

The Expansion Planning of a Microgrid in the Presence of Load, Electricity Market Price and Renewable Resources Uncertainties

Abdollah Rastgou¹, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

Abstract:

The concerns arising from fossil fuels have drawn significant attention to the development of microgrids with the presence of energy storage batteries. Microgrids, utilizing batteries, can store energy during peak production times and inject it into the grid during peak consumption periods, thereby enhancing the stability and reliability of the system. Additionally, batteries assist in load management and reduce energy losses, enabling optimal use of renewable resources. To ensure the economic performance of microgrids, optimizing the measurement of battery energy storage is essential. Factors significantly impacting the accuracy and efficiency of battery energy storage measurement results are often overlooked. These factors include a range of characteristics for different technologies, the effects of depth of discharge, the number of charge/discharge cycles on the degradation of battery energy storage quality, and the coordination of microgrid operating modes. This paper presents a model for measuring battery energy storage in microgrid applications that considers key factors such as size, technology type, number, and optimal maximum depth of discharge in the presence of uncertainties related to renewable resources and electrical load. Monte Carlo simulation is employed to analyze these uncertainties. The model used is a mixed-integer linear programming model. Furthermore, the nonlinear relationship between the depth of discharge of battery energy storage and its cycle life is modeled using a piecewise linearization approach. The results indicate that the proposed model can effectively determine the size, technology type, number, and optimal maximum depth of discharge for battery energy storage.

Keywords: Battery, Optimization in power system, Microgrid expansion, Uncertainty, Battery discharge depth

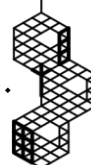
Received: 13 November 2024

Revised: 31 December 2024

Accepted: 29 January 2025

Corresponding Author: Dr. Abdollah Rastgou, abdollah.rastgou@iau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193420>



برنامه‌ریزی توسعه یک ریز شبکه در حضور عدم قطعیت‌های بار، قیمت برق در بازار و منابع تجدیدپذیر

عبداله راستگو^۱، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده: دلیل نگرانی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی توسعه ریز شبکه‌ها در حضور باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ریز شبکه‌ها با استفاده از باتری‌ها می‌توانند انرژی را در زمان‌های اوج تولید ذخیره و در زمان‌های اوج مصرف به شبکه تزریق کنند که این امر باعث بهبود پایداری و قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. باتری‌ها به مدیریت بار و کاهش تلفات کمک می‌کنند و امکان استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر را فراهم می‌آورند. برای تضمین عملکرد اقتصادی ریز شبکه‌ها، ضروری است که اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی باتری به صورت بهینه انجام شود. عواملی که تأثیر قابل توجهی بر دقت و کارایی نتایج اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی باتری دارند، معمولاً لحاظ نمی‌شوند. این عوامل شامل مجموعه‌ای از ویژگی‌ها برای فناوری‌های مختلف، تأثیر عمق تخلیه و تعداد چرخه‌های شارژ/دشارژ بر کاهش کیفیت ذخیره‌سازی انرژی باتری و هماهنگی حالت‌های بهره‌برداری ریز شبکه هستند. در این مقاله مدلی برای اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی باتری در کاربردهای ریز شبکه ارائه می‌دهد که عوامل کلیدی از جمله اندازه، نوع فناوری، تعداد و حداکثر عمق تخلیه بهینه برای ذخیره‌سازی انرژی باتری را در حضور عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر و بار الکتریکی را در نظر می‌گیرد. برای بررسی عدم قطعیت‌ها از ابزار مونت کارلو استفاده شده است. مدل به کاررفته یک مدل خطی آمیخته عدد صحیح است. همچنین، رابطه غیرخطی بین عمق تخلیه ذخیره‌سازی انرژی باتری و چرخه عمر آن با به کارگیری رویکرد خطی‌سازی قطعه‌ای مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده قادر است اندازه، نوع فناوری، تعداد و حداکثر عمق تخلیه بهینه ذخیره‌سازی انرژی باتری را تعیین کند.

واژه‌های کلیدی: باتری، بهینه‌سازی در سیستم قدرت، توسعه ریز شبکه، عدم قطعیت، عمق تخلیه باتری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر عبدالله راستگو، abdollah.rastgou@iau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193420>





۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه و هدف

کاربرد باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به‌ویژه در عصر حاضر، به دلیل افزایش نیاز به منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این باتری‌ها به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت نوسانات تولید و مصرف انرژی عمل می‌کنند، به‌طوری‌که می‌توانند انرژی تولیدشده در زمان‌های اوج تولید را ذخیره کرده و در زمان‌های کمبود عرضه، آن را به شبکه برگردانند. این امر نه تنها به بهبود پایداری شبکه‌های برق کمک می‌کند، بلکه از نظر اقتصادی نیز می‌تواند هزینه‌های انرژی را کاهش دهد. همچنین، با توجه به گسترش ریز شبکه‌ها و نیاز به تأمین انرژی در مناطق دورافتاده، باتری‌ها نقش کلیدی در ایجاد استقلال انرژی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، استفاده از این فناوری می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. در نتیجه، کاربری بهینه از باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی نه تنها به بهبود کارایی سیستم‌های انرژی کمک می‌کند، بلکه به تحقق اهداف توسعه پایدار نیز نزدیک‌تر می‌سازد. ساینز بهینه باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی در توسعه ریز شبکه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و دلایل متعددی برای این اهمیت وجود دارد:

۱. مدیریت نوسانات تولید و مصرف: ریز شبکه‌ها معمولاً شامل منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی هستند که تولید آن‌ها به شرایط جوی وابسته است. ساینز بهینه باتری‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری نوسانات تولید را مدیریت کرده و انرژی اضافی را در زمان تولید زیاد ذخیره کند و در زمان کمبود عرضه، آن را تأمین کند.
۲. پایداری شبکه: با داشتن باتری‌های با ساینز مناسب، می‌توان از بروز ناپایداری‌های ناگهانی در شبکه جلوگیری کرد. این امر به حفظ کیفیت و پایداری تأمین انرژی کمک می‌کند و از خاموشی‌های ناخواسته جلوگیری می‌کند.
۳. کاهش هزینه‌ها: ساینز بهینه باتری‌ها می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد. باتری‌های بزرگ‌تر ممکن است هزینه‌های بیشتری داشته باشند و همچنین نیاز به سیستم‌های مدیریت پیچیده‌تری دارند. از سوی دیگر، باتری‌های کوچک‌تر ممکن است نتوانند تقاضا را به‌طور مؤثر برآورده کنند.
۴. افزایش کارایی: با انتخاب ساینز مناسب باتری، می‌توان کارایی سیستم را افزایش داد. باتری‌هایی که بیش‌ازحد بزرگ یا کوچک هستند، ممکن است در زمان‌های خاصی عملکرد بهینه‌ای نداشته باشند که می‌تواند منجر به هدر رفت انرژی و کاهش بهره‌وری شود.
۵. پشتیبانی از تقاضای اوج: ساینز بهینه باتری‌ها می‌تواند به تأمین انرژی در زمان‌های اوج مصرف کمک کند. این امر به‌ویژه در ریز شبکه‌ها که ممکن است با تقاضای غیر قابل پیش‌بینی مواجه شوند، بسیار مهم است.
۶. توسعه پایدار: انتخاب ساینز مناسب باتری‌ها می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کرده و در نتیجه تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهد. این امر در راستای اهداف توسعه پایدار قرار دارد. در نهایت، انتخاب ساینز بهینه باتری‌ها باید بر اساس تحلیل دقیق نیازهای انرژی، الگوهای مصرف و ویژگی‌های منابع تولید انرژی موجود در ریز شبکه انجام شود تا بهترین نتایج ممکن حاصل گردد. در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش نیاز به منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر، گسترش و توسعه ریز شبکه‌ها به یکی از موضوعات کلیدی در حوزه انرژی تبدیل شده است. ریز شبکه‌ها به‌عنوان سیستم‌های محلی تولید و توزیع انرژی، قابلیت مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌آورند. یکی از اجزای حیاتی در این سیستم‌ها، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی هستند که نقش مهمی در تضمین عملکرد قابل‌اعتماد و اقتصادی ریز شبکه‌ها ایفا می‌کنند. با این حال، اندازه‌گیری بهینه ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی باتری‌ها به دلیل وجود عوامل بحرانی متعدد، چالش‌های خاصی را به همراه دارد. این عوامل شامل ویژگی‌های مختلف فناوری‌های باتری، تأثیر عمق تخلیه و تعداد چرخه‌های شارژ و دشارژ بر کیفیت ذخیره‌سازی انرژی و همچنین هماهنگی حالت‌های بهره‌برداری ریز شبکه است. نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند منجر به کاهش دقت و عملی بودن نتایج اندازه‌گیری شود. در این راستا، مقاله حاضر یک مدل جامع برای اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی باتری در کاربردهای ریز شبکه ارائه می‌دهد که تمامی عوامل بحرانی را مدنظر قرار می‌دهد. با استفاده از برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح، این مدل به تحلیل عمیق‌تری از ابعاد مختلف ذخیره‌سازی انرژی باتری پرداخته و رابطه غیرخطی بین عمق تخلیه و چرخه عمر آن را با رویکرد خطی‌سازی قطعه‌ای خطی مدل‌سازی می‌کند. شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی قادر است به بهینه‌سازی اندازه، فناوری، تعداد و حداکثر عمق تخلیه باتری‌ها بپردازد و در نتیجه دقت و عملی بودن راه‌حل‌های اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی را افزایش دهد.



۱-۲- مرور ادبیات و نوآوری

با توجه به افزایش نیاز به منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر، گسترش و توسعه ریز شبکه‌ها به یکی از موضوعات کلیدی در حوزه انرژی تبدیل شده است. ریز شبکه‌ها به عنوان سیستم‌های محلی تولید و توزیع انرژی، قابلیت مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌آورند [۱]. یکی از اجزای حیاتی در این سیستم‌ها، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی هستند که نقش مهمی در تضمین عملکرد قابل اعتماد و اقتصادی ریز شبکه‌ها ایفا می‌کنند [۲]. با این حال، اندازه‌گیری بهینه ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی باتری‌ها به دلیل وجود عوامل بحرانی متعدد، چالش‌های خاصی را به همراه دارد [۳]. تحقیقات نشان می‌دهد که ویژگی‌های مختلف فناوری‌های باتری، تأثیر عمق تخلیه و تعداد چرخه‌های شارژ و دشارژ بر کیفیت ذخیره‌سازی انرژی از جمله عوامل کلیدی هستند که باید در نظر گرفته شوند [۴]. نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند منجر به کاهش دقت و عملی بودن نتایج اندازه‌گیری شود [۵،۶]. در این راستا، مطالعات گذشته عمدتاً بر روی یک یا دو عامل خاص تمرکز کرده‌اند و گپ‌های قابل توجهی در ادبیات موجود وجود دارد که نیاز به مدل‌سازی جامع‌تری دارد [۷]. ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند تولید اضافی تجدیدپذیر را ذخیره کند تا در زمان مناسب از نظر اقتصادی (مانند آربیتراژ انرژی) یا از نظر فنی (مانند تنظیم فرکانس و ولتاژ) مورد استفاده قرار گیرد [۸]. کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی در ریز شبکه‌ها می‌توانند بیشتر به دو دسته کاربردهای انرژی و کاربردهای توان تقسیم شوند [۹]. فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی که دارای چگالی توان بالا و پاسخ سریع هستند، به عنوان بهترین گزینه‌ها برای کاربردهای کیفیت توان و تنظیم فرکانس شناخته می‌شوند. از طرف دیگر، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی که دارای چگالی انرژی بالا و زمان تخلیه طولانی هستند، برای کاربردهای بلندمدت شامل کاهش اوج مصرف و آربیتراژ انرژی مناسب هستند. در میان این فناوری‌ها، فناوری باتری به عنوان جذاب‌ترین گزینه به دلیل بلوغ فناوری و توانایی ارائه هر دو چگالی انرژی و توان کافی در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. تخریب باتری ارتباط زیادی با عملکرد آن دارد. عمق تخلیه باتری و تعداد چرخه‌های شارژ/تخلیه انجام شده تأثیر زیادی بر نرخ تخریب باتری دارد. رابطه بین این پارامترهای بهره‌برداری و عمر باتری باید در هنگام بررسی مسائل عملکرد یا برنامه‌ریزی باتری مدنظر قرار گیرد. یکی از رویکردهای رایج که برای در نظر گرفتن پدیده تخریب باتری در مسائل عملکرد باتری استفاده می‌شود، افزودن یک عبارت اضافی به تابع هدف است که هزینه تخریب باتری را به دلار بر کیلووات ساعت (بر اساس انرژی شارژ/تخلیه شده) لحاظ می‌کند [۱۱-۱۳]. با این حال، در مسائل برنامه‌ریزی باتری معمولاً از مدل Ah-throughput برای تخمین عمر باتری استفاده می‌شود [۱۴، ۱۵]. در این مدل، انرژی کل تحویلی توسط باتری در طول افق زمانی برنامه‌ریزی محاسبه و با مقدار مورد انتظار آمپر-ساعت (Ah) که باتری می‌تواند در طول عمر خود ارائه دهد، مقایسه می‌شود. این مقدار معمولاً توسط تولیدکننده ارائه می‌شود. با این حال، این روش ممکن است تخمین نادقیقی از عمر باتری ارائه دهد، زیرا رابطه بین عمق تخلیه باتری و تعداد چرخه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. موضوع اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی در ریز شبکه‌ها برای کاربردهای توان و انرژی به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. تعیین اندازه مناسب ذخیره‌سازی انرژی برای تنظیم فرکانس در یک ریز شبکه جزیره‌ای در [۱۶، ۱۷] ارائه شده است که باتری به گونه‌ای اندازه‌گیری شده است که خدمات تنظیم فرکانس را ارائه دهد و بنابراین، قابلیت اقتصادی نصب باتری در ریز شبکه بررسی نشده است. اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی برای کاربردهای انرژی در [۱۸-۲۰] مطالعه شده است. اندازه بهینه ذخیره‌سازی انرژی که هزینه کل برنامه‌ریزی یک ریز شبکه متصل به شبکه را به حداقل می‌رساند، در [۱۸، ۱۹] تعیین شده است. در [۲۰]، تحلیل حساسیت هزینه برای فناوری‌ها و اندازه‌های مختلف باتری در یک ریز شبکه جزیره‌ای ارائه شده است. در [۲۱، ۲۲]، یک مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای بررسی تأثیر باتری و پاسخ به تقاضا بر مسئله توسعه شبکه توزیع در حضور تولیدکننده‌های پراکنده تجدیدپذیر پیاده‌سازی شده است. اندازه‌گیری بهینه برای یک باتری ردوکس وانادیوم در [۲۳] بررسی شده است که در آن از برنامه‌ریزی دینامیک برای حل مسئله تعهد واحد روزانه برای ریز شبکه استفاده شده است. پس از بررسی مطالعات گذشته، می‌توان نوشت:

- استفاده از بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت برای محاسبه اندازه بهینه باتری
- در نظر گرفتن یک فناوری باتری واحد و نادیده گرفتن دامنه وسیع باتری‌های موجود با ویژگی‌های فنی و اقتصادی مختلف
- نادیده گرفتن تأثیر برخی عوامل تعیین‌کننده بر عمر باتری مانند عمق تخلیه باتری و تعداد چرخه‌های شارژ/تخلیه
- تمرکز صرف بر روی یک حالت بهره‌برداری (متصل به شبکه یا جزیره‌ای)
- بررسی عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر انرژی و بار الکتریکی در این خصوص کمتر مورد بررسی قرار گرفته است

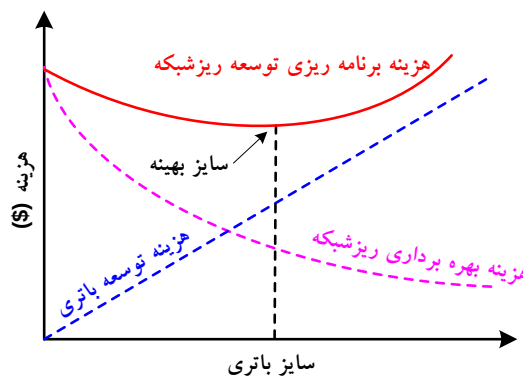


مدل به کار رفته در این مقاله ارتقاء یک ریز شبکه با باتری، برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بهبود قابلیت اطمینان تأمین انرژی را در نظر می‌گیرد. در بخش دوم این مقاله مدل‌سازی مسئله، در بخش سوم مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی عددی و در بخش پنجم نتیجه‌گیری آمده است.

۲- مدل‌سازی مسئله

۲-۱- اندازه باتری

هزینه سرمایه‌گذاری باتری عمدتاً به اندازه آن، یعنی توان و ظرفیت انرژی آن بستگی دارد. باتری‌های بزرگ‌تر از نظر اقتصادی جذاب نیستند، در حالی که باتری‌های کوچک‌تر ممکن است نتوانند مزایای مورد نظر را ارائه دهند. شکل (۱) تأثیر اندازه باتری بر هزینه برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه را نشان می‌دهد [۱۹]، جایی که افزایش اندازه به طور خطی هزینه سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد و در عین حال هزینه بهره‌برداری را به طور غیر خطی کاهش می‌دهد. نقطه بهینه نقطه‌ای است که مجموع این دو هزینه حداقل باشد.



شکل (۱): هزینه برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه در مقابل اندازه باتری [۱۹]

۲-۲- فناوری باتری

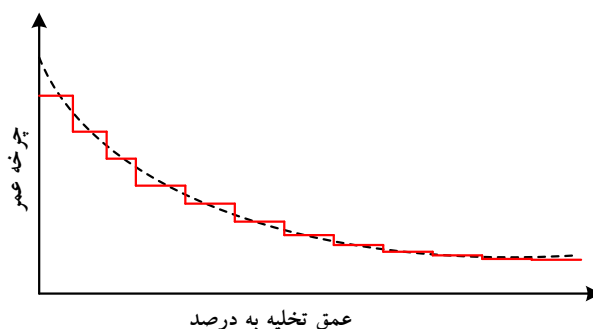
در حوزه فناوری‌های باتری، انواع مختلفی با ویژگی‌های متفاوت از جمله باتری‌های سرب-اسید، سدیم سولفور (NaS)، لیتیوم-یون (Li-ion)، نیکل-کادمیوم (NiCd) و وانادیوم ردوکس (VR) وجود دارد. هزینه سرمایه‌گذاری باتری‌ها معمولاً شامل هزینه توان به ازای هر کیلووات و هزینه انرژی به ازای هر کیلووات ساعت است. اگرچه این عوامل در انتخاب فناوری مناسب برای ادغام در ریز شبکه اهمیت دارند، اما تنها عواملی نیستند که باید مورد توجه قرار گیرند. به عنوان مثال، درست است که باتری سرب-اسید کمترین هزینه سرمایه‌گذاری را در میان سایر فناوری‌ها دارد، اما ممکن است بهترین گزینه برای انجام کاربردهایی که نیاز به شارژ و دشارژ مکرر دارند، مانند تراز کردن بار و آربیتراژ انرژی، نباشد؛ زیرا این باتری‌ها دارای عمر مفید پایین و هزینه نگهداری بالایی هستند.

۲-۳- عمق تخلیه باتری

کاهش عمر باتری عمدتاً به دو عامل پیری تقویمی و پیری چرخه‌ای بستگی دارد. پیری تقویمی حتی زمانی که باتری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد نیز اتفاق می‌افتد و تحت تأثیر دما و ولتاژ سلول‌های باتری قرار دارد. در مقابل، پیری چرخه‌ای ناشی از استفاده واقعی از باتری است و به طور قابل توجهی تحت تأثیر عمق تخلیه و تعداد چرخه‌های شارژ و دشارژ قرار می‌گیرد. نادیده گرفتن پیری چرخه‌ای در برنامه‌ریزی توسعه می‌تواند منجر به ارزیابی‌های اقتصادی نادرست شود، زیرا ممکن است باتری قبل از پایان عمر مفید پیش‌بینی شده پروژه نیاز به تعویض داشته باشد. تولیدکنندگان باتری، داده‌هایی درباره رابطه بین عمر باتری و عمق تخلیه ارائه می‌دهند که معمولاً به صورت یک منحنی نمایش داده می‌شود، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است. با افزایش عمق تخلیه، عمر باتری تمایل به کاهش دارد.



فناوری‌های مختلف باتری روابط متفاوتی بین عمر و عمق تخلیه نشان می‌دهند. در این مقاله، منحنی‌های عمق تخلیه با استفاده از تقریب خطی قطعه‌ای خطی‌سازی می‌شود، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است. افزایش تعداد بخش‌ها دقت تقریب را بهبود و متعاقباً نیازمندی‌های محاسباتی را نیز افزایش می‌دهد.



شکل (۲): خطی‌سازی چرخه عمر به عنوان تابعی از عمق تخلیه

۲-۴- فرمول‌بندی مسئله

هدف از مسئله انتخاب و اندازه‌گیری باتری پیشنهادی، کاهش هزینه‌های کلی برنامه‌ریزی توسعه است، درحالی‌که به محدودیت‌های بهره‌برداری و بودجه‌ای موجود پایبند باشد. تابع هدف موردنظر در رابطه (۱) آمده است.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i \in \Lambda_G} \sum_d \sum_t Q_i(P_{idt0}, Y_{idt0}) + \sum_d \sum_t \omega_{dt} \times P_{dt0}^X + \sum_s \pi_s \sum_{j \in \Lambda_K} \sum_d \sum_t \varpi_{bdts} \times \zeta \\ & + \sum_{i \in \Lambda_B} \sum_{j \in \Lambda_K} (PR_{ij}(CBP_i + MCB_i) + CR_{ij}(CBE_i + BIC_i)) \end{aligned} \quad (1)$$

که در رابطه فوق:

j	شاخص باس
d	شاخص روز
t	شاخص ساعت
i	شاخص منابع انرژی توزیع شده
s	شاخص سناریو
Λ_B	مجموعه فناوری‌های مختلف باتری
Λ_K	مجموعه باس‌های ریز شبکه
Λ_G	مجموعه واحدهای تولیدی قابل توزیع
CBE	هزینه سالانه انرژی باتری
CBP	هزینه سالانه توان باتری
BIC	هزینه نصب سالانه باتری
MCB	هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه باتری
π_s	احتمال سناریوهای جزیره‌ای
ζ	مقدار بار ازدست‌رفته (\$/kWh)
ω_{dh}	قیمت برق در بازار
PR_{ij}, CR_{ij}	انرژی و توان نامی باتری
Q_i	تابع هزینه واحدهای تولیدی محلی ریز شبکه
ϖ_{jdt}	کاهش بار
Y_{ids}	وضعیت تعهد واحدهای قابل پخش



دو جمله اول در معادله (۱) هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه را نشان می‌دهند که فقط در حالت متصل به شبکه یا بهره‌برداری عادی مربوط هستند درحالی‌که در حالت جزیره‌ای، هدف اصلی کاهش بار کاهش یافته است. اگر ریز شبکه به هر دلیلی از شبکه اصلی قطع شود، جمله سوم در معادله (۱) هزینه‌های مرتبط با عدم تأمین نیاز ریز شبکه را در نظر می‌گیرد که به ارزیابی قابلیت اطمینان مربوط می‌شود. مهم است که توجه شود در حین بهره‌برداری عادی ریز شبکه، هیچ بار کاهشی وجود نخواهد داشت زیرا هر تفاوتی بین تولید موجود و تقاضا توسط شبکه اصلی پوشش داده می‌شود. به همین دلیل از زیرنویس صفر در معادله (۱) استفاده شده است. شاخص S برای سناریوهای جزیره‌ای اختصاص داده شده است که می‌تواند از صفر تا S متغیر باشد. سناریویی که در آن $S=0$ نشان‌دهنده بهره‌برداری متصل به شبکه است، درحالی‌که سناریوهای $S=1$ تا S شرایط مختلف جزیره‌ای را نشان می‌دهند. برای کمیت‌سازی تأثیر اقتصادی انرژی غیرقابل‌ارائه، از ارزش بار ازدست‌رفته ($VOLL^1$) استفاده می‌شود که تمایل مشتری را برای پرداخت هزینه خدمات برق مطمئن منعکس می‌کند. شاخص $VOLL$ بسته به عواملی مانند نوع مشتری، موقعیت جغرافیایی و مدت زمان قطع برق متفاوت است. برای در نظر گرفتن احتمال هر سناریوی جزیره‌ای، π_s به عنوان یک عامل وزنی برای هر سناریو معرفی می‌شود. از آنجایی‌که در حالت متصل به شبکه هیچ بار کاهشی وجود ندارد، هزینه انرژی غیرقابل‌ارائه برای سناریوی اول (یعنی $S=0$) صفر است. با توجه به نوسانات حداقلی مورد انتظار در تقاضای ریز شبکه، خروجی DG^2 و قیمت‌های برق در طول افق برنامه‌ریزی، این مطالعه از یک سال داده تاریخی استفاده می‌کند. با این حال، اگر نیاز به در نظر گرفتن تغییرات سالانه باشد، مدل پیشنهادی به راحتی می‌تواند گسترش یافته و برای زمان‌های طولانی‌تر سازگار شود. سرمایه‌گذاری‌ها در سال اول افق برنامه‌ریزی انجام می‌شود که امکان مدل‌سازی و شبیه‌سازی سالانه را فراهم می‌کند. این رویکرد با برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت کلان متفاوت است، جایی که دارایی‌های جدید در طول چندین سال معرفی می‌شوند و نیاز به مطالعات برنامه‌ریزی پویا چندساله دارد. هزینه سرمایه‌گذاری در باتری شامل هزینه‌های سرمایه‌ای مربوط به توان و انرژی، هزینه‌های سالانه نگهداری و هزینه‌های نصب است. فرض بر این است که هزینه سیستم تبدیل انرژی در هزینه سرمایه‌ای توان گنجانده شده است. هزینه نگهداری سالانه معمولاً بر اساس توان باتری تعیین می‌شود، درحالی‌که هزینه نصب بر اساس ظرفیت انرژی باتری محاسبه می‌گردد. هر دو هزینه سرمایه‌ای باتری و هزینه نصب با استفاده از رابطه (۲) به صورت سالیانه محاسبه می‌شوند (D نرخ بهره است و T طول عمر پروژه).

$$\text{Annualized cost} = \frac{D(1+D)^T}{(1+D)^T - 1} \times \text{One time cost} \quad (2)$$

واحدهای باتری نصب شده در حالت متصل به شبکه برای افزایش قابلیت اقتصادی ریز شبکه استفاده می‌شوند. این واحدها انرژی را در زمان‌های با قیمت پایین ذخیره کرده و سپس انرژی ذخیره شده را به سیستم برمی‌گردانند تا با توسط تقاضای محلی استفاده شود یا در زمان‌های با قیمت بالا به شبکه برق فروخته شود؛ اما در حالت جزیره‌ای، واحدهای باتری برای بهبود قابلیت اطمینان ریز شبکه به کار می‌روند، به گونه‌ای که بار کاهش یافته و هزینه انرژی غیر خدمت‌رسانی شده را به حداقل می‌رسانند. این هدف تحت تأثیر چندین محدودیت بهره‌برداری و فنی مرتبط با ریز شبکه، منابع تولید پراکنده و باتری قرار دارد که باید مورد توجه قرار گیرد.

۵-۲- محدودیت‌های مرتبط با ریز شبکه

محدودیت‌های سطح سیستم ریز شبکه شامل تعادل توان در گره‌ها، تبادل توان با شبکه برق اصلی، محدودیت‌های مربوط به کاهش بار و جریان توان در شبکه توزیع است که به ترتیب در روابط (۳)–(۶) آمده است.

$$\sum_{i \in \{\Lambda_G, \Lambda_W\}} \Delta_{ij} S_{idts} + \sum_{i \in \Lambda_B} (P_{ijdts}^{ch} + P_{ijdts}^{dch}) + \sum_{l \in \Lambda_L} \Pi_{lj} p_{ldts} + S_{dts}^M + \varpi_{jdt} = DE_{jdt} \quad (3)$$

$$\forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s$$

$$-S_{dts}^{M, \max} \sigma_{dts} \leq S_{dts}^M \leq S_{dts}^{M, \max} \sigma_{dts} \quad \forall d, \forall t, \forall s \quad (4)$$

$$0 \leq \varpi_{jdt} \leq (D_{jdt} - CD_{jdt}) \quad \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (5)$$

$$-p_l^{\max} \leq p_{ldts} \leq p_l^{\max} \quad \forall l \in \Lambda_L, \forall d, \forall t, \forall s \quad (6)$$



که:

l	شاخص خطوط ریز شبکه
Λ_L	مجموعه خطوط ریز شبکه
Λ_W	مجموعه واحدهای تولیدی تجدیدپذیر
CD_{jdt}, DE_{jdt}	تقاضای کل بار و تقاضای بار بحرانی در باس j ، روز d ، ساعت t
$p_l^{\max}$	حداکثر ظرفیت توان خطوط ریز شبکه
$S^{M, \max}$	حداکثر ظرفیت توان خط اتصال ریز شبکه به شبکه برق
σ_{dhs}	وضعیت اتصال ریز شبکه/شبکه برق
Δ_{ij}	عنصر ماتریس تلاقی تولید-باس (۱ اگر واحد i به باس b متصل باشد، در غیر این صورت ۰)
Π_{lj}	عنصر ماتریس وقوع خط-باس (۱ اگر خط l به باس b متصل باشد، در غیر این صورت ۰)
$P_{ijdts}^{dch}, P_{ijdts}^{ch}$	قدرت شارژ و دشارژ باتری
p_{ldhs}	توان عبوری از خط ریز شبکه
S_{ids}	توان خروجی منابع توزیع شده
S_{dts}^M	توان انتقالی با شبکه برق

توازن توان در معادله (۳) تضمین می‌کند که در هر باس، توان تولیدشده از منابع انرژی توزیع شده واقع در آن باس به علاوه یا منهای توان جاری برابر با تقاضای محلی باشد. اگر تولید توان کافی نباشد، بار باید کاهش یابد تا توازن قدرت برقرار شود. توان باتری در حین تخلیه مثبت و در حین شارژ منفی است. توان شبکه زمانی مثبت است که توان از شبکه به ریز شبکه جریان پیدا کند و در غیر این صورت منفی است. توجه شود که توان شبکه به جز در نقطه اتصال مشترک (PCC^*) در تمام باس‌ها صفر است. لازم به ذکر است که تلفات توان و همچنین اندازه و زاویه ولتاژ باس در این کار نادیده گرفته شده‌اند. معادله (۴) حداکثر محدودیتی را بر روی توان منتقل شده از طریق خط متصل کننده ریز شبکه به شبکه تحمیل می‌کند. این معادله با شامل کردن یک پارامتر باینری σ که حالت جزیره‌ای ریز شبکه را نشان می‌دهد، اصلاح می‌شود. به عبارت دیگر، اگر مقدار σ برابر با صفر باشد، ریز شبکه از شبکه جدا شده و در حالت جزیره‌ای کار می‌کند؛ درحالی که اگر برابر با ۱ باشد، ریز شبکه به شبکه متصل است. مقدار Z توسط برنامه ریز ریز شبکه قبل از حل مسئله برنامه ریزی توسعه تعیین می‌شود و نشان دهنده تعداد ساعتهایی است که در طول سال ریز شبکه در حالت جزیره‌ای کار می‌کند. یکی از انگیزه‌های استقرار ریز شبکه، استمرار خدمات برای بارهای حیاتی است. بارهای حیاتی معمولاً با $VOLL$ بالا مرتبط هستند، بنابراین از نظر اقتصادی توصیه نمی‌شود که آن‌ها برای کاهش بار مدنظر قرار گیرند. با توجه به این نکته، محدودیت‌های کاهش بار می‌توانند به صورت معادله (۵) تعریف شوند. جریان توان در شبکه توزیع ریز شبکه توسط ظرفیت خطوط در معادله (۶) محدود شده است. یک شبکه توزیع شعاعی در نظر گرفته شده است، بنابراین معادله (۳) و معادله (۶) می‌توانند به طور مؤثری جریان توان را در شبکه توزیع ریز شبکه مدل سازی کنند. در مدل به کار رفته فرض بر این است که تولیدات و بارهای ریز شبکه در نزدیکی یکدیگر قرار دارند، بنابراین تلفات فعال نسبت به توان منتقل شده از طریق خطوط توزیع ریز شبکه کوچک بوده و قابل نادیده گرفتن است. در این کار، نفوذ کم DGهای تجدیدپذیر فرض شده است. به همین دلیل، نادیده گرفتن ریزش DGهای تجدیدپذیر و توانایی استفاده از واحدهای تنظیم توان DGهای تجدیدپذیر برای تأمین یا جذب توان راکتیو منطقی است. با این حال، باید دانست که تحت نفوذ بالای DGهای تجدیدپذیر، این عوامل باید در مسئله توسعه ریز شبکه گنجانده شوند.

۲-۶- محدودیت‌های مرتبط با DGهای توزیع شده

توان خروجی DGهای قابل کنترل، به حداکثر و حداقل ظرفیت‌های آن‌ها (رابطه (۷)) محدود است. علاوه بر این، تغییرات توان در دو بازه زمانی متوالی، یعنی زمان افزایش و کاهش توان (روابط (۸) و (۹)) و همچنین محدودیت‌های حداقل زمان بالا و پایین بودن نیز باید در نظر گرفته شوند (روابط (۱۰) و (۱۱)). سایر محدودیت‌ها مانند محدودیت‌های مربوط به انتشار آلاینده‌ها و سوخت نیز به راحتی قابل اضافه کردن هستند.



$$P_i^{\min} Y_{idt} \leq S_{ids} \leq P_i^{\max} Y_{idt} \quad \forall i \in \Lambda_G, \forall d, \forall t, \forall s \quad (7)$$

$$S_{ids} - S_{id(t-1)s} \leq U_i^R \quad \forall i \in \Lambda_G, \forall d, \forall t, \forall s \quad (8)$$

$$S_{id(t-1)s} - S_{ids} \leq D_i^R \quad \forall i \in \Lambda_G, \forall d, \forall t, \forall s \quad (9)$$

$$N_{idt}^{\text{on}} \geq U_i^T (Y_{idt} - Y_{id(t-1)}) \quad \forall i \in \Lambda_G, \forall d, \forall t \quad (10)$$

$$N_{idt}^{\text{off}} \geq D_i^T (Y_{id(t-1)} - Y_{idt}) \quad \forall i \in \Lambda_G, \forall d, \forall t \quad (11)$$

که:

$$\begin{aligned} U_i^R, D_i^R & \text{ نرخ‌های کاهش و افزایش توان} \\ U_i^T, D_i^T & \text{ حداقل زمان‌های کاهش و افزایش توان} \end{aligned}$$

۲-۷- محدودیت‌های مرتبط با باتری

اگرچه در این مقاله فناوری‌های مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما معادلات زیر می‌توانند به‌طور دقیق عملکرد آن‌ها را مدل‌سازی کنند.

$$P_i^{\min} u_{ij} \leq PR_{ij} \leq P_i^{\max} u_{ij} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K \quad (12)$$

$$\beta_i^{\min} \times PR_{ij} \leq CR_{ij} \leq \beta_i^{\max} \times PR_{ij} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall b \in \Lambda_K \quad (13)$$

$$0 \leq P_{ijds}^{\text{dch}} \leq PR_{ij} \times y_{ibds} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (14)$$

$$-PR_{ij} \times (1 - y_{ijds}) \leq P_{ijds}^{\text{ch}} \leq 0 \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (15)$$

$$\xi_{ijds} = (y_{ijds} - y_{ijd(t-1)s}) y_{ijds} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (16)$$

$$\sum_d \sum_t \pi_s \xi_{ijds} \leq \frac{1}{T} \sum_{m \in N} \gamma_{im} v_{ibm} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall s \quad (17)$$

$$\sum_{m \in N} v_{ijm} \leq u_{ib} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K \quad (18)$$

$$C_{ijds} = C_{ijd(t-1)s} - \frac{P_{ijds}^{\text{dch}}}{\eta_i^{\text{dch}}} - P_{ijds}^{\text{ch}} \eta_i^{\text{ch}} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (19)$$

$$\left(1 - \sum_{m \in N} \lambda_{ijm} v_{ibm}\right) CR_{ij} \leq C_{ijds} \leq CR_{ij} \quad \forall i \in \Lambda_B, \forall j \in \Lambda_K, \forall d, \forall t, \forall s \quad (20)$$

که:

شاخص بخش‌های عمق تخلیه	m
حداکثر و حداقل نسبت رتبه انرژی باتری به توان	$\beta_i^{\min}, \beta_i^{\max}$
حداکثر عمق تخلیه باتری	λ_{ijm}
طول عمر باتری	γ_{im}
راندمان رفت و برگشت باتری	η_i
انرژی ذخیره‌شده در باتری در هر بازه زمانی	C_{ijds}
وضعیت بهره‌برداری باتری	y_{ijds}



وضعیت سرمایه‌گذاری باتری (۱ در صورت نصب، ۰ در غیر این صورت)

U_{ij}

متغیر باینری که مقدار انتخابی حداکثر عمق تخلیه باتری را برای بخش تخلیه متر نشان می‌دهد

V_{ijm}

(در صورت انتخاب ۱، در غیر این صورت ۰)

نشانگر چرخه باتری

ξ_{ijdhs}

توان نامی باتری به مقادیر حداکثر و حداقل نشان داده شده در معادله (۱۲) محدود است. برای برخی از فناوری‌های باتری، مانند مواردی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند، توان نامی با انرژی نامی مرتبط است و نمی‌توان آن‌ها را به صورت مستقل اندازه‌گیری کرد. نسبت ظرفیت به توان (α) برای تعیین ظرفیت باتری و زمان حداکثر تخلیه در توان نامی در رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. اگر باتری‌های جریانی مانند باتری وانیوم ردوکس در نظر گرفته شوند، این محدودیت می‌تواند به راحتی تغییر کند تا توان نامی و انرژی نامی از هم تفکیک شوند. متغیر باینری U برای نشان دادن وضعیت سرمایه‌گذاری یک فناوری باتری استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی چند دوره‌ای، این متغیر دودویی باید وابسته به زمان باشد. با این حال، در این کار فرض شده است که باتری در سال اول نصب می‌شود. توان‌های شارژ/تخلیه باتری به توان نامی نصب شده مطابق روابط (۱۴)، (۱۵) محدود شده‌اند که همچنین ایجاب می‌کند که توان باتری در حالت شارژ منفی و در حالت تخلیه مثبت باشد. متغیر باینری γ برای نشان دادن وضعیت عملیاتی باتری استفاده می‌شود. باتری تنها زمانی می‌تواند تخلیه شود که γ برابر با ۱ باشد و می‌تواند شارژ شود زمانی که γ برابر با صفر باشد. هر فناوری باتری دارای یک چرخه عمر خاص است که به عمق تخلیه مرتبط با آن بستگی دارد. چرخه باتری معمولاً به عنوان یک چرخه کامل شارژ و تخلیه تعریف می‌شود. رابطه (۱۶) برای تعیین چرخه‌های باتری استفاده می‌شود. مقدار γ هر بار که فرآیند تخلیه آغاز می‌شود، برابر با ۱ خواهد بود و در غیر این صورت صفر است. مجموع چرخه‌های باتری در طول افق زمانی برنامه‌ریزی نباید از چرخه عمر تعیین شده مرتبط با عمق تخلیه حداکثری انتخاب شده و عمر پروژه مورد نظر مطابق رابطه (۱۷) فراتر رود. به عبارت دیگر، باتری نصب شده نیازی به تعویض در طول عمر پروژه مورد نظر ندارد و بنابراین هزینه تعویض باتری در رابطه (۱) گنجانده نشده است. مقدار γ بر اساس عمق تخلیه حداکثری انتخاب شده تعیین می‌شود که فرض شده است منحنی به N بخش تقسیم شده است. γ یک متغیر باینری است که نمایانگر بخش عمق تخلیه حداکثری انتخاب شده است. لازم به ذکر است که خطی‌سازی منحنی عمق تخلیه باتری نسبت به چرخه عمر برای هر فناوری باتری مورد نظر باید قبل از حل مسئله بهینه‌سازی انجام شود. به عبارت دیگر، تعداد چرخه‌های مرتبط با هر مقدار عمق تخلیه به عنوان ورودی به مدل پیشنهادی وارد می‌شود. رابطه (۱۸) تضمین می‌کند که تنها یک مقدار عمق تخلیه حداکثری برای هر واحد باتری نصب شده در نظر گرفته شود. انرژی ذخیره شده در باتری در هر بازه زمانی برابر با انرژی ذخیره شده در بازه قبلی منهای انرژی تخلیه یا شارژ شده مطابق رابطه (۱۹) است. باتری نمی‌تواند بیشتر از انرژی نامی خود شارژ شود و نمی‌تواند کمتر از حداقل مقدار خود که توسط عمق تخلیه حداکثری تعیین شده تعریف شده است، مطابق رابطه (۲۰) تخلیه شود. لازم به ذکر است که باتری می‌تواند در هر مقدار عمق تخلیه‌ای کمتر از عمق تخلیه حداکثری تعیین شده، تخلیه شود. در نهایت، هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای باتری نصب شده به بودجه (BD) موجود مطابق رابطه (۲۱) محدود است.

$$\sum_{i \in \Lambda_B} \sum_{j \in \Lambda_K} (PR_{ij} (CBP_i + MCB_i) + CR_{ij} (CBE_i + BIC_i)) \leq BD \quad (21)$$

لازم به ذکر است که این مسئله از دیدگاه توسعه‌دهنده ریز شبکه حل شده است، به این معنی که صرفه‌جویی‌ها در شبکه بالادستی، مانند به تأخیر انداختن ارتقاءهای توزیع و انتقال و همچنین مزایای کاهش گرفتگی خطوط، لحاظ نشده‌اند.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

در فرمولاسیون برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه ارائه شده، از داده‌های پیش‌بینی شده ساعتی برای تولید منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، تقاضای بار و قیمت برق استفاده شده است. با این حال، ممکن است خطاهای پیش‌بینی به وجود آید زیرا این پارامترها تحت تأثیر عوامل غیرقابل کنترل مانند شرایط جوی، رفتار مشتریان و حوادث مرتبط با گرفتگی خطوط یا قطعی قرار دارند. تقاضای برق نقش بسیار مهمی در رفتار قیمت‌های دوره‌ای برق دارد. به همین دلیل، تحلیل رابطه بین قیمت‌های برق و بارها در حال حاضر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های برق تولید شده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی این است که در دسترس بودن



آن به‌طور مطمئن، به‌ویژه در زمان اوج تقاضا، تضمین شده نیست. از نظر اقتصادی، این جنبه از کفایت سیستم، یعنی تأمین ظرفیت کافی برای پاسخگویی مطمئن به تقاضای اوج، به معنای آن است که برق در ساعات اوج ارزش بیشتری دارد؛ بنابراین، برای بهتر نشان دادن این موضوع، باید پروفایل‌های بار و قیمت برق با یکدیگر همبسته باشند. لازم به ذکر است که در این مقاله همبستگی بار و قیمت نادیده گرفته شده است. استراتژی مدل‌سازی پیشنهادی این مقاله به شرح زیر است.

۱-۳- مدل‌سازی قیمت برق مبتنی بر سناریو

در بازارهای برق، شرکت‌های توزیع نیاز دارند که برق را از بازار خریداری کنند. به دلیل ماهیت متغیر و نامشخص بازارهای برق رقابتی، قیمت‌های بازار نیز متغیر و بنابراین نامشخص هستند؛ بنابراین، برای اهداف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی، شرکت‌های توزیع ممکن است نیاز داشته باشند که قیمت‌های آینده بازار را پیش‌بینی کنند تا برنامه‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی خود را زمان‌بندی کنند. پیش‌بینی چنین سیگنال متغیر و نامشخصی منجر به خطاهای پیش‌بینی می‌شود که بر برنامه‌های بهره‌برداری و زمان‌بندی‌ها تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، در این بخش از ترکیب روش خوشه‌بندی فازی (FCM^4) و شبیه‌سازی مونت کارلو^۵ برای مدل‌سازی سناریو محور قیمت‌های برق در بازار استفاده می‌شود. شایان ذکر است که پیش‌بینی میانگین و واریانس قیمت بازار فرض می‌شود که با استفاده از تکنیک‌هایی مانند سری‌های زمانی و شبکه‌های عصبی مصنوعی محاسبه شده است. در ابتدا، با استفاده از پیش‌بینی میانگین و واریانس قیمت مذکور، نمونه‌های قیمتی n_p با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تولید می‌شوند که در آن احتمال هر سناریو برابر با $1/n_p$ فرض می‌شود. اگرچه با نمونه‌های قیمتی بزرگ‌تر، نقشه‌برداری بهتری از مدل نامشخص انجام می‌شود، اما برنامه تصادفی حاصل بسیار بزرگ خواهد بود تا حل شود؛ بنابراین، به دلیل بار محاسباتی مسئله، نیاز به یک تعادل بین تقریب خوب و بار محاسباتی وجود دارد. به همین دلیل، تکنیک‌های کاهش سناریو به کار گرفته می‌شود تا تعداد سناریوها را کاهش دهند درحالی‌که ویژگی‌های آماری قیمت‌های برق حفظ شود. از طریق کاهش سناریو، سناریوهایی با احتمال بسیار کم و دسته‌ای از سناریوها که بسیار مشابه یکدیگر هستند حذف می‌شوند. تکنیک FCM در این مقاله به‌عنوان ایده اصلی کاهش سناریوهای قیمتی استفاده می‌شود. FCM روشی است که برای خوشه‌بندی نمونه‌های تولید شده به‌صورت تصادفی n_p ^۶ (یعنی سناریوهای قیمت بازار) به تعداد دلخواهی از خوشه‌ها استفاده می‌شود. به‌طور تعریف، یک خوشه مجموعه‌ای از اشیاء است که بین خود مشابه و با اشیاء متعلق به خوشه‌های دیگر ناپیوسته هستند. این بدان معنی است که مرکز هر خوشه می‌تواند نماینده مناسبی از سناریوهای قیمتی مشابه آن خوشه باشد. در نتیجه، FCM به‌عنوان یک ابزار مفید در کنار شبیه‌سازی مونت کارلو برای کاهش نمونه‌های قیمتی تولید شده به‌صورت تصادفی n_p در هر گام زمانی به n_r نمونه غیرمشابه استفاده می‌شود. احتمال هر سناریوی قیمتی کاهش یافته (یعنی مرکز هر خوشه قیمتی) می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$P_M = \frac{n_c}{n_p} \quad M = 1, 2, \dots, n_r \quad (22)$$

در نتیجه، یک سناریوی قیمتی (مرکز هر خوشه قیمتی) که اعضای بیشتری در خوشه خود دارد، احتمال^۷ بیشتری نسبت به سایر سناریوها خواهد داشت.

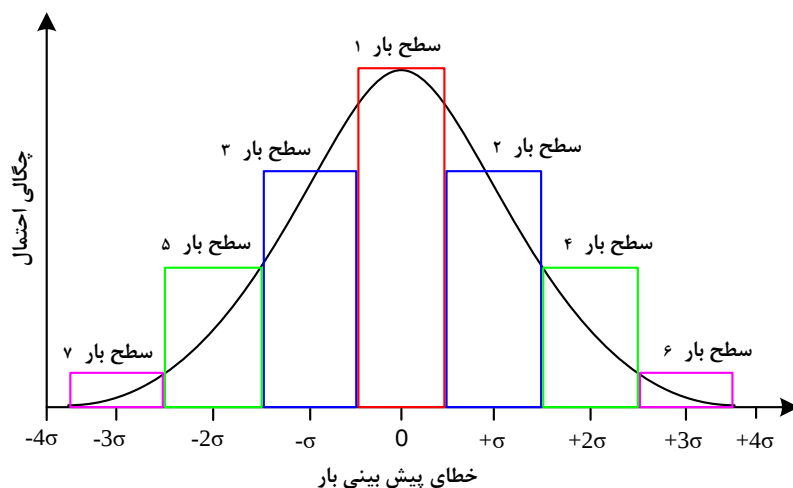
۲-۳- مدل‌سازی بار الکتریکی مبتنی بر سناریو

به دلیل خطای پیش‌بینی بار، عدم قطعیت‌های بار باید در مدل در نظر گرفته شوند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، تابع توزیع احتمال خطای پیش‌بینی بار باید تعیین شود. در این مقاله فرض شده است که خطای پیش‌بینی بار با یک توزیع نرمال نمایش داده می‌شود که در آن مقدار میانگین، بار اوج پیش‌بینی شده شرکت توزیع نیروی برق است که باید تأمین شود. در شکل (۳)، یک نمونه از تابع توزیع پیوسته خطای پیش‌بینی بار سیستم نشان داده شده است که به ۷ بازه تقسیم شده است.

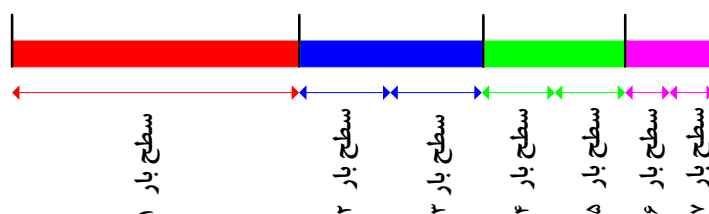
همان‌طور که در [۲۴] انجام شده است، هر بازه دارای عرضی برابر با یک انحراف معیار^۸ خطای پیش‌بینی بار است. اکنون، مکانیزم چرخ رولت^۹ برای تولید سناریوهای بار بر اساس سطوح مختلف پیش‌بینی بار و احتمالات مربوطه که از تابع توزیع احتمال مذکور به‌دست آمده است، به کار گرفته می‌شود. در این راستا، ابتدا دامنه [0,1] با احتمالات بار نرمال شده پر می‌شود همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است.



سپس یک عدد تصادفی در دامنه $[0,1]$ تولید می‌شود. اکنون، اگر عدد تصادفی تولید شده در بخش احتمال نرمال شده یک سطح پیش‌بینی بار در چرخ رولت (در میان ۷ سطح پیش‌بینی بار شکل (۴)) قرار بگیرد، آن سطح پیش‌بینی بار توسط مکانیزم چرخ رولت به عنوان یک سناریو انتخاب می‌شود. این کار تا زمانی که تعدادی سناریو تولید شود، تکرار می‌شود.



شکل (۳): یک گسسته‌سازی متداول از توزیع احتمال پیوسته خطای پیش‌بینی بار به ۷ بازه



شکل (۴): مکانیزم چرخ رولت برای احتمالات نرمال شده سطوح پیش‌بینی بار

۴- نتایج عددی

یک ریز شبکه با ۵ باس^{۱۰} که شامل یک ژنراتور گازی، یک توربین بادی و یک واحد فتوولتائیک خورشیدی است در نظر گرفته شده است. ویژگی‌ها و موقعیت منابع در ریز شبکه در جدول (۱) ارائه شده است. داده‌های ساعتی تولید منابع تجدیدپذیر و بارهای محلی از به‌دست‌آمده‌اند، درحالی‌که داده‌های ساعتی قیمت بازار برق از استخراج شده است. جزئیات بار محلی و موقعیت آن در ریز شبکه در جدول (۲) آورده شده و ویژگی‌های خطوط شبکه توزیع ریز شبکه در جدول (۳) نمایش داده شده است. نقطه اتصال مشترک که ریز شبکه را به شبکه سراسری متصل می‌کند، در باس ۱ قرار دارد. چهار فناوری باتری شامل باتری‌های سرب-اسید، نیکل-کادمیوم (NiCd)، لیتیوم-یونی (Li-ion) و سدیم-گوگرد (NaS) در شبیه‌سازی استفاده شده است. مشخصات فناوری‌های باتری در جدول (۴) نشان داده شده است. توان نامی هر فناوری باتری با یک مقدار حداکثر محدود شده است که در این مقاله فرض شده ۴ مگاوات باشد. زمان حداقل تخلیه ۱ ساعت و زمان حداکثر تخلیه ۵ ساعت در نظر گرفته شده است. از دیتاشیت‌های تولیدکنندگان باتری برای تعیین رابطه بین عمق تخلیه و چرخه عمر هر فناوری باتری استفاده شده است [۲۶]. بر اساس دیتاشیت‌های تولیدکننده، ده مقدار مختلف عمق تخلیه حداکثر برای هر فناوری باتری (یعنی $N=10$) از طریق خطی‌سازی در نظر گرفته شده است. افزایش N هم دقت و هم نیازهای محاسباتی را افزایش خواهد داد. جدول (۵) چرخه عمر فناوری‌های باتری را در مقادیر عمق تخلیه حداکثر موردنظر نشان می‌دهد. در مورد باتری لیتیوم-یونی، عمق تخلیه حداقل داده شده در دیتاشیت تولیدکننده ۵۰٪ است و هیچ اطلاعاتی برای مقادیر کمتر از آن ارائه نشده است. سناریوهای جزیره‌ای یک ساعته برای ارزیابی قابلیت اطمینان ریز شبکه تحت حالت‌های جزیره‌ای (یعنی ۲۴ سناریو برای هر روز) با احتمال یکنواخت (یعنی $\pi = 1/24$) پیاده‌سازی شده است.



جدول (۱): مشخصات واحدهای تولیدی

Min Up/Down (hour) Time	ظرفیت (MW)	ضریب هزینه (\$/MWh)	نوع	باس	واحد
۱	۷-۰	۹۰	گازی	۳	۱
-	۱-۰	۰	PV	۴	۲
-	۱-۰/۵	۰	Wind	۴	۳

جدول (۲): جزئیات تقاضای محلی ریز شبکه (R: مسکونی، C: تجاری)

VOLL (\$/MWh)	نوع بار	بار بحرانی (%)	پیک بار (MW)	باس	بار
۵۰۰۰۰	تجاری	۶۰	۶/۶۲	۳	۱
۵۰۰۰۰	تجاری-مسکونی	۳۰	۴/۴۱	۵	۲

جدول (۳): مشخصات اتصالات و ظرفیت های خطوط

ظرفیت (MW)	به باس	از باس	خط
۸	۲	۱	۱
۶	۳	۲	۲
۵	۴	۲	۳
۵	۵	۲	۴

جدول (۴): مشخصات باتری ها

η (%)	هزینه نصب (\$/kWh)	هزینه نگهداری (\$/kW/year)	هزینه انرژی نامی (\$/kWh)	هزینه توان نامی (\$/kW)	فناوری
۷۰	۲۰	۵۰	۲۰۰	۲۰۰	Lead-acid
۸۵	۱۲	۲۰	۴۰۰	۵۰۰	NiCd
۹۸	۳/۶	-	۶۰۰	۹۰۰	Li-ion
۹۵	۸	۸۰	۳۰۰	۳۵۰	NsS

جدول (۵): چرخه های عمر باتری برای مقادیر مختلف عمق دشارژ

عمق تخلیه	تعداد سیکل ها			
	Lead-acid	NiCd	Li-ion	NsS
۱۰	۸۰۰۰	۷۹۰۰	-	۱۰۰۰۰۰
۲۰	۲۵۰۰	۵۸۰۰	-	۶۰۰۰۰
۳۰	۱۵۰۰	۳۴۰۰	-	۳۰۰۰۰
۴۰	۹۵۰	۲۰۰۰	-	۱۵۰۰۰
۵۰	۷۰۰	۱۲۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰
۵۵	-	-	۷۵۰۰	-
۶۰	۵۹۰	۹۰۰	۶۹۰۰	۹۰۰۰
۶۵	-	-	۶۲۰۰	-
۷۰	۵۰۰	۸۰۰	۵۸۰۰	۷۰۰۰
۷۵	-	-	۵۰۰۰	-
۸۰	۴۵۰	۷۰۰	۴۵۰۰	۶۰۰۰
۸۵	-	-	۴۱۰۰	-
۹۰	۳۹۰	۶۰۰	۳۷۰۰	۵۰۰۰
۱۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰



چهار مورد مطالعاتی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

مطالعه موردی ۱: توسعه بهینه ریز شبکه بدون لحاظ کردن نصب باتری‌ها.

مطالعه موردی ۲: توسعه ریز شبکه در حضور نصب باتری‌ها برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین کاهش هزینه انرژی غیر خدمت‌رسانی.

مطالعه موردی ۳: این مورد تأثیر نادیده گرفتن رابطه بین عمق تخلیه باتری و چرخه عمر آن بر دقت و عملی بودن راه‌حل به‌دست‌آمده را بررسی می‌کند.

مطالعه موردی ۴: تأثیر عدم قطعیت‌ها بر راه‌حل به‌دست‌آمده در این مورد بررسی می‌شود.

مطالعه موردی ۱: برای ارزیابی دقیق مزایای نصب باتری در ریز شبکه، ابتدا حالت قبل از توسعه حل می‌شود تا امکان مقایسه با حالت نصب باتری فراهم گردد. در این حالت، مسئله بهینه‌سازی به یک مسئله زمان‌بندی بهینه کاهش می‌یابد که هدف آن حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه است. هزینه کل بهره‌برداری ریز شبکه برابر با ۶,۰۵۹,۲۵۸ دلار در سال محاسبه شده است. این هزینه شامل هزینه تولید واحدهای محلی، هزینه برق مبادله شده با شبکه اصلی و هزینه پیش‌بینی‌شده انرژی غیر خدمت‌رسانی است. مقدار انرژی غیر خدمت‌رسانی پیش‌بینی‌شده در این حالت ۶۷.۵ مگاوات ساعت در سال است. این موضوع البته تنها زمانی اتفاق می‌افتد که ریز شبکه از شبکه عمومی قطع شده و در حالت جزیره‌ای عمل کند.

مطالعه موردی ۲: این حالت برای طول عمرهای مختلف پروژه حل می‌شود. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نصب واحدهای باتری بر اساس طول عمر پروژه با نرخ بهره ۴ درصد سالانه محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، چرخه عمر باتری در طول عمر پروژه توسعه می‌یابد تا اطمینان حاصل شود که پس از نصب باتری، نیازی به تعویض آن تا پایان دوره پروژه نیست. راه‌حل مدل پیشنهادی شامل فناوری بهینه باتری، یا ترکیبی از فناوری‌ها، اندازه باتری، تعداد واحدهای باتری و حداکثر عمق تخلیه است که هزینه کل برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه را حداقل می‌کند. در حالت متصل به شبکه، نصب باتری هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه را با ذخیره انرژی در ساعات با قیمت پایین و استفاده از آن در ساعات با قیمت بالا برای تأمین تقاضای محلی یا کسب سود اقتصادی از فروش انرژی ذخیره‌شده به شبکه عمومی (یعنی آربیتراژ انرژی) کاهش می‌دهد؛ اما در حالت جزیره‌ای، باتری انرژی غیر خدمت‌رسانی را کاهش می‌دهد که منجر به بهبود کلی قابلیت اطمینان ریز شبکه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده برای طول عمرهای مختلف پروژه در جدول (۶) ارائه شده است.

عمر باتری (سال)	۱۰	۱۵	۲۰
فناوری	Lead-acid	Li-ion NaS	Li-ion Li-ion
باس	۲	۱ ۳	۱ ۴
توان نامی (MW)	۲/۹۰۵	۱/۴۶۱ ۱/۴۴۴	۲/۵۲۷ ۰/۴۰۱
انرژی نامی (MWh)	۵/۹۲۹	۱/۸۸۶ ۱/۹۰۰	۲/۸۶۵ ۰/۸۱۸
عمق تخلیه (%)	۷۰	۸۰ ۸۰	۹۰ ۵۰
تعداد سیکل‌ها (cycles/year)	۴۷	۲۹۶ ۳۹۷	۱۶۵ ۳۹۲
هزینه سرمایه‌گذاری کل باتری (\$/year)	۳۷۷۶۸۱	۴۳۲۴۴۳	۳۵۷۴۱۹
هزینه تولید محلی (\$/year)	۸۳۴۷۷۵	۸۳۴۷۷۴	۸۳۴۷۷۳
هزینه تبادل برق (\$/year)	۱۸۴۳۶۴۱	۱۷۹۶۵۱۵	۱۸۱۵۸۹۵
هزینه مورد انتظار انرژی مصرف نشده (\$/year)	۶۴۲۷۴	۱۰۶۸۲	۲۴۹۶۶
کل هزینه توسعه (\$/year)	۳۱۲۰۳۷۲	۳۰۷۴۴۱۲	۳۰۳۳۰۵۱





از نتایج مشخص است که نصب باتری از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است، زیرا هزینه کل توسعه برای تمام طول عمرهای پروژه مورد بررسی کمتر از هزینه بهره‌برداری ریز شبکه بدون باتری است. بر اساس راه‌حل مسئله بهینه‌سازی، فناوری بهینه باتری، تعداد واحدها، اندازه، حداکثر عمق تخلیه و همچنین تعداد چرخه‌های سالانه انجام‌شده توسط باتری در حالت متصل به شبکه در جدول (۶) ارائه شده است. برای طول عمر پروژه ۱۰ سال، یک باتری سرب-اسید متمرکز واقع در باس ۲ با اندازه ۲۰۹۰۵ مگاوات و ۵۰۹۲۹ مگاوات ساعت حداقل هزینه توسعه کل را به ارمغان می‌آورد. با این حال، از تحلیل عملکرد باتری مشخص می‌شود که باتری سرب-اسید عمدتاً برای بهبود قابلیت اطمینان ریز شبکه تحت بهره‌برداری جزیره‌ای نصب شده است، زیرا تعداد چرخه‌های آن در بهره‌برداری متصل به شبکه کم است (یعنی ۴۸ چرخه). این توضیح می‌دهد که چرا باتری سرب-اسید به‌عنوان فناوری بهینه در این مطالعه موردی انتخاب شده است، زیرا دارای هزینه سرمایه‌گذاری و چرخه عمر پایینی است.

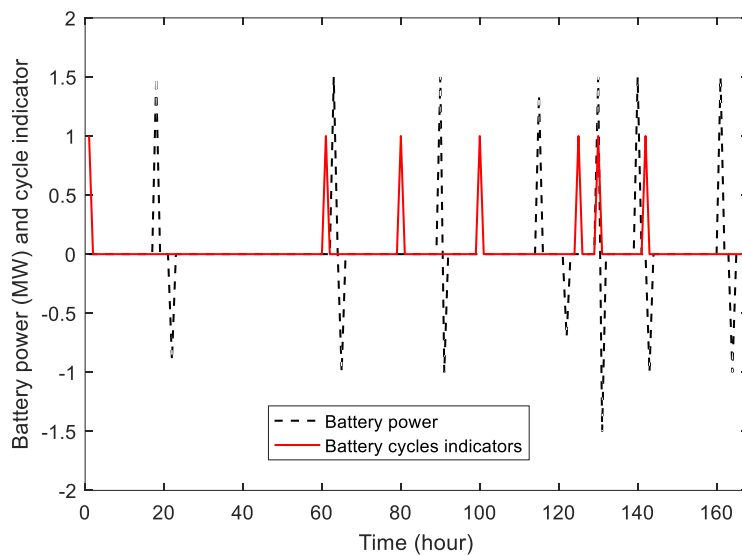
باتری سرب-اسید در باس ۲ قرار دارد تا بتواند تقاضای ریز شبکه را در حالت جزیره‌ای که در باس‌های ۳ و ۵ واقع شده‌اند تأمین کند. برای اینکه باتری سرب-اسید بتواند این تعداد چرخه را در سال انجام دهد و به مدت ۱۰ سال در خدمت باشد، عمق تخلیه آن نمی‌تواند از ۷۰ درصد بیشتر شود. انتظار می‌رود نصب باتری سرب-اسید سالانه ۷,۳۴۸ دلار صرفه‌جویی کند. با این حال، صرفه‌جویی بزرگ‌تر در بهره‌برداری جزیره‌ای مشاهده می‌شود، زیرا انرژی غیر خدمت‌رسانی مورد انتظار نسبت به مطالعه موردی ۲ به میزان ۹۸/۰۹ درصد کاهش یافته است.

زمانی که عمر پروژه به ۱۵ سال افزایش می‌یابد، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های گران‌قیمتی مانند باتری‌های لیتیوم-یونی و نیکل-سدیم سولفور (NaS) به‌صرفه می‌شود. در این مطالعه موردی، مشخص شده است که جواب بهینه زمانی حاصل می‌شود که باتری‌های لیتیوم-یونی و NaS به ترتیب در باس‌های ۱ و ۳ نصب شوند. از آنجاکه این فناوری‌ها می‌توانند تعداد بالایی از چرخه‌ها را قبل از رسیدن به پایان عمر خود انجام دهند، از آن‌ها برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه در حالت متصل به شبکه استفاده می‌شود؛ بدین صورت که انرژی را در دوره‌های قیمت پایین از شبکه عمومی خریداری کرده و یا برای تأمین تقاضا از آن استفاده می‌کنند و یا در دوره‌های قیمت بالا به شبکه عمومی می‌فروشند. این اقدام سالانه ۵۴,۴۷۵ دلار صرفه‌جویی برای اپراتور ریز شبکه به همراه دارد و در مجموع به ۸۱۷,۱۲۵ دلار در طول زمان‌بندی توسعه موردنظر خواهد رسید.

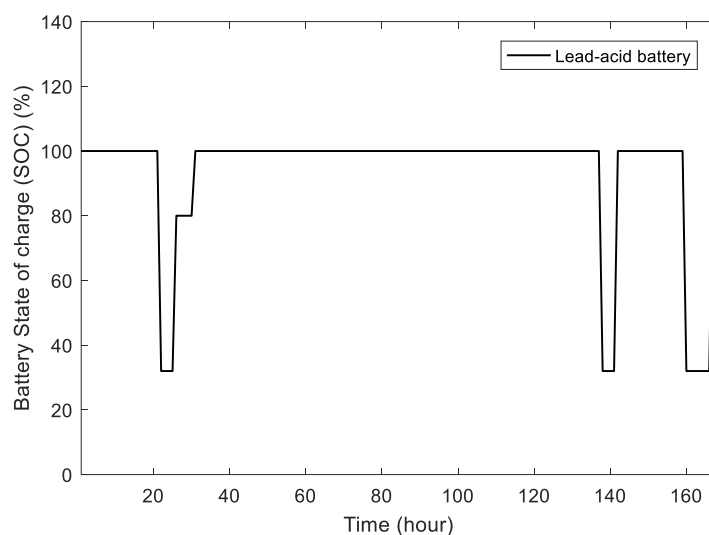
هر دو باتری می‌توانند تا ۸۰ درصد از ظرفیت انرژی نامی خود تخلیه شوند. تقاضای غیر خدمت‌رسانی مورد انتظار در بهره‌برداری جزیره‌ای نسبت به مطالعه موردی ۱، ۹۹/۶۸ درصد کاهش یافته است. برای عمر پروژه ۲۰ سال، حداقل هزینه توسعه زمانی به دست می‌آید که دو باتری لیتیوم-یونی در باس‌های ۱ و ۴ ادغام شوند. اندازه بهینه و مقادیر حداکثر عمق تخلیه برای این دو واحد باتری در جدول (۶) نشان داده شده است. باتری نصب‌شده در باس ۴، یعنی جایی که منابع تولید انرژی تجدیدپذیر قرار دارند، برای جابجایی تولید انرژی تجدیدپذیر از دوره‌های غیر اوج به دوره‌های اوج استفاده می‌شود که منجر به کاهش مقدار انرژی موردنیاز برای واردات از شبکه عمومی در دوره‌های قیمت بالا و در نتیجه کاهش هزینه عملیاتی ریز شبکه می‌شود. باتری واقع در باس ۱ برای آربیتراژ انرژی استفاده می‌شود. انرژی غیر خدمت‌رسانی مورد انتظار در این حالت نسبت به مطالعه موردی ۲، ۹۹/۲۶ درصد کاهش یافته است. چرخه‌های باتری با استفاده از معادله (۱۶) محاسبه می‌شوند. شکل (۵) نشان می‌دهد که چگونه مدل پیشنهادی می‌تواند چرخه‌های باتری را در طول افق برنامه‌ریزی به‌دقت محاسبه کند. از شکل مشخص است که مجموع چرخه‌های تخلیه باتری (ک) در طول یک هفته برابر با تعداد چرخه‌های انجام‌شده در همان دوره است. این امکان را برای برنامه‌ریزان ریز شبکه فراهم می‌کند تا تأثیر تعداد چرخه‌های باتری بر عمر آن را در مرحله برنامه‌ریزی مدنظر قرار دهند. نادیده گرفتن این تأثیر ممکن است نیاز به تعویض باتری قبل از پایان مورد انتظار پروژه را ایجاد کند که هزینه اضافی بر طرح گسترش تحمیل می‌کند. عامل دیگری که بر عمر باتری تأثیر می‌گذارد، عمق تخلیه است، یعنی مقدار انرژی که می‌توان در هر چرخه از باتری برداشت کرد. تعداد چرخه‌هایی که باتری می‌تواند انجام دهد قبل از اینکه نیاز به تعویض داشته باشد، بستگی به عمق تخلیه آن دارد. شکل‌های (۶)–(۸) وضعیت شارژ (SOC) واحدهای باتری نصب‌شده را برای هر عمر پروژه موردنظر برای یک نمونه یک‌هفته‌ای نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که مقدار حداکثر عمق تخلیه تعیین‌شده محدودیتی بر عمق تخلیه باتری بر اساس رابطه بین عمق تخلیه باتری و چرخه عمر آن اعمال می‌کند. با این حال، باتری می‌تواند با مقداری کمتر از مقدار بهینه تعیین‌شده نیز عمل کند، همان‌طور که از منحنی‌های وضعیت شارژ (شکل‌های (۷) و (۸)) دیده می‌شود.

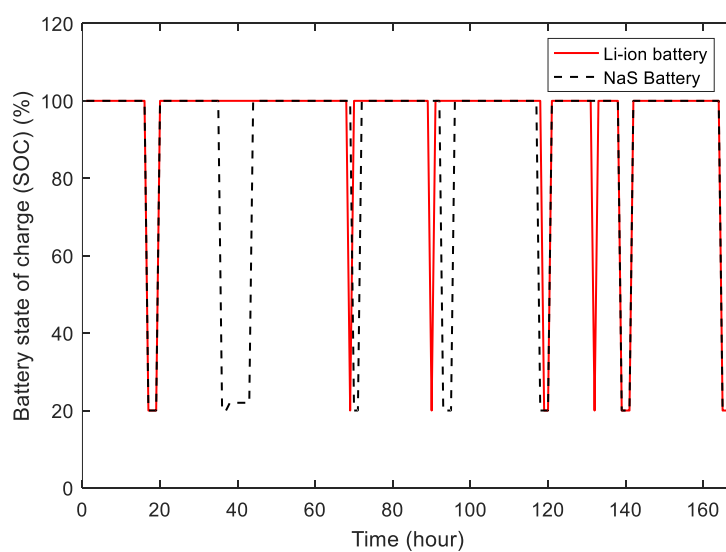




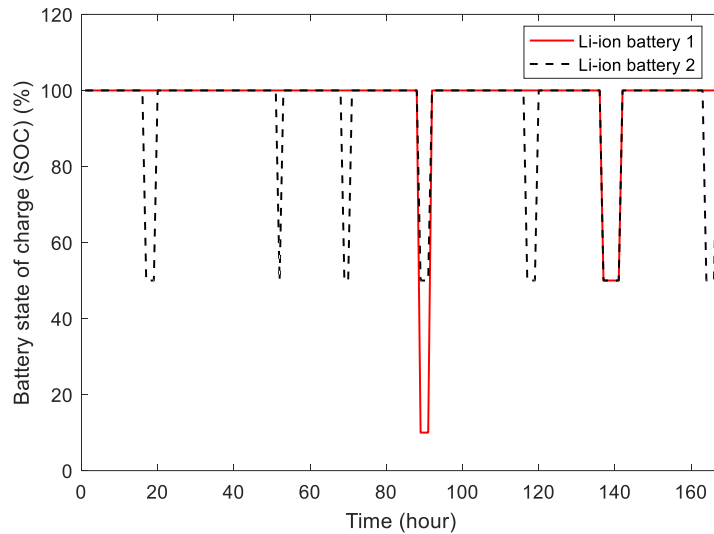
شکل (۵): انرژی باتری لیتیوم یونی و چرخه آن برای ۱۵ سال عمر پروژه



شکل (۶): وضعیت شارژ باتری سرب-اسید نصب شده برای یک هفته نمونه (۱۰ سال طول عمر پروژه)

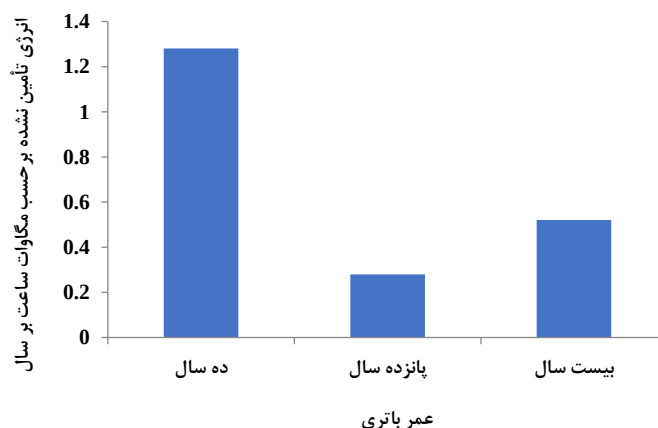


شکل (۷): باتری لیتیوم یون نصب شده و وضعیت باتری NaS برای یک هفته نمونه (۱۵ سال عمر)



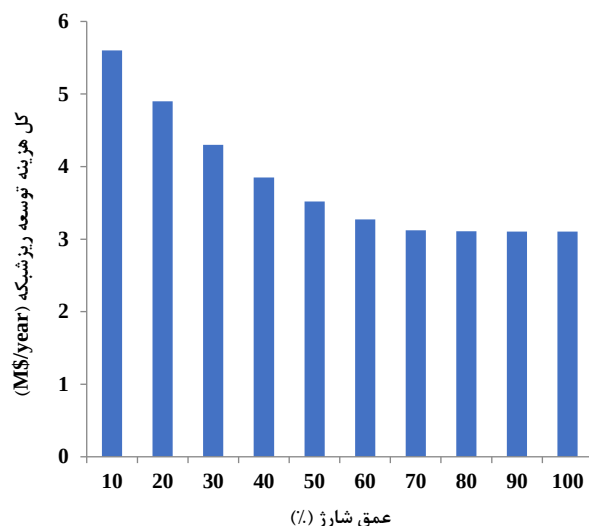
شکل (۸): باتری‌های لیتیوم یونی نصب شده به مدت یک هفته نمونه (۲۰ سال طول عمر)

مقدار حداکثر عمق تخلیه تعیین شده با این حال، اطمینان حاصل می‌کند که باتری نصب شده نیازی به تعویض در طول عمر پروژه موردنظر ندارد که یکی از الزامات برنامه‌ریزی ریز شبکه در این کار است. انرژی تأمین نشده در هر دوره عمر باتری در شکل (۹) نشان داده شده است. با وجود اینکه عمر ۱۵ ساله حداقل مقدار انرژی تأمین نشده را به همراه دارد، اما این گزینه بهترین راه حل از نظر هزینه کل ریز شبکه نیست که به مورد عمر ۲۰ ساله باتری مربوط می‌شود. به منظور بررسی تأثیر عمق تخلیه بر هزینه کلی توسعه ریز شبکه و همچنین اعتبارسنجی توانایی مدل پیشنهادی در تعیین مقدار بهینه حداکثر عمق تخلیه، شبیه‌سازی عددی دوباره برای عمر ۱۰ ساله باتری حل شده است. شکل (۱۰) هزینه توسعه ریز شبکه به دست آمده برای مقادیر مختلف عمق تخلیه باتری اسید سرب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هزینه توسعه ریز شبکه با افزایش عمق تخلیه کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار بهینه‌ای که توسط مدل پیشنهادی پیدا شده است (یعنی ۷۰٪) برسد، پس از آن هزینه توسعه ریز شبکه دوباره کمی افزایش می‌یابد. تغییر در هزینه ریز شبکه برای مقادیر عمق تخلیه بالاتر از ۷۰٪ نسبتاً کوچک است و بنابراین به راحتی در شکل قابل مشاهده نیست.



شکل (۹): انرژی تأمین نشده در طول عمر موردنظر باتری





شکل (۱۰): هزینه کل توسعه ریز شبکه برای مقادیر مختلف عمق تخلیه (عمر باتری ۱۰ سال)

مطالعه موردی ۳: به منظور برآورد دقیق مزایا و پارامترهای بهینه باتری نصب شده، تأثیر عوامل بهره‌برداری مانند عمق تخلیه و تعداد چرخه‌ها بر عمر باتری باید در مسئله توسعه ریز شبکه لحاظ شود. در این بخش، اهمیت در نظر گرفتن چنین تأثیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه در حالی حل می‌شود که محدودیت تعداد چرخه‌های باتری نادیده گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، رابطه بین عمق تخلیه باتری و عمر چرخه آن که با معادله (۱۷) نمایش داده شده است، از فرمولاسیون پیشنهادی حذف می‌شود. یک مورد عمر باتری ۱۰ ساله در نظر گرفته می‌شود. جدول (۷) نتایج به دست آمده برای این مورد را نشان می‌دهد. از آنجاکه تأثیر عملکرد باتری بر عمر آن در مدل گنجانده نشده است، فناوری بهینه باتری، باتری کم‌هزینه‌تری خواهد بود که باتری سرب اسیدی است. علاوه بر این، حداکثر عمق تخلیه بهینه ۱۰۰٪ تعیین می‌شود. با این حال، این نتیجه غیرواقعی است زیرا انتظار می‌رود باتری سرب اسیدی نصب شده ۷۹۰ چرخه در سال کار کند. بر اساس رابطه بین عمق تخلیه باتری و عمر چرخه آن که در جدول (۵) ارائه شده است، باتری سرب اسیدی نصب شده باید در طی ۵ ماه اول پس از نصب تعویض شود. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن تأثیر عملکرد باتری بر عمر آن در مسئله توسعه ریز شبکه است تا دقت و عملی بودن نتایج به دست آمده افزایش یابد.

جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی عددی برای مطالعه موردی ۳

عمر باتری (سال)	۱۰	
	Lead-acid	Lead-acid
سایز بهینه باتری (MW/MWh)	۰/۸۲۲ : ۱/۳۰۵	۲/۱۰۴ : ۳/۳۳۸
حداکثر عمق تخلیه بهینه (%)	۱۰۰	۱۰۰
تعداد عملکرد (cycles/year)	۷۹۰	۷۹۰
پایان عمر مورد انتظار (ماه)	۵	

مطالعه موردی ۴: در این مورد، خطاهای پیش‌بینی در تولید انرژی تجدیدپذیر، قیمت انرژی و تقاضای بار و تأثیرات آن‌ها بر راه حل به دست آمده بررسی می‌شود. بدترین سناریو زمانی اتفاق می‌افتد که کاهش در تولید انرژی تجدیدپذیر و افزایش در تقاضای بار نسبت به داده‌های پیش‌بینی شده رخ دهد؛ بنابراین، خطاهای پیش‌بینی ۲۰٪- در تولید انرژی تجدیدپذیر، ۱۰٪ در قیمت برق و ۱۰٪+ در تقاضای بار در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که این خطاهای پیش‌بینی به مدت ۱۰۰۰ ساعت در سال اتفاق می‌افتند. افزایش یا کاهش تعداد ساعت‌های در سال که عدم قطعیت‌ها در آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند، منجر به راه حل‌های محافظه‌کارانه یا تهاجمی‌تر در برابر



عدم قطعیت‌های داده می‌شود. در راه حل محافظه کارانه، نتایج به دست آمده در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم‌تر هستند اما در عین حال انتظار می‌رود که هزینه توسعه ریز شبکه بالاتر باشد.

از سوی دیگر، راه حل تهاجمی نتایج کمتری را در برابر عدم قطعیت‌ها ارائه می‌دهد و هزینه کل توسعه ریز شبکه نسبت به راه حل محافظه کارانه کمتر است. ۱۰۰۰ ساعت در سال که در این شبیه‌سازی استفاده شده، می‌تواند به عنوان یک راه حل معتدل در نظر گرفته شود. مورد عمر باتری ۱۰ ساله در اینجا با استفاده از مدل پیشنهادی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها حل شده است. از نتایج شبیه‌سازی عددی مشخص می‌شود که زمانی که عدم قطعیت‌های مربوط به تولید انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار مدنظر قرار گیرد، هزینه کل توسعه ریز شبکه به ۳,۳۶۸,۲۰۰ دلار در سال افزایش می‌یابد. علاوه بر این، فناوری‌های باتری گران قیمت که دارای چرخه عمر بالایی هستند، مانند باتری NaS، از نظر اقتصادی قابل توجیه می‌شوند. پارامترهای بهینه تعیین شده برای واحدهای باتری نصب شده در جدول (۸) ارائه شده است.

دلیل نصب باتری‌های NiCd و NaS به جای باتری‌های سرب اسیدی که به عنوان بهترین فناوری باتری در مطالعه موردی ۲ شناخته شده است، این است که با توجه به عدم قطعیت‌ها در مسئله توسعه ریز شبکه، نیاز است تا باتری نصب شده به طور مکرر استفاده شود تا بتوان تغییرات سریع در تولید انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار را به ویژه در زمان بهره‌برداری جزیره‌ای جبران کرد؛ بنابراین، فناوری ذخیره‌سازی انرژی با چرخه عمر بالا در چنین حالتی ضروری است.

شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی عددی برای مطالعه موردی ۴

عمر باتری (سال)	۱۰	
	NaS	NiCd
فناوری بهینه		
سایز بهینه باتری (MW/MWh)	۱/۵۱۳ : ۱/۹۸۹	۲/۴۸۱ : ۲/۹۲۵
حداکثر عمق تخلیه بهینه (%)	۵۰	۱۰۰
تعداد عملکرد (cycles/year)	۶۰۰	۴۸

بر طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، می‌توان گفت که نصب باتری در ریز شبکه مورد مطالعه، هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه را کاهش داد و در عین حال با کاهش مقدار انرژی بدون خدمت در حالت جزیره‌ای، قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشید. مدل پیشنهادی در این مقاله قادر بود اندازه بهینه باتری، فناوری، تعداد واحدها و حداکثر عمق تخلیه را به دقت تعیین کند تا هزینه کل برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه را به حداقل برساند، در حالی که بهره‌برداری جزیره‌ای ریز شبکه و تخریب باتری را نیز مدنظر قرار دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که نادیده گرفتن تأثیر عملکرد باتری بر عمر آن منجر به یک راه حل غیر واقعی می‌شود که در آن باتری نصب شده ممکن است هزینه‌ای بسیار بیشتر از آنچه قبل از نصب باتری تعیین شده بود، داشته باشد. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید تجدیدپذیر و تقاضای بار بر راه حل بهینه به دست آمده تأثیر گذاشت، زیرا نیاز به اندازه بزرگ‌تر باتری و تعداد بالاتر چرخه‌ها وجود دارد؛ بنابراین، راه حل مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های پارامترها می‌تواند با هزینه بالاتر سرمایه‌گذاری باتری حاصل شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی به کاررفته از نرم افزار GAMS استفاده شده است.

این مسئله بر روی یک کامپیوتر شخصی با فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز و با استفاده از CPLEX پیاده‌سازی شده است. راه حل به دست آمده در فاصله ۰.۵٪ از راه حل بهینه قرار دارد؛ بنابراین، یک راه حل نزدیک به بهینه ارائه می‌دهد. این فاصله با استفاده از قابلیت‌های داخلی CPLEX تنظیم می‌شود که در هر تکرار، یک حد بالا و یک حد پایین برای راه حل فعلی محاسبه می‌شود و تفاوت نسبی به عنوان فاصله بهینگی در نظر گرفته می‌شود.

شایان ذکر است که در مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت، به دلیل پیچیدگی مسئله و تعداد زیاد متغیرهای باینری و پیوسته، همیشه امکان دستیابی به راه حل بهینه وجود ندارد. با این حال، زمان محاسبات بستگی به مورد مدنظر، تعداد سناریوهای جزیره‌ای و فاصله بهینگی و سایر عوامل دارد. برای مورد اول، مسئله در عرض چند ثانیه حل می‌شود. زمانی که نصب باتری به مسئله اضافه می‌شود، مسئله در عرض چندین ساعت حل می‌شود. بالاترین زمان محاسباتی کمی کمتر از ۱۸ ساعت است. با این حال، از آنجاکه مسئله مورد نظر یک مسئله برنامه‌ریزی توسعه است، به صورت آفلاین حل می‌شود که در آن زمان محاسباتی به اندازه مسائل بهره‌برداری اهمیت ندارد.



۵- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر یک مدل جامع برای اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی باتری در کاربردهای ریز شبکه ارائه می‌دهد که تمامی عوامل بحرانی را مدنظر قرار می‌دهد. با استفاده از برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح، این مدل به تحلیل عمیق‌تری از ابعاد مختلف ذخیره‌سازی انرژی باتری پرداخته و رابطه غیرخطی بین عمق تخلیه و چرخه عمر آن را با رویکرد خطی‌سازی قطعه‌ای خطی مدل‌سازی می‌کند. برای نشان دادن کارایی مدل به کار رفته چهار مورد مطالعاتی بررسی شد. در مورد مطالعاتی اول، مقدار انرژی غیر خدمت‌رسانی پیش‌بینی‌شده در این حالت ۶۷.۵ مگاوات ساعت در سال است. این موضوع البته تنها زمانی اتفاق می‌افتد که ریز شبکه از شبکه عمومی قطع شده و در حالت جزیره‌ای عمل کند. در مورد مطالعاتی دوم تقاضای غیر خدمت‌رسانی مورد انتظار در بهره‌برداری جزیره‌ای نسبت به مطالعه موردی ۱، ۹۹/۶۸ درصد کاهش یافته است. در مورد مطالعاتی سوم باتری سرب اسیدی نصب شده باید در طی ۵ ماه اول پس از نصب تعویض شود. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن تأثیر عملکرد باتری بر عمر آن در مسئله توسعه ریز شبکه است تا دقت و عملی بودن نتایج به‌دست‌آمده افزایش یابد. نتایج به‌دست‌آمده در مورد مطالعاتی چهارم نشان داد که نادیده گرفتن تأثیر عملکرد باتری بر عمر آن منجر به یک راه‌حل غیرواقعی می‌شود که در آن باتری نصب‌شده ممکن است هزینه‌ای بسیار بیشتر از آنچه قبل از نصب باتری تعیین‌شده بود، داشته باشد. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید تجدیدپذیر و تقاضای بار بر راه‌حل بهینه به‌دست‌آمده تأثیر گذاشت، زیرا نیاز به اندازه بزرگ‌تر باتری و تعداد بالاتر چرخه‌ها وجود دارد. شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی قادر است به بهینه‌سازی اندازه، فناوری، تعداد و حداکثر عمق تخلیه باتری‌ها بپردازد و در نتیجه دقت و عملی بودن راه‌حل‌های اندازه‌گیری ذخیره‌سازی انرژی را افزایش دهد. این مقاله می‌تواند راهگشای توسعه پایدار ریز شبکه‌ها و ارتقاء کارایی سیستم‌های انرژی باشد. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع کمک کند. همچنین، بررسی‌های اخیر بر روی الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد باتری‌ها نیز توجه زیادی را جلب کرده است. با این حال، هنوز هم نیاز به تحقیقات بیشتری در زمینه ادغام فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی با ریز شبکه‌ها وجود دارد و این موضوع می‌تواند زمینه‌ای برای نوآوری‌های بیشتر در آینده باشد.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از اعضای هیئت تحریریه نشریه فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز کمال سپاسگزاری و قدردانی را دارد.

مراجع

- [1] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074-1082, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2114630.
- [2] A. Khalid, A. Stevenson, and A. I. Sarwat, "Overview of technical specifications for grid-connected microgrid battery energy storage systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 163554-163593, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3132223.
- [3] C. Xie, D. Wang, C. S. Lai, R. Wu, X. Wu, and L. L. Lai, "Optimal sizing of battery energy storage system in smart microgrid considering virtual energy storage system and high photovoltaic penetration," *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, p. 125308, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125308.
- [4] K. Prompinit and S. Khomfoi, "Battery Management System for Microgrid Applications," in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 245-248, 2018, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8619879.
- [5] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. B. Mansor, and F. Blaabjerg, "Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 35143-35164, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841407.
- [6] S. Choudhury, "Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects," *Journal of Energy Storage*, vol. 48, p. 103966, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.103699.



- [7] D. Q. Oliveira *et al.*, "A critical review of energy storage technologies for microgrids," *Energy Systems*, pp. 1-30, 2021, doi: 10.1007/s12667-021-00464-6.
- [8] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE access*, vol. 3, 890-925, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- [9] N. Günter and A. Marinopoulos, "Energy storage for grid services and applications: Classification, market review, metrics, and methodology for evaluation of deployment cases," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 226-234, 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.08.011.
- [10] Q. Fu, A. Hamidi, A. Nasiri, V. Bhavaraju, S. B. Krstic, and P. Theisen, "The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 21-29, 2013, doi: 10.1109/MELE.2013.2294736.
- [11] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system," in *2013 IEEE Grenoble Conference*, pp. 1-6: IEE, 2013, doi: 10.1109/PTC.2013.6652329.
- [12] C. Ju and P. Wang, "Energy management system for microgrids including batteries with degradation costs," in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6: IEEE, 2016, doi: 10.1109/POWERCON.2016.7754011.
- [13] K. Abdulla *et al.*, "Optimal operation of energy storage systems considering forecasts and battery degradation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2086-2096, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2606490.
- [14] E. Hajipour, M. Bozorg, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic capacity expansion planning of remote microgrids with wind farms and energy storage," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 6, no. 2, pp. 491-498, 201, doi: 10.1109/TSTE.2014.2376356.
- [15] J. P. Fossati, A. Galarza, A. Martín-Villate, and L. Fontan, "A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids," *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 539-549, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.039.
- [16] M. R. Aghamohammadi and H. Abdolahinia, "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 325-333, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.07.005.
- [17] T. Kerdphol, Y. Qudaih, and Y. Mitani, "Battery energy storage system size optimization in microgrid using particle swarm optimization," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, pp. 1-6: IEEE, 2014, doi: 10.1109/ISGTEurope.2014.7028895.
- [18] B. Shaghayegh and D. Hossein, "Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid Innovative smart grid technologies.(ISGT)," 2012, doi: 10.1109/ISGT.2012.6175774.
- [19] S. Bahramirad, W. Reder, and A. Khodaei, "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2056-2062, 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2217991.
- [20] M. Ross, R. Hidalgo, C. Abbey, and G. Joós, "Analysis of energy storage sizing and technologies," in *2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference*, pp. 1-6: IEEE, 2010 doi: 10.1109/EPEC.2010.5697212.
- [21] M. Asensio, P. M. de Quevedo, G. Muñoz-Delgado, and J. Contreras, "Joint distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response and energy storage—Part I: Stochastic programming model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 655-666, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2560339.
- [22] M. Asensio, P. M. de Quevedo, G. Muñoz-Delgado, and J. Contreras, "Joint distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response and energy storage—Part II: Numerical results," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 667-675, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2560341.
- [23] T. A. Nguyen, M. L. Crow, and A. C. Elmore, "Optimal sizing of a vanadium redox battery system for microgrid systems," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 6, no. 3, pp. 729-737, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2404780.
- [24] L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "Cost of reliability analysis based on stochastic unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1364-1374, 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.922231.



- [25] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [26] N. Lu, M. R. Weimar, Y. V. Makarov, and C. Loutan, "An evaluation of the NaS battery storage potential for providing regulation service in California," in *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1-9: IEEE, 2011, doi: 10.1109/PSCE.2011.5772494.

زیر نویس ها

-
- ¹ Value of Load Loss (VOLL)
² Distributed Generation (DG)
³ Point of Common Coupling (PCC)
⁴ Fuzzy C-mean (FCM)
⁵ Monte Carlo Simulation
⁶ Stochastic
⁷ Probability
⁸ Standard deviation
⁹ Roulette wheel
¹⁰ Bus

