

ارائه‌ی یک مدل دوسطحی برای برنامه‌ریزی تجميع گر خودروهای الکتریکی در فضای رقابتي با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

هما رشیدی‌زاده کرمانی^۱، دانشجوی دکتری، مصطفی واحدی‌پور دهرائی^۱، مربی، حمیدرضا نجفی^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Rashidi_homa@birjand.ac.ir, vahedipour_m@birjand.ac.ir, h.r.najafi@birjand.ac.ir.

چکیده: با افزایش تعداد خودروهای الکتریکی در شبکه قدرت لازم است تعامل آنها با شبکه به‌گونه‌ای مدیریت شود تا ضمن کمینه شدن هزینه‌های خودروداران، سود عوامل خدمت‌رسان به آنها نیز بیشینه شود. از این رو، در این مقاله یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری احتمالاتی دوسطحی برای مشارکت تجميع گر خودروهای الکتریکی در بازار رقابتي با در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت ارائه شده است. منابع عدم قطعیت برای مشارکت تجميع گر در بازار شامل قیمت‌های بازار روز آینده و تعادل، قیمت‌های پیشنهادی از سوی رقا و نیز بار شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی است که با استفاده از سری‌های زمانی مدل‌سازی شده است. در برنامه‌ی دوسطحی پیشنهادی، هدف سطح اول بیشینه کردن سود تجميع گر در تعامل با شبکه و خودروداران و هدف سطح دوم آن کمینه کردن هزینه‌های پرداختی خودروداران است. از آنجایی که تابع هدف سطح اول و دوم در تضاد با یکدیگر هستند، با استفاده از شرایط بهینگی KKT و تئوری دوگان مسئله‌ی دوسطحی پیشنهادی به یک مسئله‌ی تک‌سطحی خطی تبدیل شده است. در نهایت، برنامه‌ی پیشنهادی در یک سیستم نمونه اجرا شده و نتایج نشان می‌دهد که با بکارگیری این مدل تجميع گر می‌تواند با ارائه‌ی سیگنال قیمت شارژ و دشارژ بهینه ضمن حفظ مشتریان خود در بازار رقابتي، بیشترین سود را نیز کسب نماید.

واژه های کلیدی: خودروهای الکتریکی، تجميع گر، برنامه‌ریزی احتمالاتی دوسطحی، بازار انرژی الکتریکی، عدم قطعیت.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۴/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول : مصطفی واحدی‌پور دهرائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران- بیرجند- دانشگاه بیرجند

۱- مقدمه

با افزایش حضور خودروهای الکتریکی در شبکه‌ی توزیع، برنامه‌ریزی دقیق برای مشارکت آنها در بازار انرژی الکتریکی ضروری است. از آنجایی که معمولاً خودروها نمی‌توانند به صورت انفرادی در بازار برق شرکت کنند، لازم است مدیریت مبادلات انرژی بین خودروها و شبکه، توسط نهاد واسطی به نام تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی صورت پذیرد [۱، ۲]. تجمیع‌گر با تجمیع کردن مجموعه‌ی بارهای خودروها اجازه تعامل با بازار برق را برای آنها فراهم کرده و فرآیند شارژ و دشارژ آنها را مدیریت می‌کند [۳]. در فضای رقابتی بازار انرژی، هر تجمیع‌گر برای تبادلات خود با شبکه و خودروهای الکتریکی نیازمند برنامه‌ی مناسبی است تا بهترین تصمیم را اتخاذ نماید و بیشترین سود را کسب کند. در واقع تجمیع‌گر باید بتواند با مدیریت مناسب فرآیند شارژ و دشارژ خودروهای تحت مدیریت خود، ضمن رقابت با دیگر تجمیع‌گرها، نحوه‌ی مشارکت مطلوب خودروها را در تبادلات بازار برق را فراهم سازد. در عین حال، یک تجمیع‌گر در تصمیم‌گیری‌های خود برای مدیریت بهینه‌ی خودروهای الکتریکی، با عدم قطعیت‌های فراوانی در اطلاعات ورودی روبروست که از جمله می‌توان به عدم قطعیت‌های قیمت‌های بازار انرژی الکتریکی، رفتار صاحبان خودروها و همچنین عدم قطعیت‌های قیمت‌های پیشنهادی از سوی تجمیع‌گرهای رقیب اشاره کرد [۴، ۵]. تجمیع‌گر باید از یک سو، در بازار پرنوسان انرژی، که دارای عدم قطعیت زیادی است، بهترین خرید را انجام دهد و از سوی دیگر، بهترین پیشنهاد قیمت شارژ و دشارژ را به خودروداران ارائه دهد تا بتواند در این بازار رقابتی باقی بماند و ضمن حفظ مشتریان خود سود مطلوبی نیز کسب نماید. از این رو، مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر باید در یک ساختار دو سطحی برنامه‌ریزی شود تا هم‌زمان سود تجمیع‌گر و هزینه‌های خودروداران در آن دیده شود.

در دهه‌ی اخیر، مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر خودروی الکتریکی در بازار برق توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است [۶-۱۳]. به عنوان نمونه، در [۶] از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات در مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر برای مشارکت در مناقصه‌های بازار برق استفاده شده است. همچنین، یک ساختار بهینه برای مشارکت یک تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در بازار روز آینده و انجام خدمات جانبی در [۸] بررسی شده است. یک برنامه‌ی مشارکتی برای فرآیند شارژ خودروهای الکتریکی و همچنین قیمت‌دهی بارهای قابل قطع در [۹] پیشنهاد شده است که در آن تجمیع‌گر به فرمان‌های ارسالی از سوی شبکه پاسخ می‌دهد و بر اساس آن برای مدیریت بارهای خودروها تصمیم‌گیری می‌کند. همچنین، در [۱۰] یک مدل احتمالاتی برای نحوه‌ی قیمت‌دهی و شرکت در مناقصه‌های بازار روز آینده و ذخیره برای تجمیع‌گر خودروها پیشنهاد شده است. در [۱۱] مسئله‌ی مشارکت تجمیع‌گر در بازار

انرژی با در نظر گرفتن تنها وضعیت شارژ یک طرفه‌ی خودروهای الکتریکی، بررسی شده است. در [۱۲] یک برنامه‌ی بهینه برای مشارکت تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در بازار روز آینده پیشنهاد شده است که در آن تجمیع‌گر برای کاهش انحراف بین مقادیر پیش-بینی شده و مقادیر واقعی توان در بازار تعادل مشارکت می‌کند. در [۱۳]، در یک بازار انحصاری چندجانبه، مسئله‌ی برنامه‌ریزی یک تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در بازار روز آینده و نزدیک به زمان واقعی آورده شده است. در کارهای مرور شده عموماً یک بازار انحصاری در نظر گرفته شده و رقابت بین تجمیع‌گرها در مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر دیده نشده است.

از آنجایی که امروزه بازار انرژی الکتریکی از حالت انحصاری خارج شده و یک قالب رقابتی به خود گرفته است، نادیده گرفتن عملکرد و تصمیمات تجمیع‌گرهای رقیب توسط یک تجمیع‌گر می‌تواند او را در بازار رقابت ناکام گذارد. از این رو، برخی از پژوهشگران به مسئله‌ی تصمیم‌گیری بازیگران مختلف بازار برق در فضای رقابتی توجه کرده‌اند [۱۴-۱۶]. در [۱۴]، نویسندگان یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری برای یک شرکت توزیع برای مدیریت منابع تولید پراکنده و بارهای قابل قطع در یک فضای رقابتی ارائه داده‌اند. همچنین، در [۱۵]، با استفاده از روش بازی مارکوف^۱ رفتار رقابتی تولیدکنندگان در بازار انرژی الکتریکی مدل‌سازی شده است. به‌طور مشابه در [۱۶]، یک مدل همکاری بازی^۲ برای تعیین نحوه‌ی تعاملات بین پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی و بالادست در بازار ذخیره به‌منظور جبران عدم قطعیت‌های ناشی از طبیعت احتمالاتی منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. اگرچه در مقالات مرور شده اخیر فضای رقابتی در نظر گرفته شده است، اما هم‌زمان اولویت خودروداران به عنوان بازیگران پایین‌دست بازار انرژی در مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر در نظر گرفته نشده است.

با این وجود، در برخی دیگر از مطالعات، مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر به صورت یک مسئله‌ی دوسطحی احتمالاتی مدل‌سازی شده اما بحث رقابت بین تجمیع‌گرها در آنها دیده نشده است [۱۷-۱۸]. در [۱۷]، یک مسئله‌ی دوسطحی ارائه شده که در آن تجمیع‌گر تلاش دارد تا با در نظر گرفتن اولویت‌های خودروداران، سود خود را بیشینه کند. در این مرجع، اگرچه منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده است، اما بحث رقابت در نظر گرفته نشده است. در [۱۸]، یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی برای بدست آوردن سود بهینه‌ی تجمیع‌گر هم‌زمان با کمینه شدن هزینه‌های پرداختی صاحبان خودروها ارائه شده است. در این مطالعه نیز اگر چه برنامه‌ریزی تجمیع‌گر به صورت یک مسئله‌ی دوسطحی در نظر گرفته شده، اما رقابت بین تجمیع‌گرها در نظر گرفته نشده است.

در یک بازار رقابتی تصمیمات تجمیع‌گرهای رقیب بر فعالیت یک تجمیع‌گر اثرگذار است. نادیده گرفتن تصمیمات رقبای ممکن است سبب از دست دادن مشتریان و در نتیجه ناکام ماندن تجمیع‌گر در این رقابت شود. در این مقاله، برای پوشش دادن این خلأ مطالعاتی، یک

مدل احتمالاتی دوسطحی با در نظر گرفتن فضای رقابتی بین تجمیع-گرها برای تصمیم‌گیری یک تجمیع‌گر ارائه شده است. بدین ترتیب، می‌توان نوآوری‌های این مقاله را بدین ترتیب بیان کرد:

- مدل‌بندی مسئله تصمیم‌گیری یک تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در فضای رقابتی به صورت یک مسئله دو سطحی، به‌گونه‌ای که در سطح بالای مدل ارائه شده تجمیع‌گر باید سود مورد انتظار خود را بیشینه کند و در سطح پایین نیز صاحبان خودروهای الکتریکی بتوانند با کمترین هزینه خودروهای خود را شارژ کنند و با بیشترین قیمت/ف خودروی خود را دشارژ کنند،

- تبدیل مسئله دو سطحی بدست آمده به مدل تک‌سطحی آن با استفاده از شرایط بهینگی^۲ (KKT) و نظریه‌ی دوگان،

- مدل‌بندی تمام منابع عدم قطعیت موجود در فضای مسئله شامل قیمت‌های بازار روز آینده و بازار تعادل، بار شارژ و دشارژ خودروها و نیز عدم قطعیت ناشی از قیمت‌های پیشنهادی رقبا با استفاده از سری‌های زمانی و تابع چگالی احتمال.

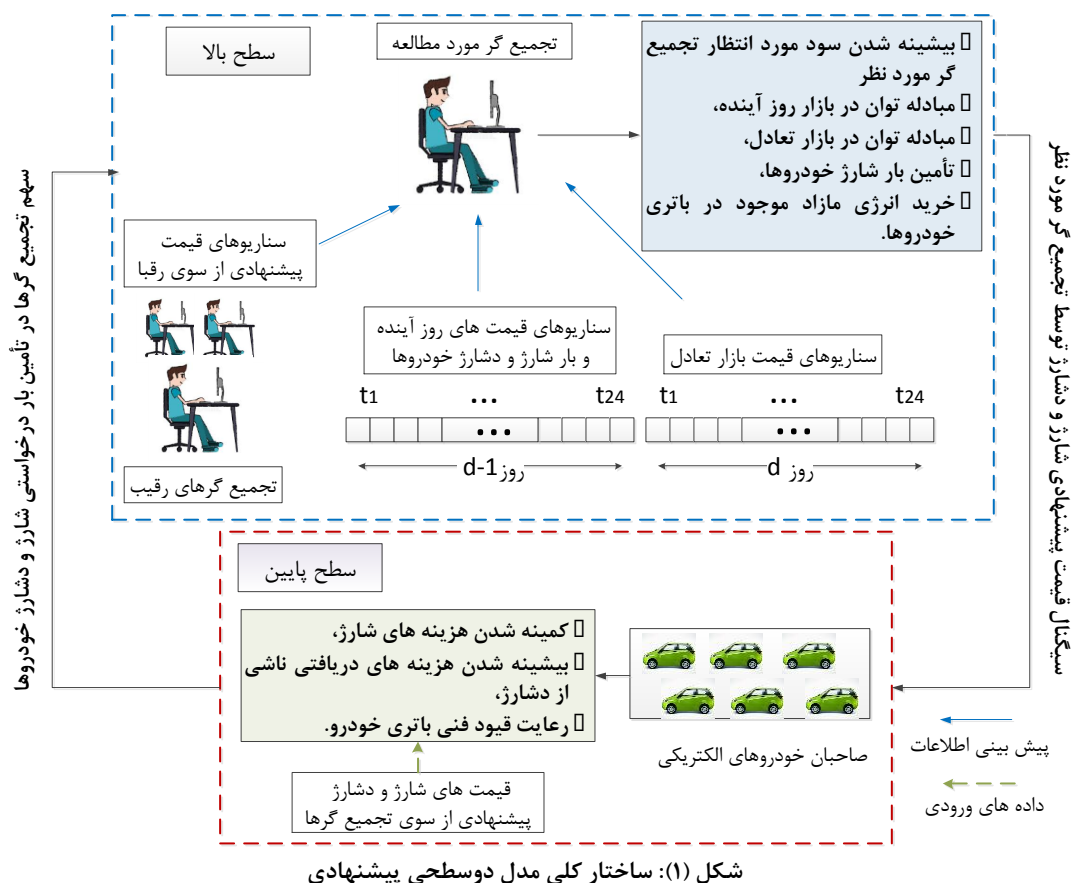
ادامه‌ی این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است. در بخش ۲، مسئله‌ی پیشنهادی بیان شده است و در بخش ۳، مسئله‌ی پیشنهادی فرمول‌بندی شده است. در بخش ۴ نتایج عددی و تحلیل آنها آورده شده است. در نهایت در بخش ۵ این مقاله، نتیجه‌گیری این مطالعه بیان شده است.

۲- مسئله‌ی برنامه‌ریزی پیشنهادی

ساختار کلی مدل دوسطحی پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی تجمیع‌گر خودروها در فضای رقابتی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این مدل، مجموعه‌ی خودروهای الکتریکی از طریق جایگاه‌های شارژ موجود در پارکینگ‌ها، که مجهز به وسایل اندازه‌گیری هوشمند هستند، با شبکه تبادلات انرژی انجام می‌دهند. تعداد معینی تجمیع‌گر نیز برای تأمین بار این مجموعه‌ی خودروها با یکدیگر رقابت می‌کنند. در برنامه‌ی پیشنهادی، تجمیع‌گر مورد مطالعه باید قیمت‌های شارژ و دشارژ خود را به‌گونه‌ای به صاحبان خودروها پیشنهاد دهد تا آنها را تشویق به خرید شارژ مورد نیاز خودروی خود از او نمایند. همچنین، قیمت پیشنهادی برای خرید انرژی دشارژ از سوی تجمیع‌گر نیز باید به‌گونه‌ای باشد تا خودروداران ترغیب شوند مازاد انرژی ذخیره شده در خودروی خود را نیز به او بفروشند. به‌علاوه، تجمیع‌گر برای بیشینه کردن سود خود باید قیمت بالایی برای شارژ و قیمت کمتری برای دشارژ پیشنهاد دهد. اما در فضای رقابتی بازار، تجمیع‌گر نمی‌تواند قیمت شارژ (دشارژ) را به هر میزان زیاد (کم) پیشنهاد دهد. زیرا

ممکن است در این رقابت برخی یا تمام مشتریان خود را از دست دهد. از این رو، تجمیع‌گر باید قیمت‌های پیشنهادی توسط تجمیع‌گرهای رقیب را نیز در نظر بگیرد تا بتواند در این محیط رقابتی، مشتریان خود را حفظ کرده و حتی تعداد بیشتری از آنها را به خود جذب نماید. بنابراین، در مدل پیشنهادی، برنامه‌ی تجمیع‌گر در دو سطح برنامه-ریزی شده است که در سطح اول آن تجمیع‌گر باید با مشارکت در بازار حوضچه‌ی توان کوتاه‌مدت^۴ شامل بازارهای روز آینده و تعادل، سود خود را بیشینه کند. در این سطح، ابتدا میزان خرید انرژی تجمیع‌گر از بازار روز آینده به صورت ساعتی در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی تعیین می‌شود و در سپس با توجه به خروجی بدست آمده و در نظر گرفتن سناریوهای قیمت بازار تعادل و اطلاعات بار خودروها، قیمت پیشنهادی به خودروداران و میزان انرژی شارژ و دشارژ خودروها در هر سناریو تعیین می‌گردد.

در سطح دوم برنامه‌ی پیشنهادی نیز باید هزینه‌های شارژ و دشارژ خودروها در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی کمینه شود. به عبارت دیگر، علاوه بر تجمیع‌گر که قصد دارد به سود بیشینه دست یابد، خودروداران نیز باید بتوانند ضمن رعایت قیود فنی باتری خودروها، با کمترین هزینه آنها را شارژ نمایند. همچنین، خودروداران باید بتوانند در مواقعی که از خودروی خود برای حمل‌ونقل استفاده نمی‌کنند، انرژی موجود در باتری خودروی خود را با قیمت بالایی به شبکه بفروشند تا بخشی از هزینه‌های شارژ آنها جبران شود. بنابراین، مشاهده می‌شود که اهداف سطح بالا و پایین برنامه‌ی پیشنهادی در تقابل با یکدیگر هستند. یعنی سود تجمیع‌گر منجر به پرداخت هزینه‌ی بیشتر از سوی خودروداران می‌شود. از سوی دیگر، در فضای رقابتی ممکن است تجمیع‌گر برای دستیابی به سود بیشتر مشتریان خود را از دست دهد و در نهایت متضرر شده و از رقابت بازماند. بنابراین، برای تداوم رقابت و کسب سود بیشینه، لازم است مسئله‌ی تصمیم‌گیری تجمیع‌گر در یک فضای رقابتی برنامه‌ریزی شود. همان‌طوری که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، در سطح اول این مدل، تجمیع‌گر باید با مشارکت در بازارهای روز آینده و تعادل و تأمین انرژی مورد نیاز خودروها و فروش انرژی ناشی از دشارژ آنها به شبکه سود خود را بیشینه کند. در سطح دوم نیز خودروداران باید بتوانند انرژی مورد نیاز خود را با کمترین هزینه تأمین کرده و انرژی موجود در باتری خودروی خود را با بیشترین هزینه بفروش برسانند. در فضای رقابتی قطعاً خودروداران تجمیع‌گری را انتخاب می‌کنند که کمترین هزینه شارژ و بیشترین قیمت دشارژ را پیشنهاد می‌دهد. بنابراین، تجمیع‌گر باید با ارائه قیمت‌های مناسب شارژ و دشارژ، مشتریان خود را حفظ کند و حتی افزایش دهد. بنابراین، تجمیع‌گر باید با پیش‌بینی قیمت رقبا و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت‌های پیشنهادی آنها و بازارهای روز آینده و نزدیک به زمان واقعی و نیز تخمین بار شارژ و دشارژ خودروها، قیمت‌های خود را به خودروداران پیشنهاد دهد. خودروداران نیز بر اساس



شکل (۱): ساختار کلی مدل دوسطحی پیشنهادی

رگرسیون) به اطلاعات جانبی کمتری نیاز دارد. در این مقاله، برای مدل سازی قیمت های بازارهای روز آینده و تعادل از سری های زمانی آریما (ARIMA) استفاده شده است. فرم کلی سری زمانی آریما به این صورت است:

$$(1 - \sum_{j=1}^p \phi_j B^j)(1 - B)^d y_t = (1 - \sum_{j=1}^q \theta_j B^j) \varepsilon_t \quad (1)$$

که در آن، p و q پارامترهای سری آریما و ε_t نیز یک تابع توزیع نرمال با میانگین صفر است که نشان دهنده نویز سفید است. ϕ_j و θ_j نیز عملگرهای پس رو هستند که با یک سری ضرایب معنا دار مشخص می شوند [۱۹]. بدین ترتیب، ابتدا ضرایب خودهمبستگی^۵ و خودهمبستگی جزئی^۶ بدست می آیند که به ترتیب همبستگی خطی هر متغیر با خودش در دو نقطه ای زمانی متفاوت و خودهمبستگی را در شرایطی که هر گونه وابستگی خطی حذف شده باشد بیان می کنند. در این مطالعه، این ضرایب با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آمده است. قیمت های بازار روز آینده و تعادل که از بازار نوردپول^۷ در سال ۲۰۱۶ استخراج شده است [۲۰]. برای پیش بینی قیمت در مدت بیست و چهار ساعت برنامه ریزی مورد استفاده قرار گرفته است. بار پیش بینی شده خودروها بر اساس رابطه ی زیر به قیمت های روز آینده وابسته در نظر گرفته شده است:

قیمت های پیشنهادی از سوی تجمع گر ها، مناسب ترین تجمع گر را برای عملیات شارژ و دشارژ انتخاب می کنند.

۳- مدل سازی برنامه ی پیشنهادی

در این بخش ابتدا منابع عدم قطعیت موجود با استفاده از مفهوم سناریوها مدل سازی شده و سپس مسئله ی دوسطحی پیشنهادی برای تصمیم گیری تجمع گر فرمول بندی شده است.

۳-۱- مدل سازی منابع عدم قطعیت

منابع عدم قطعیت های در نظر گرفته شده در این مقاله شامل قیمت های بازار پیش رو، قیمت های بازار تعادل مثبت و منفی، قیمت های پیشنهادی از سوی تجمع گر های رقیب و نیز بار شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی است. از آنجایی که قیمت های بازار انرژی دارای میانگین و واریانس متغیر با زمان هستند، برای مدل سازی آنها از سری زمانی استفاده شده است. سری زمانی مجموعه ای از مشاهدات پیرامون یک متغیر است که در نقاط گسسته ای از زمان، که معمولاً فاصله های مساوی دارند، نمونه برداری و برحسب زمان مرتب شده اند. به عبارت دیگر، یک سری زمانی از مشاهداتی یک پدیده در طی زمان بدست می آید. تفاوت سری های زمانی با روش های دیگر در این است که در سری های زمانی، می توان با استفاده از داده های قبل، مقادیر آینده را پیش بینی کرد در حالی که نسبت به سایر روش ها (مانند روش

۳-۲- فرمول‌بندی تابع هدف

در ادامه، تابع هدف تجمیع‌گر از دو دیدگاه مدل‌بندی شده است. از دیدگاه اول اینکه تجمیع‌گر تلاش دارد تا سود خود را بیشینه کند و از دیدگاه دوم، خودروداران سعی می‌کنند تا با انتخاب بهترین تجمیع‌گر، خودروی خود را با کمترین هزینه شارژ کرده و انرژی مازاد در باتری خودروی خود را با بیشترین قیمت به شبکه بفروش رسانند. در نهایت، این مسئله‌ی دو سطحی با استفاده از شرایط بهینگی و ثنوری دوگان، به یک مسئله‌ی تک‌سطحی تبدیل شده است.

۳-۲-۱- فرمول‌بندی سطح بالا؛ از دیدگاه تجمیع‌گر

سود تجمیع‌گر به صورت اختلاف بین درآمد حاصل از فروش انرژی الکتریکی به خودروها به علاوه درآمد ناشی از مشارکت در بازار تعادل منفی و هزینه‌های ناشی از خرید انرژی از شبکه در بازار روز آینده و تعادل مثبت و هزینه‌ی ناشی از دشارژ خودروها تعریف می‌شود. بنابراین، از دیدگاه تجمیع‌گر تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Maximize} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \sum_{t \in T} \left[E_{t,\omega}^{ch} C_{s_0,t,\omega}^{ch} - E_{t,\omega}^{dch} C_{s_0,t,\omega}^{dch} - E_{t,\omega}^{DA} C_{t,\omega}^{DA} - E_{t,\omega}^{pos,B} C_{t,\omega}^{pos,B} + E_{t,\omega}^{neg,B} C_{t,\omega}^{neg,B} \right] \quad (3)$$

$$E_{t,\omega}^{ch} - E_{t,\omega}^{dch} = E_{t,\omega}^{DA} + E_{t,\omega}^{pos,B} - E_{t,\omega}^{neg,B} \quad (4)$$

قید (۴) توازن انرژی در لحظه t و سناریوی ω را نشان می‌دهد. بر اساس این قید، تجمیع‌گر ملزم است با مشارکت در بازار روز آینده و تعادل انرژی مورد نیاز خودروها را تأمین نماید.

میزان بار شارژ و دشارژ خودروها که در ساعت t و سناریوی ω توسط تجمیع‌گر مورد مطالعه تأمین می‌شود برابر با مقدار مورد انتظار بار خریداری شده توسط تجمیع‌گر با وجود احتمال وقوع سناریوهای قیمت رقبای در هر سناریوی ξ است، به‌طوری که می‌توان نوشت:

$$E_{t,\omega}^{ch} = E_{t,\omega}^{D_{ch}} \sum_{\xi \in \Xi} v^{ch}(\xi) X_{s_0}^{ch}(t, \xi) \quad (5)$$

$$E_{t,\omega}^{dch} = E_{t,\omega}^{D_{dch}} \sum_{\xi \in \Xi} v^{dch}(\xi) X_{s_0}^{dch}(t, \xi) \quad (6)$$

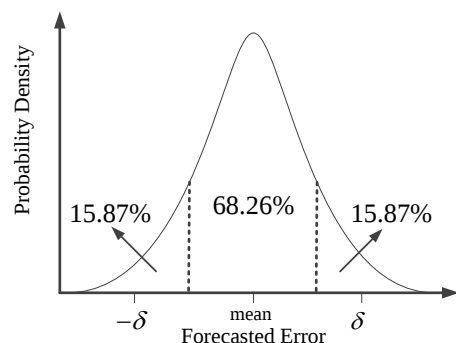
$$E_{t,\omega}^{DA} = E_{t,\omega'}^{DA} \quad (7)$$

قید (۷) بیان‌گر پیش‌بینی ناپذیری^{۱۱} در مدل سیستم است. در برنامه‌ریزی تصادفی، تعداد زیادی سناریو وجود دارد که هر یک بیان‌گر یک جواب ممکن در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی است. هرگاه تحقق دو سناریوی مختلف ω و ω' در لحظه‌ی t یکسان باشد، آنگاه مقادیر متغیرهای تصمیم نیز برای این ساعت یکسان هستند. به عبارت دیگر، در یک درخت سناریو، شاخه‌هایی که از گره خارج شده‌اند، باید در آن گره یک مقدار مشترک داشته‌اند [۲۳].

$$E_{t,\omega}^{D_{ch}} = \hat{E}_t^{D_{ch}} \left[1 + \Delta \left(\frac{C_{t,\omega}^{DA} - \hat{C}_t^{DA}}{\hat{C}_t^{DA}} \right) \right] \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق، $\hat{E}_t^{D_{ch}}$ و $\hat{C}_t^{DA}$ به‌ترتیب، بار مورد انتظار خودروها و قیمت مورد انتظار روز آینده در زمان t و سناریوی ω هستند. در این رابطه Δ پارامتری است که ارتباط بین قیمت بازار روز آینده و بار خودروها را در هر سناریو بیان می‌کند که در این مطالعه برابر 0.2 فرض شده است [۲۱].

در این مطالعه، سناریوهای مربوط به قیمت‌های پیشنهادی برای شارژ و دشارژ توسط تجمیع‌گرهای رقیب در هر ساعت با به کارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو^{۱۲} (MCS) و روش چرخ گردان^{۱۳} (RWM) مدل‌سازی شده‌اند [۲۲]. بدین منظور ابتدا عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت‌های پیشنهادی ساعتی با استفاده از تابع چگالی احتمال^{۱۴} (PDF) مدل شده است [۲۳] و سپس در هر ساعت بسته به دقت مورد نظر، تابع چگالی احتمال به فواصل گسسته‌ی سه قسمتی تقسیم شده است که هر سطح، احتمال خاص خود را دارد. در شکل (۲) یک تابع چگالی احتمال نمایش داده شده است که به سه قسمت گسسته و هر یک با پهنای δ ، که بیانگر انحراف معیار به‌منظور خطای پیش‌بینی آن پارامتر است، تقسیم شده است. برای بدست آوردن میزان احتمال قیمت پیشنهادی در هر سطح، از روش RWM استفاده شده است. بر اساس این روش، احتمال خطای پیش‌بینی قیمت نرمالیزه شده تا عددی بین صفر و یک حاصل شود. پس از آن، با استفاده از روش MCS، یک مجموعه از اعداد تصادفی بین صفر و یک تولید شده است که بیانگر احتمال سناریوی قیمت پیشنهادی توسط تجمیع‌گرهای رقیب است و میزان خطای پیش‌بینی قیمت پیشنهادی توسط رقبای در هر ساعت نمایش می‌دهد. در نهایت، پس از تولید سناریوهای قیمت‌های شارژ و دشارژ پیشنهادی توسط تجمیع‌گرهای رقیب توسط PDF، با استفاده از مفهوم درخت سناریو، سناریوهای مختلف با هم ترکیب شده‌اند.



شکل (۲): تابع چگالی احتمال سه قسمتی برای تولید قیمت‌های شارژ و دشارژ توسط تجمیع‌گرهای رقیب.

مورد مطالعه، $C_{s,t,\xi}^{ch}$ هزینه شارژ پیشنهادی توسط تجمیع گر رقیب S ، $X_s^{ch}(t, \xi)$ درصد تأمین بار توسط تجمیع گر رقیب S ، $K_{ch}^{s,s'}$ هزینه-ی مدل شده به منظور عدم تمایل خودروداران به تعویض تجمیع گر خود برای انجام شارژ و $Z_{ch}^{s,s'}(\xi)$ بیان گر درصدی از بار خودروها که برای انجام شارژ بین تجمیع گرهای مختلف جایجا شده اند.

در بخش دوم تابع هدف، $\bar{E}_t^{Dch}$ مقدار بار مورد انتظار دشارژ در زمان t ، $C_{s,t}^{dch}$ هزینه دریافتی بابت دشارژ از تجمیع گر مورد مطالعه، $X_{s0}^{dch}(t, \xi)$ درصدی از بار خودروها که توسط تجمیع گر مورد مطالعه تأمین می شود، $C_{s,t,\xi}^{dch}$ هزینه شارژ پیشنهادی توسط تجمیع گرهای رقیب و $X_s^{dch}(t, \xi)$ درصدی از بار دشارژ خودروها است که توسط تجمیع گرهای رقیب تأمین شده است. همچنین، هزینه مدل شده به منظور عدم تمایل خودروداران به تعویض تجمیع گر خود در انجام فرآیند دشارژ و $Z_{dch}^{s,s'}(\xi)$ بیان گر درصد بار خودروهای جایجا شده بین تجمیع گرها برای دشارژ است. تابع هدف سطح پایین مقید به قیود زیر است:

$$X_s^{ch}(t, \xi) = X_{s0}^{ch}(t, \xi) + \left[\sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} Z_{ch}^{s,s'}(t, \xi) + \sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} Z_{ch}^{s,s'}(t, \xi) \right] \quad (11)$$

$$X_s^{dch}(t, \xi) = X_{s0}^{dch}(t, \xi) + \left[\sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} Z_{dch}^{s,s'}(t, \xi) - \sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} Z_{dch}^{s,s'}(t, \xi) \right] \quad (12)$$

روابط (۱۱) و (۱۲) به ترتیب درصد بار شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی که توسط هر تجمیع گر تأمین می شود را بیان می کنند. همان طوری که از این روابط پیداست، درصد بار شارژ و دشارژ خودروها که توسط تجمیع گر S تأمین می شود با درصد بار اولیه ی آن تجمیع گر، میزان باری که از سمت رقبا به آن تجمیع گر رجوع می کنند و درصد باری که آن تجمیع گر را ترک می کنند برابر است. روابط (۱۳) و (۱۴) نیز بیانگر این قید هستند که تمامی بارهای شارژ و دشارژ خودروها باید توسط تجمیع گرها پوشش داده شوند. به عبارت دیگر، خودروها باید برای شارژ و یا دشارژ به یک تجمیع گر متصل باشند.

$$\sum_{s \in N_s} X_s^{ch}(t, \xi) = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{s \in N_s} X_s^{dch}(t, \xi) = 1 \quad (14)$$

$$E_{t,\omega}^{pos,B} \leq E^{max} \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (8)$$

$$E_{t,\omega}^{neg,B} \leq E_{t,\omega}^{ch} \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (9)$$

روابط (۸) و (۹) به ترتیب محدودیت های انرژی مبادله شده در بازار تعادل مثبت و منفی را نشان می دهند. همان طوری که مشاهده می شود، حداکثر میزان انرژی که تجمیع گر از بازار تعادل مثبت می تواند خریداری نماید، به اندازه ی میزان توانی است که خودروهای الکتریکی در لحظه t و سناریوی ω می توانند از طریق شارژرهای نصب شده در پارکینگ های خودروهای الکتریکی دریافت کنند. همچنین، حداکثر میزان انرژی کاهش یافته در بازار تعادل منفی برابر با میزان بار خودروهای الکتریکی متصل به شبکه در لحظه t و سناریوی ω است.

۳-۲-۲- فرمول بندی سطح پایین؛ از دیدگاه صاحبان خودروها

در سطح پایین لازم است هزینه ی انرژی صاحبان خودروهای الکتریکی کمینه شود. همچنین، هزینه ای که آنها بابت دشارژ خودروی خود دریافت می کنند، باید بیشینه گردد. خودروداران مختارند تجمیع گر مطلوب خود را از میان تمام تجمیع گرهای موجود برگزینند. آنها باید به گونه ای انتخاب نمایند تا هزینه ی شارژ خود را کمینه و درآمد ناشی از دشارژ خود را بیشینه نمایند. بر اساس این که خودروداران باید با کمترین هزینه مبادرت به شارژ کنند و در مواقعی که به خودرو برای مقاصد حمل و نقل نیاز ندارند، انرژی باقی مانده در باتری آن را (با در نظر گرفتن قیود فنی باتری) به گونه ای به شبکه تزریق نمایند تا بیشترین هزینه را در ازای دشارژ آن دریافت نمایند. می توان تابع هدف مسئله ی سطح پایین را به صورت زیر فرمول بندی کرد:

$$\text{Minimize } \left\{ \begin{aligned} & \bar{E}_t^{Dch} [C_{s0,t}^{ch} X_{s0}^{ch}(t, \xi) + \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} C_{s,t,\xi}^{ch} X_s^{ch}(t, \xi)] \\ & + \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} \sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} \bar{E}_t^{Dch} K_{ch}^{s,s'} Z_{ch}^{s,s'}(t, \xi) \\ & - (\bar{E}_t^{Dch} [C_{s0,t}^{dch} X_{s0}^{dch}(t, \xi) + \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} C_{s,t,\xi}^{dch} X_s^{dch}(t, \xi)] \\ & + \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} \sum_{\substack{s' \in N_s \\ s' \neq s}} \bar{E}_t^{Dch} K_{dch}^{s,s'} Z_{dch}^{s,s'}(t, \xi)) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

در بخش اول تابع هدف، $\bar{E}_t^{Dch}$ مقدار بار مورد انتظار شارژ خودروهای الکتریکی در زمان t ، $C_{s0,t}^{ch}$ هزینه ی پرداختی بابت شارژ به تجمیع گر مورد نظر، $X_{s0}^{ch}(t, \xi)$ درصد تأمین بار توسط تجمیع گر

و وضعیت رانندگی وابسته است و در این مطالعه برابر 2 km/kWh در نظر گرفته شده است [۲۵].

میزان انرژی مبادله شده با شبکه در حالت شارژ و دشارژ را می‌توان بر اساس میزان شارژ باقی مانده در باتری خودرو بدست آورد. بدین معنی که اگر میزان شارژ موجود در باتری از حدی بیشتر باشد، امکان دشارژ آن وجود دارد و در غیر این صورت خودرو را نمی‌تواند باتری خودروی خود را دشارژ نماید. این موضوع با رابطه (۳-آ) مدل شده است.

$$\Delta E_p = \begin{cases} (C_p - C_N) \eta_{dch}^{-1} & SOC_{init} \geq 65\% \quad \text{discharge} \\ (C_p - C_N) \eta_{ch} & SOC_{init} \leq 35\% \quad \text{charge} \end{cases} \quad (25)$$

که در رابطه بالا، ΔE_p میزان انرژی مبادله شده با شبکه است. لازم به ذکر است که در این مقاله میزان SOC_{init} یا همان وضعیت شارژ اولیه به منظور شارژ و دشارژ باتری از مرجع [۱] استخراج شده است.

۳-۲-۳- فرمول‌بندی تک‌سطحی معادل

برای حل مسئله‌ی دو سطحی باید آن را به یک مسئله‌ی معادل تک-سطحی تبدیل نمود. جهت بدست آوردن مدل معادل تک‌سطحی، قیود سطح پایین با استفاده از شرایط بهینه‌سازی KKT به سطح بالا انتقال داده می‌شود. همچنین، لازم است روابط غیرخطی مسئله شامل حاصل‌ضرب‌های $E_{t,\omega}^{dch} C_{t,\omega}^{dch}$ و $E_{t,\omega}^{ch} C_{t,\omega}^{ch}$ و سایر عوامل غیرخطی که در حین تک‌سطحی کردن مسئله بدست می‌آیند نیز توسط تئوری دوگان^{۱۲} با عوامل خطی معادل جایگزین شوند. جزئیات مربوط به مدل تک‌سطحی مسئله و خطی‌سازی عوامل غیرخطی در [۲۳] آورده شده است. روابط معادل برای حاصل‌ضرب‌های غیرخطی مطرح شده به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$Rev_{t,\omega}^{ch} = \frac{E_{t,\omega}^{Dch}}{\bar{E}_t^{Dch}} \sum_{\xi \in \Xi} v(\xi) \left[\begin{aligned} & - \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} \hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{ch} X_s^{ch}(t, \xi) \\ & - \sum_{\substack{s \in N_s \\ s' \neq s}} \hat{E}_t^{Dch} K_{ch}^{s,s'} Z_{ch}^{s,s'}(t, \xi) \\ & + \sum_{s \in N_s} X_{s_{ch}}^0(t, \xi) \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) + \phi_{ch}(\xi) \end{aligned} \right] \quad (26)$$

$$Rev_{t,\omega}^{dch} = \frac{E_{t,\omega}^{Dch}}{\bar{E}_t^{Dch}} \sum_{\xi \in \Xi} v(\xi) \left[\begin{aligned} & - \sum_{\substack{s \in N_s \\ s \neq 0}} \hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{dch} X_s^{dch}(t, \xi) \\ & - \sum_{\substack{s \in N_s \\ s' \neq s}} \hat{E}_t^{Dch} K_{dch}^{s,s'} Z_{dch}^{s,s'}(t, \xi) \\ & + \sum_{s \in N_s} X_{s_{dch}}^0(t, \xi) \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) + \phi_{dch}(\xi) \end{aligned} \right] \quad (27)$$

در روابط فوق، $Rev_{t,\omega}^{ch}$ و $Rev_{t,\omega}^{dch}$ به ترتیب، درآمد تجمیع‌گر حاصل از انجام شارژ و میزان پرداخت به خودروداران بابت دشارژ است. در نهایت، پس از خطی‌سازی، روابط مربوط به معادل تک‌سطحی شده‌ی مسئله به صورت زیر بدست می‌آیند:

واضح است که متغیرهایی که درصد بار خودروهای شارژ و دشارژ هر تجمیع‌گر و میزان جابجایی بار بین تجمیع‌گرها را نمایش می‌دهند، باید مثبت در نظر گرفته شوند. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$X_s^{ch/dch}(t, \xi) \geq 0 \quad (15)$$

$$Z_{ch/dch}^{s,s'}(t, \xi) \geq 0 \quad (16)$$

مقادیر مورد انتظار بار شارژ و دشارژ خودروها نیز از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\bar{E}_t^{Dch} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) E_{t,\omega}^{Dch} \quad (17)$$

$$\bar{E}_t^{Dch} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) E_{t,\omega}^{Dch} \quad (18)$$

از آنجایی که ظرفیت باتری هر خودرو محدود است. از این رو، هر خودرو با مقدار اولیه‌ی انرژی SoC_{t-1} می‌تواند تا میزان بیشینه‌ی انرژی از شبکه دریافت نماید. به عبارتی داریم:

$$0 \leq \eta^{ch} \times P_{t,\omega}^{ch} \times \Delta t \leq (\overline{SoC} \times E^{Cap}) - SoC_{t-1}^E \quad (19)$$

مقدار باری که هر خودرو می‌تواند دشارژ نماید حداکثر باید به اندازه‌ی میزان انرژی اولیه‌ی موجود در باتری آنها باشد. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$0 \leq \frac{1}{\eta^{dch}} \times E_{t,\omega}^{dch} \times \Delta t \leq SoC_{t-1}^E \quad (20)$$

میزان انرژی موجود در باتری خودرو نیز با میزان انرژی اولیه‌ی آن به-علاوه میزان انرژی دریافتی او از شارژ منهای انرژی دشارژ شده‌ی آن برابر است. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$SoC_{t,\omega}^E - SoC_{t-1,\omega}^E - \eta^{ch} \times E_{t,\omega}^{ch} \times \Delta t + \frac{1}{\eta^{dch}} \times E_{t,\omega}^{dch} \times \Delta t = 0 \quad (21)$$

به‌خاطر محدودیت ظرفیت باتری‌ها، میزان انرژی موجود در باتری خودرو همواره بین دو مقدار کمینه و بیشینه قرار دارد.

$$\underline{SoC} \times E^{Cap} \leq SoC_{t,\omega}^E \leq \overline{SoC} \times E^{Cap} \quad (22)$$

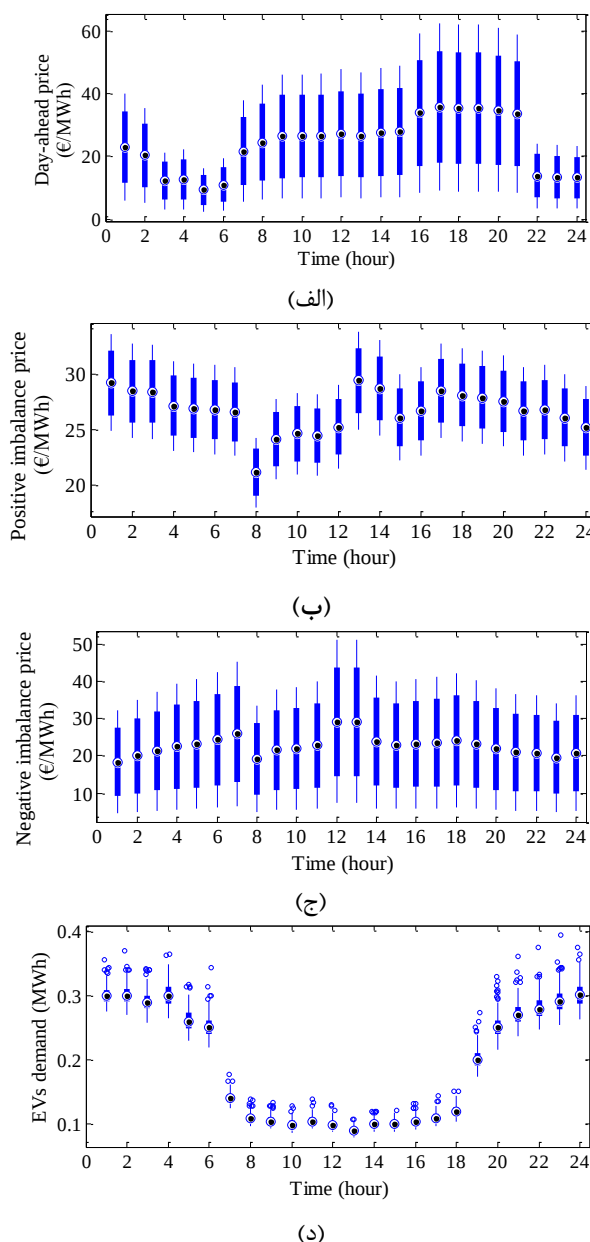
میزان شارژ موجود در باتری خودرو با میزان فاصله طی شده رابطه دارد که این ارتباط با رابطه (۱-آ) مدل شده است.

$$C_p = C_N - l \times r \quad (23)$$

در اینجا l میزان مسافت روزانه طی‌شده بر حسب کیلومتر و r میزان انرژی مصرفی در هر کیلومتر است که برابر 0.142 کیلووات فرض می‌شود. همچنین، C_N کل ظرفیت باتری خودرو و C_p میزان ظرفیت باتری خودرو موقع ورود به پارکینگ است. علاوه بر این، میزان شارژ موجود در باتری خودرو هنگام ورود به پارکینگ نیز از رابطه (۲-آ) بدست می‌آید.

$$SOC_{init} = 100\% - \frac{l}{K \times C_N} \times 100\% \quad (24)$$

در اینجا SOC_{init} میزان شارژ موجود در باتری خودرو هنگام ورود به پارکینگ و ضریب K نیز پارامتری است که به مواردی مانند ترافیک



شکل (۳): سناریوهای تولیدی، (الف) قیمت‌های بازار روز آینده، (ب) قیمت‌های بازار تعادل مثبت، (ج) قیمت‌های بازار تعادل منفی و (د) بار شارژ خودروهای الکتریکی.

میزان خرید انرژی توسط تجمیع‌گر مورد مطالعه از بازارهای روز آینده، تعادل مثبت و تعادل منفی در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطوری که دیده می‌شود، در ساعات ابتدایی صبح، نیمه و انتهای شب که قیمت بازار روز آینده کمتر از قیمت بازار تعادل است، تجمیع‌گر همواره انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی را از بازار پیش‌رو خریداری کرده است. اما در ساعت ۸:۰۰، که متوسط قیمت بازار تعادل مثبت کمتر از بازار روز آینده شده است، تجمیع‌گر در این بازار نیز مشارکت دارد. در ساعات بین ۱۲:۰۰ تا ۱۶:۰۰ که برخی از خودروها به شبکه وصل هستند تا برای حمل‌ونقل بعد از ظهر آماده شوند، با توجه به اینکه قیمت‌های بازار روز آینده و بازار تعادل تقریباً برابر

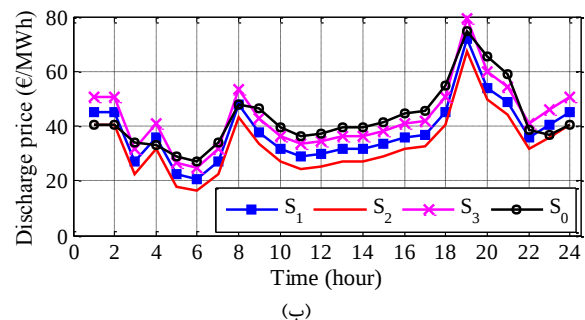
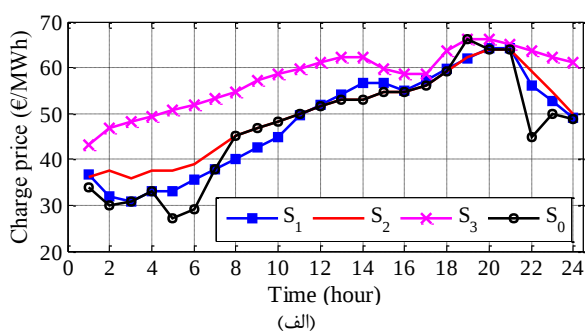
$$\underset{\substack{P_{t,\omega}^{DA}, P_{t,\omega}^{pos,B}, P_{t,\omega}^{neg,B}, \\ P_{t,\omega}^{ch}, P_{t,\omega}^{dch}, \\ C_t^{ch}, C_t^{dch}}}{\text{Maximize}} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \sum_{t \in T} \left[\begin{aligned} & \text{Rev}_{t,\omega}^{ch} - \text{Rev}_{t,\omega}^{dch} \\ & - E_{t,\omega}^{DA} C_{t,\omega}^{DA} \\ & - E_{t,\omega}^{pos,B} C_{t,\omega}^{pos,B} \\ & + P_{t,\omega}^{neg,B} C_{t,\omega}^{neg,B} \end{aligned} \right] \quad (28)$$

۴- تحلیل نتایج عددی

به منظور تحلیل نتایج عددی مدل دوسطحی پیشنهادی از یک سیستم نمونه با اطلاعات واقعی بازار برق استفاده شده است. این سیستم نمونه شامل چهار تجمیع‌گر است که تجمیع‌گر S0 تجمیع‌گر مورد مطالعه و تجمیع‌گرهای S1 تا S3 تجمیع‌گرهای رقیب در نظر گرفته شده‌اند. تعداد کل خودروهای الکتریکی در این مطالعه ۱۰۰ دستگاه و ظرفیت باتری آنها ۱۶ kWh در نظر گرفته شده است [۲۳]. تجمیع‌گر مورد مطالعه باید برای یک دوره‌ی کوتاه‌مدت ۲۴ ساعت پیش‌رو و در یک محیط رقابتی با هدف بیشینه کردن سود خود برنامه‌ریزی کند. لازم به ذکر است که تمامی تجمیع‌گرها به اطلاعات قبلی بازار انرژی دسترسی دارند.

ابتدا با استفاده از روش تولید سناریو، که در بخش قبلی توضیح داده شد، سناریوهای منابع عدم قطعیت تولید شده است. سناریوهای تولیدی شامل قیمت‌های بازار روز آینده، قیمت‌های بازار تعادل مثبت و منفی و نیز سناریوهای بار شارژ خودروهای الکتریکی است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. همچنین، در این مطالعه بار دشارژ خودروها معادل ۲۰٪ بار شارژ آنها فرض شده است. میزان SOC اولیه-ی خودروها نیز در هر سناریو به صورت تصادفی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی آن تولید شده است. به‌طور مشابه، میزان بار شارژ و دشارژ ساعتی خودروها توسط تجمیع‌گر مورد مطالعه و تجمیع‌گرهای رقیب به صورت تصادفی تولید شده است. لازم به توضیح است که در این مقاله فرض بر این است که خودروداران همواره با قیمت‌های مختلفی از سوی تجمیع‌گرها برای شارژ و دشارژ خودروی خود مواجه هستند. از این‌رو، تجمیع‌گرها با رفتار احتمالاتی خودروداران در مواجهه با قیمت‌های پیشنهادی روبرو هستند. بنابراین، لازم است با برآورد احتمال حضور خودروها در هر پارکینگ و انتخاب گزینه‌های مناسب بر اساس قیمت شارژ و دشارژ توسط خودروداران، مدیریت انرژی پارکینگ مورد نظر برنامه‌ریزی شود. از آنجایی که در یک دوره زمانی مشخص تعدادی تجمیع‌گر برای تأمین بار مجموعه‌ای از خودروها با هم رقابت می‌کنند، در نهایت، مسئله‌ی برنامه‌ریزی دوسطحی احتمالاتی پس از تبدیل به یک مسئله‌ی تک‌سطحی خطی به صورت یک مسئله‌ی MILP فرمول‌بندی و با استفاده از حل‌کننده تجاری CPLEX از نرم افزار GAMS حل شده است [۲۴].

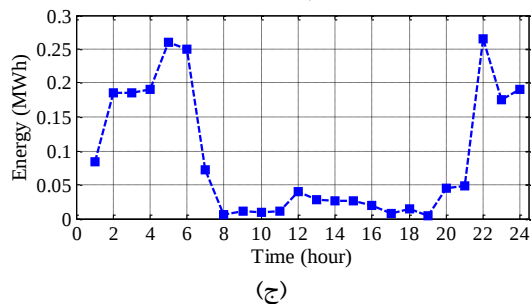
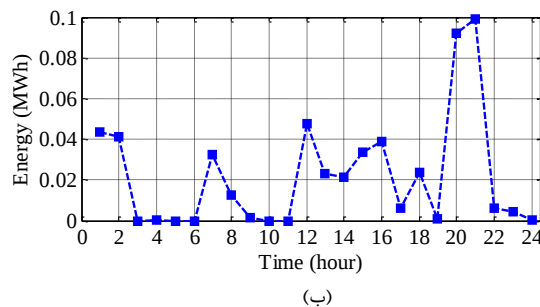
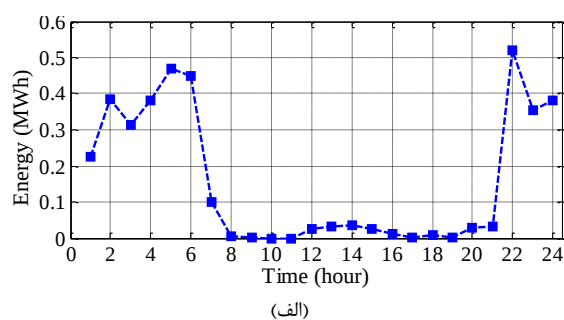
مختلفی مانند قیمت پیشنهادی شارژ و دشارژ رقبا و قیمت انرژی بازار بر سیگنال قیمت پیشنهادی شارژ و دشارژ تجمیع‌گر تأثیرگذار هستند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، در ساعاتی که تجمیع‌گرهای رقیب قیمت‌های ارزان‌تری پیشنهاد داده‌اند و تجمیع‌گر مورد مطالعه نیز انرژی را از شبکه با قیمت پایین‌تری خریداری کرده است، قیمت کمتری را به خودروداران پیشنهاد داده است. چنین وضعیتی در نیمه-ساعات، مانند ساعت ۱۹:۰۰ که قیمت دشارژ رقبا زیاد است، تجمیع‌گر نیز قیمت دشارژ بالاتری ارائه داده است. این موضوع سبب شده تا در ساعت ۱۹:۰۰ هر دو سیگنال شارژ و دشارژ تجمیع‌گر مورد مطالعه بیشترین مقدار را داشته باشد. همچنین، از این شکل مشاهده می‌شود که در ساعت ۲۲:۰۰، بخش زیادی از انرژی تجمیع‌گر از بازار روز آینده، که قیمت کمتری نسبت به بازار تعادل مثبت دارد، تأمین شده است. بنابراین، تجمیع‌گر قیمت شارژ پایین‌تری پیشنهاد داده است تا در این ساعت که عمدتاً خودروها به شبکه متصل هستند، بتواند خودروهای بیشتری را تشویق کند تا بار خود را از او تأمین نمایند.



شکل (۵): قیمت پیشنهادی شارژ و دشارژ توسط تجمیع‌گرها، (الف) قیمت شارژ و (ب) قیمت دشارژ

سهم هر یک از تجمیع‌گرها در تأمین بار شارژ و دشارژ خودروها نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. از مقایسه‌ی این شکل با شکل (۵) می‌توان دریافت که صاحبان خودروها همواره تجمیع‌گری را انتخاب می‌کنند که کمترین قیمت شارژ و بیشترین قیمت دشارژ را پیشنهاد می‌دهد تا بدین ترتیب خودروی خود را با کمترین هزینه شارژ کنند و حتی هزینه‌ی مناسبی را نیز بابت دشارژ آن دریافت نمایند. بر این اساس، در ساعاتی که تجمیع‌گر مورد نظر قیمت شارژ پایینی را پیشنهاد می‌دهد، بار زیادی را تغذیه می‌کند.

هستند، تجمیع‌گر سعی دارد تا از هر دو بازار، انرژی مورد نیاز خودروها را خریداری کند. پس از ساعت ۲۲:۰۰ که معمولاً خودروها به شبکه به‌منظور انجام دشارژ وصل می‌شوند، با توجه به اینکه قیمت‌های روز پیش‌رو کمتر از قیمت بازار نزدیک به زمان لحظه‌ای است، تجمیع‌گر بخش عمده‌ای از بار خودروها را از بازار روز آینده تهیه می‌کند. در نیمه‌ی شب و ساعات ابتدائی صبح نیز تجمیع‌گر سعی دارد تا از اتصال خودروها به شبکه نهایت استفاده را ببرد و با کاهش شارژ و حتی انجام دشارژ، در بازار تعادل منفی شرکت نماید تا سود بیشتری کسب کند. بدین ترتیب، مشاهده می‌شود که میزان مشارکت در بازار تعادل منفی در ساعاتی که خودروها به شبکه وصل هستند (ساعات اولیه‌ی روز و شب هنگام)، بیشتر است.

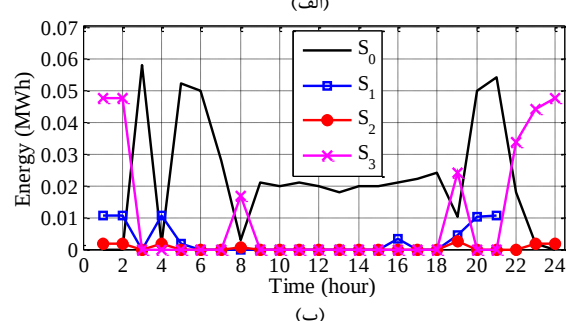
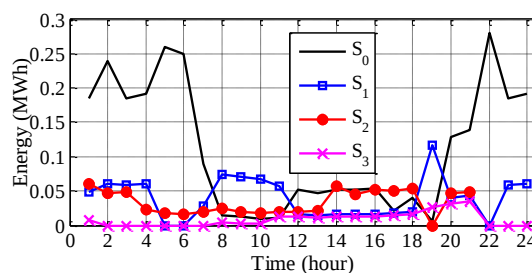


شکل (۴): تأمین انرژی توسط تجمیع‌گر مورد مطالعه، (الف) از بازار روز آینده، (ب) از بازار تعادل مثبت و (ج) از بازار تعادل منفی.

شکل (۵) سیگنال‌های قیمت‌های شارژ و دشارژ پیشنهادی توسط تجمیع‌گر مورد مطالعه و متوسط سیگنال‌های قیمت پیشنهادی توسط تجمیع‌گرهای رقیب را نشان می‌دهند. همان‌طوری که انتظار می‌رفت، تجمیع‌گر مورد مطالعه همواره رفتاری رقابتی از خود نشان داده است. بدین معنی که در بسیاری از ساعات، سیگنال قیمت پیشنهادی آن با سیگنال‌های قیمت‌های رقبا نزدیک و یا حتی کمتر است. موارد

خودروها بار خود را از تجمیع گر مورد مطالعه خریداری می کنند. در ساعات بین ۸:۰۰ تا ۱۹:۰۰ که معمولاً تعداد کمتری از خودروها به شبکه وصل هستند، تجمیع گر نیز با تقاضای بار کمی روبرو شده است. دو تجمیع گر S_1 و S_2 نیز در برخی از ساعات تلاش کرده اند تا با ارائه ی قیمت های نسبتاً پایین در این فضای رقابتی، نظر خودروداران را به خود جلب کرده و بار بخشی از خودروها را تأمین نمایند. در عین حال، تجمیع گر S_3 که همواره قیمت بالایی پیشنهاد می دهد، تنها توانسته بار بسیار اندکی از خودروها را تغذیه کند. علاوه بر رقابت بر سر شارژ خودروها، تجمیع گر ها، به ویژه تجمیع گر های S_0 و S_3 بر سر خرید انرژی دشوار خودروها نیز رقابت تنگاتنگی به نمایش گذاشته اند. تجمیع گر ها تلاش می کنند تا با جلب نظر خودروداران، به جای خرید از بازار برق، انرژی ذخیره شده در باتری خودروها را خریداری کرده و به شبکه بفروشند. همان طوری که از شکل (۶) (ب) مشاهده می شود، در ساعاتی که خودروها به شبکه متصل هستند در دشوار نیز مشارکت می کنند. بدین ترتیب، تجمیع گر مورد مطالعه با ارائه ی سیگنال قیمت دشوار مناسب توانسته است در بسیاری از ساعات نسبت به سایر تجمیع گر ها بار دشوار بیشتری را از خودروداران خریداری نماید.

همان طوری که قبلاً نیز اشاره شد، فضای مسئله، یک فضای



شکل (۶): سهم هر تجمیع گر در تأمین بار شارژ و دشوار خودروها،
(الف) شارژ و (ب) دشوار.

برای مثال، در ساعات ابتدائی روز و اواخر شب، بسیاری از

جدول (۱): درصد جابجائی بار شارژ خودروهای الکتریکی در دوره ی برنامه ریزی بین تجمیع گر ها

ساعت	از S_1 به S_0	از S_2 به S_0	از S_3 به S_0	از S_1 به S_2	از S_1 به S_3	از S_2 به S_3
۱:۰۰	-۱۲/۹	-۲/۱۸۶	۴۹/۱۳	۱/۳۱	۶/۱۳	-۹/۲۱
۲:۰۰	-۱۶/۸۴	۱۹/۸۲	۴۹/۰۴	۵/۷۹	۱/۶۷۸	-۵/۳۲
۳:۰۰	-۲۲/۴	۲۳/۸۸	۴۶/۰۴	۱۱/۵۶	۱۲/۰۳	-۱۷/۶۶
۴:۰۰	-۱۲/۷۶	۱۲/۴۹	۴۲/۳۳	-۱/۳۰	۱۲/۵۵	-۱۸/۵۲
۵:۰۰	-۳۴/۱۸	۳۱/۱۸۶	۷۶/۸۵	۱۳/۵۱	۳۳/۹۰	-۱۰/۶۵
۶:۰۰	۱/۷۳۵	۲۴/۸۴	۵۰/۶۸	-۳۱/۰۲	۳۹/۶۱	-۴۴/۹۶
۷:۰۰	-۲۲/۷۹	۲۵/۸۲	۳۳/۴۹	۱۹/۸۰	-۲/۷۰۱	-۱۲/۴۰
۸:۰۰	-۴۳/۵۱	۱۲/۹۵۶	۱۵/۵۲	۲۷/۹۵	-۴۱/۶۵	۵/۷۹
۹:۰۰	-۶۳/۵۴	۲۰/۳۱	۳۳/۳۱	-۱۰/۷۸	۱۹/۲۷	-۳۸/۳۲
۱۰:۰۰	-۳۹/۹۸	-۵/۳۸	۳۰/۴۰	-۲۸/۶۶	۱۵/۳۶	-۳۲/۴۸
۱۱:۰۰	-۴۱/۷۵	۴/۷۵	۱۹/۶۵۷	۱۲/۴۱	-۱۵/۳۴	-۴/۶۵
۱۲:۰۰	-۱۸/۸۵	۲/۹۹	۳۸/۱۸	-۲۰/۷۶	۳۶/۶۶	-۳۶/۵۳
۱۳:۰۰	-۲۰/۷۵	۷/۰۰	۴۱/۳۶	۴۱/۱۷	-۲۴/۵۶	۲۲/۰۳
۱۴:۰۰	-۲۳/۸۹	۶/۶۴	۴۱/۹۴	۱۰/۹۶	۱۰/۹۰	-۶/۹۲
۱۵:۰۰	۱۲/۱۹	۳۶/۲۳	-۲۴/۳۸	-۱۷/۸۵۱	۵/۳۳	-۶۴/۱۸
۱۶:۰۰	-۲۸/۴۵	۸/۲۹	۴۲/۵۷	۳۳/۶۳	-۷/۶۳	۱۴/۲۱۵
۱۷:۰۰	۱۲/۷۴	-۲۹/۸۹	۱۰/۱۹	-۳۲/۶۱	۱۶/۲۱	-۴۵/۸۵
۱۸:۰۰	-۲۸/۴۵	۲۴/۰۹۷	۱۴/۶۳	۳۴/۱۲	-۳/۷۷	-۱۶/۲۱
۱۹:۰۰	-۴۹/۹۳	۶/۸۳	۲۰/۳۱۷	۴۸/۴۴	-۴۳/۱۷	۲۳/۲۵
۲۰:۰۰	۲/۸۹	۴۱/۰۰	-۱۸/۰۰	۲۸/۲۱	-۳۵/۲۱	-۲۱/۸۹
۲۱:۰۰	-۲۳/۷۱	۳۲/۳۰	۸/۱۱	۴۳/۲۵	-۲۳/۷۱	-۱/۸۹
۲۲:۰۰	-۱۱/۵۸	۱۹/۵۲	۶۶/۱۷	۲۵/۰۹۹	-۱/۱۳	۱۵/۱۶
۲۳:۰۰	۲۶/۸۷	-۲۴/۷۲	۳۷/۷۶۲	-۲۵/۰۲	-۸/۱۲	-۷/۳۸
۲۴:۰۰	-۹/۴۶	۳۹/۴۹	۵/۹۹	۳۱/۶۳	-۲۹/۴۸	-۱۵/۱۳

رقابتی است و در نتیجه قیمت‌های پیشنهادی توسط رقبا در میزان بار شارژ و دشارژ تجمیع‌گر مورد مطالعه و در نتیجه میزان جابجایی بار شارژ و دشارژ خودروها بین تجمیع‌گرهای مختلف بسیار مؤثر است. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب، متوسط میزان جابجایی بار شارژ و دشارژ خودروها بین تجمیع‌گرهای مختلف را در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. علامت منفی جهت معکوس را در جابجایی خودروها نشان می‌دهد. مثلاً در ساعت ۱۰:۰۰ متوسط میزان جابجایی بار خودروها از S_1 به S_0 برابر $12/9\%$ است که بدین معنی است که $12/9\%$ از بار مورد انتظار خودروها از تجمیع‌گر S_0 به S_1 منتقل شده است.

اگرچه به نظر می‌رسد خودروها در برخی از ساعات تجمیع‌گر گران‌تر را انتخاب کرده‌اند، اما به طور متوسط و در تمام طول روز، تجمیع‌گر با سیگنال شارژ ارزان‌تر انتخاب شده است. برای نمونه، در ساعت ۱۰:۰۰، اگر چه سیگنال شارژ S_0 کمترین مقدار را دارد (شکل ۵) (الف) را ببینید، اما تعدادی از خودروها از این تجمیع‌گر به تجمیع‌گرهای S_1 و S_2 مراجعه کرده‌اند. اما بخش زیادی از خودروها (یعنی $49/13\%$) از S_3 به سوی تجمیع‌گر S_0 آمده‌اند. در این ساعت، با وجود

این که تجمیع‌گرهای S_1 و S_2 قیمت مشابهی پیشنهاد داده‌اند، اما تعداد بیشتری از خودروها (یعنی $12/9\%$) از تجمیع‌گر S_0 به سوی S_1 آمده‌اند و فقط $2/186\%$ از خودروها به سمت تجمیع‌گر S_2 عزیمت کرده‌اند. علت این است که S_1 در طول روز عموماً سیگنال قیمت ارزان‌تری را نسبت به تجمیع‌گر S_2 پیشنهاد می‌دهد و از آنجایی که دوره‌ی برنامه‌ریزی، برای کل ساعات روز صورت گرفته است، در مجموع تجمیع‌گر S_1 تقاضای بیشتری نسبت به تجمیع‌گر S_2 بر اساس شکل (۶) دارد.

در مورد تجمیع‌گر S_3 ، که همواره قیمت‌های شارژ گران‌تری پیشنهاد می‌دهد، نیز باید به این مورد اشاره کرد که هر چند در برخی از ساعات تعدادی از خودروها به سوی او مراجعه کرده‌اند (مثلاً در ساعت ۱۰:۰۰ از تجمیع‌گر S_1 معادل $6/13\%$ به سوی او آمده‌اند)، اما به میزان $9/21\%$ و $49/13\%$ از بار شارژ از این تجمیع‌گر به ترتیب به تجمیع‌گرهای S_2 و S_0 مراجعه کرده‌اند. در ساعت ۱۷:۰۰ که S_3 کمی قیمت خود را کاهش داده است، به میزان $16/21\%$ از خودروها از سوی تجمیع‌گر S_1 به سمت تجمیع‌گر S_3 و $10/19\%$ از تجمیع‌گر S_0 به S_3 حرکت کرده‌اند. اما همچنان عده‌ی زیادی از خودروداران تجمیع‌گرهای ارزان‌تر را برای شارژ خودروی خود انتخاب کرده‌اند. مثلاً $45/85\%$ از خودرودارهایی که از S_3 شارژ می‌خریدند به تجمیع‌گر S_2 مراجعه کرده‌اند.

در ساعت ۱۹:۰۰ که تجمیع‌گر مورد مطالعه و S_1 قیمت شارژ بالائی را پیشنهاد داده‌اند، تعداد $49/93\%$ و $43/17\%$ از خودروها به ترتیب از تجمیع‌گرهای S_0 و S_3 به سمت تجمیع‌گر S_1 رفته‌اند. به علاوه، $48/44\%$ نیز از تجمیع‌گر S_1 به سمت S_2 رفته‌اند. البته، همان طوری که انتظار می‌رفت عده‌ای شارژ خودروی خود را از تجمیع‌گر گران‌تر تهیه می‌کنند. بدین ترتیب، به میزان $6/83\%$ و $23/25\%$ از خودروها از تجمیع‌گر S_2 به ترتیب به تجمیع‌گرهای S_0 و S_3 منتقل شده‌اند. در همین حال، چیزی معادل $20/317\%$ از بار خودروها نیز بین دو تجمیع‌گر S_3 و S_0 رد و بدل شده است. بنابراین، در مجموع از روند جدول (۱) می‌توان چنین استنباط کرد که گرچه مالکان خودروها ممکن است در برخی از ساعات بار خودروی خود را با نرخ گران‌تری تأمین نمایند، اما معمولاً سعی می‌کنند تا تجمیع‌گر با سیگنال شارژ پیشنهادی ارزان‌تر را برگزینند.

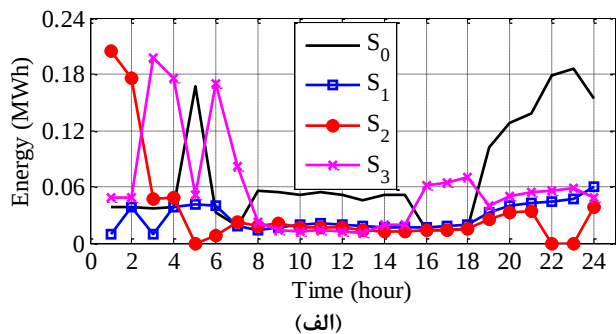
جدول (۲): درصد جابجایی بار دشارژ خودروهای الکتریکی در دوره‌ی برنامه‌ریزی بین تجمیع‌گرها

از S_2 به S_3	از S_1 به S_3	از S_1 به S_2	از S_0 به S_3	از S_2 به S_0	از S_1 به S_0	ساعت
۱۴.۱۱	۳.۳۸	۲۶.۷۴	-۷.۰۹	۱۶.۷۲	-۳۷.۲۱	۱:۰۰
۲۱.۶۱	-۱۲.۲۸	۲۹.۵۸	-۱۷.۱۷	۱۳.۴۶	-۲۴.۲۶	۲:۰۰
-۱۷.۷۲	-۷.۵۷	۴۲.۳۶	۲۶.۳۸	۷۰.۷۳	-۲۳.۶۶	۳:۰۰
۱.۸۷	-۰.۶۵۱	۴۵.۰۱	-۲۶.۴۶	۵۱.۲۱	-۴۳.۴۸	۴:۰۰
-۴۸.۷۲	۴۶.۳۵	-۲۱.۱۹	۵۱.۲۲	۳۴.۵۵	-۱۱.۹۲	۵:۰۰
-۱۹.۱۶	۱۶.۳۷	۳۴.۹۵	۵۳.۲۴	۶۵.۰۲۷	-۴۱.۰۰	۶:۰۰
-۴۵.۹۳	۳۸.۲۹	۱۹.۲۴	۴۰.۹۶	۷۴.۷۹	-۴۳.۲۳	۷:۰۰
۱۱.۷۶	-۷.۸۲	۲۷.۳۸	-۱۷.۴۶	۱۹.۲۱	-۱۶.۷۸	۸:۰۰
۱۸.۰۶	-۱۶.۶۴	۴۰.۶۳	۵۶.۹۷	۳۱.۳۵	-۱۱.۰۴۳	۹:۰۰
-۲۶.۲۳	۳۹.۸۱	۳۴.۵۸	۶۴.۲۹	۷۰.۴۱	-۵۹.۶۶	۱۰:۰۰
-۱۳.۶۲	۱۵.۵۸	۱۶.۰۳	۵۴.۴۲	۴۰.۱۴	-۲۱.۸۹	۱۱:۰۰
-۲۷.۸۰	۲۳.۷۸	-۱.۳۳	۴۶.۸۴	۳۳.۶۹	-۹.۴۱	۱۲:۰۰
-۴۹.۶۳	۴۶.۵۸	۱۰.۳۸	۵۳.۶۴	۵۸.۵۴	-۳۵.۷۶	۱۳:۰۰
-۵۳.۳۶	۲۳.۲۹	۱۷.۰۰	۲۰.۶۹	۷۹.۱۲	-۲۶.۳۳	۱۴:۰۰
-۲۶.۹۵	۴۱.۴۶	-۴.۵۰	۶۱.۷۷	۳۲.۳۵	-۲۱.۲۸	۱۵:۰۰
-۲۰.۲۳	۲۵.۹۷	۲۳.۵۱	۵۴.۵۴	۵۲.۶۲	-۳۵.۹۵	۱۶:۰۰
-۶۲.۲۲	۴۳.۷۸	-۲۳.۹۵	۳۴.۱۹	۴۶.۳۳	-۷.۴۸	۱۷:۰۰
-۵۳.۱۶	۲۳.۶۹	۱۴.۲۵	۱۷.۹۶	۷۸.۴۷	-۲۰.۰۴	۱۸:۰۰
-۲۳.۹۵	۲۹.۱۸	۱۴.۱۳	-۱.۷۴	۳۸.۹۴	-۳۷.۵۷	۱۹:۰۰
-۴۱.۰۳	۲۸.۵۲	-۲۵.۷۶	۳۹.۴۰	۲۶.۱۵۷	۹.۱۳	۲۰:۰۰
-۵۳.۹۴	۱۱.۰۰	-۳۳.۷۹	۳.۵۸	۲۷.۳۰	۳۴.۶۲	۲۱:۰۰
۷.۳۴	-۳۱.۰۰	۱۶.۴۰	-۳۱.۵۱	۱۸.۶۴	۱۸.۹۷	۲۲:۰۰
-۲۱.۴۲	۳۵.۵۴	-۱۰.۵۶	-۸.۵۹	۱۶.۵۶	-۲۸.۸۵	۲۳:۰۰
-۳.۸۳	۲.۹۲	۳۵.۱۱	-۲۹.۴۸	۴۴.۴۷	-۴۲.۹۵	۲۴:۰۰

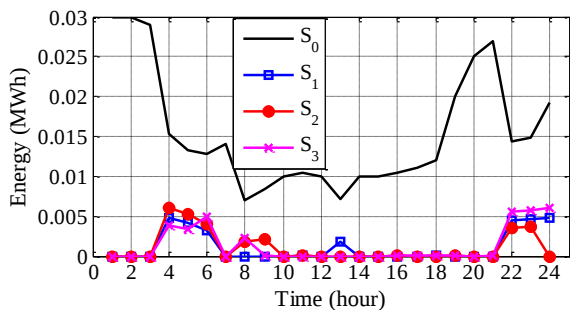
درصد از S_0 به S_1 رفته‌اند، اما تعداد دیگری بار خود را به تجمیع-گرهای با قیمت بیشتر بفروش رسانده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت که گرچه ممکن است تعدادی از خودروها تجمیع‌گری را انتخاب کنند که قیمت دشارژ کمتری را پیشنهاد می‌دهد، اما به‌طور کلی خودروها همواره سعی در انتخاب مرجع با قیمت دشارژ بالاتری را دارد تا بتوانند هزینه‌ی بیشتری را از تزریق انرژی موجود در باتری خودروی خود بدست آورند.

جهت راستی آزمایی برنامه پیشنهادی، سناریوهای متفاوتی برای قیمت‌های تجمیع‌گرهای رقیب در نظر گرفته شده و خروجی برنامه تحلیل شده است که نتایج صحت روش پیشنهادی را نشان می‌دهند. برای نمونه یکی از سناریوهای ارزیابی شده در این قسمت تحلیل شده است. در این سناریو متوسط قیمت‌های پیشنهادی برای شارژ و دشارژ برای تجمیع‌گرهای S_1 ، S_2 و S_3 مانند شکل ۶ در نظر گرفته شده است. بر اساس قیمت پیشنهادی تجمیع‌گرهای رقیب، برای مقایسه بهتر، قیمت پیشنهادی تجمیع‌گر مورد نظر نیز بر روی شکل‌ها ترسیم شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود با تغییر رفتار تجمیع‌گرهای رقیب، رفتار تجمیع‌گر مورد نظر نیز با توجه به ماهیت رقابتی بودن بازار تغییر کرده است که البته تحلیل نحوه تغییرات بر اساس همان الگوی بیان شده در متن مقاله است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که

درصد جابجایی بار دشارژ خودروها بین تجمیع‌گرها نیز در جدول ۲ آورده شده است که تحلیل آن مشابه با حالت شارژ است. به‌طور نمونه، در ساعت ۱۷:۰۰ تجمیع‌گر مورد مطالعه بیشترین و S_2 کمترین قیمت دشارژ را شکل (۶) پیشنهاد می‌دهند. بدین ترتیب، تعداد ۲۳/۹۵ درصد از بار خودروها از S_2 به S_1 حرکت کرده‌اند. به‌علاوه، چون قیمت S_0 بیشتر از S_3 است، تعداد ۳۴/۱۹ درصد از S_3 به S_0 رفته‌اند. در این ساعت، هر چند که تعداد ۶۲/۲۲ درصد از بار خودروها از S_3 به سمت S_2 حرکت کرده‌اند، اما ۴۶/۳۳ درصد از S_2 به سوی S_0 جابجا شده‌اند. به عبارت دیگر، با این که تعداد زیادی از خودروها تجمیع‌گر S_2 را به عنوان مرجعی برای فروش انرژی موجود در باتری خودروی خود انتخاب کرده‌اند، اما تعداد زیادی نیز قیمت دشارژ بیشتر پیشنهاد شده از سوی تجمیع‌گر S_0 را ترجیح داده‌اند. از آنجایی که در این ساعت، تجمیع‌گر S_1 قیمت کمتری نسبت به تجمیع‌گر S_3 ارائه داده است تعداد ۴۳/۷۸ درصد از بار خودروها از S_1 به S_3 رفته‌اند. در ساعت ۱۹:۰۰ که نقطه‌ی اوجی در قیمت‌های دشارژ پیشنهادی از سوی تمام تجمیع‌گرها وجود دارد، مشاهده می‌شود که تجمیع‌گر S_3 و پس از آن S_0 بیشترین قیمت دشارژ را ارائه داده‌اند. بدین ترتیب، مقدار ۲۹/۱۸ درصد از S_1 به S_3 و ۳۸/۹۴ درصد از S_2 به S_0 جابجا شده‌اند. هر چند که تعداد ۱۴/۱۳ درصد از S_1 به S_2 و تعداد ۳۷/۵۷



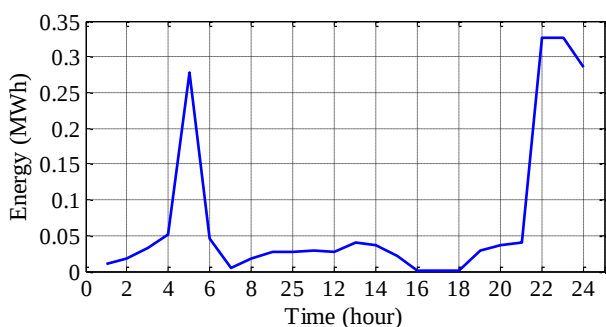
(الف)



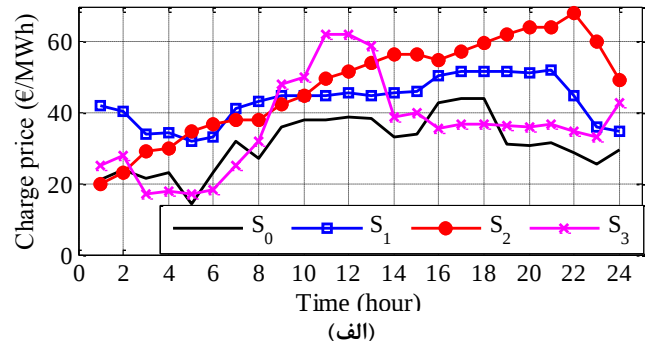
(ب)

شکل ۷: سهم هر تجميع گر در تأمين بار شارژ و دشارژ خودروها،
(الف) بار شارژ و (ب) بار دشارژ.

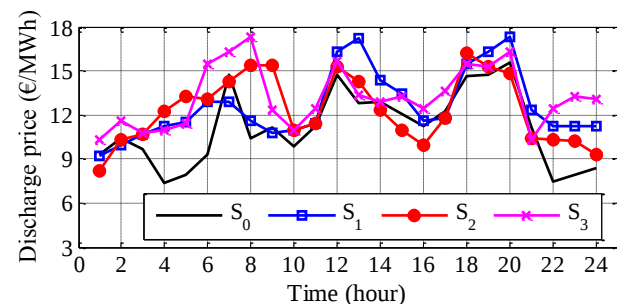
در ادامه، با توجه به میزان بار تأمینی توسط تجميع گر مورد نظر، میزان مشارکت آن در بازارهای روز آینده، تعادل مثبت و تعادل منفی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، تجميع گر مورد نظر بخش زیادی از انرژی مورد انتظار خود را از بازار روز آینده خریداری کرده و پس از آن با نزدیک شدن به لحظه انتقال انرژی، میزان انحرافات انرژی (یعنی کمبود و بیشبود انرژی) را در بازارهای تعادل مثبت و منفی جبران می‌کند. با مقایسه میزان تبادل انرژی در بازارهای مختلف در این سناریو نسبت به سناریوی قبلی، واضح است که در هر دو حالت میزان تبادل انرژی در بازارهای مختلف تابعی از میزان انرژی تأمینی توسط تجميع گر مورد نظر است. به عبارتی، با تغییر قیمت پیشنهادی رقبا برای شارژ و دشارژ، قیمت پیشنهادی تجميع گر مورد نظر نیز برای شارژ و دشارژ به تناسب تغییر می‌کند. در واقع، با تغییر قیمت پیشنهادی، میزان بار تأمینی توسط تجميع گر مورد نظر نیز تغییر می‌کند که به دنبال آن میزان مشارکت تجميع گر مورد نظر در بازارهای انرژی نیز متفاوت خواهد بود که این نتایج صحت برنامه‌ی پیشنهادی را تایید می‌کند.



تجميع گر مورد نظر همواره تلاش دارد تا علاوه بر حفظ سود خود، خودروهای الکتریکی را نیز به سوی خود جذب کند تا به سود بیشینه دست پیدا کند.



(الف)



(ب)

شکل ۶: قیمت پیشنهادی شارژ و دشارژ توسط تجميع گرها، (الف)
قیمت شارژ و (ب) قیمت دشارژ

با توجه به قیمت پیشنهادی توسط تجميع گرهای رقیب و تجميع گر مورد نظر، برای تحلیل بیشتر در سناریوی در نظر گرفته شده، میزان بار شارژ و دشارژ تأمین شده توسط هر یک از تجميع گرها در شکل ۷ آورده شده است. از مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ به خوبی می‌توان دریافت که صاحبان خودروهای الکتریکی همواره برای شارژ، ارزان‌ترین تجميع گر را انتخاب می‌کنند. به علاوه، برای دشارژ، تجميع گر با گران‌ترین قیمت را انتخاب می‌کنند. بدین ترتیب، خودروداران خودروی خود را با کمترین هزینه شارژ کرده و هزینه‌ی مناسبی را نیز بابت دشارژ آن دریافت می‌کنند. برای نمونه در ساعات انتهایی شب که تجميع گر مورد نظر قیمت شارژ پایینی را پیشنهاد می‌دهد، بار زیادی را تغذیه می‌کند. همچنین، از آنجایی که تجميع گر مورد نظر قیمت دشارژ مناسبی را در اکثر اوقات پیشنهاد می‌دهد، بار دشارژ زیادی از خودروها را توانسته است خریداری کند و در ازای این تزریق انرژی به شبکه، هزینه‌ای را دریافت نماید.

ضمایم

مسئله‌ی تک سطحی شامل تابع هدف ارائه شده در رابطه‌ی (۲۸) و قیود (۴) تا (۹) و قیود (۱۱) تا (۲۲) است. علاوه، قیود دیگری نیز در حین تک‌سطحی کردن مسئله و خطی سازی آن نیز اضافه می‌شوند که در ادامه آورده شده‌اند.

$$\hat{E}_t^{Dch} C_t^{ch} - \varepsilon_{s_{ch}0}(\xi) - \phi_{ch}(\xi) \geq 0 \quad (۱-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_t^{dch} - \varepsilon_{s_{dch}0}(\xi) - \phi_{dch}(\xi) \geq 0 \quad (۲-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{ch} - \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) - \phi_{ch}(\xi) \geq 0 \quad (۳-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{dch} - \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) - \phi_{dch}(\xi) \geq 0 \quad (۴-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{ch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{ch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) \geq 0 \quad (۵-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{dch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{dch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) \geq 0 \quad (۶-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_t^{ch} - \varepsilon_{s_{ch}0}(\xi) - \phi_{ch}(\xi) \leq M_1^{ch} e_0^{X_{ch}}(\xi) \quad (۷-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_t^{dch} - \varepsilon_{s_{dch}0}(\xi) - \phi_{dch}(\xi) \leq M_1^{dch} e_0^{X_{dch}}(\xi) \quad (۸-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{ch} - \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) - \phi_{ch}(\xi) \leq M_1^{ch} e_s^{X_{ch}}(\xi) \quad (۹-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} C_{s,t,\xi}^{dch} - \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) - \phi_{dch}(\xi) \leq M_1^{dch} e_s^{X_{dch}}(\xi) \quad (۱۰-ا)$$

$$X_s^{ch}(t, \xi) \leq M_2^{ch} [1 - e_s^{X_{ch}}(\xi)] \quad (۱۱-ا)$$

$$X_s^{dch}(t, \xi) \leq M_2^{dch} [1 - e_s^{X_{dch}}(\xi)] \quad (۱۲-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{ch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{ch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) \leq M_1^{ch} e_{s,s'}^{Z_{ch}}(\xi) \quad (۱۳-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{dch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{dch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) \leq M_1^{dch} e_{s,s'}^{Z_{dch}}(\xi) \quad (۱۴-ا)$$

$$Z_{ch}^{S,S'}(t, \xi) \leq M_2^{ch} [1 - e_{s,s'}^{Z_{ch}}(\xi)] \quad (۱۵-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{ch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{ch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{ch}}(\xi) \leq M_1^{ch} e_{s,s'}^{Z_{ch}}(\xi) \quad (۱۶-ا)$$

$$\hat{E}_t^{Dch} K_{dch}^{S,S'} + \varepsilon_{s'_{dch}}(\xi) - \varepsilon_{s_{dch}}(\xi) \leq M_1^{dch} e_{s,s'}^{Z_{dch}}(\xi) \quad (۱۷-ا)$$

$$Z_{ch}^{S,S'}(t, \xi) \leq M_2^{ch} [1 - e_{s,s'}^{Z_{ch}}(\xi)] \quad (۱۸-ا)$$

$$Z_{dch}^{S,S'}(t, \xi) \leq M_2^{dch} [1 - e_{s,s'}^{Z_{dch}}(\xi)] \quad (۱۹-ا)$$

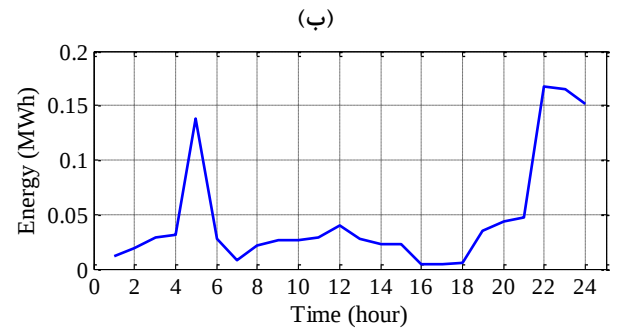
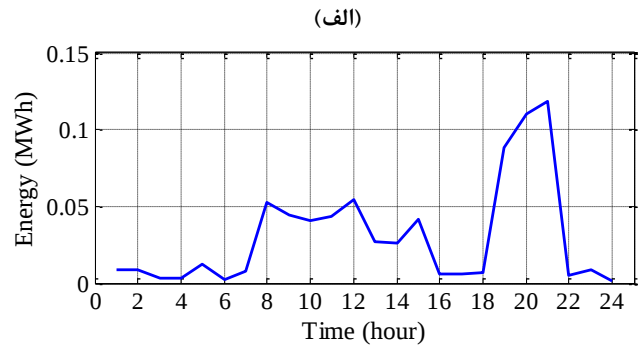
$$e_s^{X_{ch/dch}}(\xi) \in \{0,1\} \quad (۲۰-ا)$$

$$e_{s,s'}^{Z_{ch/dch}}(\xi) \in \{0,1\} \quad (۲۱-ا)$$

در ادامه به منظور خلاصه‌نویسی، تنها فرم بسته‌ی قیود مربوط به خودروهای الکتریکی آورده شده است.

$$\lambda_{t,\omega}^S - \lambda_{t+1,\omega}^S + \bar{\mu}_{t,\omega} - \underline{\mu}_{t,\omega} - \gamma_{t+1,\omega}^{dch} + \gamma_{t+1,\omega}^{ch} = 0 \quad (۲۲-ا)$$

$$0 \leq \underline{\mu}_{t,\omega}^{ch} \perp (P_{t,\omega}^{ch}) \geq 0 \quad (۲۳-ا)$$



شکل ۸: تأمین انرژی توسط تجمیع گر مورد مطالعه، (الف) از بازار روز آینده، (ب) از بازار تعادل مثبت و (ج) از بازار تعادل منفی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دو سطحی احتمالاتی برای تصمیم‌گیری بهینه‌ی یک تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در یک فضای رقابتی بازار برق پیشنهاد شد. بدین منظور، ابتدا منابع عدم قطعیت شامل قیمت‌های بازار برق، بار شارژ و دشارژ خودروها و نیز قیمت‌های شارژ و دشارژ پیشنهادی از سوی رقبا با استفاده از روش‌های تولید و کاهش سناریو مدل‌سازی شد. سپس، برنامه‌ی دوسطحی پیشنهادی که هدف سطح اول آن بیشینه کردن سود تجمیع‌گر با مشارکت در بازارهای روز آینده و تعادل و هدف سطح دوم آن کمینه کردن هزینه‌های پرداختی صاحبان خودروهای الکتریکی و دریافت بیشترین قیمت دشارژ ضمن رعایت محدودیت‌های فنی باتری خودروها است، به یک مسئله‌ی خطی تک‌سطحی تبدیل شد. برنامه‌ی پیشنهادی روی یک سیستم تست نمونه پیاده‌سازی شد و میزان بهینه‌ی تبادل انرژی تجمیع‌گر با شبکه و خودروهای الکتریکی و نیز قیمت‌های شارژ و دشارژ بهینه‌ی پیشنهادی به خودروداران از سوی او مشخص شد. همچنین نتایج نشان داد که تجمیع‌گر با مشارکت در بازار روز آینده سعی دارد تا عمده‌ی بار خودروهای تحت پوشش خود را تأمین کند و به‌خاطر وجود منابع عدم قطعیت در لحظه‌ی نزدیک به زمان واقعی انحرافات ناشی از بیشبود و کمبود انرژی را وارد از بازار تعادل جبران می‌کند. همچنین، میزان جابجایی خودروها بین تجمیع‌گرها در اثر قیمت‌های پیشنهادی به صورت کمی بررسی شد.

- Aggregators in Electricity Markets With Variable Wind Energy Resources', IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 7, No. 1, pp. 374–385, 2016.
- [9] Xia, M., Lai, Q., Zhong, Y., et al.: 'Aggregator-Based Interactive Charging Management System for Electric Vehicle Charging', Energies, Vol. 9, No. 3, pp. 1–14, 2016.
- [10] Vagropoulos, S.I., Bakirtzis, A.G., 'Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets', IEEE Trans. Power Syst., 2013, 28(4), pp. 4031–4041.
- [11] Al-Awami AT, Sortomme E. 'Coordinating vehicle-to-grid services with energy trading'. Smart Grid, IEEE Trans., Vol. 3, No. 1, pp. 453–462, 2012.
- [12] L. Baringo, R. S. Amaro, 'A stochastic robust optimization approach for the bidding strategy of an electric vehicle aggregator' Electric Power Systems Research, Vol. 146, pp. 362–370, 2017.
- [13] M. Shafie-khah, M.P. Moghaddam, M.K. Sheikh-El-Eslami, J.P.S. Catalão, Optimised Performance of a Plug-in Electric Vehicle Aggregator in Energy and Reserve Markets, Energy Conversion and Management vol. 97, pp. 393–408, 2015.
- [14] Haghighat, H., Kennedy, S. W., 'A Bilevel Approach to Operational Decision Making of a Distribution Company in Competitive Environments', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 27, No. 4, pp. 1797 – 1807, 2012.
- [15] Rashedi, N., Tajeddini, M.A., Kebriaei, H., 'Markov game approach for multi-agent competitive bidding strategies in electricity market', IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 10, No. 15, pp. 3756 – 3763, 2016.
- [16] Aghajani S., Kalantar M., 'A cooperative game theoretic analysis of electric vehicles parking lot in smart grid', Energy, Vol. 137, pp. 129–139, 2017.
- [17] Neyestani, N., Damavandi, M.D., Shafie-khah, M., A.G. Bakirtzis, J.P.S. Catalão 'Plug-In Electric Vehicles Parking Lot Equilibria With Energy and Reserve Markets', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 32, No. 3, pp. 2001–2016, 2017.
- [18] Momber, I., Wogrin, S., Román, T.G.S., 'Retail Pricing: A Bilevel Program for PEV Aggregator Decisions Using Indirect Load Control', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. pp. 464–473, 2016.

مراجع

- [۱۹] نجفی، ارسلان، فلقی، حمید، رضانی، مریم، "بهره‌برداری میان‌مدت از هاب انرژی با در نظر گرفتن ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های قیمت بازار و تقاضای انرژی الکتریکی"، دوره ۴، شمار ۸، شماره صفحات ۸۲–۷۴، ۱۳۹۴.
- [20] Relevant information on the market pertaining to Nordpool is available on: www.nordpool.com, accessed on 5 September 2016.
- [21] Carrión, M., Arroyo, J.M., Conejo, A.J., 'A bilevel stochastic programming approach for retailer futures market trading', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 3, pp. 1446–1456, 2009.
- [22] Vahedipour-Dahraie, M., Rashidzadeh-Kermani, H., Najafi, H.R., et al., 'Stochastic Security and Risk-Constrained Scheduling for an Autonomous Microgrid with Demand Response and Renewable Energy Resources', IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 14, pp. 1812 – 1821, 2017.
- [23] Rashidzadeh-Kermani, H., Vahedipour-Dahraie, M., Najafi, H.R., A. Anvari-Moghaddam, and J.M. Guerrero, 'A Stochastic Bi-level Scheduling Approach for Participation of EV Aggregators in Competitive
- [۲] حبیبی‌دوست، مهدی، بطحانی، سید محمد تقی، "تعیین زمان شارژ خودروهای الکتریکی با احتساب نقش آن‌ها در خودترمیمی شبکه هوشمند"، مجله کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق، دوره ۶، شماره ۱۱، صفحات ۷۰–۶۴، ۱۳۹۶.
- [3] Rouholamini, M., Mohammadian, M. Wang, C., et al., A. A. Gharaveisi 'Optimal fuzzy-based power management for real time application in a hybrid generation system', IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 10, pp. 1325 – 1324, 2017.
- [4] Shafie-khah, M., Heydarian-Forushani, E., Hamedani Golshan, M.E., P. Siano, M. Parsa Moghaddam, M.K. Sheikh-El-Eslami, J.P.S. Catalão, 'Optimal trading of plug-in electric vehicle aggregation agents in a market environment for sustainability', Appl. Energy, Vol. 162, pp. 601–612, 2016.
- [5] Vahedipour-Dahraie, M., Najafi, H.R., Anvari-Moghaddam, A., and J.M. Guerrero, 'Study of the Effect of Time-Based Rate Demand Response Programs on Stochastic Day-Ahead Energy and Reserve Scheduling in Islanded Residential Microgrids', Appl. Sci., Vol. 7, No. 4, pp. 1–19, 2017.
- [6] Bajpai, P., Punna, S.K., Singh, S., 'Swarm intelligence-based strategic bidding in competitive electricity markets', IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2, No. 2, pp. 175–184, 2008.
- [7] Tan, Z., Yang, P., Nehorai, A.: 'An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid', IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, No. 2, pp. 861–869, 2014.
- [8] Wu, H., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., , A. Abusorrah, 'A Game Theoretic Approach to Risk-Based Optimal Bidding Strategies for Electric Vehicle

Electricity Markets, Appl. Sci., Vol. 7, No. 10, pp. 1-16, 2017.

- [24] 'The General Algebraic Modeling System (GAMS) Software', online available at: <http://www.gams.com>, accessed on 26 September 2016.
- [25] Pashajavid, E., Aliakbar Golkar, M., "Charging of plug-in electric vehicles: Stochastic modelling of load demand within domestic grids" 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012), pp. 535-539, 2012.

زیر نویس ها

- ¹ Markov game
- ² Cooperative game model
- ³ Karush-Kuhn-Tucker
- ⁴ Pool based short term electricity floor
- ⁵ Correlation
- ⁶ Auto correlation
- ⁷ Nordpool
- ⁸ Monte Carlo Simulation (MCS)
- ⁹ Roulette wheel mechanism (RWM)
- ¹⁰ Probability density function
- ¹¹ nonanticipativity
- ¹² Duality theory