

Encouraging household investors to install distribution level battery storage systems using incentive prices

Mostafa Kazemi^{1*}, Assistant Professor, Seyed Sepehr Tabatabaei², Assistant Professor, Niki Moslemi³

¹ - Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.
Email: m.kazemi@shr.ui.ac.ir (Corresponding author)

² - Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.
Email: s.tabatabaei@shr.ui.ac.ir

³ - Power Systems Operation and Planning Research Department, Niroo Research Institute.
Email: nmoslemi@nri.ac.ir

Abstract

In this paper a bi-level optimization approach is introduced to increase the participation of household investors to install battery storage systems in the distribution level. For this purpose a public private partnership structure is introduced. The incentive prices are used here to encourage the private investor. In the upper level, the viewpoint of the government is modeled in which, peak shaving is the goal while minimizing the cost due to the allocated subsidies. In the lower level of the model, the investors' point of view are modeled, and their profit is maximized. In this structure, the heavy financial burden of installing battery storage systems is divided between the public sector (government here) and private sections (household investors here). In addition, in the introduced structure, the installed battery storage systems would be operated by their households. By applying the incentive prices, the households would operate their battery storage systems in line with the goal of public section, which is peak shaving. In this way, the communication infrastructures between the operation center and all battery storage systems can be eliminated, and each battery storage system can be operated in a stand-alone mode. The bi-level model is converted into its equivalent single level optimization using Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimality conditions, so that it can be solved easily by commercial solvers. The proposed single level nonlinear model is linearized using the big-M method and the strong duality theorem (SDT). At this step, the model is linearized accurately, and no level of approximation is involved. In other words, it is proved that the global optimum of the nonlinear model and that of the linear one are exactly the same with no approximation. A dynamic iterative model based on grid-search is also implemented to model the participants' behavior. The performance of the presented model has been analyzed using real-world data of Yazd network.

Keywords: Battery storage systems, household investors, incentive prices, peak shaving

Submit date: 2022/08/07
Accepted date: 2023/08/19

Corresponding author name: Mostafa Kazemi

Corresponding author's Address: University of Isfahan, Shahreza Campus, Isfahan, Iran

تخصیص بهینه یارانه غیر مستقیم تشویقی به مالکین ذخیره ساز الکتریکی در سطح توزیع

نوع مطالعه: پژوهشی

مصطفی کاظمی^۱، اسید سپهر طباطبایی^۱، نیکی مسلمی^۲

۱- گروه مهندسی برق، استادیار، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

m.kazemi@shr.ui.ac.ir, s.tabatabaei@shr.ui.ac.ir

۲- گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، کارشناس، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

nmoslemi@nri.ac.ir

چکیده: در این مقاله به ارائه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی جهت حمایت از نصب باتری توسط سرمایه‌گذاران خرد در سطح توزیع می‌پردازد. در این مدل با ارائه قیمت‌های حمایتی امکان افزایش سود دارندگان باتری ایجاد شده و یارانه غیر مستقیم از سمت سیاست‌گذار بالادستی به سرمایه‌گذاران خرد تخصیص داده می‌شود. در مدل دو سطحی ارائه شده سطح اول به سیاست‌گذار بالادستی پرداخته و سعی می‌کند تا اهداف آن را برآورده کند. در این مقاله بهبود ضریب بار به عنوان هدف سیاست‌گذار بالا دستی در نظر گرفته شده است. سطح دوم به مدلسازی دیدگاه سرمایه‌گذار خرد پرداخته و سود آن را بیشینه می‌کند. مدل دوسطحی ارائه شده به کمک شرایط KKT به یک مدل تک سطحی تبدیل شده است تا قابل حل به کمک نرم‌افزارهای بهینه‌سازی تجاری باشد. با توجه به ابعاد مسئله بهینه‌سازی، مدل ارائه شده به وسیله روش M بزرگ و تئوری دوگان (SDT) خطی شده است. رفتار مشترکین خرد نیز به کمک یک روش بهینه‌سازی تکراری و با استفاده از Grid-search به صورت دینامیکی مدل شده است. در نهایت عملکرد مدل ارائه شده بر داده‌های واقعی شبکه یزد مورد تست قرار گرفته و نشان داده شد که مدل ارائه شده حساسیت زیادی به مدل رفتار مشترکین خرد دارد. مدل ارائه شده به صورت دینامیکی امکان بهبود تخمین رفتار مشترکین خرد را فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره ساز باتری، سیاست‌گذار بالا دستی، قیمت‌های حمایتی، کاهش پیک بار.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: مصطفی کاظمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان- شهرضا- جاده دهقان- جنب اداره هواشناسی- مرکز آموزش عالی شهرضا- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

سرمایه‌گذار خصوصی مورد بحث قرار می‌گیرد و از کاربردهایی همچون موقعیت‌های خرید و فروش در پیک و آف-پیک شبکه، خدمات جانبی و ... جهت کسب درآمد استفاده می‌شود. این مقاله در حوزه دسته سوم معرفی شده در فوق قرار خواهد گرفت؛ بدین ترتیب که حوزه تمرکز این طرح بر سرمایه‌گذاران خصوصی خواهد بود. علاوه بر این، در بین اقدامات سودآور معرفی شده در دسته سوم، تمرکز این کار صرفاً بر مبحث پیک‌سایي متمرکز خواهد بود، چرا که اقدامات دیگری همچون مشارکت در کنترل فرکانس و یا بازار رزرو و ... نیازمند وجود زیرساخت‌هایی خواهد بود که در حال حاضر عملیاتی نیست.

با توجه به پیشینه ذکر شده در مورد افزایش نفوذ باتری‌ها در شبکه‌های قدرت، انتظار می‌رود چنین روندی به زودی در ایران نیز آغاز شود. لزوم این امر را می‌توان از مزیت‌های بسیار زیادی که برای ذخیره‌سازها شمرده می‌شوند، درک نمود؛ مواردی همچون کاهش پیک بار، کنترل فرکانس، مشارکت در رزرو، بهبود ریسک بهره‌برداری از تجدید پذیرها و ... با این دیدگاه، که رشد نفوذ ذخیره‌سازها در شبکه‌های قدرت امری الزامی و مفید برای شبکه قدرت ایران خواهد بود، تسهیل این روند باید از سیاست‌های مهم توسعه سیستم قدرت ایران در نظر گرفته شود.

از مهم‌ترین مشکلاتی که بر مسیر توسعه نفوذ ذخیره‌سازها در شبکه قدرت ایران وجود دارد، می‌توان به هزینه بالای آنها، بالاخص با رشد قیمت ارز، اشاره نمود. هزینه‌ی این ادوات در قیاس با قیمت یارانه‌ای برق به حدی زیاد است که نه تنها سرمایه‌گذاران خصوصی جذب آن نمی‌شوند، بلکه بار سنگین مالی برای نهادهای غیر خصوصی به همراه خواهد داشت. با این توصیفات، مشکل جذب سرمایه در زمینه ذخیره-سازها، یکی از مهم‌ترین موانع رشد نفوذ این تکنولوژی در شبکه برق ایران خواهد بود.

یکی از روش‌های مرتفع ساختن این مشکل، استفاده از مشارکت سرمایه‌گذاران خرد در بحث ذخیره‌سازها می‌تواند باشد. برای این منظور باید سیاست‌های تشویقی به نحوی لحاظ گردد که سرمایه‌گذار خرد را به بهترین حالت به مشارکت در نصب ذخیره‌ساز گرایش دهد. استفاده از مشارکت بخش خصوصی و بخش دولتی در تامین سرمایه طرح‌ها یکی از راهکارهایی است که در کشورهای در حال توسعه با کمبود بودجه مطرح می‌شود. به عنوان مثال در (Banks, 2003) نمونه‌هایی از مشارکت بخش خصوصی و دولتی در زمینه تامین آب، حمل و نقل و سیستم سلامت ذکر شده است. این مدل سیستم اشتراکی جهت تمین سرمایه در سیستم‌های انرژی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در (Banks, 2003) از این سیستم مشارکتی برای توسعه انرژی بادی در کشور پرتغال توضیح داده شده است. همچنین در (Sobhiyah, Bemanian, & Kashtiban, 2011) استفاده از ذخیره‌سازها در صنعت برق با رشد و اقبال بسیار زیادی همراه بوده است، به نحوی که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۴ ظرفیت نصب شده این ادوات تا حد 2GW در سطح جهان رشد کند (Beetz, 2015). در سالهای گذشته، دوفاکتور اساسی مانع از رشد سریع ذخیره‌سازها شده‌اند که عبارتند از: (۱) قیمت بالای این ادوات و (۲) نبود قانون‌گذاری مناسب و مشوق. در مورد اولین مانع ذکر شده (قیمت بالای باتری‌ها)، لازم به ذکر است که امروزه قیمت اکثر تکنولوژی‌های باتری به حدی رسیده که می‌توانند با قیمت‌های امروزی برق، نصب و بهره‌برداری شوند و کماکان سودآور باشند. همچنین روند نزولی قیمت این ادوات، منجر به برداشته شدن مانع هزینه‌ی نصب بالا شده است (Maloney, 2016).

در مورد عامل دوم (نبود قانون‌گذاری مناسب و مشوق)، نیز حرکات مؤثر و قابل توجهی در جهت حمایت از ذخیره‌سازها صورت گرفته است. به عنوان مثال در آمریکا به کمک FERC order 755، یک نظام پرداخت مبتنی بر عملکرد برای کنترل فرکانس ایجاد گردیده است (Commission, 2011). به کمک این مدل پرداخت‌ها، مزیتی برای باتری‌ها در بازار کنترل فرکانس ایجاد گردید که با توجه به سرعت بالای پاسخ‌گویی، امکان کسب درآمد بیشتر را برای آنها فراهم می‌کند.

استفاده از ذخیره‌سازها در شبکه‌های قدرت را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم بندی نمود. در دسته اول، مسئله‌ی ذخیره‌سازها از منظر بهره‌بردار سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد (Duggal & Venkatesh, 2014; Oh, 2010; Pozo, Contreras, & Sauma, 2014). در این دسته عموماً از ذخیره‌سازها برای بهبود بهره‌برداری از سیستم و کاربردهایی نظیر کاهش پیک بار استفاده می‌شود. در دسته-ی دوم، ذخیره‌سازها به عنوان منبع کمکی برای واحدهای تجدید پذیر استفاده شده است (Akhavan-Hejazi & Mohsenian-Rad, 2013; Fotuhi-Firuzabad, Shafiee, & Rastegar, 2015; Hill, Such, Chen, Gonzalez, & Grady, 2012; Shafiee, Fotuhi-Firuzabad, & Rastegar, 2012). در این نوع از کاربرد، هدف بیشتر کاهش ریسک بهره‌برداری از منابع تجدید پذیر است. در این کاربرد هدف از بهره‌برداری مشترک ذخیره‌ساز و منابع تجدید پذیر، کاهش نوسانات توان تولیدی تجدید پذیرها بوده، چرا که پیش‌بینی توان تولیدی آنها با خطای نسبتاً بالایی روبه‌رو است. در دسته سوم، کاربرد ذخیره‌سازها به عنوان یک عنصر تنها و مستقل مورد بررسی قرار می‌گیرد (Drury, Denholm, & Sioshansi, 2011; He, Chen, Kang, Pinson, & Xia, 2015; Kazemi, Zareipour, Amjadi, Rosehart, & Ehsan, 2017; Kazemi, Zareipour, Ehsan, & Rosehart, 2016; Mohsenian-Rad, 2015; Nasrolahpour, Kazempour, Zareipour, & Rosehart, 2016; Varkani, Daraeepour, & Monsef, 2011). در این دسته، غالباً نقش

شود. این مهم با تعیین قیمت‌های تشویقی-حمایتی میسر خواهد گردید. بدین ترتیب کنترل مستقیم ذخیره‌سازها توسط بهره‌بردار شبکه نیاز نبوده و عملاً بخش زیادی از هزینه‌های ایجاد زیرساخت مخابراتی حذف خواهد شد. همچنین، در این مقاله علاوه بر تعیین قیمت‌های بهینه حمایتی، ساعات بهینه پیک و غیر پیک نیز به نحوی تعیین می‌شود که منفعت بخش دولتی از تخصیص یارانه بیشینه شود. ساختار این مقاله بدین صورت است: در بخش دوم به معرفی مدل پیشنهادی پرداخته شده است. فصل سوم نتایج شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد. در نهایت بخش نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل پیشنهادی

در این بخش به ارائه مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای این منظور مسئله از دو منظر سیاست‌گذار بالا دستی و سرمایه‌گذار خرد مورد بررسی قرار می‌گیرد و مدل مورد استفاده در این مسئله، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی^۱ خواهد بود. در این مدل، سطح اول بهینه‌سازی از منظر سیاست‌گذار بالادستی طراحی می‌شود و سطح دوم مسئله، مدل‌کننده دیدگاه سرمایه‌گذار خرد خواهد بود. حل همزمان این دو مدل، به یک مدل جامع و اساسی منجر خواهد شد که می‌تواند پاسخ‌گوی نحوه بهینه‌سازی سیاست‌گذاری در مسئله مورد نظر در این گزارش باشد.

لازم به ذکر است که ساختار در نظر گرفته شده در این بخش به صورت سنتی بوده و رقابت و امکان ارائه قیمت جهت خرید و فروش باتری‌ها لحاظ نشده است. در حوزه توزیع به خصوص در کشورهایی که در ابتدای مسیر تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت هستند، رقابت در حوزه توزیع هنوز شکل نگرفته است و کماکان در این حوزه قیمت‌گذاری به صورت دستوری و از سمت نهاد بالادستی انجام می‌شود. علاوه بر این در حوزه توزیع معمولاً ابعاد تولیدکننده‌ها یا باتری‌ها به حدی کوچک بوده که قابلیت رقابت با خرده‌فروشان تامین‌کننده برق از بازار عمده‌فروشی را ندارند. به عبارت بهتر اگر رقابتی در این حوزه وجود داشته باشد، عمدتاً بین خرده‌فروشان بزرگ و با نفوذ بوده تا تولیدکننده‌های محلی و یا باتری‌های با ظرفیت کوچک. هر چند این قضیه در حوزه انتقال میسر بوده و حتی باتری‌های تعیین‌کننده قیمت در حوزه انتقال نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Nasiri, Zeynali, & Marzband, 2022).

علاوه بر تمامی این توضیحات، این مقاله به ارائه یک مدل مشارکتی جهت تشویق سرمایه‌گذاران خانگی به نصب باتری پرداخته است. قاعدتاً ابعاد باتری نصب شده توسط سرمایه‌گذار خانگی و در محیط کوچک خانه، بسیار کوچک است. حتی اگر ساز و کار بازار در سیستم توزیع موجود باشد، ابعاد باتری نصب شده توسط هر خانه به قدری کوچک است که قطعاً نمی‌تواند تاثیری بر قیمت تسویه بازار بگذارد. نکته مهم بعدی این است که با توجه به کثرت و پراکندگی باتری‌های خانگی، رقابت آنها با یکدیگر در حوزه بازار به یک رقابت یکدست و

2009)، در مورد توسعه سیستم انرژی خورشیدی در آفریقای جنوبی جهت تامین برق مناطق حاشیه‌ای بحث شده است. در (Yang, Long, Li, & Rehman, 2016)، توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل خودروهای الکتریکی در چین به کمک مشارکت بخش خصوصی و دولتی بررسی شده است. با این توصیفات، حوزه کاری این مقاله سوق دادن سرمایه‌گذاران خانگی به مشارکت در نصب ذخیره‌سازهای خانگی خواهد بود که به نوعی مشارکت بخش خصوصی و دولتی می‌تواند محسوب شود. علاوه بر این، از آنجا که حوزه تمرکز این مقاله بخش توزیع و عمدتاً محیط‌های شهری-خانگی است، استفاده از ذخیره-سازهایی که تولید آلودگی زیست محیطی یا آلودگی صوتی دارند، مناسب نخواهد بود. بدین ترتیب حوزه تمرکز این طرح از منظر نوع ذخیره‌ساز، باتری‌های Li-ion خواهد بود.

همچنین باید توجه داشت که در راستای تخصیص یارانه به بهترین وجه (یعنی به طوری که مشوقی در راستای اهداف بالادستی باشد) یک بهینه‌سازی نیاز است که در این بهینه‌سازی به نوعی دانستن رفتار بازیگران از ملزومات است. لیکن این مجهول دستخوش نایقینی است و نمی‌توان بطور دقیق آن را تعیین نمود. لذا در این مقاله سعی بر آن است تا بطور تخمینی بازیگر را مدل کنیم و با اطلاعاتی که از طریق این مدل حاصل می‌شود نقش او را در بهینه‌سازی لحاظ نماییم. از نوآوری‌ها این مقاله در نظر گرفتن یک مدل ماکروسکوپی برای رفتار مشترکین و شناسایی تطبیقی پارامترهای آن به صورت بازگشتی است. با داشتن چنین مدلی سرمایه‌گذار کلان توانایی ارائه قیمت بهینه را خواهد داشت. مدل پیشنهادی یک رابطه نمایی بین اختلاف قیمت خرید و فروش توان و میزان تمایل مشترک برای شرکت در این طرح در نظر می‌گیرد. این رابطه غیرخطی بعداً به صورت قید در بهینه‌سازی سطح اول لحاظ خواهد شد.

هدف اصلی این مقاله تعیین قیمت‌های بهینه خرید و فروش برق از/به باتری‌های خانگی بوده به نحوی که مشارکت سرمایه‌گذاران خرد در این امر بهینه گردد. منظور از بهینه شدن مشارکت سرمایه‌گذاران خرد را می‌توان بدین ترتیب شرح داد که لزوماً مشارکت حداکثری مطلوب سیاست‌گذار بالا دستی نخواهد بود. برای مشخص شدن این امر، نیاز است که منفعت سیاست‌گذار دولتی از این دست حمایت‌ها از نصب باتری نیز مورد بررسی قرار گیرد. موارد مختلفی می‌تواند مد نظر قرار گیرد. از منظر عملیاتی بودن طرح، کاربردهای ذخیره‌ساز همچون کنترل فرکانس، کیفیت توان و ... مد نظر قرار نمی‌گیرد و تمرکز این مقاله از منظر منفعت بخش دولتی از اعطای یارانه، صرفاً ناشی از کاهش پیک بار در نظر گرفته می‌شود. به عبارت بهتر، بخش دولتی با اعطای مناسب یارانه و سوق تعداد مناسبی مشترک خرد به نصب باتری، ظرفیت مناسبی از باتری‌ها بدست می‌آورد که به کمک آنها می‌تواند پیک بار شبکه خود را کاهش دهد. با این کار عملاً مالکین ذخیره‌ساز بخش خصوصی بوده ولی نحوه بهره‌برداری از این ذخیره-سازها مطابق خواسته بخش دولتی و در راستای پیک سایه انجام می‌-

¹ Bi-level optimization model

الف) قیمت فروش برق توسط شبکه به باتری‌ها در حالت غیرپیک (λ_y^{SoF}) کمتر از قیمت عادی فروش برق به مشترکین (λ_y^{Fix}) در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، دارندگان باتری به شارژ در دوره غیرپیک ترغیب خواهند شد.

ب) قیمت خرید برق توسط شبکه از باتری‌ها در حالت غیرپیک (λ_y^{BoF})، کمتر از قیمت عادی خرید برق از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع (λ_y^{Gen}) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، دارندگان باتری از دشارژ در دوره غیرپیک (مگر در شرایط اضطراری) خودداری خواهند نمود.

ج) قیمت خرید برق توسط شبکه از باتری‌ها در حالت پیک (λ_y^{BP}) بیشتر از قیمت عادی خرید برق از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع (λ_y^{Gen}) در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، دارندگان باتری به دشارژ در دوره پیک ترغیب خواهند شد.

ب) قیمت فروش برق توسط شبکه به باتری‌ها در حالت پیک (λ_y^{SP}) بیشتر از قیمت عادی فروش برق به مشترکین (λ_y^{Fix}) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، دارندگان باتری از شارژ در دوره پیک (مگر در شرایط اضطراری) خودداری خواهند نمود.

با این سیاست، می‌توان به طور ضمنی نتیجه گرفت که دارندگان باتری‌ها در زمان غیرپیک به شارژ برق و در زمان پیک به فروش برق شارژ شده خواهند پرداخت. این سیاست قیمت‌گذاری حمایتی منجر به افزایش سطح مصرف در دوره غیرپیک و کاهش سطح مصرف در دوره پیک و در نتیجه بهبود ضریب بار ۲ خواهد شد که هدف سیاست گذار بالا دستی در این پروژه است. بدین ترتیب می‌توان بهینه سازی مربوط به سطح اول (سیاست گذار بالا دستی) را به صورت زیر بیان نمود.

$$Max_{\Delta} Z = Profit - Cost \quad (1)$$

$$Cost = \sum_{y \in Y} \sum_{d \in D} \left(\sum_{t \in T^{off}} \left(P_{y,d,t}^{Ch} (\lambda_y^{Fix} - \lambda_y^{SoF}) - P_{y,d,t}^{Dis} (\lambda_y^{Gen} - \lambda_y^{BoF}) \right) + \sum_{t \in T^p} \left(P_{y,d,t}^{Dis} (\lambda_y^{BP} - \lambda_y^{Gen}) - P_{y,d,t}^{Ch} (\lambda_y^{SP} - \lambda_y^{Fix}) \right) \right) \quad (2)$$

$$Profit = \omega (LF^{new} - LF^{old}) \quad (3)$$

$$\lambda_y^{SoF} = \gamma^{SoF} \lambda_y^{Fix} \quad \forall y \in Y \quad (4)$$

$$0 \leq \gamma^{SoF} \leq 1 \quad (5)$$

$$\lambda_y^{BoF} = \gamma^{BoF} \lambda_y^{Gen} \quad \forall y \in Y \quad (6)$$

$$0 \leq \gamma^{BoF} \leq 1 \quad (7)$$

$$\lambda_y^{SP} = \gamma^{SP} \lambda_y^{Fix} \quad \forall y \in Y \quad (8)$$

$$1 \leq \gamma^{SP} \quad (9)$$

$$\lambda_y^{BP} = \gamma^{BP} \lambda_y^{Gen} \quad \forall y \in Y \quad (10)$$

$$1 \leq \gamma^{BP} \quad (11)$$

بازار شبه کامل تبدیل شده و در این حالت این بازیگران امکان ایجاد تغییر در قیمت را نخواهند داشت. با این توضیحات، در این مقاله قیمت خرید و فروش در یک ساختار سنتی و از سمت نهاد بالا دستی تعیین می‌شود.

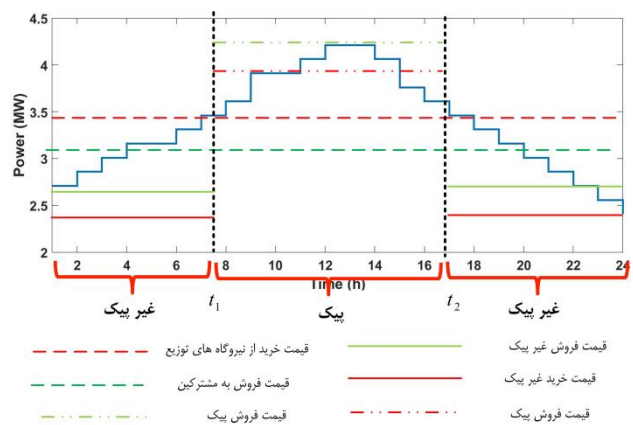
با این توضیحات می‌توان نوآوری‌های این مقاله ر به صورت زیر در نظر گرفت:

- ارائه مدلی جهت ایجاد مشارکت سرمایه‌گذاری بین نهاد سیاست گذار (دولت) و سرمایه‌گذاران خرد خانگی جهت نصب باتری‌های خانگی
- توزیع غیر مستقیم یارانه جهت تشویق سرمایه‌گذار خانگی به منظور نصب باتری و بهره‌برداری در راستای کاهش پیک شبکه
- تک سطحی کردن و خطی سازی مدل ارائه شده که می‌تواند علی‌رغم ابعاد بزرگ مسئله تضمین کننده دستیابی به نقطه بهینه سراسری باشد.
- تخمین رفتار سرمایه‌گذاران خانگی از دیدگاه ماکروسکوپی و روش‌های شناسایی سیستم

۱-۲- بهینه سازی سطح اول (دیدگاه سیاست

گذار بالا دستی)

دیدگاه سیاست‌گذار بالا دستی در این مقاله ارائه قیمت‌های حمایتی جهت تشویق سرمایه‌گذار خرد به نصب باتری است. این امر به صورت مناسب توسط شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل، یک منحنی نمونه ۲۴ ساعته از بار ارائه شده است که دوره زمانی مصرف آن به دو سطح پیک و غیرپیک تقسیم شده است. فرض می‌شود که قیمت عادی فروش برق توسط شبکه به مشترکین برابر با λ_y^{Fix} و قیمت عادی خرید برق توسط شبکه از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع برابر با λ_y^{Gen} باشد.



شکل ۱: شماتیک قیمت‌های حمایتی

طبق سیاست مدنظر در این مقاله، در دوره پیک غیرپیک، قیمت‌گذاری حمایتی به صورت ذیل انجام می‌شود:

² Load Factor

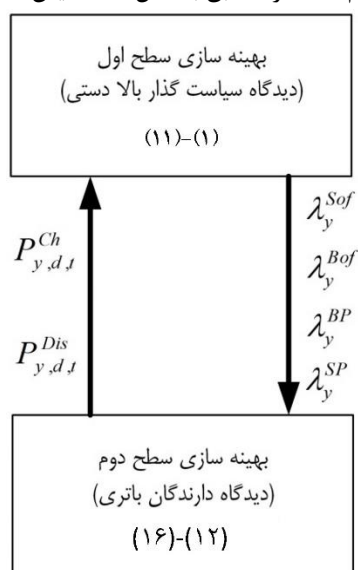
در طول ساعات پیک می‌توان میزان کاهش پیک بار و افزایش ضریب بار را به راحتی محاسبه نمود.

در روابط (۴)–(۱۱)، منطق ارائه شده در شکل (۱) به صورت ریاضی مدل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قیمت‌های خرید از مشترک دارای باتری، λ_y^{Bof} و λ_y^{BP} ، به ترتیب با ضرایب γ^{BoF} و γ^{BP} به قیمت عادی خرید برق از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع مرتبط شده‌اند. در دوره زمانی پیک، ضریب γ^{BP} بزرگتر از یک و در دوره زمانی غیرپیک، ضریب γ^{BoF} کوچکتر از یک لحاظ شده است. به همین صورت، قیمت‌های فروش برق به مشترک دارای باتری، λ_y^{Sof} و λ_y^{SP} ، به ترتیب با ضرایب γ^{SP} و γ^{Sof} به قیمت عادی فروش برق به مشترکین مرتبط شده‌اند. در دوره زمانی پیک، ضریب γ^{SP} بزرگتر از یک و در دوره زمانی غیرپیک، ضریب γ^{Sof} کوچکتر از یک لحاظ شده است.

۲-۲ مسئله سطح دوم: بهینه‌سازی از دیدگاه

سرمایه‌گذار خرد

مسئله سطح دوم، به مدل‌سازی رفتار سرمایه‌گذار خرد (دارنده باتری) می‌پردازد. دارنده باتری، بر اساس قیمت‌های اعلام‌شده توسط سیاست‌گذار بالادستی، باتری خود را به نحوی شارژ و دشارژ می‌کند که بیشترین سود را کسب نماید. بدین ترتیب، می‌توان ارتباط بین دو سطح اول و دوم مسئله را مطابق با شکل (۲) نمایش داد.



شکل (۲): نحوه ارتباط دو مسئله بهینه‌سازی سطح اول و دوم

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، با حل مسئله بهینه‌سازی سطح اول، متغیرهای تصمیم‌گیری اساسی مسئله که همان قیمت‌های حمایتی خرید و فروش برق باتری‌ها در دوره‌های پیک و غیرپیک هستند (λ_y^{Sof} , λ_y^{Bof} , λ_y^{BP} , λ_y^{SP})، به دست می‌آیند. این قیمت‌های حمایتی به عنوان ورودی به مسئله سطح دوم ارسال می‌شوند. در مسئله بهینه‌سازی سطح دوم، به کمک قیمت‌های حمایتی مشخص‌شده در مسئله سطح اول، نحوه و میزان شارژ و دشارژ

در تابع هدف (۱)، هدف بهینه‌سازی سود و یا به عبارت بهتر کمینه‌سازی ضرر ناشی از تخصیص کمک به طرح حمایتی مدنظر این گزارش است. در مدل بهینه‌سازی فوق، Δ مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی مسئله است که به صورت $\Delta = \{\lambda_y^{Sof}, \lambda_y^{Bof}, \lambda_y^{SP}, \lambda_y^{BP}\}$ تعریف می‌شود و بیانگر قیمت‌های حمایتی است که سیاست‌گذار بالادستی به کمک آنها می‌تواند به اهداف مدنظر خود دست یابد. مقادیر Cost و Profit به کمک روابط (۲) و (۳) بیان شده‌اند.

تابع هزینه برابر با مجموع یارانه تخصیص داده‌شده برای اعمال قیمت‌گذاری حمایتی است. این تابع از چهار جمله تشکیل شده است که دو جمله اول مربوط به بازه غیرپیک و دو جمله آخر مربوط به دوره پیک هستند. در دوره غیرپیک، اگر دارنده باتری اقدام به شارژ باتری نماید، مابه‌التفاوت قیمت فروش عادی برق و قیمت فروش حمایتی غیرپیک ($\lambda_y^{Fix} - \lambda_y^{Sof}$) به عنوان یارانه توسط سیاست‌گذار بالادستی تامین و جزء هزینه‌های او محسوب می‌شود. در مقابل، اگر دارنده باتری در دوره غیرپیک اقدام به دشارژ باتری نماید، مابه‌التفاوت قیمت خرید غیرپیک و قیمت خرید از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع ($\lambda_y^{Gen} - \lambda_y^{Bof}$) باید به عنوان جریمه توسط دارنده باتری به سیاست‌گذار بالادستی پرداخت شود. به عبارت دیگر، اگر دارنده باتری در دوره غیرپیک اقدام به دشارژ باتری نماید، با هزینه‌ای کمتر از نیروگاه‌های عادی موجود در شبکه توزیع، به تزریق برق به شبکه پرداخته است؛ در نتیجه، این مابه‌التفاوت به نوعی درآمد سیاست‌گذار بالادستی محسوب می‌شود. به طور مشابه، در دوره پیک هزینه‌ها توسط دو جمله بعدی محاسبه شده است. در رابطه (۳)، سود سیاست‌گذار بالادستی به صورت اصلاح ضریب بار مدل شده است که در آن LF^{old} و LF^{new} به ترتیب ضرایب بار قبل و بعد از اجرای طرح بوده و ω جهت همسنگ‌سازی مقادیر هزینه و سود لحاظ شده است. LF^{old} که ضریب بار شبکه قبل از نصب باتری بوده و به صورت یک پارامتر از شکل بار محاسبه شده و قبل از شبیه‌سازی به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شود. در مورد محاسبه LF^{new} ، از آنجا که تعریف ضریب بار، میزان بار متوسط روزانه تقسیم بر پیک بار است، می‌توان متوجه شد که صورت کسر (بار متوسط روزانه) تغییری نمی‌کند. زیرا باتری‌ها تولید کننده انرژی نبوده و فقط با شارژ و دشارژ انرژی شکل بار را عوض کرده که این امر منجر به تغییر متوسط بار روزانه نخواهد شد. باتری‌ها صرفاً با کاهش پیک روزانه می‌توانند مخرج کسر ضریب بار را کاهش داده و منجر به افزایش ضریب بار شوند. از آنجا که در این پژوهش بار روزانه به دوره‌های پیک و غیر پیک تقسیم شده و ضرایب جریمه و تشویق در طول این دوره‌ها ثابت است، شارژ و دشارژ به صورت یکنواخت در طول این دوره‌ها انجام می‌شود (نتایج شبیه‌سازی نیز موید این امر است). پس با محاسبه میزان دشارژ باتری

سال $y-1$ محاسبه می‌شود. در جمله دوم، $\sum_{\hat{d}=1}^{d-1} \sum_{t \in T} P_{y,\hat{d},t}^{Ch} - P_{y,\hat{d},t}^{Dis}$ مجموع تبادل توان باتری در سال y ام، از ابتدای سال تا روز $d-1$ ام سال y ام را محاسبه می‌کند. نهایتاً در جمله سوم، $\sum_{t=1}^t P_{y,d,t}^{Ch} - P_{y,d,t}^{Dis}$ مجموع تبادل توان باتری در سال y ام، روز d ام از ابتدای روز تا ساعت t ام را محاسبه می‌کند. در نهایت، در قید (۱۶)، محدودیت مربوط به انرژی ذخیره‌شده در باتری به مسئله اعمال می‌شود.

۳-۲ معادل تک سطحی و نحوه حل مسئله

مدل قیمت‌گذاری حمایتی برق باتری‌ها که در بخش‌های قبل ارائه شد، یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی است که جواب مسئله با حل همزمان هر دو سطح به دست می‌آید. به منظور حل مسئله نیاز است که مدل دو سطحی ارائه شده به یک مدل تک سطحی تبدیل شود. هر چند نرم‌افزارهای تجاری قابلیت حل مدل به صورت دو سطحی را دارند، به منظور خطی سازی نیاز است که از جملات و عبارات استفاده شده در شرایط KKT استفاده کنیم. بدین منظور مدل دو سطحی به صورت دستی به مدل تک سطحی تبدیل شده و در ادامه از روابط به دست آمده برای خطی سازی کمک گرفته شده است. بدین منظور، در این بخش معادل تک‌سطحی مسئله دوسطحی ارائه می‌شود.

از آنجا که مسئله بهینه‌سازی سطح دوم، که با روابط (۱۲)-(۱۶) بیان می‌شود، یک مسئله بهینه‌سازی خطی است، بنابراین می‌توان آن را با روابط Karush-Kuhn-Tucker (KKT) جایگزین کرد (Baringo & Conejo, 2010). بدین ترتیب، مسئله بهینه‌سازی سطح دوم به مجموعه‌ای از قیود تبدیل خواهد شد که می‌توان آنها را به مسئله بهینه‌سازی سطح اول (روابط (۱۱)-(۱۱)) اضافه کرد. بدین ترتیب، مسئله بهینه‌سازی دوسطحی به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌سطحی تبدیل خواهد شد. مدل تک سطحی به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Max}_{\Delta} Z = \text{Profit} - \text{Cost} \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{y,d,t}^{Dis}} = \left(\begin{aligned} & \lambda_y^{Bof} - \eta_{y,d,t}^{PdisU} + \eta_{y,d,t}^{PdisD} + \\ & \sum_{\substack{\hat{y} \in Y \\ \hat{y} > y}} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{t \in T} \eta_{\hat{y},\hat{d},t}^{EU} - \eta_{\hat{y},\hat{d},t}^{ED} \\ & + \sum_{\substack{\hat{d} \in D \\ \hat{d} > d}} \sum_{t \in T} \eta_{y,\hat{d},t}^{EU} - \eta_{y,\hat{d},t}^{ED} + \\ & \sum_{\substack{t \in T \\ t \geq t}} \eta_{y,d,t}^{EU} - \eta_{y,d,t}^{ED} \end{aligned} \right) = 0 \quad (17)$$

$$\forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T^{off}$$

دارندگان باتری مشخص می‌شود $(P_{y,d,t}^{Dis}, P_{y,d,t}^{Ch})$. سپس، الگوی شارژ و دشارژ به عنوان خروجی مسئله سطح دوم، به عنوان ورودی به مسئله سطح اول ارسال می‌گردد. در اینجا لازم است تأکید شود که مدل ارائه‌شده نیازمند حل همزمان هر دو سطح است؛ زیرا خروجی هر سطح، ورودی سطح دیگر است و برای حل مسئله هر سطح، کلیه ورودی‌های آن مورد نیاز هستند. بدین ترتیب، مدل بهینه‌سازی مسئله قیمت‌گذاری حمایتی یک مدل دوسطحی خواهد بود. در ادامه، مدل ریاضی مسئله سطح دوم بیان می‌شود.

در مسئله بهینه‌سازی سطح دوم، هدف بیشینه کردن سود دارندگان باتری به کمک انجام شارژ و دشارژ در زمان‌ها و مقادیر مناسب است. در این مسئله، مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی به صورت $\Omega = \{P_{y,d,t}^{Ch}, P_{y,d,t}^{Dis}\}$ تعریف می‌شود. مدل ریاضی این مسئله با روابط زیر بیان می‌شود:

$$\text{Max}_{\Omega} \text{Profit}^B = \sum_{y \in Y} \sum_{d \in D} \left(\sum_{t \in T^{off}} P_{y,d,t}^{Dis} \lambda_y^{Bof} - P_{y,d,t}^{Ch} \lambda_y^{Sof} + \sum_{t \in T^P} P_{y,d,t}^{Dis} \lambda_y^{BP} - P_{y,d,t}^{Ch} \lambda_y^{SP} \right) \quad (12)$$

$$0 \leq P_{y,d,t}^{Dis} \leq P^{max} \quad \forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (13)$$

$$0 \leq P_{y,d,t}^{Ch} \leq P^{max} \quad \forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (14)$$

$$E_{y,d,t} = \left(\begin{aligned} & \sum_{\hat{y}=1}^{y-1} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{t \in T} P_{\hat{y},\hat{d},t}^{Ch} - P_{\hat{y},\hat{d},t}^{Dis} + \\ & \sum_{\hat{d}=1}^{d-1} \sum_{t \in T} P_{y,\hat{d},t}^{Ch} - P_{y,\hat{d},t}^{Dis} + \\ & \sum_{t=1}^t P_{y,d,t}^{Ch} - P_{y,d,t}^{Dis} \end{aligned} \right) \quad (15)$$

$$\forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T$$

$$0 \leq E_{y,d,t} \leq E^{max} \quad \forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (16)$$

در رابطه (۱۲)، تابع هدف بهینه‌سازی از دو جمله تشکیل شده است. جمله اول، مربوط به شارژ و دشارژ باتری در دوره زمانی غیرپیک است $(\sum_{t \in T^{off}} P_{y,d,t}^{Dis} \lambda_y^{Bof} - P_{y,d,t}^{Ch} \lambda_y^{Sof})$ در این دوره، هزینه فروش برق به باتری برای شارژ کردن با قیمت λ_y^{Sof} و درآمد ناشی از فروش برق باتری به شبکه برای دشارژ کردن با قیمت λ_y^{Bof} محاسبه می‌شود. به همین ترتیب در جمله دوم سود سرمایه گذار خرد در بازه پیک محاسبه می‌شود. قیود (۱۳) و (۱۴) نیز محدودیت توان باتری برای شارژ و دشارژ را لحاظ می‌کنند. در قید (۱۵)، سطح انرژی باتری برای سال y ام، روز d ام و ساعت t ام محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این عبارت از سه جمله تشکیل شده است. در جمله اول،

$$\sum_{\hat{y}=1}^{y-1} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{t \in T} P_{\hat{y},\hat{d},t}^{Ch} - P_{\hat{y},\hat{d},t}^{Dis}$$

مجموع تبادل توان باتری از ابتدا تا

(۱۶)-(۱۲) و (۱۱)-(۲)

در روابط (۱۷)-(۲۰)، ضرایب لاگرانژ قیود مسئله سطح دوم بوده و این روابط از طریق مشتق گیری از تابع لاگرانژ L نسبت به متغیرهای اصلی ایجاد شده‌اند. روابط (۲۱)-(۳۲) نیز معادل خطی روابط مکمل نامساوی‌های مسئله سطح دوم بوده که به کمک روش M بزرگ خطی شده‌اند. توضیحات تکمیلی این مدل خطی سازی برای روابط مکمل در [۲۲] ارائه شده است.

مسئله بهینه‌سازی تک‌سطحی که اکنون به دست آمده است، یک مسئله غیرخطی است (در عبارت $Cost$) و با توجه به ماهیت مسئله، که مربوط به برنامه‌ریزی توسعه در یک دوره زمانی است، ابعاد آن بزرگ است. در این صورت، حل این مسئله با روش‌های غیرخطی نه تنها ممکن است به جواب دقیق نرسد، بلکه ممکن است منجر به عدم همگرایی در حل مسئله بشود. بدین ترتیب، لازم است که مسئله تک‌سطحی ارائه‌شده خطی شود تا بتوان رسیدن به جواب بهینه سراسری را تضمین کرد.

با توجه دوباره به مسئله بهینه‌سازی سطح دوم (۱۲)-(۱۶) می‌توان فهمید که این روابط خطی بوده و شرایط تئوری دوگان قوی^۳ (SDT) برای آن برقرار است. به کمک SDT و انجام برخی عملیات ریاضی که می‌توان مشابه آن را در (Kazemi et al., 2016) مطالعه نمود، می‌توان عبارات غیر خطی موجود در مدل تک سطحی را (که فقط در جمله $Cost$ حضور دارند) بدون تقریب خطی کرد. خطی شده این عبارت به صورت مدل نهایی زیر خواهد بود:

$$Cost = \sum_{y \in Y} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \left(P^{max} (\eta_{y,d,t}^{PdisU} + \eta_{y,d,t}^{PchU}) + E^{max} \eta_{y,d,t}^{EU} + P_{y,d,t}^{Ch} \lambda_y^{Fix} - P_{y,d,t}^{Dis} \lambda_y^{Gen} \right) \quad (33)$$

بدین ترتیب با جایگزینی رابطه (۳۳) به جای (۲)، مدل تک سطحی خطی خواهد شد.

۴-۲ مدل‌سازی رفتار سرمایه گذاران خرد

در مدل‌سازی قسمت قبل، تصمیم‌گیری مشترکین خرد در حوزه بهره برداری از باتری‌هایشان مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت بهتر در بخش قبل حوزه تمرکز صرفاً مشترکینی بود که به نصب باتری اقدام کرده بودند. در این بخش حوزه دیدگاه زمانی را برای مشترکین خانگی بلند مدت تر در نظر می‌گیریم و به این سوال پاسخ می‌دهیم که مشترکین خانگی در چه صورت به نصب باتری اقدام خواهند کرد. در واقع میزان ذخیره‌سازی که در شبکه‌ی توزیع توسط مشترکین خرد نصب می‌شود، تابعی از میزان جذاب بودن قیمت‌های حمایتی خواهد بود. هر چه که این میزان جذابیت بیشتر باشد، میزان مشارکت سرمایه‌گذاران خرد در این برنامه بیشتر خواهد بود. به عبارت بهتر، سرمایه‌گذاران خرد، با توجه به استراتژی سرمایه‌گذاری خود و میزان

$$\frac{\partial L}{\partial P_{y,d,t}^{Dis}} = \left(\lambda_y^{BP} - \eta_{y,d,t}^{PdisU} + \eta_{y,d,t}^{PdisD} + \sum_{\substack{\hat{y} \in Y \\ \hat{y} > y}} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{EU} - \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{ED} + \sum_{\substack{\hat{d} \in D \\ \hat{d} > d}} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{EU} - \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{ED} + \sum_{\substack{\hat{t} \in T \\ \hat{t} \geq t}} \eta_{y,d,\hat{t}}^{EU} - \eta_{y,d,\hat{t}}^{ED} \right) = 0 \quad (18)$$

$$\forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T^p$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{y,d,t}^{Ch}} = \left(-\lambda_y^{Sof} - \eta_{y,d,t}^{PchU} + \eta_{y,d,t}^{PchD} + \sum_{\substack{\hat{y} \in Y \\ \hat{y} > y}} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{ED} - \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{EU} + \sum_{\substack{\hat{d} \in D \\ \hat{d} > d}} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{ED} - \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{EU} + \sum_{\substack{\hat{t} \in T \\ \hat{t} \geq t}} \eta_{y,d,\hat{t}}^{ED} - \eta_{y,d,\hat{t}}^{EU} \right) = 0 \quad (19)$$

$$\forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T^{off}$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{y,d,t}^{Ch}} = \left(-\lambda_y^{SP} - \eta_{y,d,t}^{PchU} + \eta_{y,d,t}^{PchD} + \sum_{\substack{\hat{y} \in Y \\ \hat{y} > y}} \sum_{\hat{d} \in D} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{ED} - \eta_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}^{EU} + \sum_{\substack{\hat{d} \in D \\ \hat{d} > d}} \sum_{\hat{t} \in T} \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{ED} - \eta_{y,\hat{d},\hat{t}}^{EU} + \sum_{\substack{\hat{t} \in T \\ \hat{t} \geq t}} \eta_{y,d,\hat{t}}^{ED} - \eta_{y,d,\hat{t}}^{EU} \right) = 0 \quad (20)$$

$$\forall y \in Y, \forall d \in D, \forall t \in T^p$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{PdisU} \leq MW_{y,d,t}^{PdisU} \quad (21)$$

$$P^{max} - P_{y,d,t}^{Dis} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{PdisU}) \quad (22)$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{PdisD} \leq MW_{y,d,t}^{PdisD} \quad (23)$$

$$P_{y,d,t}^{Dis} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{PdisD}) \quad (24)$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{PchU} \leq MW_{y,d,t}^{PchU} \quad (25)$$

$$P^{max} - P_{y,d,t}^{Ch} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{PchU}) \quad (26)$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{PchD} \leq MW_{y,d,t}^{PchD} \quad (27)$$

$$P_{y,d,t}^{Ch} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{PchD}) \quad (28)$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{EU} \leq MW_{y,d,t}^{EU} \quad (29)$$

$$E^{max} - E_{y,d,t} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{EU}) \quad (30)$$

$$0 \leq \eta_{y,d,t}^{ED} \leq MW_{y,d,t}^{ED} \quad (31)$$

$$E_{y,d,t} \leq M (1 - W_{y,d,t}^{ED}) \quad (32)$$

³ Strong duality Theory (SDT)

مشارکت به اشباع برسد. به در نظر گرفتن این مدل، شناسایی به شناسایی مدل خاکستری و تخمین پارامتر تبدیل خواهد شد.

پذیرش ریسک قابل قبول، به برنامه‌ی نصب باتری پاسخ مثبت و یا منفی می‌دهند.

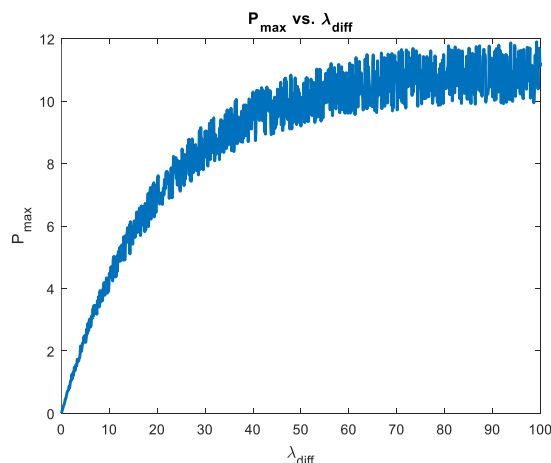
مدل‌سازی این نوع پاسخ‌گویی در سیستم‌های قدرت مسأله جدیدی نیست و این موضوع قبلاً در مسائل مختلفی همچون برنامه‌ریزی خرده‌فروشان به کرات مورد بررسی قرار گرفته است (Bompard, Abrate, Napoli, & Wan, 2007; Kharrati, Kazemi, & Ehsan, 2016a, 2016b). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش بازیها^۴ (Kharrati et al., 2016a)، روش عامل‌های هوشمند^۵ (Bompard et al., 2007) و نمودار PQC^۶ (Kharrati et al., 2016b) اشاره کرد که هر کدام در مدل‌سازی دقیق رفتار اشخاص دارای ضعف‌هایی هستند.

نقش سرمایه‌گذار کلان در چنین بازاری اعلام یک قیمت سالانه برای تنظیم قرارداد است. با توجه به این قیمت است که سرمایه‌گذاران خرد تصمیم می‌گیرند که چه میزان در این تعامل شرکت کنند. در واقع رابطه‌ای بین اختلاف قیمت خرید و فروش توان (قیمت پیک و آف-پیک) و توان مشارکتی وجود دارد که به طور مستقیم در دسترس نیست. یکی از نوآوری‌های این مقاله مدل‌سازی این رابطه است. در این مقاله رویکرد ماکروسکوپی جهت مدل‌سازی رفتار سرمایه‌گذاران خرد به اتخاذ شده است.

در واقع رابطه‌ای به صورت زیر بین حداکثر توان مشارکتی و اختلاف قیمت خرید و فروش وجود دارد.

$$P_{\max} = a(1 - e^{-b\lambda_{\text{diff}}}) + w \quad (33)$$

در این رابطه $P_{\max}$ حداکثر توان مشارکتی، w یک نویز سفید ناشی از عدم قطعیت مدل‌سازی، a, b دو پارامتر مدل‌سازی و $\lambda_{\text{diff}} = \lambda_y^{\text{BP}} - \lambda_y^{\text{Sof}}$ اختلاف قیمت خرید و فروش است. این مدل به صورت نمودار کلی شکل ۳ قابل نمایش است.



شکل (۳): نمودار کلی رابطه بین قیمت و توان مشارکتی

علت انتخاب چنین مدلی آن است که توقع داریم در اختلاف قیمت‌های پایین رفتار مشترکین خطی باشد اما در تفاوت قیمت‌های بالا این

⁴ Game theory

⁵ Agent based method

⁶ Price quota curve

فلوچارت شکل (۲)، مدل مربوط به حل مسأله بهینه‌سازی در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است و بقیه مدل، شامل یافتن مقادیر بهینه مشارکت سرمایه‌گذاران (محاسبه مقادیر E^{max} و P^{max}) و تعیین زمان‌های t_1 و t_2 ، در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. همچنین، کدهای پیاده‌سازی شده در این دو نرم‌افزار از طریق فرمت‌های $wgdx$ و $rgdx$ به یکدیگر متصل شده‌اند تا رفت و برگشت بین دو نرم‌افزار تا همگرایی کامل و جستجوی کامل فضای جواب انجام شود. در ادامه ابتدا به بیان داده‌های ورودی مسئله پرداخته می‌شود و پس از آن، نتایج شبیه‌سازی با توجه به داده‌های ورودی به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳ داده‌های ورودی

در این شبیه‌سازی، افق برنامه‌ریزی برابر متوسط طول عمر باتری لحاظ شده است. با در نظر گرفتن باتری‌های نوع Li-ion، که از رایج‌ترین انواع باتری‌ها با تکنولوژی جدید هستند، عمر تقریبی ۱۰ سال برای باتری‌ها لحاظ شده است. در این تحلیل، سعی شده است که از داده‌های نزدیک به واقعیت، مانند داده‌های مقالات گذشته و کارخانجات سازنده مانند Saft، استفاده شود (He et al., 2015) و (Saft, 2016). همچنین، به منظور ساده‌سازی، عملکرد باتری نیز با بازدهی ۱۰۰ درصد لحاظ شده است (کل توان شارژ شده بدون اتلاف می‌تواند دشارژ شود). لازم به ذکر است که برای تحلیل برنامه‌ریزی بلندمدت در یک دوره ۱۰ ساله، این گونه ساده‌سازی‌ها در مقایسه با خطاهایی مانند پیش‌بینی بار و ... می‌توانند معقول باشند. همچنین در این بخش از داده‌های بار شبکه برق یزد استفاده شده است که در ادامه به تفصیل بیان می‌گردد.

از منظر مدل‌سازی بار نیز، هر سال با دو روز مدل شده است: روز مدل‌کننده فصول گرم و روز مدل‌کننده فصول سرد. همچنین، هر روز نیز به جای مدل‌سازی ۲۴ ساعته، به سه دوره زمانی ابتدای روز تا شروع پیک، زمان پیک و انتهای پیک تا انتهای روز مدل شده است. پس به طور خلاصه، می‌توان گفت که در این شبیه‌سازی، افق برنامه‌ریزی برابر ۱۰ سال لحاظ و به‌منظور ساده‌سازی، هر سال با دو روز و هر روز با سه دوره زمانی مدل شده است. لازم به ذکر است که این گونه ساده‌سازی‌های در برنامه‌ریزی بلندمدت رایج است.

همچنین قیمت برق خریداری شده از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع (λ^{Gen}) برابر با نرخ خرید تضمینی از نیروگاه‌های مقیاس کوچک خورشیدی با توان کمتر از 20 kW فرض شده است که برابر با 1040 T/kWh (نماد تومان در نظر گرفته شده است) می‌باشد (بورس ۲۴، ۲۰۲۲). برای قیمت فروش برق به مشترکین (λ^{Fix}) نیز، با توجه به پلکانی بودن قیمت برق در ایران و با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای باتری (اگر 10kW را در طی یک ماه برای حداقل 60 ساعت استفاده کند)، از پلکان آخر (انرژی مصرفی مازاد بر 3757 T/kWh) استفاده شده است که قیمت آن برابر با 3757 T/kWh

اما برای اینکه سرمایه‌گذار کلان درک خوبی از رفتار مشترکین داشته باشد بایستی هر سال دانش خود را به روز کند و بر اساس دانش جدیدش قیمت پیشنهادی در قرارداد (که حاصل از بهینه‌سازی است) را اعلام نماید. در طی این فرایند فرض می‌شود که در طول کل دوره کارکرد باتری (مثلاً ده سال) مدل رفتار مردم ثابت است. حل مسئله به ترتیب زیر خواهد بود:

۱. طرف اول قیمت پیشنهادی سال نخست را اعلام می‌کند.
 ۲. میزان خاصی از مشترکین بر اساس این قیمت از طرح استقبال نموده و قرارداد را می‌پذیرند.
 ۳. بر اساس این میزان و با توجه به مدل نمایی (۳۳) پارامترهای a, b از یک روش بهینه‌سازی (مانند Grid Search) به دست می‌آیند. این پارامترها برای بهینه‌سازی سطح اول برای طرف اول لحاظ می‌شوند تا به یک قیمت پیشنهادی بهتر برسیم. این قیمت در قرارداد سال بعد اعلام خواهد شد.
 ۴. مراحل ۲ و ۳ تا همگرایی پارامترها تکرار می‌شود.
- این روش برای فرمول بندی پیشنهادی اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی در ادامه ارائه می‌شود.

۵-۲ تعیین دوره‌های بهینه پیک و غیر پیک

همان‌طور که در این مقاله شرح داده شد، یکی از عوامل مهم در روند بهینه‌سازی ارائه‌شده، محدوده دوره‌های پیک و غیرپیک بار سیستم است. به عبارت دیگر، برای ترغیب مشترکین به نصب ذخیره‌ساز به کمک قیمت‌های حمایتی، نیاز به تعیین محدوده زمانی دوره‌های پیک و غیرپیک برای اعمال این قیمت‌ها وجود دارد.

بنابراین، لازم است که ساز و کار مناسبی جهت تعیین محدوده زمانی دوره‌های پیک و غیرپیک، یا در واقع زمان‌های t_1 و t_2 ، مشخص شود (به شکل (۱) رجوع شود). بدیهی است که اگر روند تعیین بهینه‌زمان‌های t_1 و t_2 در فرآیند حل مسأله بهینه‌سازی گنجانده شود، این امر منجر به افزایش بیش از حد پیچیدگی مسأله خواهد شد. به عبارت دیگر، اضافه کردن اندیس‌هایی که خود متغیر تصمیم‌گیری مسئله هستند، منجر به غیر قابل حل شدن مدل خواهد شد.

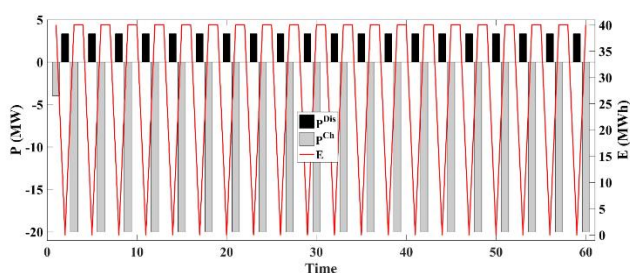
از طرف دیگر، فضای جستجو برای یافتن مقادیر بهینه t_1 و t_2 فضای بزرگی نیست. اگر تمام ترکیب‌های t_1 و t_2 در نظر گرفته شوند، تعداد حالت‌ها برابر با $\frac{24 \times 23}{2} = 276$ خواهد بود. از طرف دیگر، بسیاری از این حالت‌ها نیاز به بررسی ندارند؛ چرا که محدوده تقریبی t_1 و t_2 مشخص است و این امر باعث محدود شدن بیشتر فضای جستجو خواهد شد. بدین ترتیب، می‌توان از الگوریتم جستجوی کامل فضای جواب برای تعیین زمان‌های بهینه t_1 و t_2 استفاده کرد.

۳- شبیه‌سازی

در این بخش، به پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در فصل دوم بر روی یک سیستم با داده‌های واقعی پرداخته می‌شود. بدین‌منظور، با توجه به

0.05	b	22	t_2	40	$[MWh] E^{max}$
------	---	----	-------	----	-----------------

در این صورت، با اجرای هسته اصلی بهینه‌سازی، الگوی شارژ و دشارژ باتری‌ها به صورت شکل (۶) خواهد بود.



شکل (۶): الگوی شارژ و دشارژ سرمایه‌گذاران خرد باتری به همراه

سطح انرژی باتری‌ها

همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است، دارندگان باتری به صورت جمعی از الگوی مد نظر سیاست‌گذار بالادستی برای شارژ و دشارژ باتری‌های خود پیروی نموده‌اند. به عبارت دیگر، در این الگو در دوره پیک اقدام به دشارژ و در دوره غیرپیک اقدام به شارژ باتری‌های خود نموده‌اند. لازم به ذکر است که عدم تناسب نرخ شارژ و دشارژ به دلیل تفاوت مدت زمان‌های پیک و غیرپیک بوده است. به عبارت بهتر دوره پیک در این شبیه‌سازی اولیه برابر ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است و دوره غیر پیک که در آن اقدام به شارژ می‌شود تنها دو ساعت است. بهره‌برداران خرد طی ۱۲ ساعت باتری خود را با نرخ 3.333 MW دشارژ می‌کنند تا کل 40 MWh انرژی را دشارژ کنند و پس از آن طی دو ساعت باتری را با نرخ 20MW شارژ می‌کنند تا کل 40MWh انرژی باتری شارژ شود. همچنین، در نمودار فوق میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری طی ۱۰ سال نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از کل ظرفیت باتری (40 MWh) نیز در این شبیه‌سازی استفاده شده است. به عبارت دیگر، در زمان شارژ، باتری به صورت کامل شارژ و در زمان دشارژ نیز به صورت کامل دشارژ می‌شود.

خروجی مهم دیگر این شبیه‌سازی، ضرایب مربوط به قیمت‌های حمایتی پیشنهادی سیاست‌گذار بالادستی است که طبق جدول (۲) تعیین شده‌اند:

جدول (۲): ضرایب قیمت‌های حمایتی محاسبه‌شده توسط هسته

اصلی بهینه‌سازی

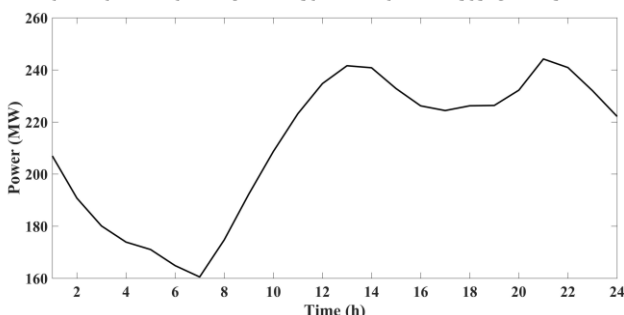
متغیر	مقدار
ضریب قیمت فروش غیرپیک γ^{Sof}	0
ضریب قیمت خرید غیرپیک γ^{Bof}	0
ضریب قیمت خرید پیک γ^{BP}	21.97
ضریب قیمت فروش پیک γ^{SP}	0

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، ضرایب قیمت‌های حمایتی خرید برق در دوره غیرپیک و فروش برق در دوره پیک برابر صفر قرار داده شده است تا دارندگان باتری در این ساعات اقدام به شارژ و دشارژ

می‌باشد. نرخ رشد این قیمت‌ها در هر سال برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

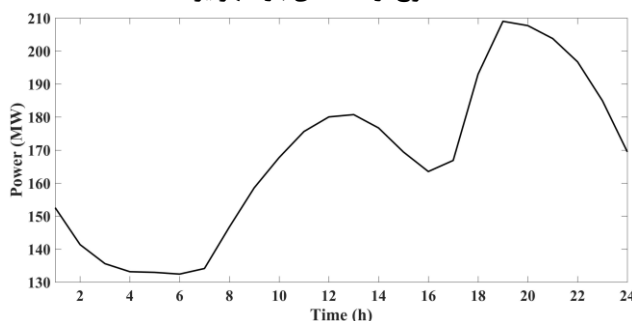
برای اطلاعات منحنی بار روزانه نیز از داده‌های بار شبکه شرکت برق منطقه‌ای یزد در سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. مطالعه موردی حاضر برای بار شهر یزد انجام شده است که شامل سه ناحیه "امور یک"، "امور دو" و "امور سه" است. شهر یزد دارای ۱۱ پست 63/20 kV بوده که آنالیز این داده‌ها نرخ رشد بار 7.6% را به دست می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این مطالعه موردی، هر سال با دو روز سرد و گرم مدل شده است. بدین‌منظور، مجموع داده‌های پست‌های برق منطقه‌ای یزد در طی شش ماه اول سال میانگین گرفته شده و به عنوان داده‌های منحنی بار روز گرم سال در نظر گرفته می‌شوند. به همین ترتیب، میانگین مجموع داده‌های پست‌ها برای شش ماه دوم سال به عنوان داده‌های بار روز سرد لحاظ می‌شوند. منحنی بار ورودی مسئله برای این روزهای نمونه به صورت شکل (۴) و (۵) خواهد بود.



شکل (۴): منحنی بار نمونه برای روزهای مدل‌کننده فصول گرم

(مستخرج از داده‌های بار شهر یزد)



شکل (۵): منحنی بار نمونه برای روزهای مدل‌کننده فصول سرد

(مستخرج از داده‌های بار شهر یزد)

۱-۳ نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی معقول بودن نتایج، ابتدا شبیه‌سازی برای هسته اصلی بهینه‌سازی انجام شده است. تعداد مشارکت‌کنندگان برابر ۴۰۰۰ نفر در نظر گرفته شده است. برای این منظور، پارامترهای مورد نیاز فعلاً مطابق با جدول (۱) فرض می‌شوند تا صرفاً روند اجرای هسته اصلی بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه ضریب $\omega = 100$ در نظر گرفته شده است.

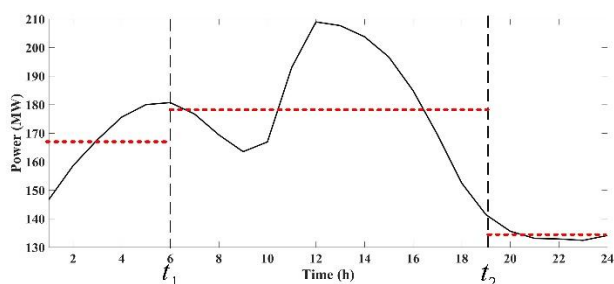
جدول (۱): پارامترهای فرضی برای تست کارکرد هسته بهینه‌سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
P^{max} [MW]	40	t_1	10	a	60

خرد برابر با ۹۰۰۰۰۰۰۰ تومان خواهد بود. این بدین معنا است که دارندگان باتری از این سرمایه‌گذاری سود کلانی می‌برند (میلیون تومان ۱۸۵۶=۹۰-۱۹۴۶). لازم به ذکر است که مبلغ ذکر شده برای سود نیز مجموع غیر زمان حال سود است و اگر مقدار زمان حال آن محاسبه شود، بیشتر از این مقادیر خواهد بود. به عبارت دقیق‌تر، مقادیر a, b در نظر گرفته شده در مدل‌سازی رفتار مشترک فرض نادرستی است و مقدار واقعی باید کمتر از این مقادیر باشد تا نشان دهنده اقبال کمتر سرمایه‌گذاران خرد در این طرح باشد.

پس از بررسی نحوه عملکرد هسته اصلی بهینه‌سازی، به بررسی عملکرد کلی برنامه نرم‌افزاری توسعه یافته برای پیاده‌سازی و حل مسأله بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. بدین‌منظور، برنامه برای داده‌های ورودی ذکر شده اجرا می‌شود. اجرای برنامه بر روی یک سیستم Core i7-2.8GHz به مدت ۲ ساعت و ۲۰ دقیقه به طول انجامید. برنامه ذکر شده، برای ۴۵ ترکیب مختلف از $2 \leq t_1 \leq 6$ و $15 \leq t_2 \leq 23$ اجرا گردید. در هر ترکیب زمانی نیز تعداد مورد نیاز تکرار جهت همگرا شدن برنامه اجرا گردید.

با در نظر گرفتن تمامی ترکیب‌های زمانی ممکن، بهترین حالت برای $t_1=6$ و $t_2=19$ رخ خواهد داد. شکل بار برای ترکیب زمانی فوق در روزهای سرد سال برای سال اول، مطابق با شکل (۸) خواهد بود.



شکل (۸): زمان‌های بهینه مستخرج از شبیه‌سازی برای تعیین

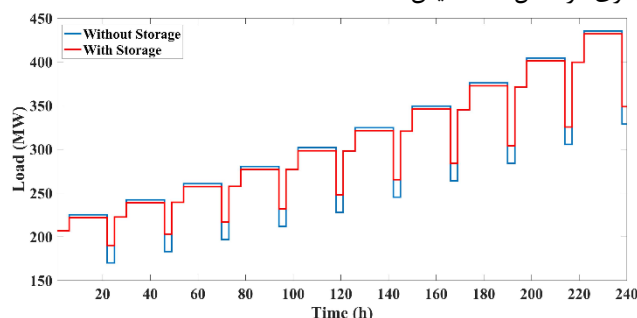
بازه‌های پیک و غیرپیک در طول روزهای سرد سال

با در نظر گرفتن ترکیب زمانی فوق، میزان مشارکت سرمایه‌گذاران خرد در مجموع برابر 66.382 MWh محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، با در نظر گرفتن متوسط ظرفیت هر باتری برابر 40kWh، تعداد ۱۶۶۰ نفر اقدام به نصب باتری کرده‌اند. در این حالت، سود مجموع برآوردشده سرمایه‌گذاران خرد از این سرمایه‌گذاری برابر با ۲۱۷۶۸ میلیارد تومان تخمین زده شده است که با توجه به تعداد مشارکت، سهم هر سرمایه‌گذار خرد به صورت متوسط برابر با ۱۳ میلیارد تومان خواهد بود. این رقم بالای سود نشان‌دهنده سطح بسیار زیاد حمایتی و قاعدتا تخصیص گزاف یارانه است که مقدار آن برابر با ۳۷۷ هزار میلیارد تومان است (محاسبه شده از طریق تابع هدف).

نمودار بار معادل شبکه در طول دوره ۱۰ ساله و برای ترکیب زمانی بهینه، برای روزهای سرد و گرم سال به ترتیب مطابق با شکل‌های (۹) و (۱۰) است.

نکنند و بر طبق الگوی مد نظر سیاست گذار بالا دستی رفتار کنند. از طرف دیگر، ضرایب γ^{BP} و γ^{Sof} نیز باید با توجه به حدود اعمالی از طرف بخش مدل‌سازی رفتار مشترکین بر آنها انتخاب شوند. به عبارت دیگر، در گام فعلی که صرفاً هسته اصلی بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، مقادیر ارائه‌شده فاقد ارزش هستند و مقادیر دقیق این ضرایب با ایجاد فیدبک با سایر بخش‌ها به خصوص بخش مدل‌سازی رفتار مشترکین محاسبه خواهند شد.

با در نظر گرفتن این طرح اولیه (که می‌توان از آن با عنوان تکرار صفر ام یاد کرد)، میزان یارانه تخصیص‌داده‌شده توسط سیاست‌گذار بالادستی برابر با ۷۴۶۷۰ میلیارد تومان تخمین زده می‌شود که به دارندگان باتری خرد برای خرید در دوران غیرپیک و فروش در دوران پیک پرداخت می‌شود. همچنین، با اتخاذ سیاست حمایتی فوق، مقدار LF به اندازه ۱ درصد بهبود یافت. لازم به ذکر است که این مقدار بهبود تقریبی است؛ چرا که رفتار بار در مدل ارائه‌شده با منحنی روزانه تقریبی سه‌پله‌ای لحاظ شده است. نمودار بار معادل شبکه در طول دوره ۱۰ ساله برای روزهای گرم سال در دو حالت با و بدون استفاده از باتری در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۷): نمودار بار معادل شبکه در روزهای گرم طی ۱۰ سال با و بدون استفاده از باتری

همچنین، برای بررسی صحت روند محاسبات ریاضی اعمال‌شده در فصل دوم برای تبدیل مسأله بهینه‌سازی دوسطحی غیرخطی به مسأله بهینه‌سازی تک‌سطحی خطی، مقادیر تابع هزینه از دو روش مدل دوسطحی اصلی و مدل تک‌سطحی خطی محاسبه گردید که از هر دو روش مقدار ۷۴۶۷۰ میلیارد تومان محاسبه شد و این امر نشان‌دهنده صحت روند ریاضی تبدیل این دو مسأله به یکدیگر است.

یکی دیگر از خروجی‌های مهم شبیه‌سازی انجام‌شده با داده‌های فرضی ارائه‌شده در این بخش، درآمد مشترکین خرد از نصب باتری خواهد بود. درآمد مجموع مشترکین از نصب باتری برابر با ۷۷۸۵ میلیارد تومان برآورد شده است. با توجه به فرض اینکه ظرفیت متوسط باتری هر سرمایه‌گذار خرد برابر 10 kW در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب، درآمد هر یک از سرمایه‌گذاران خرد برابر با

$$\frac{7,785 \times 10^9 T}{4000} = 1.946 \times 10^9 T$$

است. با در نظر گرفتن

قیمت تقریبی 300\$/kWh برای باتری‌ها (He et al., 2015)، و قیمت دلار ۳۰۰۰۰ تومانی، هزینه نصب باتری برای هر سرمایه‌گذار

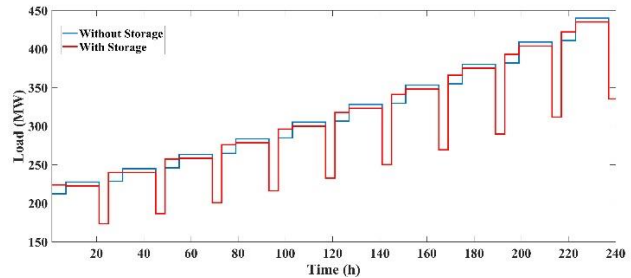
داده شد. برای سنجش تاثیر ضرایب a و b ، شبیه سازی را برای مقادیر $a=200$ و $b=0.2$ تکرار می کنیم. با انجام این شبیه سازی، ترکیب بهینه شامل زمان های $t_1=6$ و $t_2=20$ خواهد بود. مقدار تابع هدف در این حالت برابر با ۳۴۱۸ میلیارد تومان و از جنس هزینه (مقدار منفی) محاسبه شد که در مقایسه با عدد ۳۷۷ هزار میلیارد تومان حالت قبل بهبود چشم گیری حاصل شده است. همان طور که مشاهده می شود، ترکیب زمانی بهینه چندان به نحوه مشارکت سرمایه گذاران خرد در برنامه نصب باتری وابسته نیست. به عبارت دیگر، هم در حالتی که دید سرمایه گذار خرد منفعلانه لحاظ شده بود ($a=60$ و $b=0.05$) و هم در حالتی که سرمایه گذار خرد مشتاق به مشارکت در نظر گرفته شد ($a=200$ و $b=0.2$)، ترکیب زمانی بهینه برابر با $t_1=6$ و $t_2=20$ به دست آمد. به عبارت دیگر، می توان نتیجه گرفت که بهترین ترکیب زمانی ناشی از شکل منحنی بار خواهد بود و چنین پارامترهای اقتصادی موثر نخواهند بود.

این روند شبیه سازی در تکرار ۱۶۸ به مقدار E^{max} برابر 48.51 MWh محاسبه شده است. در مقایسه با حالت قبل که در آن $a=60$ و $b=0.05$ بود و E^{max} برابر 66.382 MWh بود، شاهد کاهش میزان باتری نصب شده در شبکه هستیم. از منظر تعداد مشارکت کنندگان نیز همین مسئله تکرار می شود. در حالت $a=60$ و $b=0.05$ تعداد مشارکت کنندگان برابر ۱۶۶۰ نفر بود و در حالت $a=200$ و $b=0.2$ تعداد مشارکت کنندگان به ۱۲۱۳ نفر کاهش پیدا کرده است. این کاهش در بدو امر ممکن است نامعقول به نظر بیاید، چرا که میزان اقبال مشارکت کنندگان خرد در این طرح ۱۰ برابر لحاظ شده است. ولی باید در نظر گرفت که این اقبال تنها عامل موثر نبوده و قیمت های پیشنهادی نیز تاثیر گذارند. در جدول (۴) قیمت های پیشنهادی متناسب با ورودی $a=200$ و $b=0.2$ آورده شده است.

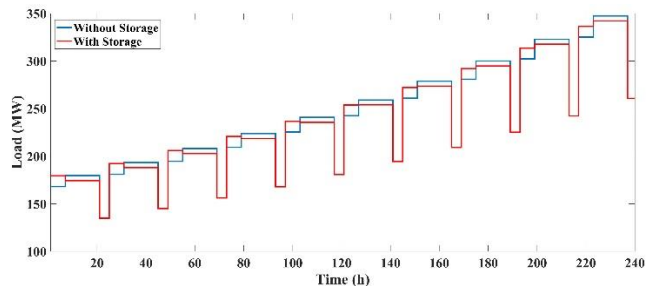
جدول (۴): ضرایب قیمت های حمایتی محاسبه شده برای بهترین ترکیب زمانی ممکن با لحاظ کردن $a=200$ و $b=0.2$

مقدار	متغیر
0	ضریب قیمت فروش غیرپیک γ^{Sof}
0	ضریب قیمت خرید غیرپیک γ^{Bof}
1.39	ضریب قیمت خرید پیک γ^{BP}
0	ضریب قیمت فروش پیک γ^{SP}

همان طور که دیده می شود، در این حالت قیمت های حمایتی به شدت کاهش پیدا کرده اند. در حالتی که $a=60$ و $b=0.05$ بود، $\gamma^{BP}=44.82$ محاسبه گردید و در حالت $a=200$ و $b=0.2$ ، $\gamma^{BP}=1.39$ خواهد بود. به عبارت دیگر، دلیل کاهش میزان مشارکت سرمایه گذاران در این حالت، با وجود افزایش اقبال آنها به سرمایه گذاری در بخش باتری ها، کاهش قیمت های حمایتی بوده است؛ به نحوی که نقطه بهینه سیستم تغییر کرده و به این میزان جدید رسیده است. در این حالت، قیمت خرید از دارندگان باتری برابر



شکل (۹): نمودار بار معادل شبکه در روزهای گرم طی ۱۰ سال با و بدون استفاده از باتری برای ترکیب زمانی منتخب



شکل (۱۰): نمودار بار معادل شبکه در روزهای گرم طی ۱۰ سال با و بدون استفاده از باتری برای ترکیب زمانی منتخب

همچنین، قیمت های حمایتی برای بهترین ترکیب زمانی ارائه شده نیز مطابق جدول (۳) خواهد بود:

جدول (۳): ضرایب قیمت های حمایتی محاسبه شده برای بهترین ترکیب زمانی ممکن

مقدار	متغیر
0	ضریب قیمت فروش غیرپیک γ^{Sof}
0	ضریب قیمت خرید غیرپیک γ^{Bof}
44.82	ضریب قیمت خرید پیک γ^{BP}
0	ضریب قیمت فروش پیک γ^{SP}

همان طور که از جدول فوق مشاهده می شود، ضریب قیمت فروش در حالت غیرپیک (γ^{Sof}) در کمترین مقدار خود قرار داده شده است. به عبارت بهتر، حمایت سیاست گذار در این حالت بدین صورت است که تقریباً برق را به صورت رایگان در اختیار دارندگان باتری جهت شارژ در ساعات غیرپیک قرار داده است. از طرف دیگر، در ساعات پیک نیز ضریب ۴۴ برابری (γ^{BP}) برای خرید از دارندگان باتری لحاظ شده است. با در نظر گرفتن قیمت خرید از نیروگاه های سطح توزیع (λ^{Gen}) که برابر با 1040 T/kWh است، مبلغ پرداخت شده به دارندگان باتری در ساعات پیک برابر 46612 T/KWh به دست می آید که عدد نسبتاً بزرگی است. به عبارت دیگر، میزان اقبال سرمایه گذاران خرد به بحث نصب باتری به حدی کم در نظر گرفته شده است که سیاست گذار مجبور به پرداخت چنین هزینه هنگفتی خواهد بود.

میزان اقبال سرمایه گذاران خرد در واقع توسط ضرایب a و b در رابطه (۳۳) تعیین می شود که از ورودی های مسئله است و توسط خبرگان صنعت تعیین می شود. در تحلیل فعلی مقادیر $a=60$ و $b=0.05$ قرار

- Banks, D. (2003). *Rural Energy Service Delivery, A Public Private Partnership approach*. Paper presented at the Proc. Domestic Use of Energy Conference, Cape Town April.
- Baringo, L., & Conejo, A. J. (2010). Offering strategy via robust optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 1418-1425.
- Beetz, B. (2015). Utility-scale battery storage to reach 12 gw, \$8.44 billion by 2024.
- Bompard, E. F., Abrate, G., Napoli, R., & Wan, B. (2007). Multi-agent models for consumer choice and retailer strategies in the competitive electricity market. *International journal of emerging electric power systems*, 8.(۲)
- Commission, F. E. R. (2011). Frequency regulation compensation in the organized wholesale power markets. *Order*, 755, 137.
- Drury, E., Denholm, P., & Sioshansi, R. (2011). The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets. *Energy*, 36(8), 4959-4973.
- Duggal, I., & Venkatesh, B. (2014). Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30.(۴), ۲۱۱۰-۲۱۱۸.
- Fotuhi-Firuzabad, M., Shafiee, S., & Rastegar, M. (2015). Optimal in-home charge scheduling of plug-in electric vehicles incorporating customer's payment and inconvenience costs. *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids: Charging Strategies*, 301-326.
- He, G., Chen, Q., Kang, C., Pinson, P., & Xia, Q. (2015). Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2359-2367.
- Hill, C. A., Such, M. C., Chen, D., Gonzalez, J., & Grady, W. M. (2012). Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 850-857.
- Kazemi, M., Zareipour, H., Amjadi, N., Rosehart, W. D., & Ehsan, M. (2017). Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4), 1726-1735.
- Kazemi, M., Zareipour, H., Ehsan, M., & Rosehart, W. D. (2016). A robust linear approach for offering strategy of a hybrid electric energy company. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(3), 1949-1959.
- Kharrati, S., Kazemi, M., & Ehsan, M. (2016a). Equilibria in the competitive retail electricity market considering uncertainty and risk management. *Energy*, 106, 315-328.
- Kharrati, S., Kazemi, M., & Ehsan, M. (2016b). Medium-term retailer's planning and participation strategy considering electricity market uncertainties. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26.(۵), ۹۲۳-۹۲۰.
- Maloney, P. (2016). After record year, US energy storage forecasted to break 1 GW capacity mark in 2019. *Utility Dive, US*.
- Mohsenian-Rad, H. (2015). Optimal bidding, scheduling, and deployment of battery systems in California day-ahead energy market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 442-453.
- Nasiri, N., Zeinali, S., Najafi Ravadanegh, S., & Marzband, M. (2022). A tactical scheduling framework for wind farm-integrated multi-energy systems to take part in natural gas and wholesale electricity markets as a price setter. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(9), 1849-1864.
- Nasrolahpour, E., Kazempour, S. J., Zareipour, H., & Rosehart, W. D. (2016). Strategic sizing of energy storage facilities in electricity markets. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4), 1462-1472.

با $\frac{T}{KWh} = 1445 \times 1.39 = 1040$ خواهد بود که عدد کمتری در مقایسه با حالت قبل است.

۳-۱ نتیجه گیری

در این مقاله، به ارائه یک مدل ریاضی برای تعیین استراتژی حمایتی جهت سوق دادن سرمایه‌گذاران خرد به نصب باتری در سطح شبکه توزیع پرداخته شد. بدین منظور، قیمت‌های حمایتی خرید بالاتر از قیمت خرید از نیروگاه‌های موجود در شبکه توزیع و قیمت‌های حمایتی فروش پائین‌تر از قیمت فروش به مصرف‌کننده خانگی در نظر گرفته شد و یک مدل بهینه‌سازی جهت استخراج مقادیر بهینه این قیمت‌ها ارائه گردید. بدین ترتیب، مدل ارائه‌شده یک مدل تک‌سطحی دوسطحی بود که به کمک روش‌های بهینه‌سازی به مدل تک‌سطحی تبدیل گردید. علاوه بر این، با توجه به اینکه برنامه‌ریزی مد نظر یک برنامه ریزی بلندمدت (ده ساله) است، از تکنیک‌های مختلفی همچون روش M بزرگ و SDT جهت خطی‌سازی مسئله استفاده شد تا مسئله حاصل قابلیت حل در افق‌های بلندمدت را داشته باشد. در مدل ارائه شده، نحوه‌ی تصمیم‌گیری مشترکین خرد در قبال قیمت‌های حمایتی اعلامی از سمت سیاست‌گذار بالادستی به وسیله یک روش بهینه‌سازی تکراری بر مبنای grid-search تنظیم شده است. مدل‌های مذکور از طریق یک الگوریتم تکراری با فیدبک به یکدیگر متصل شده و به وسیله معیار همگرایی تعریف شده اتمام شبیه‌سازی تشخیص داده می‌شود.

با شبیه‌سازی انجام‌شده، نشان داده شد که قیمت‌های حمایتی برای فروش در پیک و خرید در غیرپیک اهمیتی در مدل بهینه‌سازی نداشته و از آنها می‌توان به عنوان عامل جریمه جهت ممانعت از دارندگان باتری جهت فروش در غیرپیک و خرید در پیک استفاده کرد. همچنین، مشاهده شد که با طراحی صورت گرفته، الگوی بهینه استفاده از باتری توسط دارندگان باتری‌ها، در راستای اهداف سیاست‌گذار بالادستی است و منجر به پیک‌سایی بار می‌شود. بدین ترتیب، بدون نیاز به داشتن بستر مخابراتی-کنترلی برای برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ باتری‌های پراکنده در سطح شبکه توزیع، می‌توان رفتار مطلوب را به صورت کنترل جداگانه از سرمایه‌گذاران خرد انتظار داشت.

تقدیر و تشکر

این پژوهش تماماً با استفاده از اعتبار پژوهشی (Grant) شماره 993900361 مرکز آموزش عالی شهرضا انجام شده است.

مراجع

بورس ۲۴. (۲۰۲۲). ابلاغ نرخ خرید تضمینی برق نیروگاه‌های تجدید پذیر توسط وزیر نیرو.

Akhavan-Hejazi, H., & Mohsenian-Rad, H. (2013). Optimal operation of independent storage systems in energy and reserve markets with high wind penetration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 1088-1097.

- Oh, H. (2010). Optimal planning to include storage devices in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 1118-1128 .
- Pozo, D., Contreras, J., & Sauma, E. E. (2014). Unit commitment with ideal and generic energy storage units. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 2974-2984 .
- Saft. (2016). battery life Technical Sheet .
- Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., & Rastegar, M. (2012). *Impacts of controlled and uncontrolled PHEV charging on distribution systems*. Paper presented at the 9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012).
- Sobhiyah, M., Bemanian, M., & Kashtiban, Y. K. (2009). Increasing VFM in PPP power station projects–Case study: Rudeshur gas turbine power station. *International Journal of Project Management*, 27(5), 512-521 .
- Varkani, A. K., Daraeepour, A., & Monsef, H. (2011). A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets. *Applied Energy*, 88(12), 5002-5012 .
- Yang, T., Long, R., Li, W., & Rehman, S. U. (2016). Innovative application of the public–private partnership model to the electric vehicle charging infrastructure in China. *Sustainability*, 8(8), 738 .