر باشد، DSO هزینه بیش‌تری را برای خرید انرژی جهت تغذیه خودروها متحمل می‌شود. همچنین با کاهش قیمت بازار عمده‌فروشی در روز دوم و سوم نسبت به روز اول هزینه DSO نیز کاهش پیدا خواهد نمود. همچنین اگر خودروها قابلیت V2G را نداشته باشند اضافه شدن خودروها به شبکه توزیع به مثابه یک اضافه بار برای شبکه محسوب شده و بهره‌بردار شبکه توزیع هزینه بیش‌تری را برای خرید انرژی و تغذیه خودروها متحمل می‌شود. مقدار سود تجمیع‌کننده در سناریوهای مختلف و روزهای کاری متفاوت و با تعداد ۳۰۰ خودروی الکتریکی در جدول ۲ نشان داده شده است. در سناریو اول خودروها ساعات بیش‌تری را در تجمیع‌کننده حضور دارند، بنابراین تجمیع‌کننده در این سناریو دارای اختیار بیش‌تری برای دشارژ خودروها و فروش آن خواهد بود. همچنین در روز اول قیمت پیشنهادی جهت فروش دشارژ خودروها بالاتر از روزهای دیگر است و طبیعتاً سود تجمیع‌کننده در سناریوی اول و روز اول بیش‌تر از سایر حالت‌ها است.

جدول ۲. سود تجمیع‌کننده در سناریو و روزهای مختلف (دلار)

سناریو	روز ۱	روز ۲	روز ۳
سناریو ۱	۴۵۶/۷۲	۴۵۲	۳۶۰/۰۸
سناریو ۲	۳۶۷/۱۳	۳۹۰/۵۴	۳۲۷/۴۳
سناریو ۳	۲۱۰/۸۷	۱۹۳/۷	۱۹۸/۷۷

مقدار متوسط و انحراف معیار سود تجمیع‌کننده و هزینه DSO در سناریوی سوم به‌ترتیب در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است. شبیه‌سازی بر اساس روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  و برای پنج حالت انجام پذیرفته و مقادیر میانگین و انحراف معیار در این جدول‌ها نشان داده شده است. با توجه به این‌که قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده متأثر از قیمت بازار عمده‌فروشی است، ملاحظه می‌شود که در روز سوم تجمیع‌کننده دارای سود کم‌تری نسبت به دو روز دیگر است. از طرف دیگر با توجه به این‌که در روز سوم قیمت بازار کم‌تر از دو روز دیگر است؛ هزینه DSO در این روز کم‌تر از روز اول و دوم است.

جدول ۳: میزان متوسط و انحراف معیار سود تجمیع‌کننده‌ای با ۵۰۰

خودرو و در سناریوی سوم (دلار)

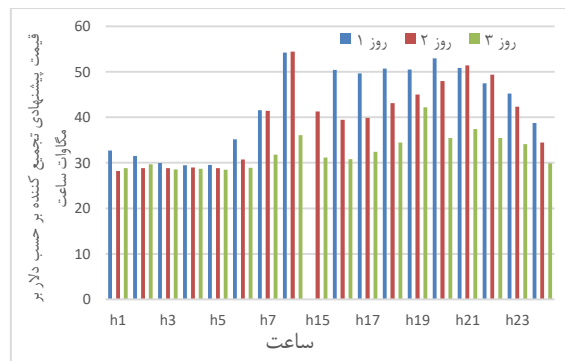
متوسط			انحراف معیار		
روز ۱	روز ۲	روز ۳	روز ۱	روز ۲	روز ۳
۳۸۶/۶	۳۹۱/۲	۳۸۴/۳	۳۱	۳۰/۶	۳۹/۱

جدول ۴: مقدار متوسط و انحراف معیار هزینه DSO در روزهای

مختلف از سناریوی سوم (دلار)

متوسط			انحراف معیار		
روز ۱	روز ۲	روز ۳	روز ۱	روز ۲	روز ۳
۲۹۱۵۸۸	۲۱۱۷۵۹	۱۸۴۲۶۲	۲۸۳۸۵	۳۷۲۷۰	۳۵۳۱۴

قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده در روزهای مختلف از سناریوی سوم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این‌که در روز اول قیمت بازار عمده‌فروشی بیش از دو روز دیگر است بنابراین قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده در این روز بیش‌تر از دو روز دیگر به‌دست آمده است. با توجه به این‌که در ساعت ۱۵ از روز اول، خودرویی درون پارکینگ حضور نداشته و یا مقدار SOC خودروها برای دشارژ کافی نمی‌باشد، در این ساعت، قیمتی برای دشارژ توسط تجمیع‌کننده پیشنهاد نشده است.



شکل ۱۳: متوسط قیمت پیشنهادی تجمیع‌کننده به DSO جهت فروش انرژی حاصل از دشارژ خودروها در ساعات و روزهای مختلف و در سناریو ۳

جدول ۱ مقدار هزینه DSO را در سناریوها و روزهای کاری مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در روز اول قیمت بازار عمده‌فروشی بیش‌تر از دو روز دیگر است؛ DSO در روز اول دارای هزینه بیش‌تری نسبت به دو روز دیگر است. همچنین در سناریوی اول خودروها ساعات بیش‌تری را در پارکینگ حضور داشته و بنابراین تجمیع‌کننده امکان بیش‌تری جهت استفاده از قابلیت V2G خودروها خواهد داشت. در این سناریو، DSO مقدار انرژی بیش‌تری را با قیمتی کم‌تر از بازار انرژی الکتریکی از تجمیع‌کننده خریداری نموده و در نهایت هزینه کم‌تری را متحمل می‌شود. با توجه به این‌که تجمیع‌کننده به کمک شبکه توزیع می‌آید و ساعات اوج بار را کاهش می‌دهد و از طرفی نواحی دره بار را پر می‌کند بنابراین با اضافه شدن تجمیع‌کننده به شبکه توزیع، هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع کاهش یافته و سود بیشینه بهره‌بردار شبکه توزیع را به همراه خواهد داشت.

جدول ۱. مقایسه هزینه بهره‌بردار شبکه توزیع در دو حالت با V2G و

بدون حضور V2G

سناریو	روز ۱	روز ۲	روز ۳
سناریو ۱	V2G با	۲۶۲۲۳۹	۱۵۶۴۸۲
	بدون V2G	۲۹۲۳۵۶	۱۶۱۳۲۸
سناریو ۲	V2G با	۱۹۱۳۹۴	۱۶۹۷۸۷
	بدون V2G	۲۹۸۲۴۹	۱۷۴۹۸۱
سناریو ۳	V2G با	۱۹۱۵۸۹	۱۸۴۲۶۲
	بدون V2G	۲۹۸۵۶۲	۱۸۷۸۶۵

## مراجع

- [1] K. Parks, P. Denholm, and T. Markel, "Cost and emissions associated with plug-in hybrid vehicle charging," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech.Rep, May 2007 .
- [2] G. K. Venayagamoorthy, G. Braband, "Carbon reduction potential with intelligent control of power systems," in Proc. 17th World Congr., Int. Federation Autom. Control, Seoul, Korea, p. 13 952–13 957, Jul. 6–11, 2008 .
- [3] IEA (OECD/IEA), "Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles," <http://www.iea.org/about/copyright.asp>, 2009.
- [4] K. J. Yunus, Plug-In Electric Vehicle Charging Impacts on Power Systems, chalmers university of technology Göteborg, Sweden, 2010 .
- [5] A. d. (Guibert, "Batteries and super capacitors cells for the fully electric vehicle," <http://www.smart-systemsintegration.org/public/electricvehicle/batteryworkshopdocuments/presentations/Anne%20de%20Guibert%20Saft.pdf/download>, 2009.
- [6] W. Kempton, V. Udo, K. Huber, K. Komara, S. Letendre, S. Baker, D. Brunner, N. Pearre, "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System," November 2008. <https://www1.udel.edu/V2G/resources/test-v2g-in-pjm-jan09.pdf>
- [7] جمشید آقایی، سید احسان باقری، سجاد شفیعی، طاهر نیکنام و سید محسن باقری، «بررسی پاسخ‌گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۱–۲۰، ۱۳۹۶.
- [8] E. Akhavan-Rezai, M. F. Shaaban, E. F. El-Saadany, A. Zidan, "Uncoordinated Charging Impacts of Electric Vehicles on Electric Distribution Grids: Normal and Fast Charging Comparison," IEEE Conf. on Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [9] P. Denholm and W. Short, "An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles," National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [10] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid," Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 1, pp. 185-192, 2011.
- [11] M. Singh, P. Kumar, I. Kar, "A Multi Charging Station for Electric Vehicles and Its Utilization for Load Management and the Grid Support," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 1026-1037, 2013.
- [12] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, 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 Trans. on Smart Grid, vol. 2, no. 3, pp. 456-467, 2011.
- [13] مهدی تورانی، محمدرضا آقابراهیمی و حمیدرضا نجفی، «برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه بر پایه مسافرت روزانه خودروها»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۷۶–۶۵، ۱۳۹۵.
- [14] حسن براتی و فرشید عشیر، «مدیریت و کمینه‌سازی هزینه انرژی با ساختار نیروگاه مجازی و در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، پذیرفته شده، مقاله آماده انتشار.
- [15] F. Askari, M. R. Haghifam ; J. Zohrevand ; A. Khoshkholgh, "An Economic Model for Power Exchange of V2Gs in Parking Lots," Integration of Renewables into the Distribution Grid, " CIRED, May 2012.
- [16] Kristoffer Weywadt, "Optimal bidding strategy for PHEV fleet aggregators - A bilevel model" Master Thesis, Power Systems Laboratory, ETH Zurich 2012

تجمع‌کننده برای فروش انرژی به خودروها قراردادی را با آنها منعقد می‌کند و انرژی را با قیمتی ثابت به مالکان خودروها تحویل می‌دهد. در این تحقیق، قیمت قراردادی شارژ خودروها الکتریکی در پارکینگ برابر ۴۵ دلار بر مگاوات‌ساعت در نظر گرفته شده است. بدیهی است که انتخاب مقدار مناسب این مقدار اثر مستقیمی در سطح رضایت و از طرف دیگر افزایش سود تجمع‌کننده در پی خواهد داشت. به همین منظور در این بخش به بررسی اثر تغییرات قیمت قراردادی شارژ خودروهای الکتریکی در پارکینگ پرداخته می‌شود. جدول ۵ سود تجمع‌کننده‌ای با ۳۰۰ خودروی الکتریکی را در سناریوی دوم و با سه قیمت قراردادی در روزهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵. سود تجمع‌کننده در سناریوی دوم و با ۳۰۰ خودروی الکتریکی (دلار)

روز ۳	روز ۲	روز ۱	
۲۸۰/۵	۳۱۶/۶	۲۹۷/۹	قیمت قراردادی ۴۵ (دلار) برمگاوات‌ساعت)
۳۲۲/۷	۳۵۸/۶	۳۳۹/۹	قیمت قراردادی ۵۰ (دلار) برمگاوات‌ساعت)
۳۶۵/۲	۴۰۱/۹	۳۸۱/۳	قیمت قراردادی ۵۵ (دلار) برمگاوات‌ساعت)

## ۵- نتیجه‌گیری

بهره‌بردار توزیع همواره تمایل دارد که انرژی الکتریکی را با قیمتی کم‌تر از بازار عمده‌فروشی از تولیدکنندگان محلی شبکه خود خریداری نماید؛ اما انتخاب قیمت مناسب و مورد قبول هر دو نهاد ذی‌نفع مسئله‌ای چالش‌برانگیز و مورد اختلاف می‌باشد. در این مقاله مدل تصمیم‌گیری غیرمتمرکز مبتنی بر برنامه‌ریزی دوسطحی با حضور تجمع‌کننده خودروهای الکتریکی و بهره‌بردار شبکه توزیع ارائه شده است. تجمع‌کننده علاوه بر تصمیم‌گیری در مورد زمان و میزان بهینه شارژ الکتریکی خودروهای ورودی به پارکینگ، با انتخاب یک راهبردی بهینه پیشنهاددهی قیمت فروش انرژی (V2G) را با توجه به واکنش بهره‌بردار توزیع انجام داده و انرژی V2G خودروها را در قیمت توافقی به‌دست‌آمده در مدل دو سطحی به شبکه تزریق می‌نماید. هدف این مقاله مدل‌سازی رفتار تجمع‌کننده خودروهای الکتریکی در تعامل با بهره‌بردار سیستم توزیع است. همان‌طور که از نتایج به‌دست‌آمده در بخش چهارم ملاحظه می‌شود با اضافه شدن تجمع‌کننده به شبکه توزیع ضریب بار بهتری برای منحنی بار شبکه توزیع به دست آمده و برنامه‌ریزی هماهنگی شارژ و دشارژ موجب تسطیح نواحی اوج و دره منحنی بار خواهد گردید و در عین حال ضمن حداکثر شدن سود تجمع‌کننده، تابع هزینه بهره‌بردار توزیع نیز حداقل می‌گردد.

- [25] M. J. Rider, J. M. Lopez-Lezama, J. Contreras, A. Padilha-Feltrin, "Bilevel approach for optimal location and contract pricing of distributed generation in radial distribution systems using mixed-integer linear programming," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, no. 7, pp. 724-734, 2012.
- [26] R. E. Rosenthal, "GAMS: A User's Guide Washington, DC: GAMS Development Corporation," 1998. [Online]. Available: <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>
- [27] "Nordpool market website.," [Online]. Available: <http://www.nordpoolspot.com/Marketdata1>.
- [28] Ghasemi A, mortzavi SS, mashhour E. "Hourly demand response and battery energy storage for imbalanced reduction of smart distribution company embedded with electric vehicles and wind farms.renew energy" 2016,85:124-36.
- [29] Morales JM,Perez-Ruiz J. "Point estimate scheme to solve the probabilistic power flow". IEEE Trans Power Syst 2007,22:1597-601
- [30] Delgado C, Dominguez-Navarro JA, "point estimate method for probabilistic load flow of an unbalanced power distribution system with correlated wind and solar sources". Electr power energy Syst 2014, 61:267-78.
- [31] Ali Shayegan-Rad, Ali Badri, Ali Zangeneh, "Day-ahead scheduling of virtual power plant in joint energy and regulation reserve markets under uncertainties" Elsevier Energy 121 (2017) 114e125.
- [17] Marina González Vayá, and Göran Andersson, "Optimal Bidding Strategy of a Plug-In Electric Vehicle Aggregator in Day-Ahead Electricity Markets Under Uncertainty" , IEEE transactions on power systems, vol. 30, no. 5, pp. 2375 – 2385, September 2015
- [18] Stylianos I. Vagropoulos, Anastasios G. Bakirtzis, "Optimal Bidding Strategy for Electric Vehicle Aggregators in Electricity Markets" IEEE transactions on power systems, vol. 28, no. 4, pp. 4031 – 4041, November 2013.
- [19] C. Hutson, G. K. Venayagamoorthy, K. A. Corzine, "Intelligent Scheduling of Hybrid and Electric Vehicle Storage Capacity in a Parking Lot for Profit Maximization in Grid Power Transactions," IEEE Conf. on Energy, Nov. 2008.
- [20] G. Zhang, G. Zhang, Y. Gao, J. Lu, "Competitive Strategic Bidding Optimization in Electricity Markets Using Bilevel Programming and Swarm Technique," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 58, no. 6, pp. 2138-2146, 2011.
- [21] M. A. Amouzegar, "A Global Optimization Method for Nonlinear Bilevel Programming Problems," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 29, no. 6, pp. 771-777, 1999.
- [22] J. M. Lopez-Lezama, A. Padilha-Feltrin, J. Contreras, J. I. Munoz, "Optimal Contract Pricing of Distributed Generation in Distribution Networks," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 128-136, 2011.
- [23] M. Carrion, J. M. Arroyo; A, J. Conejo, "A Bilevel Stochastic Programming Approach for Retailer Futures Market Trading," IEEE Trans. on Power Sys., vol. 24, no. 3, pp. 1446-1456, 2009.
- [24] J. M. Arroyo, "Bilevel programming applied to power system vulnerability analysis under multiple contingencies," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 4, no. 2, pp. 178-190, 2009.