Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 1-14

Vol. 12/ No. 3/ Fall 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

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

Mostafa Kazemi[1*], Assistant Professor, Seyed Sepehr Tabatabaei[2], Assistant Professor, Niki Moslemi[3]

[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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۱۴-۱

Vol. 12 / No. 3/ Fall 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

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

نوع مطالعه: پژوهشی

مصطفی کاظمی،[۱] سید 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 پردخته 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، سیاست گذار 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 دهاقان-جنب اداره هواشناسی- مرکز آموزش عالی شهرضا-گروه مهندسی برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

۱- مقدمه

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 قانون گذاری 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 عموما از ذخیره‌سازها برای بهبود بهره‌برداری از سیستم و کاربردهایی نظیر کاهش پیک بار استفاده می‌شود. در دسته‌ی 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 نسبتا 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, Amjady, Rosehart, & Ehsan, 2017; Kazemi, Zareipour, Ehsan, & Rosehart, 2016; Mohsenian-Rad, 2015; Nasrolahpour, Kazempour, Zareipour, & Rosehart, 2016; Varkani, Daraeepour, & Monsef, 2011). در این دسته، غالبا نقش 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 پیک‌سایی 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 ذخیره‌سازها، 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,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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 محسب شود. علاوه بر این، از آنجا که حوزه‌ی تمرکز این مقاله بخش توزیع و عمدتا محیط‌های شهری-خانگی است، استفاده از ذخیره-سازهایی که تولید آلودگی زیست محیطی یا آلودگی صوتی دارند، مناسب نخواهد بود. بدین ترتیب حوزه‌ی 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 بهینه سازی نیاز است که در این بهینه سازی 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 بهینه سازی 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 بهینه سازی 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 سیاست گذار بالا دستی نخواهد بود. برای مشخص شدن این امر، نیاز است که منفعت سیاست گذار 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، صرفا 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 سایی انجام می-شود. این مهم با تعیین قیمت‌های تشویقی-حمایتی میسر خواهد گردید. بدین ترتیب کنترل مستقیم ذخیره‌سازها توسط بهر بردار 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 می-شود 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 سیاست گذار بالا دستی و و سرمایه‌گذار خرد مورد بررسی قرار میگیرد و مدل مورد استفاده در این مسئله، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی[1] 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 پاسخ-گوی نحوه بهینه 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 قیمت گذاری به صورت دستوری و از سمت نهاد بالادستی انجام می‌شود. علاوه بر این در حوزه توزیع معمولا ابعاد تولیدکننده‌ها یا باتری‌ها به حدی کوچک بوده که قابلیت رقابت با خرده فروشان تامین کننده برق از بازار عمده فروشی را ندارند. به عبارت بهتر اگر رقابتی در این حوزه وجود داشته باشد، عمدتا بین خرده فروشان بزرگ و با نفوذ بوده تا تولید کننده های محلی و یا باتری های با ظرفیت کوچک. هر چند این قضیه در حوزه انتقال میسر بوده و حتی باتریهای تعیین کننده قیمت در حوزه انتقال نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Nasiri, Zeynali, Najafi Ravadanegh, & Marzband, 2022).

علاوه بر تمامی این توضیحات، این مقاله به ارائه یک مدل مشارکتی جهت تشویق سرمایه‌گذاران خانگی به نصب باتری پرداخته است. قاعدتا ابعاد باتری نصب شده توسط سرمایه گذار 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 قطعا 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

[1] Bi-level optimization model

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

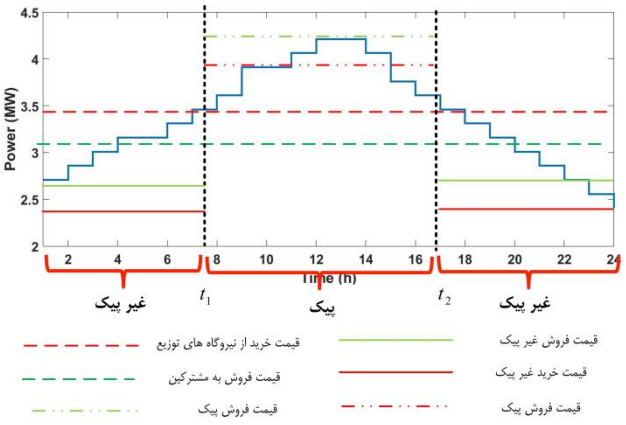
بازار شبه کامل تبدیل شده و در این حالت این بازیگران امکان ایجاد تغییر در قیمت را نخواهند داشت. با این توضیحات، در این مقاله قیمت خرید و فروش در یک ساختار سنتی و از سمت نهاد بالا دستی تعیین می‌شود.

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

- ارائه مدلی جهت ایجاد مشارکت سرمایه‌گذاری بین نهاد سیسات 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 ماکروسکوپیک 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 ارائه‌شده 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:

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. بدین‌ترتیب، 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. بدین‌ترتیب، 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[2] خواهد شد که هدف سیاست گذار بالا دستی در این پروژه است. بدین ترتیب ی‌توان بهینه سازی مربوط به سطح اول (سیاست گذار بالا دستی) را به صورت زیر بیان نمود.

$$Max_{\Delta}\ Z = Profit - Cost \quad (۱)$$

$$Cost = \sum_{y\in Y}\sum_{d\in D}\left(\begin{array}{l}\sum_{t\in T^{off}}\begin{pmatrix}P_{y,d,t}^{Ch}(\lambda_y^{Fix}-\lambda_y^{Sof})\\ -P_{y,d,t}^{Dis}(\lambda_y^{Gen}-\lambda_y^{Bof})\end{pmatrix}\\ +\sum_{t\in T^{p}}\begin{pmatrix}P_{y,d,t}^{Dis}(\lambda_y^{BP}-\lambda_y^{Gen})\\ -P_{y,d,t}^{Ch}(\lambda_y^{SP}-\lambda_y^{Fix})\end{pmatrix}\end{array}\right) \quad (۲)$$

$$Profit = \omega\left(LF^{new} - LF^{old}\right) \quad (۳)$$

$$\lambda_y^{Sof} = \gamma^{SoF}\lambda_y^{Fix} \qquad \forall y \in Y \quad (۴)$$

$$0 \le \gamma^{SoF} \le 1 \quad (۵)$$

$$\lambda_y^{Bof} = \gamma^{BoF}\lambda_y^{Gen} \qquad \forall y \in Y \quad (۶)$$

$$0 \le \gamma^{BoF} \le 1 \quad (۷)$$

$$\lambda_y^{SP} = \gamma^{SP}\lambda_y^{Fix} \qquad \forall y \in Y \quad (۸)$$

$$1 \le \gamma^{SP} \quad (۹)$$

$$\lambda_y^{BP} = \gamma^{BP}\lambda_y^{Gen} \qquad \forall y \in Y \quad (۱۰)$$

$$1 \le \gamma^{BP} \quad (۱۱)$$

[2] Load Factor

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

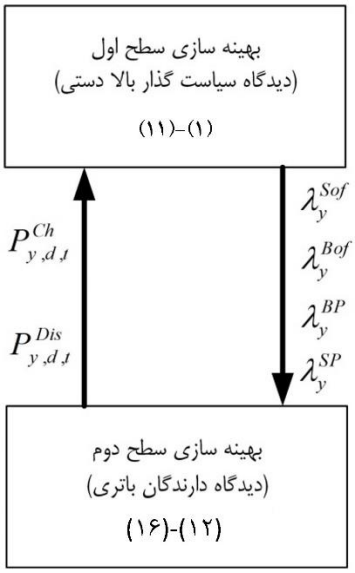
در تابع هدف (۱)، هدف بیشینه‌سازی سود و یا به عبارت بهتر کمینه‌سازی ضرر ناشی از تخصیص کمک به طرح حمایتی مدنظر این گزارش است. در مدل بهینه‌سازی فوق، Δ مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی مسأله است که به صورت $\Delta=\left\{\lambda_y^{Sof},\lambda_y^{Bof},\lambda_y^{SP},\lambda_y^{BP}\right\}$ تعریف می‌شود 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 قیمت-گذاری 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 سیاست گذار بالادستی به صورت اصلاح ضریب بار مدل شده است که در آن LF^{old} و LF^{new} به ترتیب ضرایب بار قبل و بعد ازاجرای طرح بوده و ω جهت همسنگ سازی 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 نمی-کند. 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 صرفا 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 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^{SoF} و γ^{SP} به قیمت عادی فروش برق به مشترکین مرتبط شده اند. 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 مسأله سطح دوم: بهینه‌سازی از دیدگاه سرمایه‌گذار خرد

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



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

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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

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

$$Max_{\Omega}\ Profit^{B}=$$
$$\sum_{y\in Y}\sum_{d\in D}\left(\begin{array}{l}\sum_{t\in T^{off}} P^{Dis}_{y,d,t}\lambda^{Bof}_{y}-P^{Ch}_{y,d,t}\lambda^{Sof}_{y}\\ +\sum_{t\in T^{p}} P^{Dis}_{y,d,t}\lambda^{BP}_{y}-P^{Ch}_{y,d,t}\lambda^{SP}_{y}\end{array}\right) \quad (۱۲)$$

$$0\le P^{Dis}_{y,d,t}\le P^{max} \qquad \forall y\in Y,\forall d\in D,\forall t\in T \quad (۱۳)$$

$$0\le P^{Ch}_{y,d,t}\le P^{max} \qquad \forall y\in Y,\forall d\in D,\forall t\in T \quad (۱۴)$$

$$E_{y,d,t}=\left(\begin{array}{l}\sum_{\hat{y}=1}^{y-1}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T} P^{Ch}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-P^{Dis}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\hat{d}=1}^{d-1}\sum_{\hat{t}\in T} P^{Ch}_{y,\hat{d},\hat{t}}-P^{Dis}_{y,\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\hat{t}=1}^{t} P^{Ch}_{y,d,\hat{t}}-P^{Dis}_{y,d,\hat{t}}\end{array}\right) \quad (۱۵)$$
$$\forall y\in Y,\forall d\in D,\forall t\in T$$

$$0\le E_{y,d,t}\le E^{max} \qquad \forall y\in Y,\forall d\in D,\forall t\in T \quad (۱۶)$$

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 ($\sum_{t\in T^{off}} P^{Dis}_{y,d,t}\lambda^{Bof}_{y}-P^{Ch}_{y,d,t}\lambda^{Sof}_{y}$). در این دوره، هزینه فروش برق به باتری برای شارژ کردن با قیمت λ^{Sof}_{y} و درآمد ناشی از فروش برق باتری به شبکه برای دشارژ کردن با قیمت λ^{Bof}_{y} 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 y‌ام، روز dام و ساعت tام محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این عبارت از سه جمله تشکیل شده است. در جمله اول، $\sum_{\hat{y}=1}^{y-1}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T} P^{Ch}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-P^{Dis}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}$، مجموع تبادل توان باتری از ابتدا تا سال y-1 محاسبه می‌شود. در جمله دوم، $\sum_{\hat{d}=1}^{d-1}\sum_{\hat{t}\in T} P^{Ch}_{y,\hat{d},\hat{t}}-P^{Dis}_{y,\hat{d},\hat{t}}$، مجموع تبادل توان باتری در سال yام، از ابتدای سال تا روز d-1 ام سال yام را محاسبه می‌کند. نهایتا در جمله سوم، $\sum_{\hat{t}=1}^{t} P^{Ch}_{y,d,\hat{t}}-P^{Dis}_{y,d,\hat{t}}$، مجموع تبادل توان باتری در سال yام، روز dام از ابتدای روز تا ساعت tام را محاسبه می‌کند. در نهایت، در قید (۱۶)، محدودیت مربوط به انرژی ذخیره‌شده در باتری به مسأله اعمال می‌شود.

۳-۲ معادل تک سطحی و نحوه حل مسئله

مدل قیمت‌گذاری حمایتی برق باتری‌ها که در بخش‌های قبل ارائه شد، یک مسأله بهینه‌سازی دوسطحی است که جواب مسأله 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 مسأله دوسطحی ارائه می‌شود.

از آنجا که مسأله بهینه‌سازی سطح دوم، که با روابط (۱۲)-(۱۶) بیان می‌شود، یک مسأله بهینه‌سازی خطی است، بنابراین می‌توان آن را با روابط Karush-Kuhn-Tucker (KKT) جایگزین کرد (Baringo & Conejo, 2010). بدین‌ترتیب، مسأله بهینه‌سازی سطح دوم به مجموعه‌ای از قیود تبدیل خواهد شد که می‌توان آنها را به مسأله بهینه‌سازی سطح اول (روابط (۱)-(۱۱) اضافه کرد. بدین‌ترتیب، مسأله بهینه‌سازی دوسطحی به یک مسأله بهینه‌سازی تک‌سطحی تبدیل خواهد شد. مدل تک سطحی به صورت زیر خواهد بود:

$$Max_{\Delta}\ Z=Profit-Cost \quad (۱)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P^{Dis}_{y,d,t}}=\left(\begin{array}{l}\lambda^{Bof}_{y}-\eta^{PdisU}_{y,d,t}+\eta^{PdisD}_{y,d,t}+\\ \sum_{\substack{\hat{y}\in Y\\ \hat{y}>y}}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{EU}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-\eta^{ED}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}\\ +\sum_{\substack{\hat{d}\in D\\ \hat{d}>d}}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{EU}_{y,\hat{d},\hat{t}}-\eta^{ED}_{y,\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\substack{\hat{t}\in T\\ \hat{t}\ge t}}\eta^{EU}_{y,d,\hat{t}}-\eta^{ED}_{y,d,\hat{t}}\end{array}\right)=0 \quad (۱۷)$$
$$\forall y\in Y,\forall d\in D,\forall t\in T^{off}$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

$$\frac{\partial L}{\partial P^{Dis}_{y,d,t}}=\begin{pmatrix}\lambda^{BP}_{y}-\eta^{PdisU}_{y,d,t}+\eta^{PdisD}_{y,d,t}+\\ \sum_{\substack{\hat{y}\in Y\\ \hat{y}>y}}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{EU}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-\eta^{ED}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}\\ +\sum_{\substack{\hat{d}\in D\\ \hat{d}>d}}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{EU}_{y,\hat{d},\hat{t}}-\eta^{ED}_{y,\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\substack{\hat{t}\in T\\ \hat{t}\geq t}}\eta^{EU}_{y,d,\hat{t}}-\eta^{ED}_{y,d,\hat{t}}\end{pmatrix}=0 \qquad (۱۸)$$

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

$$\frac{\partial L}{\partial P^{Ch}_{y,d,t}}=\begin{pmatrix}-\lambda^{Sof}_{y}-\eta^{PchU}_{y,d,t}+\eta^{PchD}_{y,d,t}+\\ \sum_{\substack{\hat{y}\in Y\\ \hat{y}>y}}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{ED}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-\eta^{EU}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}\\ +\sum_{\substack{\hat{d}\in D\\ \hat{d}>d}}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{ED}_{y,\hat{d},\hat{t}}-\eta^{EU}_{y,\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\substack{\hat{t}\in T\\ \hat{t}\geq t}}\eta^{ED}_{y,d,\hat{t}}-\eta^{EU}_{y,d,\hat{t}}\end{pmatrix}=0 \qquad (۱۹)$$

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

$$\frac{\partial L}{\partial P^{Ch}_{y,d,t}}=\begin{pmatrix}-\lambda^{SP}_{y}-\eta^{PchU}_{y,d,t}+\eta^{PchD}_{y,d,t}+\\ \sum_{\substack{\hat{y}\in Y\\ \hat{y}>y}}\sum_{\hat{d}\in D}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{ED}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}-\eta^{EU}_{\hat{y},\hat{d},\hat{t}}\\ +\sum_{\substack{\hat{d}\in D\\ \hat{d}>d}}\sum_{\hat{t}\in T}\eta^{ED}_{y,\hat{d},\hat{t}}-\eta^{EU}_{y,\hat{d},\hat{t}}+\\ \sum_{\substack{\hat{t}\in T\\ \hat{t}\geq t}}\eta^{ED}_{y,d,\hat{t}}-\eta^{EU}_{y,d,\hat{t}}\end{pmatrix}=0 \qquad (۲۰)$$

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

$$0\leq\eta^{PdisU}_{y,d,t}\leq MW^{PdisU}_{y,d,t} \qquad (۲۱)$$

$$P^{max}-P^{Dis}_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{PdisU}_{y,d,t}) \qquad (۲۲)$$

$$0\leq\eta^{PdisD}_{y,d,t}\leq MW^{PdisD}_{y,d,t} \qquad (۲۳)$$

$$P^{Dis}_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{PdisD}_{y,d,t}) \qquad (۲۴)$$

$$0\leq\eta^{PchU}_{y,d,t}\leq MW^{PchU}_{y,d,t} \qquad (۲۵)$$

$$P^{max}-P^{Ch}_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{PchU}_{y,d,t}) \qquad (۲۶)$$

$$0\leq\eta^{PchD}_{y,d,t}\leq MW^{PchD}_{y,d,t} \qquad (۲۷)$$

$$P^{Ch}_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{PchD}_{y,d,t}) \qquad (۲۸)$$

$$0\leq\eta^{EU}_{y,d,t}\leq MW^{EU}_{y,d,t} \qquad (۲۹)$$

$$E^{max}-E_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{EU}_{y,d,t}) \qquad (۳۰)$$

$$0\leq\eta^{ED}_{y,d,t}\leq MW^{ED}_{y,d,t} \qquad (۳۱)$$

$$E_{y,d,t}\leq M\,(1-W^{ED}_{y,d,t}) \qquad (۳۲)$$

(۱۶)-(۱۲) و (۱۱)-(۲)

در روابط (۱۷)-(۲۰)، η 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.

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

با توجه دوباره به مسأله بهینه‌سازی سطح دوم (۱۲)-(۱۶) می‌توان فهمید که این روابط خطی بوده و شرایط تئوری دوگان قوی[3] (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:

$$Cost=\sum_{y\in Y}\sum_{d\in D}\sum_{t\in T}\begin{pmatrix}P^{max}(\eta^{PdisU}_{y,d,t}+\eta^{PchU}_{y,d,t})+\\ E^{max}\eta^{EU}_{y,d,t}+P^{Ch}_{y,d,t}\lambda^{Fix}_{y}\\ -P^{Dis}_{y,d,t}\lambda^{Gen}_{y}\end{pmatrix} \qquad (۳۳)$$

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، تصمیم گیری مشترکین خرد در حوزه بهره برداری از باتری‌هایشان مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت بهتر در بخش قبل حوزه تمرکز صرفا 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

[3] Strong duality Theory (SDT)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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

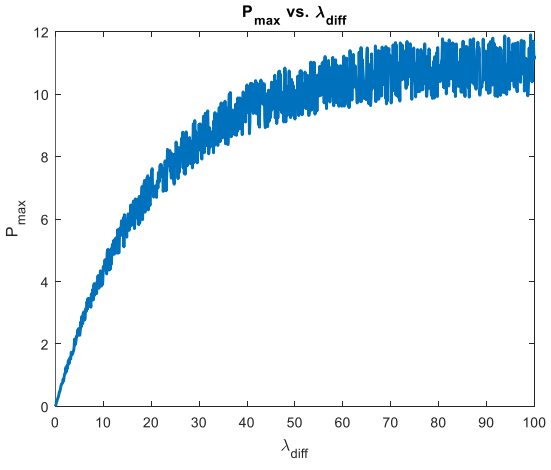
مدل‌سازی این نوع پاسخ‌گویی در سیستم‌های قدرت مسأله جدیدی نیست و این موضوع قبلا در مسائل مختلفی همچون برنامه‌ریزی خرده‌فروشان به کرات مورد بررسی قرار گرفته است (Bompard, Abrate, Napoli, & Wan, 2007; Kharrati, Kazemi, & Ehsan, 2016a, 2016b). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش بازیها[4] (Kharrati et al., 2016a)، روش عامل‌های هوشمند[5] (Bompard et al., 2007) و نمودار PQC[6] (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.

$$P^{\max} = a(1-e^{-b\lambda^{diff}}) + w \qquad (۳۳)$$

در این رابطه $P_{\max}$ حداکثر توان مشارکتی، w یک نویز سفید ناشی از عدم قطعیت مدلسازی، a,b دو پارامتر مدلسازی و $\lambda^{diff} = \lambda_y^{BP} - \lambda_y^{Sof}$ 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 مشارکت به اشباع برسد. به در نظر گرفتن این مدل، شناسایی به شناسایی مدل خاکستری و تخمین پارامتر تبدیل خواهد شد.

[4] Game theory
[5] Agent based method
[6] Price quota curve

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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 بهینه سازی 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 بهینه سازی (مانند Grid Search) به دست می‌ایند. این پارامترها برای بهینه سازی 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 شبیه سازی در ادامه ارائه می‌شود.

۲-۵ 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 بهینه زمان‌های 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. بدین‌ترتیب، می‌توان از الگوریتم جستجوی کامل فضای جواب برای تعیین زمان‌های بهینه t_1 و t_2 استفاده کرد.

۳- شبیه سازی

در این بخش، به پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در فصل دوم بر روی یک سیستم با داده‌های واقعی پرداخته می‌شود. بدین‌منظور، با توجه به 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 P^{max} و E^{max}) و تعیین زمان‌های t_1 و t_2، در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. همچنین، کدهای پیاده‌سازی‌شده 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.

۳-۱ داده های 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، این‌گونه 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 این‌گونه ساده‌سازی‌های در برنامه‌ریزی بلندمدت رایج است.

همچنین قیمت برق خریداری‌شده 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 (T نماد تومان در نظر گرفته شده است) می‌باشد (بورس۲۴, 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 ۶۰ ساعت استفاده کند)، از پلکان آخر (انرژی مصرفی مازاد بر 600 kWh) استفاده شده است که قیمت آن برابر با 3757 T/kWh

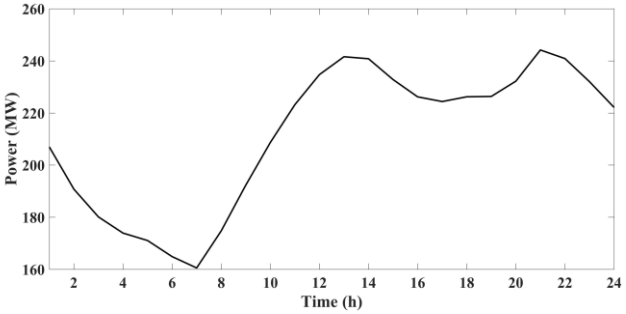
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

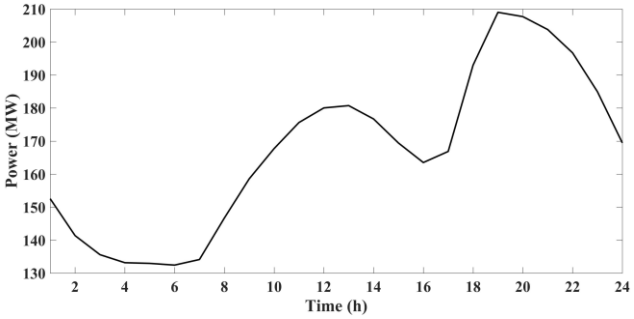
می‌باشد. نرخ رشد این قیمت‌ها در هر سال برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

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 قبلا 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)

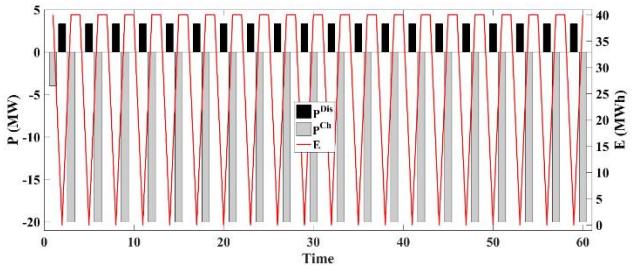
۳-۱ نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی معقول بودن نتایج، ابتدا شبیه‌سازی برای هسته اصلی بهینه‌سازی انجام شده است. تعداد مشارکت کنندگان برابر ۴۰۰۰ نفر در نظر گرفته شده است. برای این منظور، پارامترهای مورد نیاز فعلا مطابق با جدول (۱) فرض می‌شوند تا صرفا 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
E^{max} [MWh]	40	t_2	22	b	0.05

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 شبیه سازی اولیه برابر ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است و دوره غیر پیک که در آن اقدام به شارژ می‌شود تنها دو ساعت است. بهره برداران 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

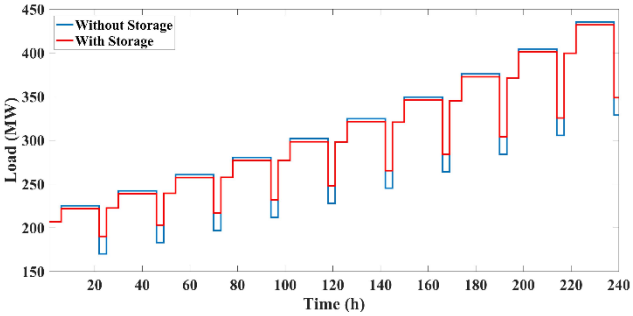
همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، ضرایب قیمت‌های حمایتی خرید برق در دوره غیرپیک و فروش برق در دوره پیک برابر صفر قرار داده شده است تا دارندگان باتری در این ساعات اقدام به شارژ و دشارژ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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 صرفا 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.



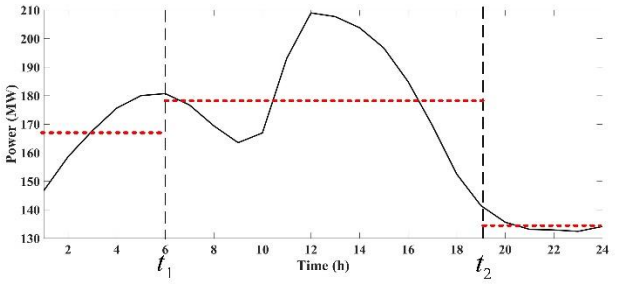
شکل (۷): نمودار بار معادل شبکه در روزهای گرم طی ۱۰ سال با و بدون استفاده از باتری

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 $\frac{7,785\times10^{9}T}{4000}=1.946\times10^{9}T$ 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 خرد برابر با ۹۰٫۰۰۰٫۰۰۰ تومان خواهد بود. این بدین معنا است که دارندگان باتری از این سرمایه‌گذاری سود کلانی می‌برند (میلیون تومان 1946-90=1856). 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 داده های ورودی ذکرشده اجرا می‌شود. اجرای برنامه بر روی یک سیستم Core i7-2.8GHz به مدت ۲ ساعت و۲۰ دقیقه به طول انجامید. برنامه ذکر شده، برای ۴۵ ترکیب مختلف از $2\le t_1\le 6$ و $15\le t_2\le 23$ 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 t1=6 و t2=19 رخ خواهد داد. شکل بار برای ترکیب زمانی فوق در روزهای سرد سال برای سال اول، مطابق با شکل (۸) خواهد بود.



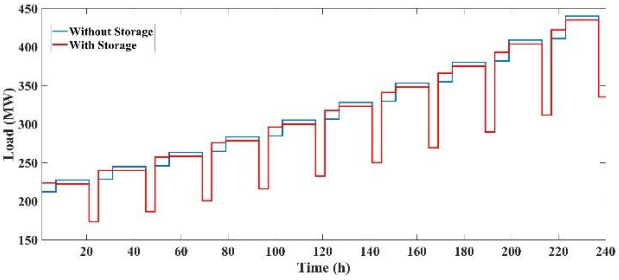
شکل (۸): زمان‌های بهینه مستخرج از شبیه‌سازی برای تعیین بازه‌های پیک و غیرپیک در طول روزهای سرد سال

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).

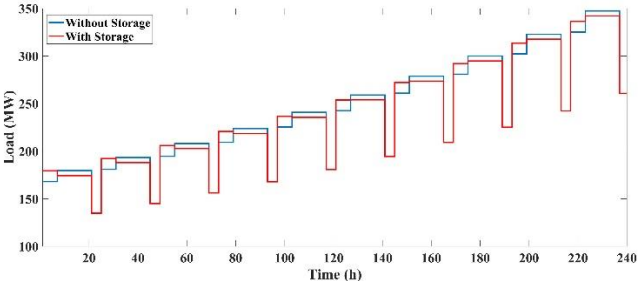
نمودار بار معادل شبکه در طول دوره ۱۰ ساله و برای ترکیب زمانی بهینه، برای روزهای سرد و گرم سال به ترتیب مطابق با شکل‌های (۹) و (۱۰) است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]



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

جدول (۳): ضرایب قیمت‌های حمایتی محاسبه‌شده برای بهترین ترکیب زمانی ممکن

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

همان‌طور که از جدول فوق مشاهده می‌شود، ضریب قیمت فروش در حالت غیرپیک (γ^{Sof}) در کمترین مقدار خود قرار داده شده است. به عبارت بهتر، حمایت سیاست‌گذار در این حالت بدین صورت است که تقریبا 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 نیروگاه‌های سطح توزیع (λ^{Gen}) که برابر با 1040 T/kWh است، مبلغ پرداخت‌شده به دارندگان باتری در ساعات پیک برابر 46612 T/KWh به دست می‌آید که عدد نسبتا بزرگی است. به عبارت دیگر، میزان اقبال سرمایه‌گذاران خرد به بحث نصب باتری به حدی کم در نظر گرفته شده است که سیاست‌گذار مجبور به پرداخت چنین هزینه هنگفتی خواهد بود.

میزان اقبال سرمایه‌گذاران خرد در واقع توسط ضرایب a و b در رابطه (۳۳) تعیین می‌شود که از ورودی‌های مسأله است و توسط خبرگان صنعت تعیین می‌شود. در تحلیل فعلی مقادیر a=60 و b=0.05، قرار داده شد. برای سنجش تاثیر ضرایب a و b، شبیه‌سازی را برای مقادیر a=200 و b=0.2 تکرار می‌کنیم. با انجام این شبیه‌سازی، ترکیب بهینه شامل زمان‌های t1=6 و t2=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 چشم‌گیری حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب زمانی بهینه چندان به نحوه مشارکت سرمایه‌گذاران خرد در برنامه نصب باتری وابسته نیست. به عبارت دیگر، هم در حالتی که دید سرمایه‌گذار خرد منفعلانه لحاظ شده بود (a=60 و b=0.05) و هم در حالتی که سرمایه‌گذار خرد مشتاق به مشارکت در نظر گرفته شد (a=200 و b=0.2)، ترکیب زمانی بهینه برابر با t1=6 و t2=20 به دست آمد. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین ترکیب زمانی ناشی از شکل منحنی بار خواهد بود و چنین پارامترهای اقتصادی موثر نخواهند بود.

این روند شبیه‌سازی 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 نصب‌شده در شبکه هستیم. از منظر تعداد مشارکت کنندگان نیز همین مسئله تکرار می‌شود. 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 مشارکت‌کنندگان خرد در این طرح ۱۰ برابر لحاظ شده است. ولی باید در نظر گرفت که این اقبال تنها عامل موثر نبوده و قیمت‌های پیشنهادی نیز تاثیر گذارند. در جدول (۴) قیمت‌های پیشنهادی متناسب با ورودی a=200 و b=0.2 آورده شده است.

جدول (۴): ضرایب قیمت‌های حمایتی محاسبه‌شده برای بهترین ترکیب زمانی ممکن با لحاظ کردن a=200 و b=0.2

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

همان‌طور که دیده می‌شود، در این حالت قیمت‌های حمایتی به شدت کاهش پیدا کرده‌اند. در حالتی که a=60 و b=0.05 بود، $\gamma^{BP}=44.82$ محاسبه گردید و در حالت حالت a=200 و b=0.2 ، $\gamma^{BP}=1.39$ خواهد بود. به عبارت دیگر، دلیل کاهش میزان مشارکت سرمایه‌گذاران در این حالت، با وجود افزایش اقبال آنها به سرمایه‌گذاری در بخش باتری‌ها، کاهش قیمت‌های 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

با $1040\times1.39=1445\ \frac{T}{KWh}$ خواهد بود که عدد کمتری در مقایسه با حالت قبل است.

۳-۱ نتیجه‌گیری

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. بدین‌ترتیب، مدل ارائه‌شده یک مدل بهینه‌سازی 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 مسأله استفاده شد تا مسأله 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 شبیه سازی 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. بدین‌ترتیب، بدون نیاز به داشتن بستر مخابراتی-کنترلی برای برنامه-ریزی 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

بورس۲۴. (۲۰۲۲). ابلاغ نرخ خرید تضمینی برق نیروگاه های 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 .

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., Amjady, 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* .۹۲۰-۹۳۳ ,(۵)

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., Zeynali, 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 .

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]

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 .

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-05-27]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.1.4]