



Resilient Planning Against Disturbances and Optimal Location Determination for Mobile Energy Storage Systems in Smart Microgrids

Sina Samadi Gharehveran* , Mahrooz Nasiri

*PhD in Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(Received: 02/12/2024, Revised: 01/01/2025, Accepted: 24/01/2025, Published: 21/07/2025)

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.6.2

ABSTRACT

Batteries, as one of the types of electrical energy storage devices, play an important role in increasing the resilience of distribution networks against extreme events such as floods. However, the use of these devices solely for increasing resilience is not economically justified. In this paper, an innovative approach is presented for the use of vehicle-mounted batteries that, with the ability to be moved through public transportation routes, enable the creation of dynamic microgrids and reduce outages in critical areas. The main innovation of this study is the development of a two-stage optimization framework that, in the first stage, maximizes the optimal location and investment in battery storage modules and, in the second stage, enables the rerouting of these modules to cope with extreme floods and ensure the continuity of energy supply. The proposed approach has been tested on radial distribution networks with 15, 33, and 85 buses. The results show that the use of mobile batteries significantly reduces load shedding compared to fixed batteries, with the average load cap being 11% lower. Also, among the three scenarios studied, the scenario using mobile batteries provides the lowest objective function value and the most optimal performance. This method has been able to reduce outages by 35% and optimize overall operating and investment costs by 22%.

Keywords: Microgrid, Resilient, Two-level Optimization, Vehicle-Mounted Storage

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: s.samadi@tabrizu.ac.ir



پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴ (پیاپی ۶۲): صص ۸۰-۶۹

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰

علمی - پژوهشی

برنامه ریزی تاب آور در برابر اختلالات و تعیین مکان بهینه برای سیستم های ذخیره سازی انرژی سیار در ریز شبکه های هوشمند

سینا صمدی قره ورن^۱، مهروز نصیری^۲

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.6.2

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

چکیده

باتری ها به عنوان یکی از انواع ذخیره سازی انرژی الکتریکی، نقش مهمی در افزایش تاب آوری شبکه های توزیع در برابر رویدادهای شدید؛ مانند سیلاب ها ایفا می کنند. با این حال، بهره برداری از این تجهیزات صرفاً برای افزایش تاب آوری، از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیست. در این مقاله، رویکردی نوآورانه برای استفاده از باتری های نصب شده بر روی خودرو ارائه شده است که با قابلیت جابه جایی از طریق مسیرهای حمل و نقل عمومی، امکان ایجاد ریز شبکه های پویا و کاهش خاموشی ها در مناطق بحرانی را فراهم می کند. نوآوری اصلی این مطالعه، توسعه یک چارچوب بهینه سازی دو مرحله ای است که در مرحله نخست، مکان یابی بهینه و سرمایه گذاری در مازول های ذخیره ساز باتری را به حداکثر می رساند و در مرحله دوم، تغییر مسیر این مازول ها برای مقابله با سیلاب های شدید و اطمینان از تداوم تأمین انرژی را ممکن می سازد. رویکرد پیشنهادی بر روی شبکه های توزیع شعاعی با ۱۵، ۳۳ و ۸۵ باس آزمایش شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از باتری های سیار در مقایسه با باتری های ثابت، به طور قابل توجهی قطع بار را کاهش می دهد؛ به طوری که میانگین محدودیت بار در این حالت ۱۱٪ کمتر است. همچنین، در بین سه سناریوی مورد بررسی، سناریوی که از باتری های سیار استفاده می کند، کمترین مقدار تابع هدف را ارائه داده و بهینه ترین عملکرد را دارد. این روش توانسته است خاموشی ها را تا ۳۵٪ کاهش داده و هزینه های کلی بهره برداری و سرمایه گذاری را تا ۲۲٪ بهینه کند.

کلیدواژه ها: بهینه سازی دوسطحی، تاب آور، ریز شبکه، ذخیره سازی انرژی روی خودرو

^۱ دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (s.samadi@tabrizu.ac.ir) - نویسنده مسئول

^۲ دکتری مهندسی کامپیوتر، شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

سیلاب‌ها و طوفان‌ها از جمله بلایای طبیعی هستند که تهدیدی جدی برای شبکه‌های برق در سراسر جهان به شمار می‌روند [۱]. شبکه‌های توزیع به‌ویژه در برابر اثرات این بلایا آسیب‌پذیری بیشتری دارند. ساختار شعاعی، کمبود منابع پشتیبان، و احتمال خرابی گسترده خطوط توزیع برق از جمله عواملی هستند که آسیب‌پذیری این شبکه‌ها را تشدید می‌کنند. علاوه بر این، وقوع بلایای طبیعی با مقیاس وسیع می‌تواند زیرساخت‌های الکتریکی را در چندین نقطه به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر قرار دهد و منجر به قطعی گسترده برق در مناطق وسیع شود [۲]، حتی اگر برخی از این مناطق مستقیماً تحت تأثیر فاجعه قرار نگرفته باشند.

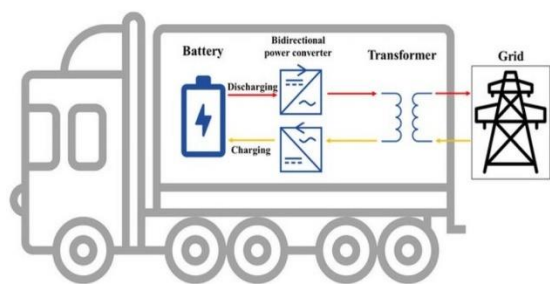
این شرایط حتی در مناطقی که معمولاً از اثرات مستقیم بلایا مصون هستند نیز ممکن است رخ دهد. از این رو، کنترل خرابی‌های شبکه توزیع و جلوگیری از سرایت آن‌ها به شبکه انتقال از اهمیت بالایی برخوردار است. اتخاذ تدابیر ترمیمی مناسب می‌تواند تاب‌آوری شبکه‌های برق را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد، به‌طوری‌که حتی در مواجهه با بلایای طبیعی نادر اما پرخطر، شبکه قادر به ادامه فعالیت و تأمین پایدار برق باشد [۳]. ابزارهای پاسخ می‌توانند پیشگیرانه یا اضطراری باشند، بسته به اینکه اقدام قبل یا بعد از وقوع رویداد انجام شود. اگر اقدام قبل از وقوع انجام شود، پیشگیرانه تلقی می‌شود. در مرحله برنامه‌ریزی، اپراتور شبکه توزیع یک راهبرد برنامه‌ریزی بلندمدت را توسعه خواهد داد که شامل برنامه‌ای برای تقویت امکانات و منابع سیستم برای افزایش تاب‌آوری شبکه در برابر رویدادهای شدید آینده است. با استفاده از چنین منابع شبکه‌ای، اپراتور می‌تواند خود را برای سازگاری با شرایط استثنایی ناشی از بلایای طبیعی مرتبط با شرایط جوی یا بازایی وضعیت عادی بهتر آماده کند. این مطالعه تلاش می‌کند تا نشان دهد که چگونه دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی قابل حمل می‌توانند با داشتن امکانات اقتصادی و فیزیکی برای مرحله سازگاری فرایند، تاب‌آوری شبکه توزیع را افزایش دهند. برای دستیابی به این هدف، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ارائه می‌دهد که شامل برنامه‌ای برای پیش‌بینی و بهره‌برداری تأسیسات ذخیره‌ساز باتری سیار در کنار ایجاد ریزشبکه‌ها است [۴].

تأسیسات دستگاه ذخیره‌سازی باتری سیار، یک باتری لیتیوم-یونی با ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی ۹۰۰ کیلووات ساعت است که بر روی وسیله نقلیه نصب می‌شود و قابل جابجایی به مکان‌های مختلف است. این تأسیسات نسبت به ابزارهای سنتی پاسخ تاب‌آوری مزایای زیست‌محیطی دارند و بدون ایجاد نوسانات قدرت و آلودگی هوا، جایگزین مناسبی برای ژنراتورهای اضطراری هستند [۵]. همچنین، در مناطقی با مقررات سختگیرانه آلودگی، استفاده از این باتری‌ها به

جای واحدهای تولید اضطراری سیار، مطلوب‌تر است. این باتری‌ها توسط مدیر سیستم قدرت کنترل می‌شوند و نیاز به سیستم‌های پیچیده ندارند. تضمین اقتصادی بودن این فناوری مهم است، زیرا هزینه سرمایه بالایی دارند، اما قابلیت جابجایی آن‌ها می‌تواند ارزش افزوده و منابع درآمد جدیدی ایجاد کند.

با استقرار دقیق منابع پشتیبان منعطف (مانند دستگاه‌های ذخیره‌سازی باتری سیار)، می‌توان از خرابی‌های عمده جلوگیری کرد یا حداقل اثرات آنها را کاهش داد، به شرط اینکه پیش‌بینی به‌موقع فاجعه در دسترس باشد [۶]. تنها تعداد کمی فناوری جایگزین، مانند واحدهای تولید اضطراری نصب‌شده بر روی خودرو، کلیدزنی پیکربندی، محدودیت بار پیشگیرانه یا ریزشبکه‌های تاب‌آور، از نظر فیزیکی مناسب برای گسترش، جابجایی یا فعال‌سازی در این بازه زمانی هستند، زیرا پیش‌بینی‌های فاجعه معمولاً با اطلاعیه کوتاه در دسترس هستند.

تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی نصب شده روی خودرو که به‌عنوان سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی قابل حمل نیز شناخته می‌شوند، راه‌حل‌های نوآورانه‌ای هستند که می‌توانند در شبکه‌های خرد محلی ادغام شوند. این سیستم‌ها شامل تجهیز خودروهای برقی یا خودروهای ویژه با بسته‌های باتری پیشرفته‌ای است که می‌توانند انرژی اضافی تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی یا باد را ذخیره کنند. هنگامی که شبکه به انرژی اضافی نیاز دارد، ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی خودرو می‌تواند منبعی قابل‌اعتماد و انعطاف‌پذیر از برق پشتیبان را فراهم کند. این فناوری نه تنها تاب‌آوری شبکه را ارتقا می‌بخشد، بلکه نفوذ بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز امکان‌پذیر می‌کند و وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی‌های گازی را کاهش می‌دهد. با بهره‌گیری از ذخیره‌سازی انرژی نصب شده روی خودرو، شبکه‌های خرد می‌توانند توزیع انرژی را بهینه کنند، تقاضای پیک را کاهش دهند و آینده‌ای پایدارتر را تضمین کنند. این ذخیره‌سازها معمولاً از چندین جزء تشکیل می‌شوند: باتری‌ها، مبدل قدرت جهت تبدیل ولتاژ متناسب با شبکه توزیع، ترانسفورماتور جهت افزایش یا کاهش ولتاژ ذخیره‌ساز برای اتصال با شبکه توزیع، سیستم کنترل و نظارت، سیستم خنک‌کننده و سیستم حفاظت [۷].



شکل (۱): تجهیزات ذخیره‌سازهای باتری نصب شده روی خودرو [۷]

دسترس را بهینه می‌کند. اگر باتری‌ها قابل حمل باشند، برنامه راهبردی پیچیده‌تر خواهد شد. اول، به دلیل قابلیت جابه‌جایی، استقرار این تأسیسات در مرحله دوم باید بهبود یابد، زیرا ثابت نیست (به اصطلاح تصمیمات جبرانی). دوم، هر واحد سیار ذخیره‌ساز باتری یک تصمیم جبرانی باینری می‌گیرد که در صورت نیاز به جابه‌جایی واحد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را می‌دهد. مسائل مختلط احتمالی دومرحله‌ای باینری با تصمیمات جبرانی باینری به پردازش اضافی نیاز دارند و روش‌های حل فعلی، مانند تجزیه بندرز، معمولاً نتایج رضایت‌بخشی را ارائه نمی‌کنند [۱۶].

می‌توان از روش پوشش تدریجی^۳ برای غلبه بر این پیچیدگی محاسباتی استفاده کرد [۱۷]. مسئله تعهد واحد احتمالی دو مرحله‌ای اخیراً توجه خود را به الگوریتم روش پوشش تدریجی جلب کرده است [۱۸]. این روش از ساختار دو مرحله‌ای بهینه‌سازی پایه استفاده نمی‌کند و به وضوح بین گزینه‌های مرحله اول و دوم تمایز قائل نمی‌شود، دقیقاً برعکس تجزیه بندرز. در روش پوشش تدریجی گزینه‌های مرحله اول و دوم برای هر مورد به‌طور جداگانه بهینه می‌شوند، که مسئله اصلی را به سناریوها تقسیم می‌کند. هر مسئله مبتنی بر سناریو، تصمیم‌گیری مرحله اول را با یک ضریب جریمه، جریمه می‌کند. الگوریتم تا زمانی که همه ارزیابی‌های مرحله اول در یک بازه مشخص قرار گیرند، ادامه می‌یابد. می‌توان از تجزیه و تحلیل مبتنی بر سناریو که در روش پوشش تدریجی استفاده می‌شود، در سیستم‌های برنامه‌ریزی با تأسیسات ذخیره‌ساز باتری سیار استفاده کرد، زیرا اثربخشی این روش به‌عنوان یک روش حل مسئله برای مسائل مختلط احتمالی دو مرحله‌ای با گزینه‌های جبرانی باینری نشان داده شده است.

برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در برابر رویدادهای شدید، مرجع [۱۹] یک مدل هماهنگ‌سازی ترمیم را برای سیستم‌های توزیع چند حمله انرژی پیشنهاد کرده است تا مراحل آماده‌سازی و بازیابی بار پس از رویداد را هماهنگ کند. در این مدل، اینرسی حرارتی برای کاهش هزینه تأمین انرژی پس از فجایع استفاده می‌شود و عدم قطعیت‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر و مصرف با برنامه‌نویسی احتمالی دومرحله‌ای مدیریت می‌شوند. علاوه بر این، مرجع [۲۰] یک استراتژی گریز از ریسک را برای بازیابی سیستم‌های توزیع برق با کمک شبکه آب ارائه داده است، جایی که انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پانل‌های خورشیدی روی بام و ژنراتورهای پراکنده در سیستم برق، و همچنین تأسیسات آب‌شیرین‌کن /پالایش آب، ایستگاه‌های پمپاژ و واحدهای ذخیره‌سازی هیدرو پمپاژ کوچک در شبکه آب وجود دارند. در این مقاله، وابستگی‌های متقابل از طریق ارتباطات مؤلفه‌ای و رفتار مصرف‌کننده مدل‌سازی می‌شوند و به‌عنوان معیار عملکرد،

نویسندگان در [۴] رویکرد یکپارچه‌ای را برای استفاده از کلیدزنی پیکربندی و محدودیت بار پیشگیرانه برای پاسخ تاب‌آوری ارائه می‌دهند. مرجع [۸] از طریق فرایند مارکوف، رویکرد تعاملی را پیشنهاد می‌کند که شامل کلیدزنی شبکه بهینه و بازتخصیص منابع تولید است. اندازه و مکان تولید و ذخیره‌سازی خورشیدی با فرمول‌بندی یک مسئله برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی می‌شوند [۹]. در [۱۰] یک طراحی انطباقی خودکفا برای ریزشک با مرزهای قابل تنظیم توصیف شده است. وانگ و همکاران [۱۱] یک سیستم توزیع خاص را به ریزشک‌های خودکفا تقسیم می‌کنند تا یک روش خودترمیمی ایجاد کنند. در چارچوب MIQP^۱ لی و همکاران [۱۲] ژنراتورهای اضطراری قابل حمل و ساخت ریزشک را برای افزایش تاب‌آوری سیستم در شرایط غیرمنتظره در نظر می‌گیرند. مدل ارائه‌شده در دو مسئله بهینه‌سازی متمایز را برای پیش‌بینی و اتصال متوالی ژنراتورهای اضطراری سیار در زمان واقعی فرمول‌بندی می‌کند. تصمیمات مرحله اول ممکن است به دلیل این جدایی بهینه نباشند، زیرا تحت تأثیر تصمیمات مسیریابی قرار می‌گیرند. در [۱۳] یک روش برنامه‌ریزی مشابهی ارائه شده است که قابلیت کنترل پاسخ تقاضا و تحرک ژنراتورهای پراکنده را در نظر می‌گیرد و منجر به MIQP می‌شود.

در یک فرایند برنامه‌ریزی پیشرفته دستگاه‌های ذخیره‌ساز باتری ثابت به‌طور کلی به‌عنوان یک مسئله MILP^۲ احتمالی دومرحله‌ای ساختار بندی می‌شوند؛ زیرا که تأسیسات ذخیره‌ساز را به‌عنوان منابع ثابت در نظر می‌گیرد [۱۵]. در این مقاله از روش MILP (برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط) برای مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. این روش به دلیل ماهیت مسئله که شامل متغیرهای دودویی (مانند مکان‌یابی باتری‌های سیار) و پیوسته (مانند میزان انرژی توزیع‌شده) است، انتخاب شده است. استفاده از MILP امکان مدل‌سازی دقیق تصمیم‌گیری‌های ترکیبی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های حل کارآمد را فراهم می‌کند.

در بخش‌هایی از مدل که روابط غیرخطی وجود داشت، از تکنیک‌های خطی‌سازی استاندارد برای ساده‌سازی مدل استفاده شده است. این فرایند خطی‌سازی و روابط غیرخطی اصلی به‌طور کامل در بخش مدل‌سازی تشریح شده‌اند. انتخاب روش MILP به جای MINLP همچنین موجب کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش سرعت حل مدل شده است که برای سیستم‌های توزیع بزرگ و داده‌های مقیاس‌پذیر از اهمیت بالایی برخوردار است. در این ابرارها، مرحله اول اندازه و محل استقرار باتری را بهینه می‌کند، و مرحله دوم تصمیمات مرحله اول را اصلاح می‌کند و استفاده هم‌زمان از تأسیسات ذخیره‌ساز باتری تازه نصب‌شده و منابع در

^۱ Mixed-Integer Quadratic Programming

^۲ Mixed-Integer Linear Programming

^۳ progressive hedging (PH)

پیشنهادی، فرض می‌شود شبکه توزیع دارای معماری شعاعی برای عملیات است که ساختار معمول برای سیاست‌های سیستم قدرت است. از سوی دیگر، مجموعه‌های B و L ، که به ترتیب توسط حروف b و l نشان داده می‌شوند، به معنای گره‌های شبکه برق و تغذیه‌کننده‌ها هستند.

۱-۲- بهره‌برداری عادی

در این سناریو، اپراتور شبکه از باتری‌های سیار برای تبادل انرژی به صورت مکانی و زمانی در طول بهره‌برداری عادی استفاده می‌کند. با وجود قابلیت حمل باتری‌ها، این منابع در عملیات روزمره توسط شرکت‌های توزیع بدون تغییر باقی می‌مانند. هدف از فرمول‌بندی احتمالی تابع هدف، بهینه‌سازی استفاده از باتری‌های سیار در این شرایط است.

$$\min \sum_{s \in S^N} \omega_s \cdot OC_s \quad (1)$$

$$OC = \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} C_b^g \cdot P_{bts}^g + \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \left(\frac{h}{100} \right) C^P (P_{kbs}^{ch} + P_{kbs}^{dis}) \quad (2)$$

جایی که معادله (۱) کمترین هزینه بهره‌برداری متوسط را در یک محدوده از شرایط معمول پیدا می‌کند. در این معادله، ω_s احتمال سناریوها و OC_s هزینه بهره‌برداری باتری نصب‌شده بر روی خودرو در طول بهره‌برداری T است. هزینه بهره‌برداری برای هر سناریو با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود. این هزینه، هزینه تولید پراکنده و همچنین هزینه تخریب باتری‌ها را در نظر می‌گیرد که به متغیرهای تصمیم‌گیری شارژ (P_{kbs}^{ch}) و دشارژ (P_{kbs}^{dis}) وابسته است. در این معادله، C^P قیمت نرخ توان برای باتری است، C_b^g هزینه افزایشی واحدهای تولید پراکنده و P_{bts}^g توان تولید آنها را در باس b نشان می‌دهد. محدودیت‌های فنی و بین زمانی برای شرایط عملیاتی قابل اعتماد عبارتند از [۲۴]:

$$(f_{lts}^p)^2 + (f_{lts}^q)^2 \leq S_l^2, \forall l \in L \quad (3)$$

$$(f_{lts}^p - a_{lts} \cdot R_l)^2 + (f_{lts}^q - a_{lts} \cdot X_l)^2 \leq S_l^2, \forall l \in L \quad (4)$$

$$v_{s(l),t,s} - 2(R_l \cdot f_{lts}^p + X_l \cdot f_{lts}^q)^2 + a_{lts} (R_l^2 + X_l^2) \leq v_{r(l),t,s} \quad \forall l \in L \quad (5)$$

$$\frac{(f_{lts}^p)^2 + (f_{lts}^q)^2}{a_{lts}} \leq v_{s(l),t,s} \quad (6)$$

$$-\sum_{r(l)=0} (f_{lts}^p - a_{lts} \cdot R_l) - p_{0,t,s}^g + G_0 \cdot v_{0,t,s} = 0 \quad (7)$$

از دست دادن خدمات تجمعی در مورد بار مصرف‌کننده‌های مختلف و دوره‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود. در [۲۱] یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه مبتنی بر منحنی‌های شکنندگی نیز گزارش شده است که ژنراتورهای پراکنده را به طور بهینه در سیستم‌های توزیع قرار می‌دهد تا هم هزینه‌های اقتصادی و هم حذف بار اولویت‌بندی شده ناشی از یک زمین‌لرزه را به حداقل برساند. نویسندگان در [۲۲] یک مدل‌سازی احتمالی آفلاین برای ترمیم بار را با تشکیل ریزشک‌های پویا و همچنین در نظر گرفتن اثرات کنترل افت و تنظیم فرکانس، و همچنین یک روش به‌روزرسانی آنلاین برای مشخص کردن عدم قطعیت متغیر تولیدات متغیر ارائه کرده‌اند. مرجع [۲۳] یک بهینه‌سازی دومرحله‌ای مبتنی بر شبکه بیزی و شبیه‌سازی مونت کارلو را برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع یکپارچه با شبکه حمل‌ونقل الکتریکی ارائه کرد. در مرحله اول، پست‌های اضطراری و تعمیر و نگهداری پیش‌بینی می‌شوند تا سرعت بازیابی افزایش یابد و سپس در مرحله دوم، اتصال ذخیره‌ساز باتری و گروه‌های تعمیر و نگهداری در شبکه حمل‌ونقل برای کاهش حذف بار به حداقل برسد. نوآوری اصلی این مقاله ارائه یک رویکرد جدید برای استفاده از باتری‌های سیار به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر بلایای طبیعی است. برخلاف روش‌های سنتی که بر استفاده از باتری‌های ثابت متمرکز هستند، این تحقیق به بررسی کاربرد باتری‌های قابل حمل با قابلیت جابه‌جایی از طریق مسیرهای حمل‌ونقل عمومی پرداخته است. این باتری‌ها می‌توانند به صورت پویا به مکان‌های بحرانی منتقل شوند و با ایجاد ریزشک‌های محلی، از گسترش خاموشی‌ها جلوگیری کنند.

علاوه بر این، مقاله چارچوبی دومرحله‌ای برای بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از این باتری‌های سیار ارائه کرده است. در مرحله نخست، مکان‌یابی و سرمایه‌گذاری بهینه این باتری‌ها با هدف حداکثرسازی مزایای اقتصادی و کاهش هزینه‌های اولیه انجام می‌شود. در مرحله دوم، الگوریتمی برای جابه‌جایی این باتری‌ها طراحی شده است که امکان مقابله با شرایط اضطراری ناشی از بلایای طبیعی را فراهم می‌کند.

۲- روش تحقیق

هدف اصلی این مقاله استفاده از باتری‌های نصب‌شده بر روی خودرو در شبکه‌های توزیع برای افزایش تاب‌آوری است، جایی که در مدل پیشنهادی مجموعه‌های S^N و S^E که با هم مجموعه $S = S^N \cup S^E$ را تشکیل می‌دهند، در نظر گرفته می‌شوند و شرایط بهره‌برداری ایده‌آل فراهم می‌کنند. تعداد بازه‌های زمانی مشخص شده توسط مجموعه T ، که با t مشخص می‌شود، و احتمال ω_s که برای آن $\sum \omega_s = 1$ و $\forall s \in [S^N \cup S^E]$ به هر سناریو اختصاص داده می‌شود. توجه داشته باشید که در مسئله

$$\sum_{k \in K} z_{kb} \leq N_b^{ES}, \forall b \in B \quad (19)$$

$$-K \cdot p_{kbs}^{ch} \leq q_{kbs}^{ch} \leq K \cdot p_{kbs}^{ch}, \forall b \in B \quad (20)$$

$$-K \cdot p_{kbs}^{dis} \leq q_{kbs}^{dis} \leq K \cdot p_{kbs}^{dis}, \forall b \in B \quad (21)$$

معادله (۱۴) ارتباط ریاضی بین حالت شارژ (e_{kts}) برای انرژی و قضاوت در مورد شارژ/دشارژ با $\psi^{ch} = \psi^{dis} \leq 1$ نامتقارن را برقرار می‌کند. معادله (۱۵) ذخیره‌سازی انرژی را در $\bar{E}_k$ محدود می‌کند. در معادله (۱۶)، ما مقرر می‌داریم که واحد ذخیره ساز باید در ابتدای هر سناریو ۵۰ درصد شارژ داشته باشد و باید در پایان هر سناریو در همان حالت باقی بماند. ما حداکثر تعداد ذخیره سازهای نصب شده بر روی خودرو را که می‌تواند در هر باس قرار گیرد، اعمال می‌کنیم، زیرا باس‌ها ممکن است در ظرفیت خود برای پذیرش آنها متفاوت باشند (۱۹). متغیر باینری z_{kb} و معادلات (۱۷) و (۱۸) حداکثر توان شارژ و دشارژ را به $\bar{P}_k$ محدود می‌کنند. معادلات (۲۰) و (۲۱) از پارامتر K (ضریب توان)، برای تطبیق تزریق توان راکتیو باتری‌های سیار با توجه به انرژی شارژ/دشارژ آنها استفاده می‌کنند، که اپراتور شبکه توزیع ممکن است با توجه به انتخاب‌های فنی-اقتصادی خود از آنها بهره گیرد.

۲-۲- بهره‌برداری اضطراری

در صورت پیش‌بینی فاجعه طبیعی، اپراتور شبکه توزیع یک برنامه پاسخ تاب‌آوری ایجاد می‌کند تا آسیب‌ها و خسارات اقتصادی را کاهش دهد. این برنامه از قابلیت تحرک واحدهای باتری نصب شده بر روی خودرو و سایر فناوری‌های تاب‌آوری مانند کلیدزنی پیکربندی و تشکیل ریزشبکه استفاده می‌کند. تأسیسات باتری قابل حمل می‌توانند از موقعیت‌های ثابت خود به مکان‌های بحرانی منتقل شوند. تصمیم‌گیری برای جابه‌جایی این باتری‌ها در شرایط اضطراری به تصمیمات در بهره‌برداری عادی وابسته است. اپراتور باید مسیریابی باتری‌ها را همراه با کلیدزنی پیکربندی و ساخت ریزشبکه‌ها بهینه‌سازی کند تا در طول بهره‌برداری اضطراری بهترین عملکرد را داشته باشد.

$$\min \sum_{s \in S^E} \omega_s \cdot EC_s \quad (22)$$

$$\begin{aligned} EC_s = & \sum_{t \in T, b \in B} C_b^g \cdot p_{bts}^g \\ & + \sum_{k \in K, t \in T, b \in B} \left(\frac{h}{100} \right) C^P (p_{kbs}^{ch} + p_{kbs}^{dis}) \\ & + \sum_{k \in K, t \in T, b \in B} C_b^{VOLL} (1 - \sigma_{bts}^d) p_{bts}^d \end{aligned} \quad (23)$$

$$-\sum_{r(l)=0} (f_{lts}^q - a_{lts} \cdot R_1) - q_{0,t,s}^g + B_0 \cdot v_{0,t,s} = 0 \quad (8)$$

$$f_{bts}^p - \sum_{r(l)=0} (f_{lts}^p - a_{lts} \cdot R_1) - p_{bts}^g + p_{bts}^d + G_b \cdot v_{bts} - \sum_{k \in K} p_{kbs}^{dis} + \sum_{k \in K} p_{kbs}^{ch} = 0 \quad (9)$$

$$f_{bts}^q - \sum_{r(l)=b} (f_{lts}^q - a_{lts} \cdot X_1) - q_{bts}^g + Q_{bts}^d + B_b \cdot v_{bts} - \sum_{k \in K} q_{kbs}^{dis} + \sum_{k \in K} q_{kbs}^{ch} = 0 \quad (10)$$

$$P_b^g \leq p_{bts}^g \leq \bar{P}_b^g; \forall b \in B^G \quad (11)$$

$$Q_b^g \leq q_{bts}^g \leq \bar{Q}_b^g; \forall b \in B^G \quad (12)$$

$$V_b \leq v_{bts} \leq \bar{V}_b; \forall b \in B \quad (13)$$

در شبکه‌های شعاعی توصیف شده در [۲۸-۲۵]، جریان‌های توان اکتیو و راکتیو به ترتیب توسط f_{lts}^q و f_{lts}^p نشان داده می‌شوند، در حالی که مجذورات مقادیر ولتاژ گره‌های فرستنده و گیرنده هر خط ۱ به ترتیب توسط $v_{s(l)}$ و $v_{r(l)}$ نشان داده می‌شوند، همان‌طور که در معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده است. R_1, S_1 و X_1 به ترتیب نشان دهنده محدودیت توان ظاهری، مقاومت و راکتانس هر فیدر هستند. [۲۶]. تعادل توان اکتیو و راکتیو با معادلات (۵) و (۶) برای باس اولیه سیستم توزیع، یا باس که شبکه انرژی توزیع را به شبکه بالادست متصل می‌کند، اعمال می‌شود. در معادلات (۹) و (۱۰)، p_{bts}^d و q_{bts}^d به ترتیب تقاضای توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهند. در معادلات (۱۱) و (۱۲)، تزریق توان اکتیو و راکتیو از نیروگاه‌های قابل اتصال توسط مقادیر حداقل (P_b^g و Q_b^g) و حداکثر ($\bar{P}_b^g$ و $\bar{Q}_b^g$) آنها محدود می‌شود. تزریق توان واحدهای ذخیره سازهای قابل حمل به شرح زیر مدل‌سازی می‌شوند:

$$e_{kts} = e_{k,t-1,s} + \sum_{b \in B} (p_{kbs}^{ch} \cdot \psi^{ch} - p_{kbs}^{dis} / \psi^{dis}) \quad (14)$$

$$0 \leq e_{kts} \leq \bar{E}_k \quad (15)$$

$$e_{k,t_0,s} = e_{k,t24,4} = 0.5 \bar{E}_k \quad (16)$$

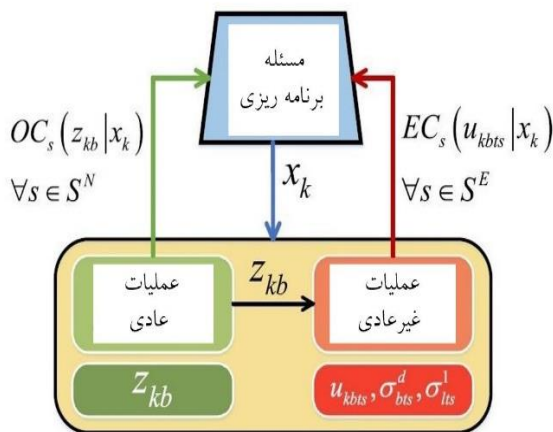
$$0 \leq p_{kbs}^{ch} \cdot \psi^{ch} \leq \bar{P}_{k,z_{kb}}, \forall b \in B \quad (17)$$

$$0 \leq p_{kbs}^{dis} \cdot \psi^{dis} \leq \bar{P}_{k,z_{kb}}, \forall b \in B \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} u_{kbs} \leq N_b^{ES}, \forall b \in B, \forall t \in T \quad (35)$$

$$u_{k,b_1,t,s} - u_{k,b_2,t+1,s} \leq 1 - u_{k,b_2,t+\tau,s}, \forall k \in K, \forall s \in S^E, \\ b_1 \neq b_2 \in B, \forall t \in T, \tau \in [1, \dots, \min(T_{b_1,b_2,t}^d, N^t - t)] \quad (36)$$

تنها در اولین بازه زمانی است که حالت انرژی شارژ توسط معادله (۳۲) محدود می‌شود. متغیر باینری (u_{kbs}) که در صورت قرار گرفتن باتری نصب شده بر روی خودرو k در گره b در بازه زمانی t در سناریوی s به ۱ تنظیم می‌شود. متغیر باینری در (۳۳)–(۳۴) تعیین می‌کند که آیا می‌توان ذخیره سازه‌های نصب شده بر روی خودرو را با توجه به بازدهی انرژی باتری شارژ یا دشارژ کرد. معادله (۳۵) حداکثر تعداد باتری‌های سیار را که ممکن است به طور همزمان به هر گره اتصال شود را اعمال می‌کند. مسئله بهینه سازی حاصل توسط معادله (۳۶) محدود می‌شود، که گزینه‌های u_{kbs} و $u_{k,b_1,t+1,s}$ را به هم مربوط می‌کند.



شکل (۲): طرح کلی برنامه‌ریزی پیشنهادی دومرحله‌ای تاب‌آوری ذخیره‌ساز سیار

$$\min \left[\gamma \cdot IC(x_k) + \sum_{s \in S^E} \omega_s \cdot OC_s(z_{kb} | x_k) \right. \\ \left. + \sum_{s \in S^E} \omega_s \cdot EC_s(u_{kbs} | x_k) \right] \quad (37)$$

$$IC(x) = \sum_{k \in K} (C^P \cdot \bar{P}_k + C^E \cdot \bar{E}_k) \cdot x_k \quad (38)$$

$$\sum_{b \in B} z_{kb} \leq x_k, \forall k \in K \quad (39)$$

$$\sum_{b \in B} u_{kbs} \leq x_k, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S^E \quad (40)$$

$$u_{kbs} = z_{kb}, \forall k \in K, \forall b \in B, \forall s \in S^E \quad (41)$$

معادله (۲۳) حذف بار را با جریمه‌ای برابر با مقدار بار از دست رفته (C_b^{VOLL}) در نظر می‌گیرد. تصمیم باینری σ_{bts}^d و تقاضای توان اکتیو گره‌ای (p_{bts}^d) برای تعیین حذف بار استفاده می‌شوند. در واقع، فرض $\sigma_{bts}^d = 0$ این است که مصرف در گره b و بازه زمانی t در سناریو s به‌طور کامل از شبکه اصلی قطع می‌شود. در شرایط اضطراری، شبکه توزیع می‌تواند به شرح زیر مدل‌سازی شود.

$$(f_{lts}^p)^2 + (f_{lts}^q)^2 \leq (\sigma_{lts}^1 \cdot S_l)^2, \forall l \in L \quad (25)$$

$$(f_{lts}^p - a_{lts} \cdot R_l)^2 + (f_{lts}^q - a_{lts} \cdot X_l)^2 \leq (\sigma_{lts}^1 \cdot S_l)^2, \forall l \in L \quad (26)$$

$$f_{bts}^p - \sum_{r(l)=b} (f_{bts}^p - a_{lts} \cdot R_l) - p_{bts}^p \\ + \sigma_{bts}^d \cdot p_{bts}^d + G_b \cdot v_{bts} - \sum_{k \in K} p_{kbs}^{dis} + \sum_{k \in K} p_{kbs}^{ch} = 0 \quad (27)$$

$$f_{bts}^q - \sum_{r(l)=b} (f_{bts}^q - a_{lts} \cdot X_l) - q_{bts}^q \\ + \sigma_{bts}^d \cdot q_{bts}^d + B_b \cdot v_{bts} - \sum_{k \in K} q_{kbs}^{dis} + \sum_{k \in K} q_{kbs}^{ch} = 0 \quad (28)$$

در اینجا از تصمیمات سوئیچینگ خط برای در نظر گرفتن فرایند ایجاد ریز شبکه استفاده می‌شود:

$$\sum_{l \in L} \sigma_{lts}^1 \geq N^L - \max(N^O, N^{ES} + N^{DG}) \quad (29)$$

$$\sigma_{lts}^1 = 0, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall s \in S^E \quad (30)$$

در شبکه توزیع، معادله (۲۹) اطمینان حاصل می‌کند که تعداد ریز شبکه‌های ایجاد شده با تعداد واحدهای منابع پراکنده (N^{DG}) یا واحدهای ذخیره ساز نصب شده بر روی خودرو (N^{ES}) که برای اپراتور شبکه توزیع در دسترس هستند، مطابقت دارد. در نتیجه، برخی مناطق شبکه انرژی در صورت بزرگ‌تر بودن تعداد خرابی‌ها (N^O) ناشی از فاجعه از تعداد منابع پراکنده، همچنان خاموش خواهند ماند.

$$Eq. (14)-(15), (20)-(21) \quad (31)$$

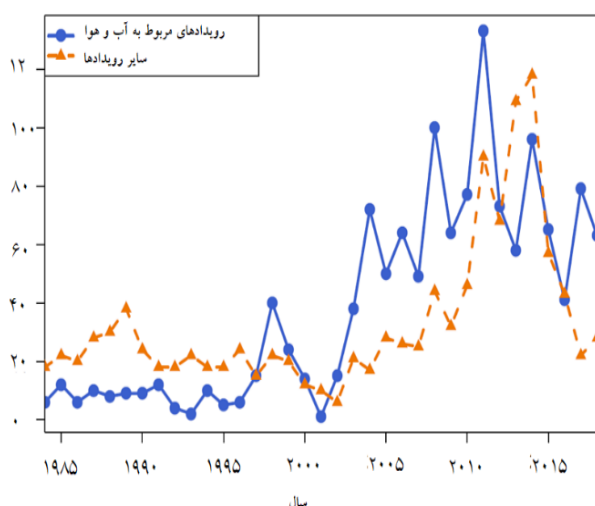
$$e_{k,t_0,s} = 0.5 \times \bar{E}_k, \forall k \in K, \forall t \in T, \quad (32)$$

$$0 \leq p_{kbs}^{ch} \cdot \mu^{ch} \leq \bar{P}_k \cdot u_{kbs} \quad (33)$$

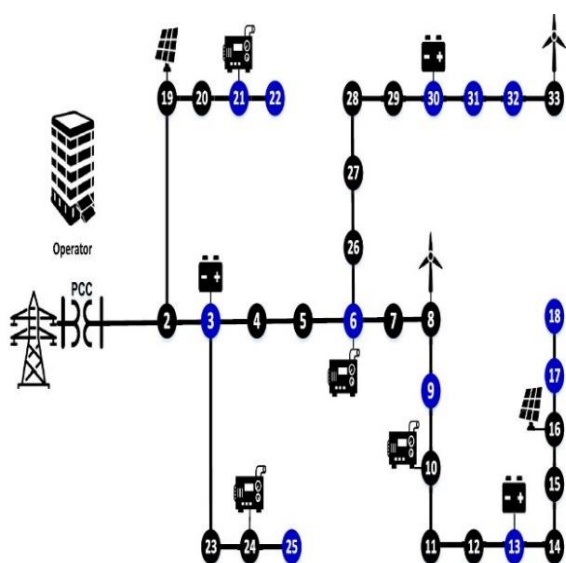
$$0 \leq p_{kbs}^{dis} \cdot \mu^{dis} \leq \bar{P}_k \cdot u_{kbs} \quad (34)$$

پیشنهادی، ارزش بار ازدست‌رفته برای ارزیابی اقتصادی استفاده شده است [۲۶].

رویدادها می‌توانند به شرایط آب‌وهوایی مرتبط باشند، مانند طوفان‌های گرمسیری، یخبندان‌ها یا موج‌های گرما که در آن شرایط شدید آب‌وهوایی به خطوط برق، پست‌های توزیع و ترانسفورماتورها آسیب می‌رسانند. از سوی دیگر، رویدادهای غیرمرتبط با آب‌وهوا شامل حملات سایبری، خرابی تجهیزات و اشتباهات انسانی می‌شوند. حملات سایبری می‌توانند سیستم‌های کنترل شبکه برق را هدف قرار داده و باعث قطعی‌های گسترده شوند، درحالی‌که خرابی تجهیزات، اغلب به دلیل زیرساخت‌های قدیمی، می‌تواند باعث بروز خرابی‌های زنجیره‌ای در سراسر شبکه شوند.



شکل (۳): حوادث شدید رخدادها طی سال‌های اخیر



شکل (۴): ساختار بهینه شبکه توزیع ۳۳ گره‌ای مورد مطالعه با تولید پراکنده و ذخیره‌سازی انرژی

$$(42) \quad \text{Eq.}(2)-(21),$$

$$(43) \quad \text{Eq.}(23)-(30)$$

مجموع سه عبارت با معادله (۳۷) با توجه به بازیابی روزانه سرمایه به حداقل می‌رسد. که در آن $IC(x_k)$ هزینه سرمایه باتری‌های سیار و پارامتر γ ضریب بازیابی سرمایه را نشان می‌دهد. معادله (۳۸) هزینه سرمایه گذاری نصب واحدهای باتری سیار را محاسبه می‌کند. معادلات (۳۹) و (۴۰) متغیرهای Z_{kb} (متغیر مکان ثابت برای باتری‌ها) و U_{kbt} (متغیر مسیر حرکت باتری‌ها) را به تصمیم سرمایه‌گذاری مربوطه (x_k) مرتبط می‌کنند. هر باتری سوار بر وسیله نقلیه با استفاده از معادله (۴۱) در طول بهره‌برداری عادی از مکان‌های ثابت خود به مکان‌های موقت خود در مواقع اضطراری منتقل می‌شوند.

بهینه‌سازی مشترک تصمیمات سرمایه‌گذاری برای بهره‌برداری عادی و اضطراری، تصمیمات جبرانی دودویی و بهینه‌سازی چند دوره‌ای در هر سناریو، مسئله برنامه‌ریزی پیشنهادی دومرحله‌ای احتمالی^۱ MISOCP در معادلات (۳۷)–(۴۳) را از نظر محاسباتی دشوار می‌کند. می‌توان این مدل را با حل‌کننده‌های آماده‌به‌کار حل کرد، اما سرعت آنها برای شبکه‌های بسیار بزرگ یا موارد بسیار پیچیده‌ای که شامل نتایج احتمالی زیادی هستند، کافی نیست. این مقاله از الگوریتم PH توسعه‌یافته در [۱۸] برای حل مؤثر مسئله برنامه‌ریزی پیشنهادی استفاده می‌کند.

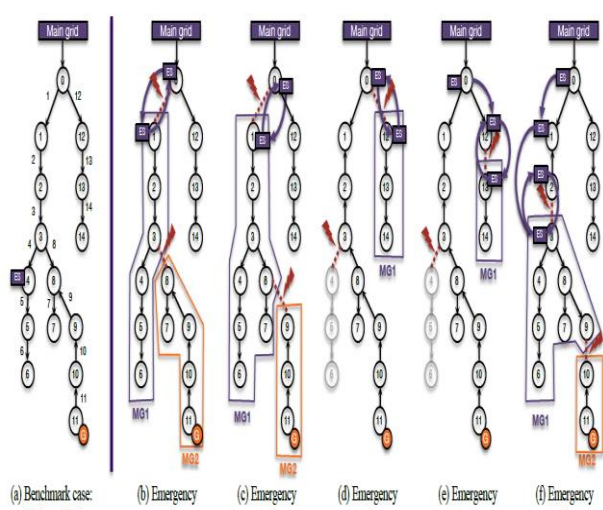
الگوریتم PH مسئله اولیه را در (۳۷)–(۴۳) به $N^S = \text{card}(S)$ زیرمسئله تقسیم می‌کند. این تجزیه و تحلیل از ایده‌ای استفاده می‌کند که تصمیمات مسیریابی می‌توانند برای هر سناریو به‌طور منحصر به فردی بهینه شوند، در حالی که تصمیمات سرمایه‌گذاری و استقرار واحدهای باتری نصب‌شده بر روی خودرو برای همه شرایط کلی هستند.

۳- نتایج و بحث

در سیستم تست توزیع شعاعی با ۳۳ باس که در شکل (۴) نشان داده شده است، فرض بر این است که طول عمر باتری‌های سیار مورد استفاده برای برنامه‌ریزی ۱۰ سال است. مشخصات این باتری‌ها به‌طور مختصر شامل ظرفیت‌ها و پارامترهای کلیدی است که باتوجه به منبع [۱۴] مشخص شده‌اند. زمان انتقال بین گره‌ها با استفاده از روش کوتاه‌ترین مسیر و طبق معادله (۳۶) تعیین می‌شود. به‌عنوان نمونه، زمان انتقال برای باتری بین گره‌های ۰ و ۱۴ برابر با ۰/۵ ساعت تنظیم شده است. همچنین، در مدل

¹ Mixed-Integer Second-Order Programming

آورده شده و نتایج به صورت گرافیکی در شکل (۵) نمایش داده شده است. در شرایط عادی، باتری ثابت در گره ۴ نصب شده و بدون تحرک باقی می‌ماند. این باتری به دلیل محدودیت‌های مکانی تنها قادر به پشتیبانی از یک ریزش شبکه است و در صورت وقوع قطعی بالادستی نمی‌تواند در شرایط اضطراری به عنوان منبع پشتیبان عمل کند، به‌ویژه در صورت قطع خطوط ۵، ۸ یا ۱۲. در مقابل، باتری سیار در شرایط عادی در گره صفر قرار می‌گیرد و می‌تواند در زمان وقوع شرایط اضطراری، به مکان‌های دیگر منتقل شود تا با ایجاد ریزش شبکه و استفاده از کلیدزنی خطوط، از سیستم پشتیبانی کند. این انعطاف‌پذیری باتری سیار به آن اجازه می‌دهد که در شرایط اضطراری به نیازهای مختلف پاسخ دهد.



شکل (۵): جایابی تجهیزات ذخیره‌ساز قابل حمل (b-f) و واحدهای دائمی باتری (a) با بهترین مسیر ممکن در شرایط اضطراری (S6-S10)

بر اساس یافته‌ها، الگوریتم پیشنهادی باتری‌های سیار را بین گره‌های نزدیک به هم توزیع می‌کند تا زمان انتقال کاهش یابد و مصرف بهینه ذخیره‌ساز برای به حداقل رساندن قطع بار تضمین شود. همچنین، تصمیمات مسیریابی باتری‌های سیار بر برنامه‌ریزی منابع پراکنده در گره ۱۱ بهینه‌سازی می‌شود تا عملکرد شبکه توزیع برق بهبود یابد. در شرایط اضطراری، دو ریزش شبکه ایجاد می‌شود: یکی توسط باتری سیار که از گره ۰ منتقل شده و دیگری توسط منابع پراکنده در گره ۱۱ تغذیه می‌شود. با این حال، در شرایطی که نصب باتری اضافی ممکن نیست و تولید پراکنده وجود ندارد، برخی گره‌ها (مانند گره‌های ۴-۶) با قطع بار مواجه می‌شوند. باتری سیار به دلیل ظرفیت محدود خود، بین ریزش شبکه و مناطق سالم شبکه حرکت می‌کند و به‌طور دوره‌ای باید انرژی خود را جایگزین کند. به عنوان مثال، در سناریوی اضطراری S6، این باتری چهار بار بین گره‌های ۰ و ۱ جابه‌جا می‌شود. این تغییرات در مسیریابی باتری‌ها نشان‌دهنده ارزش آن‌ها در مدیریت شرایط اضطراری خاص است.

۳-۱- مطالعه موردی اول

در حل مسئله با دو سناریوی عادی و اضطراری، سیستم با استفاده از معادلات (۳۷) - (۴۳) بررسی شده و منجر به تعیین $Ns=2$ شده است. در این مدل، احتمال وقوع قطعی‌های خطوط ۶، ۷، ۸ یا ۱۲ در زمان $t=5$ ساعت برای شبیه‌سازی شرایط اضطراری در نظر گرفته شده است. هر قطعی به درجات متفاوتی از قطع بار منجر می‌شود که شدت آن برای اپراتور شبکه دارای اهمیت است. نتایج در جدول (۲) نشان می‌دهد که در شرایط عادی و بدون وقوع قطعی، استفاده از باتری‌های سیار اقتصادی نیست و نصب آنها توجیه‌پذیر نمی‌باشد. اما در شرایط اضطراری و با افزایش ریزش بار بالقوه از ۱۹/۸۵ کیلووات به ۱۶۸/۲۴ کیلووات، نیاز به استفاده از این باتری‌ها افزایش می‌یابد. پس از نصب این باتری‌ها، هیچ قطع باری در چهار سناریوی قطعی مشاهده نشده است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از باتری‌های سیار در شرایط اضطراری می‌تواند به طور قابل توجهی از ریزش بار جلوگیری کرده و ارزش افزوده‌ای در بهره‌برداری عادی و اضطراری ایجاد کند. در نتیجه، اجتناب از ریزش بار و پاسخ به قطعی‌های شدیدتر، منجر به تغییر در استراتژی نصب باتری‌ها می‌شود.

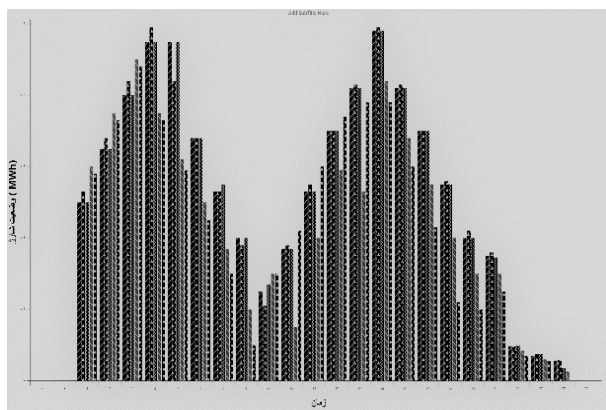
جدول (۱): تصمیمات استراتژیک سرمایه‌گذاری بر روی ذخیره‌سازهای باتری نصب شده روی خودرو

خطی قطع	بدون قطع	خط ۶	خط ۵	خط ۴	خط ۱۳
بارزدایی (KW)	۰	۲۸/۶۵	۶۹/۲۲	۱۲۵/۴	۱۸۸/۷۱
شماره ذخیره‌ساز	۰	۲	۱	۳	۲
ظرفیت ذخیره‌سازی (MWh)	۰	۱/۵	۲/۵	۳	۲/۵
باس اولیه ذخیره‌ساز	-	۳	۷	۱۱ و ۲	۸ و ۴

صرف نظر از دوره عمر در نظر گرفته شده، مقدار تابع هدف در معادله (۳۷) به‌طور تک‌مقداری کاهش می‌یابد زیرا بازدهی باتری افزایش می‌یابد. تابع هدف همچنین با افزایش طول عمر دوره، مقدار پایین‌تری را کسب می‌کند. این به این دلیل است که ذخیره‌سازها که کارآمدتر هستند و طول عمر طولانی‌تری دارند، به ورودی سرمایه کمتری نیاز دارند، در حالی که همچنان منافع سیستم را افزایش می‌دهند.

۳-۲- مطالعه موردی دوم

محل استقرار باتری در گره ۰ در طول شرایط عادی (S1-S5) و مسیرهای انتقال باتری سیار در شرایط اضطراری (S6-S10) بررسی شده‌اند. موقعیت و وضعیت شارژ باتری‌های سیار نیز در جدول (۳)



شکل (۶): وضعیت شارژ باتری‌های قابل حمل درخواست شده برای (S6-S10)

در جدول (۳)، سه سناریو براساس توابع هدف و میزان محدودیت بار مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از باتری‌های سیار نسبت به باتری‌های ثابت به‌طور قابل‌توجهی قطع بار را کاهش می‌دهد. به دلیل قابلیت تحرک باتری‌های سیار، میانگین محدودیت بار ۱۱٫۸۴ درصد کمتر از شرایطی است که باتری‌های ثابت استفاده می‌شوند. همچنین، در بین سه سناریوی مورد بررسی، سناریویی که از باتری‌های سیار استفاده می‌کند، کمترین مقدار تابع هدف را ارائه می‌دهد و بهینه‌ترین عملکرد را دارد.

جدول (۳): حذف بار در حضور واحدهای ذخیره ساز انرژی سوار بر خودرو

ارزش هدف (دلار)	متوسط بار حذف شده (MWh)	بار حذف شده (MWh)					
		S10	S9	S8	S7	S6	
-	-						بدون ذخیره ساز
۲۸۷۷/۲۰	۴/۸۲	۳/۳۱	۴/۵۸	۶/۷۳	۵/۱۹	۴/۴۰	بدون ذخیره ساز
۲۳۹۳/۹۹	۳/۷۱	۲/۱۸	۳/۳۵	۵/۷۴	۴/۰۷	۳/۳۳	ذخیره سازهای ثابت
۲۱۹۹/۰۵	۳/۳۲	۱/۸۴	۲/۹۵	۵/۲۳	۳/۵۹	۲/۹۱	ذخیره سازهای قابل حمل

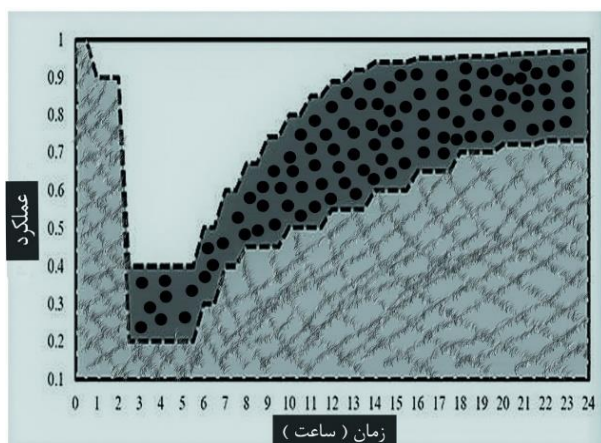
جدول (۴) کارایی و بهینگی الگوریتم پوشش تدریجی پیشنهادی را در مقایسه با روش بروت فورس برای شرایط مختلف ارزیابی می‌کند. اگرچه نتایج تابع هدف و تصمیمات سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازهای سیار بین این دو روش مشابه است، روش بروت فورس تنها قادر به مدیریت دو سناریو است و ۶ برابر سریع‌تر اجرا می‌شود. اما برای بیش از دو سناریو، بروت فورس نمی‌تواند در زمان محدود (۱۲ ساعت) مسئله را حل کند. در مقابل، الگوریتم پوشش تدریجی تمام موارد را در کمتر از هشت ساعت با بهترین نتایج حل می‌کند. برای

جدول (۲): مسیریابی بهینه باتری نصب شده در خودرو بین گره‌های

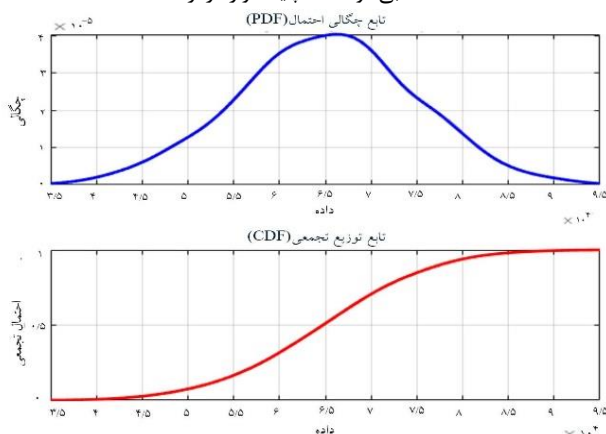
مختلف برای (S6-S10)

زمان ساعت	S6	S7	S8	S9	S10
۱	باس ۰#	باس ۰#	باس ۰#	-	-
۲	باس ۰#	باس ۰#	باس ۰#	-	-
۳	باس ۰#	باس ۰#	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۱#
۴	باس ۰#	باس ۰#	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۱#
۵	-	-	-	-	-
۶	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	-
۷	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۸	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۹	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۱۰	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۱۱	-	-	-	باس ۱۳#	باس ۳#
۱۲	باس ۰#	-	باس ۰#	-	-
۱۳	باس ۰#	-	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۲#
۱۴	باس ۰#	-	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۲#
۱۵	باس ۰#	-	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۲#
۱۶	باس ۰#	-	باس ۰#	باس ۱۲#	باس ۲#
۱۷	-	-	-	باس ۱۲#	باس ۲#
۱۸	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	-	-
۱۹	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۲۰	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۲۱	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۲۲	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۲۳	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#
۲۴	باس ۱#	باس ۱#	باس ۱۲#	باس ۱۳#	باس ۳#

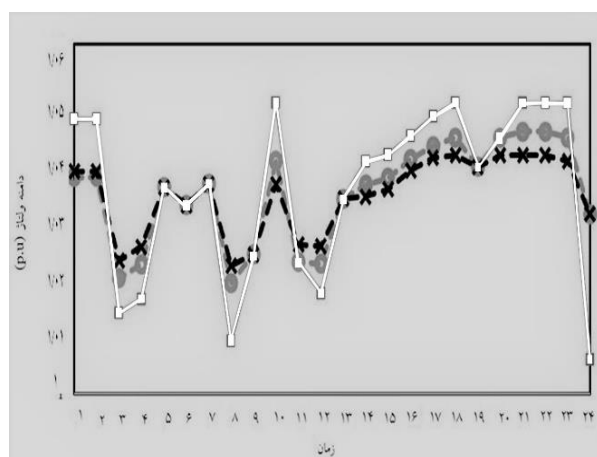
این باتری‌ها در بهبود پایداری و ثبات ولتاژ شبکه بررسی شده است. با توجه به داده‌های ارائه شده، می‌توان مشاهده کرد که روش پیشنهادی توانسته است نوسانات ولتاژ را کاهش دهد و شبکه را در وضعیت بهینه‌تری نگه دارد. این امر نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در حفظ پایداری ولتاژ و افزایش تاب‌آوری شبکه در مواجهه با شرایط اضطراری است.



شکل (۷): منحنی دوزنقه ای انعطاف پذیری برای هر دو روش پیشنهادی (منطقه آبی) و حالت پایه (نوار قرمز)



شکل (۸): PDF و CDF تابع هدف در مدل تصادفی پیشنهادی



شکل (۹): پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن روش پیشنهادی

بررسی مقیاس‌پذیری، آزمایش‌هایی بر روی شبکه‌های بزرگتر IEEE ۳۳ باسه و ۸۵ باسه انجام شد و زمان‌های CPU در جدول (۵) نشان داده شده است. با افزایش اندازه شبکه، زمان‌های CPU افزایش می‌یابد، اما تعداد سناریوها تأثیر چندانی بر زمان محاسبات ندارد.

جدول (۴): عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسئله مورد نظر

شماره سناریو	ارزش هدف (دلار)		مدت زمان CPU	
	PH	BF	PH	BF
۲	۱۹۳۰/۳	۱۹۶۶/۲	۱۱۹۳	۷۶۸۶
۴	N/A	۲۱۶۵/۲	N/A	۸۹۱۲
۶	N/A	۲۵۱۳/۶	N/A	۱۰۵۹۵
۸	N/A	۲۳۷۶/۳	N/A	۸۰۶۷
۱۰	N/A	۲۱۹۸/۱	N/A	۱۰۸۱۳
۲۰	N/A	۲۲۶۵/۳	N/A	۱۰۱۶۶
۴۰	N/A	۱۹۱۶/۸	N/A	۱۸۲۱۸
۶۰	N/A	۱۸۷۴/۱	N/A	۱۳۱۸۶

جدول (۵): زمان اجرای روش پیشنهادی برای سناریوهای مختلف

سناریو	۲۰	۴۰	۶۰
۳۳ IEEE باسه	۱۲۸۶۳/۲۲	۱۷۸۹۲/۳۶	۱۴۲۸۹/۱۴
۸۵ IEEE باسه	۱۸۶۹۹/۴۵	۱۵۹۸۷/۰۵	۱۷۱۹۰/۴۷

شکل (۷) منحنی تاب‌آوری شبکه را برای دو روش بررسی می‌کند: یکی با استفاده از باتری‌های سیار و دیگری بدون این باتری‌ها. محور عمودی بار تأمین‌شده و محور افقی زمان عملیات شبکه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از باتری‌های سیار هم میزان اختلالات بار را کاهش داده و هم سرعت بازیابی شبکه را افزایش داده است، که در نهایت منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع می‌شود. باتری‌های سیار با جابجایی در زمان سیل و تأمین انرژی برای منابع پراکنده و بارهای حساس، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری شبکه ایفا می‌کنند. علاوه بر این، توابع توزیع احتمال و جمعیتی (PDF و CDF) تابع هزینه در سناریوهای مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است که می‌تواند به اپراتور شبکه در ارزیابی ریسک ناشی از عدم قطعیت کمک کند. شایان ذکر است که اپراتور شبکه، بسته به سطح ریسک‌پذیری یا ریسک‌گریزی خود، می‌تواند با انتخاب سناریوهای مختلف، شبکه را در برابر ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت ایمن کند. این انتخاب‌ها به بودجه موجود و اهمیت بارهای شبکه بستگی دارد. انتخاب سناریوهای بدبینانه ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های شبکه شود، اما در مقابل، سطح ریسک سیستم را کاهش می‌دهد. شکل (۹) پروفیل ولتاژ را با در نظر گرفتن روش پیشنهادی نشان می‌دهد. این پروفیل ولتاژ، عملکرد شبکه توزیع را در شرایط مختلف عملیاتی و با استفاده از تجهیزات ذخیره‌ساز باتری سیار نشان می‌دهد. در این نمودار، تأثیر استفاده از

۴- نتیجه گیری

این مقاله تلاش کرد تا یک روش‌شناسی را برای حداکثر کردن بازده سرمایه‌گذاری برای ذخیره‌سازهای باتری قابل حمل ارائه دهد که هدف آن ارتقای تاب‌آوری این شبکه خود در برابر سیل شدید است. قابلیت حمل باتری‌های نصب‌شده بر روی خودرو امکان‌سازش بین بهره‌برداری کم‌هزینه در طول بهره‌برداری عادی و نیاز به افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت در صورت وقوع بلایای طبیعی مانند سیل را فراهم می‌کند. برای در نظر گرفتن نیاز به جابه‌جایی باتری‌های قابل حمل در پاسخ به برخی از شرایط فاجعه‌بار، یک برنامه‌ریزی مخروطی مختلط مرتبه دوم با گزینه‌های جبرانی باینری به‌عنوان یک مدل بهینه‌سازی ارائه شده است. همچنین از یک الگوریتم پوشش تدریجی کارآمد برای بهینه‌سازی مسئله به طور دقیق و سریع استفاده می‌شود. مطالعات عددی نشان می‌دهند که در مقایسه با مواردی که ذخیره‌ساز باتری ثابت وجود ندارد، باتری‌های نصب‌شده بر روی خودرو نه تنها هزینه‌های بهره‌برداری کل شبکه را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند، بلکه مقدار قطعی توان ناشی از بلایای طبیعی را نیز کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر، باتری‌های نصب‌شده بر روی خودرو در حالت عادی شبکه با اعمال معاملات انرژی در ساعات کم‌وزیاد بار، منحنی بار را صاف کرده‌اند که به نوبه خود هزینه خرید مصرف‌کنندگان و نوسانات تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز کاهش داده است. علاوه بر این، این تأسیسات سیار، با حرکت بین باس‌های مختلف شبکه مانند پل مجازی، بخشی از مصرف را در یک شرایط اضطراری تأمین می‌کنند و همچنین توان استارت لازم را برای راه‌اندازی مجدد واحدهای تولید پراکنده فراهم می‌کنند.

۵- مراجع

7. H. Zhang, P. Wang, S. Yao, X. Liu, T. Zhao, "Resilience Assessment of Interdependent Energy Systems Under Hurricanes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3682-3694, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108616>
8. M. A. Mohamed, T. Chen, W. Su, T. Jin, "Proactive Resilience of Power Systems Against Natural Disasters: A Literature Review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 163778-163795, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952362
9. T. Khalili, M. T. Hagh, S. G. Zadeh, S. Maleki, "Optimal Reliable and Resilient Construction of Dynamic Self-adequate Multi-microgrids Under Large-scale Events," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 10, pp. 1750-1760, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6222>
10. S. S. Gharehveran, S. Ghassem Zadeh, N. Rostami, "Resilience-oriented planning and pre-positioning of vehicle-mounted energy storage facilities in community microgrids," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, pp. 108263, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108263>
11. F. Ni, et al., "Enhancing Resilience of DC Microgrids With Model Predictive Control Based Hybrid Energy Storage System," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 128, pp. 106738, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106738>
12. J. P. Moreno, C. Rahmann, R. Moreno, L. Morán "Co-optimizing transmission and BESS expansions with system strength constraints," *Electric Power Systems Research*, vol. 235, pp. 110696, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110696>
13. X. Jiang, J. Chen, W. Zhang, Q. Wu, Y. Zhang, J. Liu, "Two-step Optimal Allocation of Stationary and Mobile Energy Storage Systems in Resilient Distribution Networks," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 788-799, 2021. doi: 10.35833/MPCE.2020.000910
14. A. Karimi Saiedabadi, B. Mozafari, S. Soleymani, and H. Mohammadnezhad Shourkaei, "Optimal Operation of the Water-Energy Supply System in an Islanded Microgrid with Several Energy Carriers to Improve Resilience Against Cyber Attacks," *Passive Defense*, vol. 13, no. 4, pp. 1-10, 2023. (in persian). 20.1001.1.20086849.1401.13.4.1.0
15. M. Abedini and H. Moazami, "Reconfiguration of electricity distribution networks to increase resilience and reliability using fuzzy objective functions and game theory," *Passive Defense*, vol. 15, no. 3, pp. 27-38, 2024 (in persian). 20.1001.1.20086849.1403.15.3.3.4
16. D. Baghbanzadeh, et al., "Resilience Improvement of Multi-microgrid Distribution Networks Using Distributed Generation," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 27, pp. 100503, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100503>
17. N. Saedi, D. Baharvand, K. Shirini, et al., "Prediction of electrical energy consumption using principal component analysis and independent components analysis," *Journal of Supercomputing*, vol. 81, p. 1072, 2025. doi: 10.1007/s11227-025-07505-2
18. S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. C. Khavar, and A. Abdollahi, "Optimizing day-ahead power scheduling: a novel MIQP approach for enhanced SCUC with renewable integration," *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Art. no. 101022, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101022>
19. J. Tan, R. M. Radhi, K. Shirini, S. S. Gharehveran, Z. Parisooz, M. Khosravi, and H. Azarinfar, "Innovative framework for fault detection and system resilience in hydropower operations using digital twins and deep learning," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 15669, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98235-1>
20. S. S. Gharehveran, S. Ghassemzadeh, N. Rostami, "Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages," *Sustainable Cities and Society*, vol. 83, pp. 103952, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103952>
21. H. Zaki Dizaji, K. Shirini, A. Taheri Hajivand, and N. Monjezi, "Modelling variables affecting the yield of sugarcane fields using deep recurrent neural network," *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 55, no. 2, pp. 93-108, 2024. doi: 10.22059/ijbse.2025.378958.665557
22. F. Gazijahani, J. Salehi, M. Shafie-khah, "Benefiting From Energy-Hub Flexibilities to Reinforce Distribution System Resilience: A Pre-and Post-Disaster Management Model," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 3381-3390, 2022. DOI: 10.1109/jsyst.2022.3147075

1. S. Paul, A. Poudyal, S. Poudel, A. Dubey, Z. Wang, "Resilience Assessment and Planning In Power distribution systems: Past and future considerations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, pp. 113991, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113991>
2. M. Panteli, P. Mancarella, "The grid: Stronger, Bigger, Smarter? Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 58-66, May/June 2015. doi: 10.1109/MPE.2015.2397334
3. J. J. Plotnek, J. Slay, "Power Systems Resilience: Definition And Taxonomy With A View Towards Metrics," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 33, pp. 100411, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100411>
4. K. Jin, H. Banizaman, S. S. Gharehveran, et al., "Robust power management capabilities of integrated energy systems in the smart distribution network including linear and non-linear loads," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 6615, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-89817-0
5. H. H. Abdeltawab, Y. A. Mohamed, "Mobile Energy Storage Scheduling And Operation in Active Distribution Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 6828-6840, 2017. doi: 10.1109/TIE.2017.2682779
6. F. Mujjuni, T. R. Betts, R. E. Blanchard, "Evaluation of power systems resilience to extreme weather events: A review of methods and assumptions," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 87279-87296, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304643

31. Taherihajivand, A. , shirini, K. , & samadi Gharehveran, S. (2024). Weed detection in fields using convolutional neural network based on deep learning. *Agricultural Engineering*, 47(1), 129-142. (In Persian) doi: 10.22055/agen.2024.45327.1688
32. Taherihajivand, A. , shirini, K. , & samadi gharehveran, S. (2024). An Overview of Product Performance Prediction Using Artificial Algorithms. *Agricultural Mechanization*, 9(3), 1-14. (In Persian) doi: 10.22034/jam.2024.61899.1276
33. Shirini, K., Kordan, M.B. & Gharehveran, S.S. Impact of learning rate and epochs on lstm model performance: a study of chlorophyll-a concentrations in the Marmara Sea. *J Supercomput* 81, 265 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06806-2>
34. zahiri, M., shirini, K., & samadi gharehveran, S. (2024). Network traffic analysis with machine learning for faster detection of distributed denial of service attack. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 4, 67-76, (2024). (In Persian) <https://dori.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.1.5>
35. Taheri hajivand, A. , Shirini, K. , & Samadi Gharehveran, S. (2024). Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 215-234. (In Persian) doi: 10.22067/jam.2023.81735.1157
36. shirini, K. , Taherihajivand, A. , & samadi Gharehveran, S. (2023). A review of algorithms for solving the project scheduling problem with resource-constrained considering agricultural problems. *Agricultural Mechanization*, 8(1), 1-14. (In Persian) doi: 10.22034/jam.2023.55751.1227
37. Zamanian, S., & sadeghzadeh, S. M. (2022). Presentation of an Economic-Environmental Planning Model for the Interconnected Water and Electricity Network Microgrids. *Passive Defense*, 13(3), 67-75. (In Persian). Dor: 20.1001.1.20086849.1401.13.3.7.4
38. abedini, M., & Moazami, H. (2024). Reconfiguration of electricity distribution networks to increase resilience and reliability using fuzzy objective functions and game theory. *Passive Defense*, 15(3), 27-38. (In Persian) 20.1001.1.20086849.1403.15.3.3.4
39. Taghi Tahooneh, M., Dashti, R., Ghaffarpour, R., & Jalali Farahani, G. (2021). New Critical Infrastructure Protection Strategies. *Passive Defense*, 11(4), 1-6. (In Persian) dor: 20.1001.1.20086849.1399.11.4.1.6
23. S. Yao, P. Wang, X. Liu, H. Zhang, T. Zhao, "Rolling Optimization of Mobile Energy Storage Fleets for Resilient Service Restoration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1030-1043, 2019. doi: 10.1109/TSG.2019.2930012.
24. N. N. Ibrahim, J. J. Jamian, M. M. Rasid, "Optimal multi-objective sizing of renewable energy sources and battery energy storage systems for formation of a multi-microgrid system considering diverse load patterns," *Energy*, vol. 304, pp. 131921, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131921>
25. M. T. Sattari, K. Shirini, and S. Javidan, "Evaluating the efficiency of dimensionality reduction methods in improving the accuracy of water quality index modeling in Qizil-Uzen River using machine learning algorithms," *Water and Soil Management and Modelling*, vol. 4, no. 2, pp. 89–104, 2024. doi: 10.22098/mmws.2023.12434.1241
26. M. T. Sattari, R. Bagheri, K. Shirini, and P. Allahverdipour, "Modeling Daily and Monthly Rainfall in Tabriz using Ensemble Learning Models and Decision Tree Regression," *Journal of the Climate Change Research*, vol. 5, no. 18, pp. 31–48, 2024. Doi: 10.30488/ccr.2024.433394.1192
27. M. Ahrari, K. Shirini, S. S. Gharehveran, M. G. Ahsaei, S. Haidari, P. Anvari, "A security-constrained robust optimization for energy management of active distribution networks with presence of energy storage and demand flexibility," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, pp. 111024, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111024>
28. S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. Cheshmeh Khavar, S. H. Mousavi, A. Abdolahi, "Deep learning-based demand response for short-term operation of renewable-based microgrids," *Journal of Supercomputing*, vol. 80, pp. 26002–26035, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06407-z>
29. Shirini, K., Aghdasi, H.S. & Saeedvand, S. A Comprehensive Survey on Multiple-Runway Aircraft Landing Optimization Problem. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 25, 1574–1602 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42405-024-00747-z>
30. Shirini, K., Aghdasi, H.S. & Saeedvand, S. Multi-objective aircraft landing problem: a multi-population solution based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. *J Supercomput* 80, 25283–25314 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06385-2>