برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری برای شرکت همزمان در بازار انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس

الهام صادقی[۱] مصطفی غلامی[۲]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم وفناوری مازندران، بهشهر، ایران

e.sadeghi5306@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم وفناوری مازندران، بهشهر، ایران

m.gholami@mazust.ac.ir

چکیده: امروزه با افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، تمایل به استفاده از منابع تجدیدپذیر افزایش یافته است. همچنین با توجه به تجدید ساختار شبکه‌های قدرت از ساختار سنتی به ساختار مبتنی بر بازار، بازارهای مختلف انرژی و خدمات جانبی طراحی شده است. از سوی دیگر با توجه به عدم قطعیت در تولید منابع تجدیدپذیر، واحدهای ذخیره‌ساز انرژی مورد توجه قرار گرفته است که می‌توانند در کنار منابع تجدیدپذیر و یا به تنهایی، در بازارهای مختلف انرژی و خدمات جانبی شرکت کنند. با توجه به سرعت بالای ورود و خروج واحدهای ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به شبکه، استفاده از این منابع در بازارهای خدمات جانبی فرکانس همچون بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس مناسب می‌باشد. یکی از مسائلی که در برنامه‌ریزی این واحدها مطرح است، چگونگی شرکت در بازارهای انرژی و یا بازارهای خدمات جانبی برای بیشینه کردن سود حاصل از شرکت در بازار می‌باشد. در این مقاله، یک استراتژی بهینه برای شرکت همزمان واحد ذخیره‌ساز انرژی در بازار انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی کارآمدی روش پیشنهادی برای شرکت همزمان واحد ذخیره‌ساز انرژی و بیشینه کردن سود حاصل از شرکت در بازارهای مذکور را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: واحد ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری، بازار انرژی، بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس، بازار خدمات جانبی، برنامه‌ریزی بهینه واحدهای ذخیره‌ساز

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.43

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: مصطفی غلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- مازندران- بهشهر- دانشگاه علم و فناوری مازندران

۱- مقدمه

امروزه با افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آن، استفاده از منابع تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. برای کاهش افزایش دمای زمین، سهم قابل توجهی از انرژی الکتریکی تولیدی باید از نیروگاه‌های سنتی به منابع تجدیدپذیر تغییر پیدا کند [۱]. با نفوذ روزافزون منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نقش جدیدی را بر عهده گرفته‌اند و با افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت کنترل شبکه، نقش بی‌بدیلی را در بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند [۲]. با توجه به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، شبکه‌های قدرت به تدریج از ساختار سنتی خارج شده و به ساختار مبتنی بر بازار در حال تغییر است. لذا شبکه‌های قدرت از انحصار دولت‌ها خارج شده و به سمت خصوصی‌سازی پیش رفته است. در این شرایط، با توجه به اینکه هر کدام از شرکت‌کنندگان بازار برای حداکثرسازی سود خود تلاش می‌کنند، لذا امکان ایجاد عدم هماهنگی و رخداد خاموشی‌های نامطلوب برای شبکه نیز افزایش می‌یابد. لذا بهره‌بردار شبکه باید برای جلوگیری از رخداد حوادث ناگوار همچون خاموشی سراسری، تمهیدات لازم را بیندیشد. در این راستا، علاوه بر بازار انرژی که در آن تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان اقدام به خرید و فروش انرژی می‌نمایند، بازارهای دیگری تحت عنوان بازارهای خدمات جانبی پیش‌بینی شده است که در آن از واحدهای شرکت‌کننده به عنوان واحدهای ذخیره در شرایط اضطراری و به منظور اطمینان از عملکرد صحیح شبکه استفاده می‌شود.

کنترل فرکانس از مهمترین وظایف متولی شبکه می‌باشد که در آن بهره‌بردار شبکه به منظور برقراری تعادل بین تولید و مصرف، بخشی از ظرفیت منابع تولیدی خود را به صورت آماده پیش‌بینی می‌کند [۳, ۴]. لذا، یکی از بازارهای خدمات جانبی که امروزه در برخی از کشورها همچون آلمان و اتریش فعال است [۱]، بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس می‌باشد که در آن واحدهای تولیدی به عنوان منابع ذخیره انرژی در ساعات مشخص طبق دستور بهره‌بردار شبکه وارد مدار می‌شوند تا تعادل تولید و مصرف در شبکه برقرار شود و از انحراف فرکانس شبکه جلوگیری شود. با توجه به اینکه منابع ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری سرعت بالایی برای شروع تولید نسبت به سایر واحدهای تولیدی دارند و با کنترل فرآیند شارژ و دشارژ می‌توانند در ساعات مشخص با قابلیت اطمینان بالا به مدار وارد شوند، استفاده از این واحدها می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب برای بازار خدمات جانبی فرکانس باشد.

در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس، واحدهای تولیدی ذخیره باید حداکثر تا ۵ دقیقه بعد از عدم تعادل بین تولید و مصرف وارد مدار شوند [۱]. فقط واحدهای از قبل مشخص شده که مشخصات فنی آن‌ها تایید شده باشد می‌توانند در این بازار شرکت کنند. هر شرکت‌کننده در بازار باید در سفارش ارسالی خود سه پارامتر را اعلام کند [۱]:

- ظرفیت قابل تحویل در هنگام نیاز برحسب MW
- قیمت پیشنهادی به ازای هر واحد ظرفیت ($/MW)
- قیمت پیشنهادی به ازای هر واحد انرژی ($/MWh)

در شرایط اضطراری که تعادل تولید و مصرف شبکه به هم می‌خورد، شرکت‌کنندگان در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس به ترتیب کمترین قیمت پیشنهادی به ازای هر واحد ظرفیت وارد مدار می‌شوند. لذا واحدهای با کمترین قیمت پیشنهادی به ازای هر واحد انرژی، دفعات ورود و خروج بیشتری به شبکه را متحمل می‌شوند [۱]. لازم به ذکر است که حداکثر نرخ دشارژ واحد مشارکت‌کننده در بازار aFRR، همان ظرفیت قابل تحویل پیشنهادی می‌باشد.

در [۵] یک استراتژی قیمت‌دهی برای شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس با درنظر گرفتن سوابق قبلی بازار ارائه شده است که با استفاده از آن، ظرفیت بهینه و قیمت پیشنهادی به ازای هر واحد انرژی مشخص می‌گردد. در استراتژی پیشنهادی، تابع احتمال پذیرش سفارش و مقدار تقاضای بازار در هر ساعت از سوابق قبلی بازار استخراج می‌شود. در مدل دیگری که در [۶] ارائه شده است، از سوابق بازار برای تعیین تابع توزیع احتمال قیمت به ازای هر واحد ظرفیت و قیمت به ازای هر واحد انرژی استفاده شده است.

یک مدل مبتنی بر تئوری بازی برای بازار رقابتی با دو بازیگر در [۷] ارائه شده است که در آن، بازیگر اول به عنوان یک شرکت‌کننده مستقل در بازار منظور شده است و دومین بازیگر رفتار بقیه‌ی شرکت‌کنندگان در بازار را مشخص می‌کند. نتایج شبیه‌سازی بر روی بازارهای انرژی و خدمات جانبی با فرآیندهای حراج مختلف ارائه شده است که نشان از قابلیت بیشینه کردن سود شرکت‌کننده‌ی مستقل در بازار با استفاده از تئوری بازی دارد.

مراجع [۸, ۹] مقدار ظرفیت پیشنهادی برای شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس توسط واحدهای تولیدی تجدیدپذیر همچون منابع بادی و خورشیدی را تخمین زده‌اند. در استراتژی‌های ارائه شده دو رویکرد مختلف با هدف بیشینه کردن سود و یا کمینه کردن ریسک ناشی از عدم قطعیت در تولید منظور شده است. در [۱۰] از یک مدل تخمین تولید مزرعه بادی برای شرکت در بازار خدمات جانبی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مشارکت منابع بادی در بازار خدمات جانبی سودآور هست، اما همیشه باعث افزایش سود در مقایسه با شرکت در بازار انرژی نمی‌گردد.

در [۱۱]، شبیه‌سازی‌های مختلفی برای بررسی تاثیر عوامل مختلف در بازار رزرو و بازار روز آتی آلمان ارائه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها عواملی همچون قوانین حاکم بر بازار، امید ریاضی قیمت، نوع و محدودیت‌های فنی واحد مشارکت‌کننده بررسی شده است. در [۱۲] یک مدل مبتنی بر تئوری بازی برای بررسی تاثیر طراحی بازار بر سود واحدهای مشارکت‌کننده در بازار ارائه شده است. در این راستا،

دو نوع طراحی بازار شامل پرداخت مبتنی بر قیمت توان سفارش داده شده و یا قیمت توان سفارش داده شده بعلاوه قیمت انرژی تحویل شده در اتحادیه اروپا بررسی شده است.

مراجع کمی به مشارکت منابع ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس پرداخته‌اند که از مهمترین آن‌ها مرجع [۱۳] می‌باشد که در آن باتری‌های لیتیوم یون و سدیم سولفور برای شرکت در این بازار بررسی شده‌اند. همچنین، در [۱۴, ۱۵] پیشنهاد شده است که از منابع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به عنوان یک واحد مستقل در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس استفاده نشود. چرا که از لحاظ اقتصادی بازدهی مناسبی ندارد. در [۱] استراتژی قیمت‌دهی برای بیشینه کردن سود یک نیروگاه مجازی در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس ارائه شده است که در آن، نیروگاه مجازی به صورت ترکیبی از واحدهای بادی، خورشیدی، گازی و منبع ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری منظور شده است. در ، تاثیر عوامل بیرونی بر قیمت به ازای هر واحد ظرفیت و قیمت به ازای هر واحد انرژی در بازار aFRR بررسی شده است. مهمترین موارد بررسی شده در این راستا عبارتند از قیمت بازارهای هفته آتی و روز آتی و میزان تولید منابع تولید پراکنده. همچنین، در [۹, ۱۶] بر روی قابلیت مشارکت مجموعه‌ای از منابع تجدیدپذیر به عنوان یک واحد در بازارهای خدمات جانبی همچون aFRR مطالعه شده است تا یک ظرفیت مطمئن برای شرکت در بازار تخمین زده شود. علاوه بر این، در [۱۷] مروری بر روش‌های مختلف تخمین قیمت در بازارهای مختلف طی ۱۵ سال گذشته ارائه شده است.

مهمترین چالش‌هایی که برای مالکین واحدهای ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری وجود دارد، انتخاب بازار و نوع استراتژی مشارکت در بازار است. بنابراین همواره این سوال برای مالکین واحدهای مذکور وجود دارد که مشارکت در کدام بازار و با کدام استراتژی، سود بیشتری را به دست می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است مشارکت همزمان در دو بازار بتواند سود بیشتری را نسبت به مشارکت در یک بازار به دست دهد. لذا پاسخ به چالش‌های فوق مهمترین مسئله در تصمیم‌گیری مالکین واحدهای ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای مشارکت در بازار می‌باشد.

در این مقاله یک استراتژی بهینه برای شرکت کردن همزمان یک واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس ارائه شده است، که در آن مالک واحد ذخیره‌ساز می‌تواند طی یک برنامه‌ریزی بهینه در بازارهای مذکور شرکت نموده و سود حاصل از مشارکت در بازار را بیشینه نماید. مدل ارائه شده برای هر دو بازار بر مبنای استفاده از سوابق بازارهای مذکور می‌باشد که طی آن با استفاده از توابع توزیع احتمال، امید ریاضی سود حاصل از هر کدام از بازارها محاسبه می‌شود و با استفاده از دستورات بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB، برنامه‌ریزی بهینه با توجه به سوابق بازار و مشخصات عملیاتی واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری ارائه می‌گردد.

به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به صورت زیر بیان نمود:

- مدلسازی مشارکت واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار انرژی به صورت منفرد
- مدلسازی مشارکت واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس به صورت منفرد
- تلفیق مدل‌های فوق برای مشارکت همزمان واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس به صورت منفرد و بیشینه کردن سود حاصل از مشارکت در بازار

در ادامه مقاله به این صورت تهیه شده است که در بخش ۲ مدلسازی ارائه شده، در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی بیان گردیده و در نهایت در بخش ۴ نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- مدلسازی پیشنهادی

قابلیت شارژ و دشارژ در واحدهای ذخیره انرژی مبتنی بر باتری این امکان را به بهره‌بردار می‌دهد که به تنهایی در بازارهای مختلفی شرکت کند. اولین بازاری که به نظر می‌رسد، بازار انرژی می‌باشد که در آن بهره‌بردار واحد ذخیره‌ساز در ساعاتی که قیمت انرژی پایین است، اقدام به خرید توان از بازار نموده و واحد ذخیره‌ساز انرژی را شارژ می‌نماید و در ساعاتی که قیمت انرژی بالاتر است، اقدام به فروش انرژی ذخیره شده می‌نماید. اما با توجه به سرعت بالای ورود/خروج واحد ذخیره‌ساز به/از مدار، امکان شرکت در بازارهای خدمات جانبی فرکانس نیز برای واحد ذخیره‌ساز وجود دارد. یکی از بازارهای خدمات جانبی فرکانس، بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس است که در آن، واحد ذخیره‌ساز باید حداکثر تا ۵ دقیقه بعد از اعلام بهره‌بردار شبکه، به مدار وارد شود تا از افت فرکانس شبکه جلوگیری شود.

چالش اصلی بهره‌بردار واحد ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری، انتخاب بازار و استراتژی شرکت در بازار می‌باشد تا طی آن، سود بیشینه به دست آید. بر این اساس، در ادامه مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی برای یک واحد منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت همزمان در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس ارائه می‌شود تا طی آن، سود واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری بیشینه شود.

۲-۱- مدلسازی سود حاصل از شرکت در بازار انرژی

برای مدلسازی درآمد حاصل از شرکت در بازار انرژی، ابتدا باید فرضیات حاکم بر مسئله روشن شود. لذا موارد زیر به عنوان مهمترین فرضیات حاکم بر بازار انرژی مطرح می‌گردد:

- شرکت‌کنندگان در بازار برای هر ساعت از روز پیشنهاد می‌دهند. به عبارتی، در هر ساعت از شبانه‌روز، یک قیمت و یک ظرفیت توسط تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان ارائه می‌گردد.

- با توجه به اینکه بازار رقابتی است، قیمت پیشنهادی توسط تولیدکنندگان، همان قیمت حاشیه‌ای آن‌ها می‌باشد.
- با توجه به اینکه بازار رقابتی است، شرکت‌کنندگان همچون واحدهای ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری، قادر به تغییر قیمت در بازار نخواهند بود.
- برای هر ساعت، با توجه به عرضه و تقاضا، یک قیمت برای کل بازار مشخص می‌شود.

با توجه به فرضیات فوق، در صورتی که قیمت بازار در یک ساعت از شبانه‌روز، بیشتر از قیمت حاشیه‌ای واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری باشد، شرکت در بازار برای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری سودآور خواهد بود. لذا اولین گام قبل از شرکت در بازار انرژی، بررسی سوابق قیمت در ساعات شبانه‌روز، طی روزهای قبل می‌باشد. با توجه به اینکه سوابق قیمتی برای هر ساعت در روزهای قبل مشخص می‌باشد، می‌توان یک تابع توزیع احتمال برای قیمت هر ساعت از شبانه‌روز مشخص نمود تا مبنای شرکت در بازار مشخص گردد. تابع توزیع احتمال منظور شده برای هر ساعت از بازار انرژی مطابق با (۱) می‌باشد که یک تابع به فرم نرمال-لگاریتمی می‌باشد [۱۸].

$$f^{S}(p)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta p}\exp\left(-\left(\frac{\ln(p)-e}{\sqrt{2}\zeta}\right)^{2}\right) \qquad (۱)$$

که در آن f تابع توزیع احتمال است؛ p قیمت انرژی در یک ساعت از شبانه‌روز می‌باشد؛ e و ζ به ترتیب مطابق با (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند و بالانویس S به بازار انرژی اشاره دارد [۱۸].

$$e=\ln(\mu)-0.5\zeta^{2} \qquad (۲)$$

$$\zeta=\sqrt{\ln\left(\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{2}+1\right)} \qquad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳)، μ و σ به ترتیب به میانگین و انحراف معیار قیمت در یک ساعت از شبانه‌روز اشاره دارند که از سوابق تاریخی قیمت در آن ساعت اقتباس شده است.

با داشتن تابع توزیع احتمال برای قیمت انرژی در هر ساعت از شبانه‌روز، درآمد حاصل از شرکت در بازار انرژی به صورت (۴) محاسبه می‌گردد.

$$\pi^{S}=P^{A}\left(p^{s}>c^{S}\right).L^{B}.\left(E\left[p^{S}\mid p^{S}>c^{S}\right]-c^{S}\right) \qquad (۴)$$

که در آن π بیانگر درآمد حاصل از شرکت در بازار است؛ $P^{A}(.)$ احتمال رخداد یک فرآیند تصادفی است؛ p^{S} قیمت انرژی در ساعت مورد نظر می‌باشد؛ L معرف ظرفیت واحد تولیدی می‌باشد؛ بالانویس B به پیشنهاد شرکت در بازار مربوط می‌گردد؛ c^{S} به قیمت حاشیه‌ای یک واحد تولیدی اشاره دارد و عملگر E[.] بیانگر امید ریاضی می‌باشد.

مطابق با (۴)، سود حاصل از شرکت در بازار انرژی دارای سه قسمت اصلی می‌باشد. اولین قسمت عبارت $P^{A}\left(p^{s}>c^{S}\right)$ می‌باشد. به عبارتی، احتمال رخداد شرایطی که در آن قیمت بازار انرژی بیشتر از قیمت حاشیه‌ای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری باشد، محاسبه می‌گردد. در این صورت واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در آن ساعت از بازار شرکت داده می‌شود. قسمت دوم، L^{B} می‌باشد که معرف ظرفیتی است که در آن ساعت، منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت در بازار انرژی پیشنهاد می‌دهد و در صورت مشارکت در بازار، با آن ظرفیت به شبکه انرژی تزریق می‌کند. نهایتا قسمت آخر در رابطه‌ی مذکور، عبارت $\left(E\left[p^{S}\mid p^{S}>c^{S}\right]-c^{S}\right)$ می‌باشد که بیانگر امید ریاضی اختلاف قیمت در بازار انرژی با قیمت حاشیه‌ای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری می‌باشد که سود واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری از آن ناشی می‌شود. اما باید توجه نمود که با توجه به اینکه در جمله‌ی اول، احتمال بزرگتر بودن قیمت بازار از قیمت حاشیه‌ای منظور شده است، در این قسمت، احتمال شرطی منظور می‌شود که طی آن امید ریاضی قیمت بازار انرژی به شرط اینکه در آن ساعت، قیمت انرژی از قیمت حاشیه‌ای بیشتر باشد، محاسبه می‌گردد.

۲-۲- مدلسازی سود حاصل از شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس

هر تولیدکننده که بتواند مطابق با درخواست بهره‌بردار شبکه (ISO) طی مدت ۳۰ ثانیه تولید خود را شروع کند و حداکثر تا مدت زمان ۵ دقیقه، تولید خود را به مقداری که برای شرکت در بازار پیشنهاد داده است برساند، می‌تواند در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس اقدام به ثبت سفارش نماید تا درخواست او برای ساعت مشخصی از روز مورد بررسی و مقایسه با سایر درخواست‌ها قرار گیرد و در صورت برنده شدن، در ساعت مذکور به عنوان ذخیره خودکار بازیابی فرکانس آماده‌ی اتصال به شبکه و تزریق توان درخواستی باشد. بدین ترتیب، ISO با توجه به شرایط شبکه، برای هر ساعت از روز یک ظرفیت ذخیره تعیین می‌کند تا شرکت‌کنندگان در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس، نسبت به تامین آن اقدام نمایند [۱].

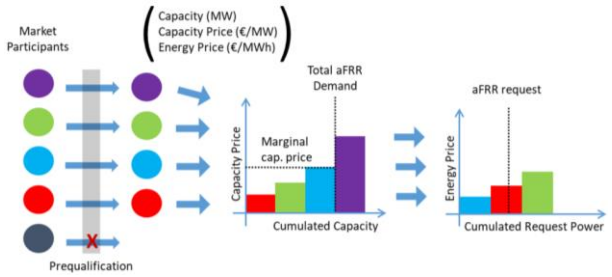
ساختاری که برای بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس طراحی شده است بدین صورت است که هر پیشنهاد دهنده‌ی این بازار، در پیشنهاد ارسالی خود برای ISO سه پارامتر را تعیین می‌کند[۱]:

- ظرفیت: این پارامتر مشخص می‌کند که توان تولیدی که واحد تولیدکننده می‌تواند در ساعت مشخص با درخواست ISO به شبکه تزریق نماید، چقدر است.
- قیمت به ازای هر واحد ظرفیت (قیمت ظرفیت): این قیمت بیانگر این است که در صورت برنده شدن شرکت‌کننده در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس در آن ساعت، حتی در صورتی که شبکه دچار شرایط اضطراری نشود و نیازی به تزریق توان توسط واحد برنده شده در بازار نباشد، ISO موظف است مبلغ مورد نظر را به ازای هر واحد ظرفیت ذخیره، به مصرف‌کننده پرداخت نماید. این مسئله از آنجایی عادلانه است که تولیدکننده بجای اینکه در بازار انرژی شرکت کند، ظرفیت خود را به عنوان ظرفیت ذخیره شبکه

آماده نگه می‌دارد. لذا حتی در صورتی که به وی نیازی پیدا نشود، باید به ازای هر واحد ظرفیتی که به عنوان ذخیره آماده کرده است، ISO به آن واحد مبلغی پرداخت نماید.

- قیمت به ازای هر واحد انرژی (قیمت انرژی ذخیره): این قیمت که از طرف شرکت‌کننده به ISO اعلام می‌گردد، زمانی به شرکت‌کننده پرداخت می‌شود که در ساعت مذکور، به تولید شرکت‌کننده در بازار نیاز پیدا شود و برای برقراری تعادل توان تولیدی و مصرفی، به شبکه انرژی تزریق نماید. طبیعی است که باید این هزینه لحاظ شود تا بین تولیدکنندگانی که به حضور آن‌ها نیاز شده است و سایر تولیدکنندگانی که به حضور آن‌ها نیاز پیدا نشده است، تفاوتی باشد.

نمایی ساختار و نحوه‌ی عملکرد بازار aFRR در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار و نحوه عملکرد بازار aFRR [۱۹]

با توجه به اینکه پیشنهاد دهندگان در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس در پیشنهاد خود، دو پیشنهاد قیمتی را مطرح می‌کنند، مفهومی به نام "قیمت ترکیبی" برای این بازار مطرح می‌گردد که به فرم (۵) تعریف می‌شود [۱].

$$B_{MP} = B_C + \alpha_M . B_E \qquad (۵)$$

که در آن B_{MP} قیمت ترکیبی پیشنهادی هر شرکت‌کننده در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس می‌باشد؛ B_C قیمت ظرفیت می‌باشد و B_E قیمت انرژی ذخیره می‌باشد. همچنین، α_M ضریب وزنی قیمت به ازای هر واحد انرژی (B_E) نسبت به قیمت به ازای هر واحد ظرفیت (B_C) می‌باشد [۱]. با بررسی سابقه سفارش‌هایی که در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس برنده شده‌اند، می‌توان یک تابع توزیع احتمال برای احتمال برنده شدن در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس برحسب قیمت ترکیبی به دست آورد. تابع توزیع احتمال منظور شده برای این بازار به فرم تابع توزیع نرمال پیشنهاد شده است [۱]، که به فرم (۶) قابل بیان است.

$$f\left(MP\right) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(MP-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad (۶)$$

که در آن MP قیمت ترکیبی پیشنهادی برای بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس است، μ و σ به ترتیب به میانگین و انحراف معیار قیمت ترکیبی در سابقه بازار اشاره دارد و f نیز احتمال برنده شدن در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس را نشان می‌دهد.

با توجه به ساختار بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس، مدلسازی درآمد این بازار را می‌توان به فرم (۷) بیان نمود.

$$\pi^{aFRR} = G\left(MP\right).\left(E_{CaFRR} + E_{EaFRR}\right) \qquad (۷)$$

که در آن π^{aFRR} عبارت است از درآمد مورد انتظار از بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس، $G\left(MP\right)$ احتمال برنده شدن در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس است که از سوابق بازار طبق (۶) قابل محاسبه است؛ E_{CaFRR} درآمد حاصل از ظرفیت ذخیره شرکت‌کننده در بازار می‌باشد؛ صرفنظر از اینکه از ظرفیت ذخیره پیش‌بینی شده استفاده بشود یا خیر و E_{EaFRR} درآمد حاصل از تزریق انرژی به شبکه می‌باشد که تنها در صورتی توسط ISO به تولیدکننده پرداخت می‌شود که شبکه به توان ذخیره پیش‌بینی شده آن تولیدکننده نیاز پیدا کند. طبیعی است که این درآمد الزاما به همه‌ی شرکت‌کنندگان در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس پرداخت نمی‌شود.

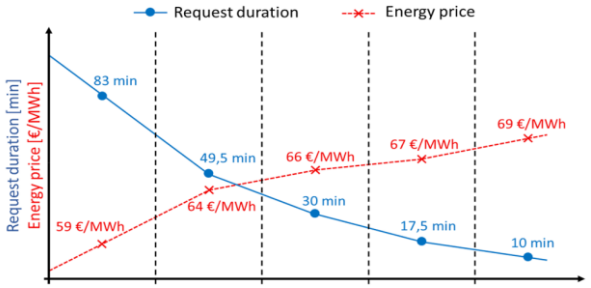
با توجه به (۶)، احتمال برنده شدن در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس مطابق با (۸) قابل بیان است که در آن، $F(MP)$ به تابع توزیع احتمال تجمعی $f(MP)$ اشاره دارد.

$$G(MP) = 1 - F(MP) \qquad (۸)$$

درآمد حاصل از ظرفیت ذخیره واحد شرکت‌کننده در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس مطابق با (۹) از حاصلضرب ظرفیت پیشنهادی (P_C) و قیمت به ازای هر واحد ظرفیت (B_C) تعیین می‌گردد.

$$E_{CaFRR} = P_C . B_C \qquad (۹)$$

پیش‌بینی E_{EaFRR} در (۷) قبل از ثبت پیشنهاد شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس به سادگی امکانپذیر نمی‌باشد و نیاز به بررسی سوابق قبلی بازار دارد. این درآمد تابعی از قیمت B_E پیشنهادی است. بدین منظور در [۱] مدلی برای این پیش‌بینی ارائه شده است که در آن از یک منحنی چند تکه خطی برای پیش‌بینی مقدار انرژی تزریقی شرکت‌کنندگان در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس استفاده شده است. منحنی ارائه شده در [۱] مطابق با شکل (۲) می‌باشد که برای بلوک‌های زمانی چهار ساعته ارائه شده است. لذا می‌توان با به دست آوردن معادلات خطی شکل مذکور مدت زمان تخمینی استفاده از هر واحد ذخیره در یک ساعت را محاسبه نمود و به عنوان مبنای محاسبه‌ی E_{EaFRR} از آن استفاده نمود.



شکل (۲): تخمین مدت زمان تزریق انرژی در بلوک‌های زمانی چهار ساعته با توجه به قیمت B_E پیشنهادی در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس

لذا اگر مدت زمان پیش‌بینی شده در شکل (۲) با t_E نشان داده شود، E_{EaFRR} مطابق با (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$E_{EaFRR} = P_C . B_E \, t_E \qquad (۱۰)$$

۲-۳- مدل پیشنهادی هزینه‌ی شارژ منبع ذخیره مبتنی بر باتری برای شرکت در بازار

در بخش‌های قبلی درآمد حاصل از بازارهای انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس به طور جداگانه و به صورت دقیق بررسی و بیان گردید. اما باید توجه نمود که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت در هر کدام از بازارهای مذکور نیاز به انرژی دارند. لذا با توجه به اینکه در این مقاله، واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به صورت یکتا در نظر گرفته شده است و مدلسازی بدون در نظر گرفتن هرگونه مولد الکتریکی در کنار واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری می‌باشد، لذا باید مدلی برای شارژ واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در نظر گرفت. طبیعی است شارژ واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری با خرید انرژی از بازار صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه قیمت انرژی در ساعات کم‌باری شبانه‌روز، ارزان‌تر از ساعات میان باری و پرباری شبکه است، به‌صرفه است که تامین انرژی مورد نیاز واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در ساعات کم‌باری شبکه صورت پذیرد. بنابراین با توجه به نرخ شارژ واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری، ظرفیت کل واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری و امید ریاضی قیمت در بازار انرژی در هر ساعت از شبانه‌روز، می‌توان هزینه‌ی شارژ کل واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری را مطابق با (۱۱) محاسبه نمود.

$$\mathrm{Cost}(h) = u(h) . RoC_{BESS} . \mu(h) \qquad (۱۱)$$

که در آن $u(h)$ متغیر باینری برای تعیین شارژ منبع ذخیره‌ساز در ساعت hم است؛ RoC_{BESS} نرخ شارژ باتری در هر ساعت است و $\mu(h)$ نیز امید ریاضی قیمت در ساعت hم در بازار انرژی است.

طبیعی است که تعداد ساعات شارژ منبع ذخیره‌ساز در شبانه‌روز به ظرفیت آن و نرخ شارژ آن در هر ساعت بستگی دارد. بنابراین برای محاسبه‌ی هزینه‌ی حاشیه‌ای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری که در (۴) از آن استفاده شده است، می‌توان از رابطه (۱۲) استفاده نمود.

$$c^S = \frac{1}{k} \sum_{h=h_1}^{h_k} \mu(h) \;\; , \;\; k = \frac{BESS_{Capacity}}{RoC_{BESS}} \qquad (۱۲)$$

که در آن k به تعداد ساعات مورد نیاز برای شارژ کامل منبع ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری است و $BESS_{Capacity}$ کل ظرفیت واحد مذکور است.

۲-۴- تابع هدف پیشنهادی مشارکت همزمان در بازار انرژی و بازار aFRR

با توجه به مدلسازی تابع سود در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس و هزینه‌ی شارژ باتری، تابع هدف پیشنهادی مسئله به فرم (۱۳) مطرح می‌گردد.

$$Max \sum_{h=1}^{24} \left(\pi^S(h) + \pi^{aFRR}(h) - \mathrm{cost}(h) \right) = \sum_{h=1}^{24} \begin{bmatrix} P^A\left(p_h^S > c_h^S\right) . L_h^B . \\ \left(E\left[p_h^S \mid p_h^S > c_h^S \right] - c_h^S \right) \\ + \left(G\left(B_C, B_E\right) \right) . \left(P_C . B_C + E_{EaFRR} \right) \\ - u(h) . RoC_{BESS} . \mu(h) \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

۲-۵- قیود پیشنهادی مسئله

برای حل مدلسازی پیشنهادی، دو قید عملکردی برای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری منظور می‌گردد. اولین قید بدین صورت است که مجموع ظرفیت پیشنهادی برای بازار انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس در هر ساعت، نباید از نرخ دشارژ باتری فراتر رود و دومین قید بیان می‌کند که مجموع ظرفیت پیشنهادی در بازارهای مذکور در طول شبانه‌روز باید برابر با ظرفیت کل باتری باشد. بنابراین، روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب به بیان قیدهای مذکور می‌پردازد که RoD_{BESS} در (۱۴) به نرخ دشارژ باتری در هر ساعت اشاره دارد.

$$P_C(h) + L^B(h) < RoD_{BESS} \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{h=1}^{24} P_C(h) + L^B(h) = BESS_{Capacity} \qquad (۱۵)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش با توجه به تابع هدف پیشنهادی برای مشارکت همزمان در بازارهای انرژی و aFRR، و قیود پیشنهادی مسئله، سناریوی شبیه‌سازی به تفصیل بیان می‌گردد و سپس روند شبیه‌سازی و نتایج آن به تفصیل ارائه می‌شود. علاوه بر این، تاثیر مواردی همچون میانگین قیمت ترکیبی در بازار aFRR و بیشینه نرخ دشارژ منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به عنوان دو مسئله‌ی تاثیرگذار در جواب بهینه در دو سناریوی دیگر بررسی شده‌اند.

همانطور که به آن اشاره شد، در این مقاله یک واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به تنهایی برای شرکت در بازار انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس درنظر گرفته شده است و برنامه‌ریزی برای یک روز

کاری به نحوی صورت می‌گیرد که سود مالک منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری بیشینه گردد. نتایج برنامه‌ریزی شامل موارد زیر است:

- ظرفیتی که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در هر ساعت از بازار انرژی پیشنهاد می‌دهد.
- ظرفیتی که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در هر ساعت از بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس پیشنهاد می‌دهد.
- قیمت ظرفیت که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس پیشنهاد می‌دهد.
- قیمت انرژی ذخیره که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس پیشنهاد می‌دهد.

لازم به ذکر است که با توجه به رقابتی بودن بازار، قیمت پیشنهادی واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار انرژی، همان هزینه‌ی حاشیه‌ای آن خواهد بود که با توجه به عرضه و تقاضای بازار، ممکن است قیمت نهایی بازار در آن ساعت بیشتر و یا کمتر از قیمت پیشنهادی تعیین شود.

۳-۱- بیان سناریوی پایه

یکی از مهمترین مسائلی که در نتایج برنامه‌ریزی اهمیت دارد، میانگین و انحراف معیار قیمت در هر ساعت از بازار انرژی می‌باشد که بدین منظور، مقادیر منظور شده برای شبیه‌سازی مطابق با جدول (۱) از [۱۸] اقتباس شده است.

جدول (۱): میانگین و انحراف معیار قیمت در هر ساعت از بازار انرژی [۱۸]

انحراف معیار قیمت در بازار انرژی (σ) بر حسب یورو	میانگین قیمت در بازار انرژی (μ) بر حسب یورو	ساعت	انحراف معیار قیمت در بازار انرژی (σ) بر حسب یورو	میانگین قیمت در بازار انرژی (μ) بر حسب یورو	ساعت
۱۹,۴	۳۰,۸	۱۳	۷,۳	۱۴,۵	۱
۱۶,۹	۲۸,۸	۱۴	۷,۵	۱۰,۰	۲
۱۵,۳	۲۸,۲	۱۵	۷,۷	۹,۱	۳
۱۲,۴	۲۶,۰	۱۶	۶,۵	۸,۲	۴
۹,۴	۲۲,۸	۱۷	۷,۴	۹,۹	۵
۹,۱	۲۲,۵	۱۸	۷,۷	۱۵,۶	۶
۹,۳	۲۲,۱	۱۹	۸,۲	۱۸,۲	۷
۹,۳	۲۱,۲	۲۰	۱۴,۲	۲۷,۴	۸
۹,۸	۲۱,۸	۲۱	۱۴,۲	۲۸,۲	۹
۱۰,۴	۲۰,۵	۲۲	۱۶,۶	۲۸,۸	۱۰
۸,۴	۱۸,۵	۲۳	۱۸,۹	۳۲,۳	۱۱
۵,۶	۱۳,۷	۲۴	۳۰,۱	۴۴,۲	۱۲

ظرفیت واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری برای شرکت در بازار انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس طبق مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی، ۳۰۰ MWh منظور شده است و RoC_{BESS} و RoD_{BESS} آن ۱۰۰ MW/h فرض شده است. با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که میانگین قیمت انرژی در ساعات ۳، ۴ و ۵ بامداد از سایر ساعات شبانه‌روز کمتر است. لذا با توجه به ظرفیت و نرخ شارژ منظور شده برای سناریوی شبیه‌سازی، باتری باید در ساعات مذکور شارژ شود. بدین ترتیب یک روز برنامه‌ریزی از ساعت ۶ صبح تا ۵ صبح روز بعد منظور می‌شود تا در اولین ساعت از روز برنامه‌ریزی، باتری در وضعیت شارژ کامل قرار داشته باشد. بدین ترتیب، هزینه حاشیه‌ای منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری نیز طبق (۱۶) قابل محاسبه است.

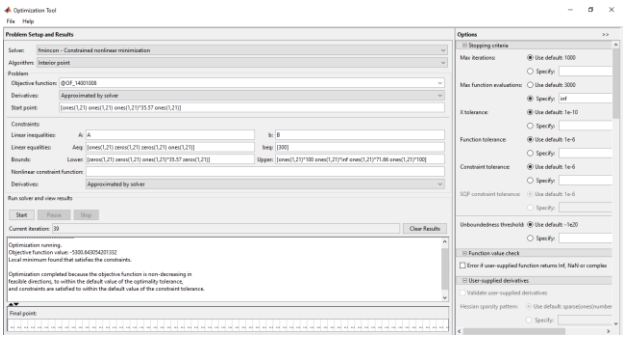
$$c^S = \frac{9.1+8.2+9.9}{3} = 9.0667 \qquad (۱۶)$$

یکی دیگر از پارامترهایی که در مدلسازی مطرح گردید، ضریب وزنی قیمت به ازای هر واحد انرژی نسبت به قیمت به ازای هر واحد ظرفیت ذخیره می‌باشد که در این مقاله، مقدار ۳ برای آن منظور شده است. علاوه بر این، امید ریاضی و انحراف معیار قیمت ترکیبی در این سناریو به ترتیب برابر با ۱۰ و $\sqrt{2}$ منظور شده است.

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی مسئله برای یک روز برنامه‌ریزی

ساعت/مقدار بهینه	L_h^B	$B_{C,h}$	$B_{E,h}$	$P_{C,h}$
۱	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۳	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۴	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۵	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۶	۱۰۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۷	۱۰۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۸	۱۰۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۹	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۰	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۱	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۲	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۳	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۴	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۵	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۶	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۷	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۸	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۱۹	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲۰	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲۱	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲۲	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲۳	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
۲۴	۰,۰۰	۲۵,۷۱۶۶	۵۹,۶۵۱۶	۰,۰۰
مقدار بهینه تابع هدف (یورو)				۵۳۰۰,۶۴۳۰

مسئله‌ی بهینه‌سازی پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده fmincon در جعبه‌ابزار Optimtool از نرم‌افزار MATLAB حل شده است. لازم به ذکر است که حل‌کننده مذکور برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی مقید استفاده می‌شود. نتیجه‌ی پیاده‌سازی سناریوی شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای یک روز برنامه‌ریزی در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ساعت ۱ در این جدول معادل ساعت ۶ صبح می‌باشد و ساعت ۲۴ نیز معادل ساعت ۵ صبح روز آتی است که یک روز برنامه‌ریزی را تشکیل می‌دهند. همچنین، نمایی از استفاده از جعبه‌ابزار OptimTool در نرم‌افزار MATLAB برای حل مسئله بهینه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمایی از بکارگیری جعبه‌ابزار OptimTool در نرم‌افزار MATLAB برای حل مسئله بهینه‌سازی

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول (۲)، مشاهده می‌شود که ظرفیت پیشنهادی برای شرکت در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس صفر بوده است و سود این بازار در مقابل سود حاصل از بازار انرژی کمتر بوده است. لذا واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس شرکت نمی‌کند و تنها در سه ساعت از ساعات روز که میانگین قیمت انرژی بیشترین مقدار را در طول روز دارد، واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار انرژی شرکت می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، چون مقدار ۱۰۰ MW/h برای RoD_{BESS} منظور شده است، مقدار ظرفیت پیشنهادی برای سه ساعت در بازار انرژی مقدار ۱۰۰ MW بوده است تا کل ظرفیت واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در طول روز برنامه‌ریزی استفاده شود. سه ساعتی که واحد ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار انرژی شرکت کرده است، ساعات ۶ تا ۸ از روز برنامه‌ریزی بوده است که معادل با ساعات ۱۱ تا ۱۳ شبانه‌روز می‌باشد و قیمت انرژی در آن سه ساعت مطابق با جدول (۱) بیشتر از سایر ساعات شبانه‌روز می‌باشد.

بدیهی است که نتایج بدست آمده در جدول (۲) به ازای بازاری است که در این مقاله با توجه به مراجع طراحی شده است. با تغییر شرایط بازار و توابع توزیع احتمالی قیمت‌های بازار انرژی و بازار ذخیره خودکار بازیابی فرکانس نتایج متفاوتی بدست خواهد آمد.

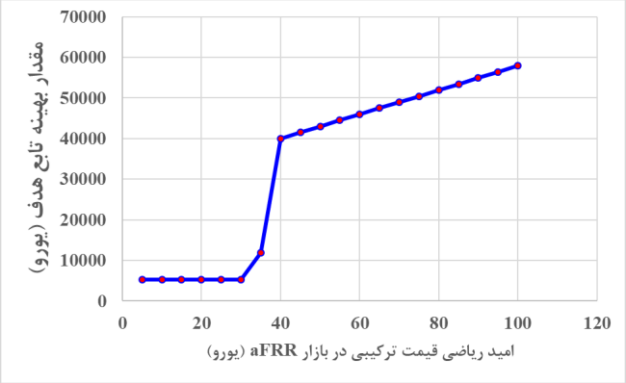
۳-۲- بررسی تاثیر امید ریاضی قیمت ترکیبی و ضریب وزنی α_M در پاسخ بهینه

به منظور بررسی تاثیر امید ریاضی قیمت ترکیبی بازار aFRR و ضریب وزنی α_M در پاسخ بهینه‌ی مدلسازی پیشنهادی، فرض کنید امید ریاضی قیمت ترکیبی در بازار aFRR بجای ۱۰، مقدار ۱۰۰ داشته باشد و ضریب α_M نیز از ۳ به ۱ تغییر یابد. نتیجه حل مسئله بهینه‌سازی در این شرایط مطابق با جدول (۳) می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ بهینه در این شرایط به گونه‌ای است که منبع ذخیره‌ساز در بازار انرژی شرکت نکرده است و صرفا در بازار aFRR مشارکت داشته است.

جدول (۳) نتایج بهینه‌سازی مسئله برای یک روز برنامه‌ریزی

ساعت/مقدار بهینه	L_h^B	$B_{C,h}$	$B_{E,h}$	$P_{C,h}$
۱	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۳
۲	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۳
۳	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۴	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۵	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۶	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۷	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۱۶
۸	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۹
۹	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۱
۱۰	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۰
۱۱	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۵
۱۲	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۰
۱۳	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۷
۱۴	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۱۵	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۰
۱۶	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۱۷	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۰
۱۸	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۰
۱۹	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۳۲
۲۰	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۰
۲۱	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۱۴,۲۲
۲۲	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۰,۰۰
۲۳	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۰,۰۰
۲۴	۰,۰۰	۶۰,۴۱	۳۵,۵۷	۰,۰۰
مقدار بهینه تابع هدف (یورو)				۵۷۹۴۷,۵۷

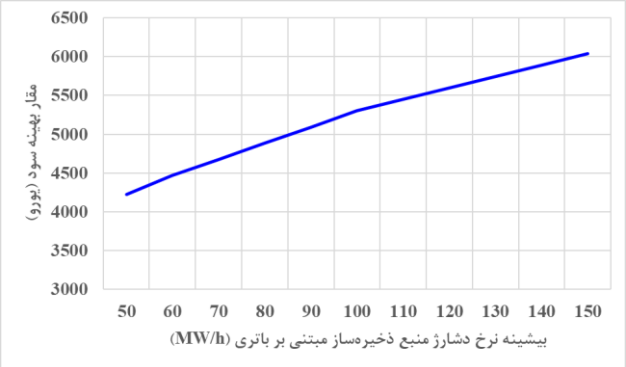
حال فرض کنید ضریب وزنی α_M روی مقدار ۱ باقی بماند و امید ریاضی قیمت ترکیبی از مقدار ۵ تا ۱۰۰ با گام‌های ۵ واحدی تغییر کند. منحنی تغییرات تابع هدف به ازای تغییر امید ریاضی قیمت ترکیبی در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از قیمت ۳۵ یورو به بعد، منبع ذخیره‌ساز در بازار aFRR مشارکت داشته است و سود آن نسبت به مشارکت در بازار انرژی افزایش یافته است.



شکل (۴): تغییرات مقدار بهینه سود با تغییر امید ریاضی قیمت ترکیبی بازار aFRR

۳-۳- بررسی تاثیر بیشینه نرخ دشارژ منبع ذخیره‌ساز در پاسخ بهینه

یکی از مسائلی که می‌تواند در پاسخ بهینه تاثیر بگذارد، بیشینه نرخ دشارژ منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری است. به منظور بررسی این مسئله، فرض کنید بیشینه نرخ دشارژ منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری از مقدار ۵۰ تا ۱۵۰ مگاوات بر ساعت با گام‌های ۱۰ واحدی تغییر کند. منحنی تغییر مقدار بهینه حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی به ازای امید ریاضی قیمت بازار aFRR برابر با ۱۰ یورو و ضریب وزنی α_M برابر با ۱ در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به تغییر نرخ دشارژ بیشینه، فروش انرژی ذخیره شده‌ی منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری در بازار انرژی بین ساعات مختلف تقسیم می‌شود. مطابق با انتظار، هرچه نرخ دشارژ بیشینه بیشتر شود، سهم بیشتری از انرژی را می‌توان در ساعات گرانقیمت به فروش رساند و سود بیشتری کسب کرد. لازم به ذکر است با توجه به مقدار ۱۰ مفروض برای امید ریاضی قیمت در بازار aFRR، پاسخ بهینه فقط شرکت در بازار انرژی را پیشنهاد می‌دهد.



شکل (۵): تغییرات مقدار بهینه سود با تغییر بیشینه نرخ دشارژ

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، بازارهای مختلفی برای مشارکت بخش خصوصی در تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه و حفظ قابلیت اطمینان آن ایجاد شده است. منابع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری با توجه به سرعت بالای ورود/خروج به/از مدار، گزینه‌های مناسبی برای بازارهای خدمات جانبی فرکانس می‌باشند. چالش اصلی برای مالک این منابع، انتخاب نوع بازار و نوع استراتژی مشارکت برای کسب سود حداکثر می‌باشد. در این مقاله یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی استراتژی شرکت کردن یک منبع ذخیره‌ساز انرژی منفرد به صورت همزمان در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس ارائه گردید که در آن مالک منبع ذخیره‌ساز در ساعات کم‌باری اقدام به خرید انرژی برای شارژ کردن باتری خود می‌نماید و در ساعات دیگر اقدام به فروش انرژی ذخیره شده می‌نماید. در مدل ارائه شده، سود حاصل از مشارکت در هر کدام از بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس محاسبه شده است و نهایتا در مقابل هزینه‌های حاصل از شارژ منبع، در قالب یک تابع هدف برای بیشینه کردن سود نوشته شده است.

نتایج شبیه‌سازی طی یک سناریو برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته نشان می‌دهد مدل پیشنهادی به خوبی می‌تواند سود حاصل از بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس را محاسبه نموده تا برای بیشینه کردن سود، پیشنهادات شرکت در بازارهای انرژی و ذخیره خودکار بازیابی فرکانس را تنظیم نماید. علاوه بر این، تاثیر امید ریاضی قیمت در بازار aFRR و بیشینه نرخ دشارژ منبع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری به عنوان دو مورد تاثیرگذار در مقدار بهینه‌ی سود نشان از صحت مدل پیشنهادی دارد.

مراجع

[1] M. Merten, C. Olk, I. Schoeneberger, and D. U. Sauer, "Bidding strategy for battery storage systems in the secondary control reserve market," Applied Energy, vol. 268, p. 114951, 2020.

[2] Z. Esmaeili, M. R. Namavar Zeini Vandi, E. Anani, and M. Ehsan" ,A Review on Energy Storage Systems Planning in Active Distribution Networks and its Applications," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 19, pp. 255-275, 2022.

[3] M. Rajabi Mashhadi, M. H. Javidi, and M. S. Ghazizadeh, "Simultaneous Scheduling of Energy and Primary Frequency Control Reserve Considering Technical Capabilities of Modern Generation Units," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 6, pp. 71-81, 2009.

[4] M. Rouholamini and M. Rashidinejad, "Simultaneous Scheduling of Energy and Primary Reserve Considering Congestion Constraints in Transmission Lines," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 9, pp. 1-10, 2012.

[5] F. Ocker, K. M. Ehrhart, and M. Ott, "Bidding strategies in Austrian and German balancing power auctions," Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, vol. 7, p. e303, 2018.

[6] E. Kraft, D. Keles, and W. Fichtner, "Analysis of bidding strategies in the German control reserve market," in 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2018, pp. 1-6.

[7] A. G. Morinec and F. E. Villaseca, "Optimal generator bidding strategies for power and ancillary services using game theory," in 200۴۰ ۸th North American Power Symposium, 2008, pp. 1-8.
[8] S. Camal, A. Michiorri, and G. Kariniotakis, "Optimal offer of automatic frequency restoration reserve from a combined PV/wind virtual power plant," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, pp. ,۶۱۷۰-۶۱۵۵ .۲۰۱۸
[9] S. Camal, A. Michiorri, and G. Kariniotakis, "Probabilistic forecasting and bidding strategy of ancillary services for aggregated renewable power plants," in 6th International Conference Energy & Meteorology, 2019.
[10] T. Soares, P. Pinson, T. V. Jensen, and H. Morais, "Optimal offering strategies for wind power in energy and primary reserve markets," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, pp. 1036-1045, 2016.
[11] A. Maaz, Effects of strategic bid behavior on the market price in the German day-ahead spot market: printproduction M. Wolff GmbH, 2017.
[12] F. Ocker, K.-M. Ehrhart, and M. Belica, "Harmonization of the European balancing power auction: A game-theoretical and empirical investigation," Energy Economics, vol. 73, pp. 194-211, 2018.
[13] I. Staffell and M. Rustomji, "Maximising the value of electricity storage," Journal of Energy Storage, vol. 8, pp. 212-225, 2016.
[14] A. Gitis, M. Leuthold, and D. U. Sauer, "Applications and markets for grid-connected storage systems," in Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing, ed: Elsevier, 2015, pp. 33-52.
[15] C. Olk, D. U. Sauer, and M. Merten, "Bidding strategy for a battery storage in the German secondary balancing power market," Journal of Energy Storage, vol. 21, pp. 787-800, 2019.
[16] S. Camal, A. Michiorri, G. Kariniotakis, and A. Liebelt, "Short-term forecast of automatic frequency restoration reserve from a renewable energy based virtual power plant," in 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2017, pp. 1-6.
[17] R. Weron, "Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future," International journal of forecasting, vol. 30, pp. 1030-1081, 2014.
[18] D. J .Swider, "Simultaneous bidding in day-ahead auctions for spot energy and power systems reserve," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 29, pp. 470-479, 2007.
[19] M. Merten, F. Rücker, I. Schoeneberger, and D. U. Sauer, "Automatic frequency restoration reserve market prediction: Methodology and comparison of various approaches," Applied Energy, vol. 268, p. 114978, 2020.