



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(1):17-34

Portable Energy Storage Systems Expansion Planning to Improve the Power Systems Resilience

Mohammad Reza Sheibani¹, Assistant Professor, Mehdi Zeraati¹, Assistant Professor, Farkhondeh Jabbari¹, Assistant Professor, Ehsan Heydarian-Forushani, Assistant Professor

¹ Power Systems Operation and Planning Research Department, Niroy Research Institute (NRI), Tehran, Iran.
² Department of Electrical & Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

Abstract:

Providing electricity to critical electrical loads in all conditions is one of the important goals facing designers and operators of power systems. On the other hand, power systems are always exposed to various events and disasters. The ability to face these events and disasters in power systems is brought up with the concept of resilience. In this article, improving the resilience of distribution networks is pursued. For this purpose, the expansion of fixed and portable energy storage systems in distribution networks has been carried out to keep distribution networks resilience. Due to the importance of providing the critical loads, meeting the critical loads is considered as the main resilience criterion. The proposed model is formulated as a mixed integer linear optimization problem. Minimization of costs is considered as the objective function and fulfillment of restrictions in normal and resilience conditions of the network are considered as the constraints of the problem. In this model, the distribution network is divided into several separate zones and the fulfillment of critical loads in the zones is followed by the available resources and energy storage systems. The results of studies on the test network show the ability of portable energy storage systems to meet the requirements of network resilience.

Keywords: Distribution networks, Resilience, Portable energy storage systems.

Received: 22 December 2020

Revised: 25 February 2021

Accepted: 13 March 2021

Corresponding Author: Mohammad Reza Sheibani, msheibani@nri.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1997267.1097>





مقاله پژوهشی

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی قابل حمل به منظور بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت

محمدرضا شیبانی^۱، استادیار، مهدی زراعتی^۱، استادیار، فرخنده جباری^۱، استادیار، احسان حیدریان فروشانی^۲، استادیار

۱- گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده: برق‌رسانی به بارهای الکتریکی حیاتی در تمام شرایط یکی از اهداف مهم پیش‌روی طراحان و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت است. از طرفی سیستم‌های قدرت همواره در معرض حوادث و فجایای مختلف قرار دارند. قابلیت مواجهه با این حوادث و فجایا در سیستم‌های قدرت با مفهوم تاب‌آوری مطرح می‌شود. در این مقاله، بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع دنبال می‌شود. به این منظور به توسعه ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل در شبکه‌های توزیع برای تاب‌آور نگه‌داشتن شبکه‌های توزیع پرداخته شده است. به دلیل اهمیت برق‌رسانی به بارهای حیاتی، برآورده شدن بارهای حیاتی به عنوان معیار اصلی برآورده شدن معیار تاب‌آوری در نظر گرفته می‌شود. مدل پیشنهادی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد صحیح فرمول‌بندی شده است. حداقل‌سازی هزینه‌ها به عنوان تابع هدف و برآورده شدن محدودیت‌ها، در شرایط نرمال و تاب‌آور شبکه به عنوان قیود مسأله در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، شبکه توزیع به چند ناحیه مجزا تقسیم شده و برآورده شدن بارهای حیاتی در ناحیه‌ها به صورت جزیره‌ای توسط منابع موجود و ذخیره‌سازهای انرژی دنبال می‌شود. نتایج مطالعات بر روی شبکه تست، قابلیت ذخیره‌سازهای قابل حمل به منظور برآورده‌سازی شرایط تاب‌آوری شبکه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع، تاب‌آوری، ذخیره‌سازهای انرژی قابل حمل.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

نویسنده مسئول: محمدرضا شیبانی، msheibani@nri.ac.ir

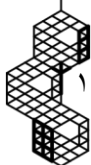
DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1997267.1097>

به‌طور سنتی شبکه‌های برق با هدف تغذیه بارهای متصل تحت شرایط بهره‌برداری عادی اما مقاوم در مقابل حوادث خسارت‌بار برنامه‌ریزی و ساخته می‌شوند. بلایای طبیعی، حوادث آب و هوایی شدید، و حملات عمدانه می‌تواند باعث بروز آسیب‌های جبران‌ناپذیر به شبکه برق و اختلال در برق‌رسانی به بسیاری از مشتریان شود. در نتیجه، اثرات منفی نظیر خروج تجهیزات و خاموشی‌ها باعث ایجاد خسارت‌های اقتصادی سنگین و نارضایتی‌های اجتماعی می‌شود. بر اساس آمارهای ارائه‌شده، وقوع حوادث خسارت‌بار در مقایسه با ۵۰ سال قبل سه برابر شده است [۱]. به‌طور مشخص، دهه گذشته میلادی شاهد بیشترین نرخ رخداد چنین حوادثی بوده است. عبارت تاب‌آوری^۱ برای بررسی مقاومت سیستم در برابر حوادث با احتمال پائین اما اثرات زیاد به‌کار برده می‌شود. مطابق با تعریف مؤسسه تحقیقات برق^۲ [۲]، در ادبیات سیستم قدرت، تاب‌آوری دلالت بر توانایی مقاومت سیستم در برابر حوادث کم‌رخداد با اثرگذاری بالا و بازیابی سریع از این وضعیت دارد. بنابراین، بازیابی بارهای حیاتی در طول زمان حادثه و پس از آن یک اقدام مهم است. طبق این تعریف، تفاوت اصلی مفهوم تاب‌آوری و قابلیت اطمینان^۳ برای سیستم‌های قدرت مشخص می‌شود. در مطالعات تاب‌آوری حوادث و فجایع با فراوانی پایین ولی اثرگذاری زیاد در نظر گرفته می‌شوند، اما در مطالعات قابلیت اطمینان، حوادث با فراوانی نسبتاً زیاد که به‌طور معمول، برای سیستم اتفاق می‌افتند، مد نظر قرار می‌گیرد.

اقدامات برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع شامل اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه است. اقدامات اصلاحی، نظیر بارزدایی و/یا تغییر ساختار شبکه، هم‌زمان و بعد از وقوع یک حادثه انجام می‌شوند. اقدامات پیشگیرانه، نظیر استفاده از کابل‌های زیرزمینی، ساختن پست‌ها در ارتفاع بالاتر نسبت به زمین و مدیریت پوشش گیاهی (کاهش ایجاد مشکل در زمان طوفان‌های شدید)، باعث استحکام زیرساخت سیستم و در عوض، افزایش تاب‌آوری می‌شود [۳]. تاکنون تحقیقات بسیاری برای ارزیابی و اندازه‌گیری و همچنین بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انجام شده است. بهبود تاب‌آوری یک شبکه توزیع، معمولاً به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره در نظر گرفته می‌شود.

پیکربندی مجدد^۴ شبکه به‌عنوان یک راه‌حل بالقوه برای بازیابی شبکه‌ها بعد از وقوع یک خطا یا مجموعه‌ای از خطاها به‌حساب می‌آید [۴]. یک روش پیکربندی مجدد دو مرحله‌ای در [۵] برای حداکثرسازی تاب‌آوری سیستم توزیع در برابر حوادث آب و هوایی شدید ارائه شده است. منابع تولید پراکنده در سرتاسر سیستم قدرت نیز به‌عنوان منابع بالقوه تاب‌آوری شناخته می‌شوند. در [۶]، نویسندگان استفاده از منابع تولید پراکنده موجود برای تشکیل‌دادن ریزشبکه‌های جزیره‌ای با هدف تأمین بارهای حیاتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. یک رویکرد دو مرحله‌ای برای مسیریابی و زمان‌بندی بهینه منابع توان متحرک قبل از حوادث آب و هوایی شدید در [۷] توسعه داده شده است تا تاب‌آوری سیستم توزیع را حداکثر کند. در [۸]، پاسخ‌گویی تقاضای اضطراری برای حداقل نمودن فرسودگی خطوط هوایی و حداکثرسازی قابلیت اطمینان در شرایط عدم قطعیت در یک چارچوب چند هدفه پیشنهاد شده است. فناوری فنرهای الکتریکی^۵ که اخیراً معرفی شده است نیز به‌عنوان یک منبع بالقوه مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. بهبود تاب‌آوری با استفاده از فنرهای الکتریکی در [۱۰] برای هماهنگی ولتاژ و کنترل فرکانس برای تأمین قابلیت اطمینان بارهای حیاتی پیشنهاد شده است.

اگرچه منافع استفاده از منابع پراکنده تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع با هدف افزایش تاب‌آوری بسیار زیاد است، اما نصب و کنترل فلوی توان آن‌ها کاملاً چالش برانگیز است. از این‌رو، به‌کارگیری واحدهای ذخیره‌سازی انرژی، پایداری، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری را از طریق کنترل خطاهای پیش‌بینی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نوسانات ولتاژ و افزایش قابلیت انعطاف شبکه بهبود می‌دهد [۱۱، ۱۲]. جایابی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای تغذیه بارهای حیاتی در طول حوادث شدید مورد نیاز است. نویسندگان مراجع [۱۳] و [۱۴] نشان داده‌اند که مکان بهینه منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی نقش مهمی در مقابله با عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر دارد. ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل، به‌دلیل پویایی و انعطاف‌پذیری‌شان توجه محققان را به‌خود جلب کرده‌اند [۱۵]. در [۱۶]، ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل همراه با پیکربندی دوباره شبکه و زمان‌بندی منابع ریزشبکه موجود برای حداقل کردن مجموع هزینه سیستم بعد از حادثه و افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع استفاده شده است. یک مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی در [۱۷] برای بهینه کردن ظرفیت و مکان واحدهای ذخیره‌سازی انرژی در برابر زمین‌لرزه‌ها فرمول‌بندی شده است. در [۱۸]، یک مدل بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده است که سرمایه‌گذاری‌ها در واحدهای ذخیره‌سازی انرژی متحرک را برای تشکیل ریزشبکه‌های دینامیکی، بهینه می‌کند. در [۱۹]، نویسندگان بر روی ساختن یک مدل سه‌سطحی (مدافع، مهاجم، و مدافع) برای حل تعیین بهینه





اندازه و مکان تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی قابل حمل، در ریزشکبه‌های توزیع غیرمتمرکز با اهداف مرتبط با تاب‌آوری تمرکز نموده‌اند. بنابراین، برای پیدا کردن اندازه و مکان بهینه و در نظر گرفتن رویکردهای حمله مختلف، یک الگوریتم ژنتیک وفقی در این مقاله استفاده شده است.

متحرک بودن ذخیره‌ساز انرژی در [۲۰] برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری چندین ریزشکبه هوشمند استفاده شده است. در [۲۱]، ارزش مشروط در خطر برای بهینه نمودن ذخیره‌سازی انرژی در یک ریزشکبه اقتصادی با هدف افزایش تاب‌آوری آن در برابر حوادث شدید استفاده شده است در حالی که کاهش مخارج بهره‌برداری و مدل‌سازی عدم قطعیت تولید و مصرف نیز در نظر گرفته شده‌اند. در [۲۲]، یک روش برنامه‌ریزی فصلی برای جابجایی و تعیین اندازه مناسب واحدهای ذخیره‌سازی به‌همراه پیکربندی مجدد بهینه شبکه پیشنهاد شده است. نویسندگان در [۲۳]، یک الگوی بلندمدت برای برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی با هدف حداکثرسازی منافع ذخیره‌سازی انرژی پراکنده ارائه کرده‌اند. در وضعیت بروز پیشامد، نویسندگان، کاهش بار به‌منظور اجتناب از خاموشی کامل در طول افق برنامه‌ریزی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

در این مقاله، از حضور ذخیره‌سازهای انرژی برای تاب‌آور نمودن شبکه‌های توزیع استفاده شده است. بدین‌منظور یک مدل جدید برای توسعه ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل، برای برآورده‌سازی بارهای حیاتی در شرایط وقوع حادثه شدید به‌عنوان معیار تاب‌آوری پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی، بدترین شرایط شبکه در زمان وقوع حادثه در نظر گرفته شده است. در این شرایط چنین فرض شده است که در زمان وقوع حادثه امکان هیچ‌گونه ارتباطی بین نواحی ایزوله شبکه توزیع با سایر نواحی و شبکه بالادست وجود ندارد. به این‌منظور، در ادامه در ابتدا مدل پیشنهادی، معرفی و فرمول‌بندی ریاضیاتی مدل ارائه شده است. پس از آن در بخش سوم مدل پیشنهادی بر روی شبکه تست پیاده‌سازی شده و نتایج مطالعات، بررسی و تحلیل شده است. در پایان، نتیجه‌گیری حاصل از انجام مطالعات ارائه شده است.

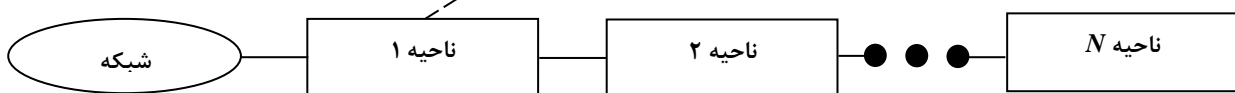
۲- معرفی مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این مقاله، به‌منظور بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است. به این‌منظور، ساختار نمایش داده‌شده در شکل (۱) برای شبکه توزیع مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. در ساختار پیشنهادی، شبکه توزیع مورد مطالعه به چند ناحیه تقسیم شده است. هر ناحیه می‌تواند شامل منابع تولید تجدیدپذیر و همچنین میکروتوربین‌ها به‌عنوان منابع تولید پراکنده برای تولید انرژی الکتریکی باشد. بارهای الکتریکی در هر ناحیه به دو دسته بارهای معمولی و حیاتی تقسیم شده است. هدف از این نوع تقسیم‌بندی آن است که برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی به‌صورتی انجام شود که بارهای حیاتی تحت هر شرایطی برآورده شوند. در واقع برآورده‌شدن بارهای حیاتی به‌عنوان معیار اصلی برآورده‌شدن معیار تاب‌آوری در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. هدف از مدل پیشنهادی در این مقاله، برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی در هر ناحیه به‌منظور برآورده‌سازی معیار تاب‌آوری در هر کدام از نواحی شبکه مورد مطالعه است. در این مدل، برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل انجام شده است. از جمله ذخیره‌سازهای ثابت می‌توان به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده اشاره کرد که در شکل (۱) نیز نمایش داده شده است. در مدل پیشنهادی مطابق شکل (۱)، از قابلیت ذخیره‌سازهای قابل حمل مثل باتری‌ها به‌منظور برآورده‌سازی معیار تاب‌آوری در هر ناحیه استفاده شده است.

هدف اصلی مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل در شبکه معرفی‌شده فوق، به‌منظور برآورده‌سازی معیار تاب‌آوری در هر ناحیه در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب ظرفیت و مکان هر کدام از ذخیره‌سازها در شبکه مورد مطالعه تعیین می‌شود. در این مدل، شبکه در دو حالت نرمال و تاب‌آور در نظر گرفته خواهد شد. شرایط نرمال مربوط به حالتی است که اتفاقی برای هیچ‌کدام از تجهیزات شبکه پیش نیامده است. در شرایط تاب‌آور چنین فرض می‌شود که حادثه‌ای برای شبکه به‌وجود آمده است که ارتباط هر یک از نواحی با شبکه بالادست و سایر شبکه‌ها از بین رفته است. در این شرایط همچنین تصور شده است که امکان انتقال انرژی توسط خطوط شبکه در داخل نواحی نیز وجود ندارد. در این شرایط هر بار تنها می‌تواند توسط منابع تولید و ذخیره‌سازهای متصل به شین بار و یا ذخیره‌سازهای قابل حمل تغذیه شود. معیار ناحیه‌بندی در شبکه مورد مطالعه نیز چنین می‌باشد که در هر ناحیه حداقل یک منبع تولید پراکنده حضور داشته باشد. از طرفی، معیار قابلیت جابجایی ذخیره‌سازهای قابل حمل در هر ناحیه نیز باید مد نظر قرار گیرد. به این معنی که، ذخیره‌ساز در نظر گرفته‌شده برای شین‌های داخل هر ناحیه، در شرایط تاب‌آور تنها



می‌توانند بین شین‌های همان ناحیه جابجا شوند. البته فاصله زمانی مورد نیاز برای جابجایی ذخیره‌سازهای قابل حمل نیز باید در مسأله برنامه‌ریزی توسعه ذخیره‌سازهای انرژی مد نظر قرار گیرد. شایان ذکر است که ذخیره‌سازهای قابل حمل در شرایط نرمال همانند ذخیره‌سازهای ثابت فرض شده و امکان جابجایی آن‌ها در شرایط نرمال در نظر گرفته نخواهد شد. در ادامه فرمول‌بندی مدل پیشنهادی ارائه شده است.



شکل (۱): ساختار کلی سیستم مورد مطالعه

مدل پیشنهادی به صورت مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده است. تابع هدف مسأله مطابق رابطه زیر، حداقل‌سازی هزینه سالانه تعریف می‌شود:

$$\text{Min } YIC + YOC \quad (1)$$

تابع هزینه مدل مورد نظر براساس رابطه (۱) به صورت مجموع هزینه سالانه سرمایه‌گذاری بر روی ذخیره‌سازهای انرژی (YIC) و هزینه سالانه بهره‌برداری از سیستم (YOC) تعریف می‌شود. هزینه سالانه سرمایه‌گذاری بر روی ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$YIC = \sum_{b=1}^{N_b} EC_b^{fixed\ storage} * AEC^{fixed\ storage} + PC_b^{fixed\ storage} * APC^{fixed\ storage} + EC_b^{portable\ storage} * AEC^{portable\ storage} + PC_b^{portable\ storage} * APC^{portable\ storage} \quad (2)$$



مطابق رابطه (۲)، هزینه سرمایه‌گذاری بر روی ذخیره‌سازهای انرژی به صورت مجموع هزینه سرمایه‌گذاری متناسب با ظرفیت توان و انرژی ذخیره‌سازهای ثابت و قابل حمل در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۱)، تعریف هر کدام از اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها ارائه شده است.

جدول (۱): واژه‌نامه

متغیر	توضیح
b	اندیس شین
d	اندیس روز نمونه سال
h	اندیس ساعت
z	اندیس ناحیه
N_b	تعداد شین
M_d	تعداد روزهای با نمایندگی روز d
N_d	تعداد روزهای نمونه سال
N_h	تعداد ساعات مدل شده در روز نمونه
NT_z	حداکثر مدت زمان لازم برای انتقال ذخیره‌ساز قابل حمل داخل ناحیه z
NE	تعداد ساعات شرایط تاب‌آور سیستم (مدت زمان لازم برای بازگشت سیستم به حالت نرمال پس از وقوع خطا)
OC_b^{MT}	هزینه نهایی میکروتوربین در شین b
OC_b^{RES}	هزینه نهایی منبع تولید تجدیدپذیر در شین b
$P_{b,d,h}^{RES}$	توان تولیدی توسط منبع تولید تجدیدپذیر در شین b در روز d و ساعت h
$\frac{p_b^{MT}}{p_b^{RES}}$	حداکثر قابلیت تولید توان اکتیو توسط میکروتوربین تعبیه شده در شین b در روز d و ساعت h
$\frac{p_b^{MT}}{q_b^{MT}}$	حداقل قابلیت تولید توان اکتیو توسط میکروتوربین تعبیه شده در شین b در روز d و ساعت h
$\frac{q_b^{MT}}{q_b^{RES}}$	حداقل قابلیت تولید توان اکتیو توسط میکروتوربین تعبیه شده در شین b در روز d و ساعت h
$AEC^{fixed storage}$	هزینه سالانه سرمایه‌گذاری واحد ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز انرژی ثابت
$APC^{fixed storage}$	هزینه سالانه سرمایه‌گذاری واحد ظرفیت توان ذخیره‌ساز انرژی ثابت
$AEC^{portable storage}$	هزینه سالانه سرمایه‌گذاری واحد ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل
$APC^{prtable storage}$	هزینه سالانه سرمایه‌گذاری واحد ظرفیت توان ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل
$OC_b^{fixed storage,ch}$	هزینه نهایی شارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b
$OC_b^{fixed storage,dis}$	هزینه نهایی دشارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b
$OC_b^{portable storage,ch}$	هزینه نهایی شارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b
$OC_b^{portable storage,dis}$	هزینه نهایی دشارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b
$EF_b^{fixed storage,ch}$	بازده شارژ انرژی ذخیره‌ساز ثابت در شین b
$EF_b^{fixed storage,dis}$	بازده دشارژ انرژی ذخیره‌ساز ثابت در شین b
$EF_b^{portable storage,ch}$	بازده شارژ انرژی ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b
$EF_b^{portable storage,dis}$	بازده دشارژ انرژی ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b
$DOD_b^{fixed storage}$	عمق دشارژ ذخیره‌ساز انرژی ثابت در شین b
$DOD_b^{portable storage}$	عمق دشارژ ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل در شین b
$D_{b,d,h}^{active}$	بار اکتیو مصرفی در شین b در روز d و ساعت h
$D_{b,d,h}^{reactive}$	بار راکتیو مصرفی در شین b در روز d و ساعت h
$Gl_{b\hat{b}}$	رسانایی خط بین شین b و شین متصل \hat{b}
$Bl_{b\hat{b}}$	سوسپتانس خط بین شین b و شین متصل \hat{b}
$\frac{V_b}{V_{\hat{b}}}$	حداقل دامنه ولتاژ شین b
$\frac{V_{\hat{b}}}{V_b}$	حداکثر دامنه ولتاژ شین b
$fl_{b\hat{b}}^{active}$	قابلیت عبور فلوی توان اکتیو خط بین شین‌های b و \hat{b}
$EC_b^{fixed storage}$	ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز انرژی ثابت در شین b
$PC_b^{fixed storage}$	ظرفیت توان ذخیره‌ساز انرژی ثابت در شین b
$EC_b^{portable storage}$	ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل در شین b



ظرفیت توان ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل در شین b
 انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h
 انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h
 انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 توان اکتیو تولیدی میکروتوربین در شین b در روز d و ساعت h
 توان راکتیو تولیدی میکروتوربین در شین b در روز d و ساعت h
 توان اکتیو تولیدی میکروتوربین در شین b در روز d و ساعت h
 توان شارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h
 توان دشارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h
 توان شارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h
 توان دشارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h
 توان شارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 توان دشارژ ذخیره‌ساز ثابت در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 توان شارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 توان دشارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور
 فلوی توان اکتیو خط بین شین b و شین متصل \hat{b} در روز d و ساعت h
 فلوی توان راکتیو خط بین شین b و شین متصل \hat{b} در روز d و ساعت h
 دامنه ولتاژ شین b در روز d و ساعت h
 زاویه ولتاژ شین b در روز d و ساعت h
 شاخص وضعیت شارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور (یک به معنی شارژ شدن و صفر به معنی شارژ نشدن)
 شاخص وضعیت دشارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شین b در روز d و ساعت h در شرایط تاب‌آور (یک به معنی دشارژ شدن و صفر به معنی دشارژ نشدن)

$PC_b^{portable storage}$
 $E_{b,d,h}^{fixed storage}$
 $E_{b,d,h}^{portable storage}$
 $E_{b,d,h}^{fixed storage,resilience}$
 $E_{b,d,h}^{portable storage,resilience}$
 $p_{b,d,h}^{MT}$
 $q_{b,d,h}^{MT}$
 $p_{b,d,h}^{MT,resilience}$
 $p_{b,d,h}^{fixed storage,ch}$
 $p_{b,d,h}^{fixed storage,dis}$
 $p_{b,d,h}^{portable storage,ch}$
 $p_{b,d,h}^{portable storage,dis}$
 $p_{b,d,h}^{fixed storage,ch,resilience}$
 $p_{b,d,h}^{fixed storage,dis,resilience}$
 $p_{b,d,h}^{portable storage,ch,resilience}$
 $p_{b,d,h}^{portable storage,dis,resilience}$
 $f_{b\hat{b},d,h}^{active}$
 $f_{b\hat{b},d,h}^{reactive}$
 $V_{b,d,h}$
 $\theta_{b,d,h}$
 $ch_{b,d,h}^{portable storage,resilience}$
 $dis_{b,d,h}^{portable storage,resilience}$

هزینه سالانه بهره‌برداری از سیستم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$YOC = \sum_{b=1}^{N_b} YOC_b^{MT} + YOC_b^{RES} + YOC_b^{fixed Storage} + YOC_b^{portable Storage} \quad (3)$$

طبق رابطه (۳)، هزینه سالانه بهره‌برداری به صورت مجموع هزینه‌های بهره‌برداری میکروتوربین‌ها (YOC_b^{MT})، منابع تولید تجدیدپذیر (YOC_b^{RES}) و ذخیره‌سازهای انرژی ثابت ($YOC_b^{fixed Storage}$) و ذخیره‌سازهای قابل حمل ($YOC_b^{portable Storage}$) در نظر گرفته می‌شود. هر کدام از هزینه‌های بهره‌برداری ارائه شده در رابطه (۳) با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود.

$$YOC_b^{MT} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d * \left(\sum_{h=1}^{N_h} OC_b^{MT} * p_{b,d,h}^{MT} \right) \quad (4)$$

$$YOC_b^{RES} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d * \left(\sum_{h=1}^{N_h} OC_b^{RES} * p_{b,d,h}^{RES} \right) \quad (5)$$

$$YOC_b^{fixed storage} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d * \left(\sum_{h=1}^{N_h} (OC_b^{fixed storage,ch} * p_{b,d,h}^{fixed storage,ch} + OC_b^{fixed storage,dis} * p_{b,d,h}^{fixed storage,dis}) \right) \quad (6)$$

$$YOC_b^{portable storage} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d * \left(\sum_{h=1}^{N_h} (OC_b^{portable storage,ch} * p_{b,d,h}^{portable storage,ch} + OC_b^{portable storage,dis} * p_{b,d,h}^{portable storage,dis}) \right) \quad (7)$$



مطابق روابط (۴) و (۵)، هزینه بهره‌برداری میکروتوربین‌ها و منابع تولید تجدیدپذیر براساس هزینه نهایی تولید برق توسط میکروتوربین‌ها و منابع تولید تجدیدپذیر محاسبه می‌شود. براساس روابط (۶) و (۷)، هزینه بهره‌برداری ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و قابل حمل با توجه به توان‌های شارژ و دشارژ هر کدام از ذخیره‌سازهای انرژی و همچنین هزینه نهایی شارژ و دشارژ آن‌ها تعیین می‌شود. نکته قابل توجه آن که در مدل پیشنهادی به منظور مدل‌سازهای هزینه بهره‌برداری، چند روز نمونه سال در نظر گرفته می‌شود و رفتار سایر روزها به صورت مشابه با روز نماینده مورد نظر فرض خواهد شد. قیود مسأله بهینه‌سازی پیشنهادی در ادامه ارائه شده است [۲۴-۲۶].

قیود میکروتوربین [۲۴]:

$$p_b^{MT} \leq p_{b,d,h}^{MT} \leq \overline{p_b^{MT}} \quad (۸)$$

$$q_b^{MT} \leq q_{b,d,h}^{MT} \leq \overline{q_b^{MT}} \quad (۹)$$

مطابق رابطه (۸)، توان اکتیو تولیدی توسط میکروتوربین‌ها در شین‌های مختلف باید در محدوده حداقل و حداکثر قابلیت تولید توان اکتیو توسط این منابع تولید قرار داشته باشد. توان راکتیو تولیدی توسط میکروتوربین‌ها نیز توسط رابطه (۹) محدود می‌شود. قیود ذخیره‌ساز انرژی ثابت [۲۵، ۲۶]:

$$\sum_{h=1}^{24} EF_b^{fixed\ storage, ch} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage, ch} = \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage, dis}} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage, dis} \quad (۱۰)$$

$$E_{b,d,h}^{fixed\ storage} = E_{b,h-1}^{fixed\ storage} + EF_b^{fixed\ storage, ch} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage, ch} - \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage, dis}} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage, dis} \quad \forall h \in [2, 24] \quad (۱۱)$$

$$E_{b,d,1}^{fixed\ storage} = (1 - DOD_b^{fixed\ storage}) * EC_b^{fixed\ storage} + EF_b^{fixed\ storage, ch} * p_{b,d,1}^{fixed\ storage, ch} - \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage, dis}} * p_{b,d,1}^{fixed\ storage, dis} \quad (۱۲)$$

$$E_{b,d,24}^{fixed\ storage} = (1 - DOD_b^{fixed\ storage}) * EC_b^{fixed\ storage} \quad (۱۳)$$

$$(1 - DOD_b^{fixed\ storage}) * EC_b^{fixed\ storage} \leq E_{b,d,h}^{fixed\ storage} \leq DOD_b^{fixed\ storage} * EC_b^{fixed\ storage} \quad (۱۴)$$

$$0 \leq p_{b,d,h}^{fixed\ storage, ch}, p_{b,d,h}^{fixed\ storage, dis} \leq PC_b^{fixed\ storage} \quad (۱۵)$$

تعداد شارژ و دشارژ توان ذخیره‌ساز ثابت در طول هر روز نمونه توسط رابطه (۱۰) پیاده می‌شود. وضعیت شارژ ذخیره‌ساز ثابت در تمام ساعات روز غیر از ساعت ابتدایی روز براساس رابطه (۱۱) تعیین می‌شود. وضعیت شارژ برای ساعت اول توسط رابطه (۱۲) مشخص می‌شود. در رابطه (۱۳) لزوم یکسان بودن وضعیت شارژ در پایان روزهای نمونه اعمال می‌شود. محدودیت‌های انرژی و توان ذخیره‌سازهای ثابت، به ترتیب توسط روابط (۱۴) و (۱۵) تأمین خواهد شد. قیود ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل:

$$\sum_{h=1}^{24} EF_b^{portable\ storage, ch} * p_{b,d,h}^{portable\ storage, ch} = \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{EF_b^{portable\ storage, dis}} * p_{b,d,h}^{portable\ storage, dis} \quad (۱۶)$$

$$E_{b,d,h}^{portable\ storage} = E_{b,h-1}^{portable\ storage} + EF_b^{portable\ storage, ch} * p_{b,d,h}^{portable\ storage, ch} - \frac{1}{EF_b^{portable\ storage, dis}} * p_{b,d,h}^{portable\ storage, dis} \quad \forall h \in [2, 24] \quad (۱۷)$$



$$E_{b,d,1}^{portable\ storage} = (1 - DOD_b^{portable\ storage}) * EC_b^{portable\ storage} + EF_b^{portable\ storage,ch} * p_{b,d,1}^{portable\ storage,ch} - \frac{1}{EF_b^{portable\ storage,dis}} * p_{b,d,1}^{portable\ storage,dis} \quad (18)$$

$$E_{b,d,24}^{portable\ storage} = (1 - DOD_b^{portable\ storage}) * EC_b^{portable\ storage} \quad (19)$$

$$(1 - DOD_b^{portable\ storage}) * EC_b^{portable\ storage} \leq E_{b,d,h}^{portable\ storage} \leq DOD_b^{portable\ storage} * EC_b^{portable\ storage} \quad (20)$$

$$0 \leq p_{b,d,h}^{portable\ storage,ch}, p_{b,d,h}^{portable\ storage,dis} \leq PC_b^{portable\ storage} \quad (21)$$

روابط (۱۶) تا (۲۱) مشابه روابط (۱۰) تا (۱۵)، به ترتیب تعادل توان روزانه، محاسبه وضعیت شارژ، تعیین وضعیت شارژ در ساعت اولیه روز، تثبیت وضعیت شارژ در انتهای روز، محدودیت انرژی و محدودیت توان ذخیره ساز قابل حمل را مدل می کنند. قیود سیستم [۲۷]:

$$p_{b,d,h}^{MT} + p_{b,d,h}^{RES} + p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis} + p_{b,d,h}^{portable\ storage,dis} - p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch} - p_{b,d,h}^{portable\ storage,ch} - D_{b,d,h}^{active} = \sum_{\hat{b} \in b} f_{b\hat{b},d,h}^{active} \quad (22)$$

$$q_{b,d,h}^{MT} - D_{b,d,h}^{active} = \sum_{\hat{b} \in b} f_{b\hat{b},d,h}^{reactive} \quad (23)$$

$$f_{b\hat{b},d,h}^{active} = Gl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h}^2 - V_{b,d,h} * V_{\hat{b},d,h} * \cos(\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h})) - Bl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h} * V_{\hat{b},d,h} * \sin(\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h})) \quad (24)$$

$$f_{b\hat{b},d,h}^{reactive} = Bl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h}^2 - V_{b,d,h} * V_{\hat{b},d,h} * \cos(\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h})) - Gl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h} * V_{\hat{b},d,h} * \sin(\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h})) \quad (25)$$

$$f_{b\hat{b},d,h}^{active} = Gl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h} - V_{\hat{b},d,h} - \omega_{b\hat{b},d,h} + 1) - Bl_{b\hat{b}} * (\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h}) \quad (26)$$

$$f_{b\hat{b},d,h}^{reactive} = -Bl_{b\hat{b}} * (V_{b,d,h} - V_{\hat{b},d,h} - \omega_{b\hat{b},d,h} + 1) - Gl_{b\hat{b}} * (\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h}) \quad (27)$$

$$\underline{V}_b \leq V_{b,d,h} \leq \overline{V}_b \quad (28)$$

$$-f_{b\hat{b}}^{active} \leq f_{b\hat{b},d,h}^{active} \leq \overline{f_{b\hat{b}}^{active}} \quad (29)$$

قیود تعادل توان اکتیو راکتیو گرهی به ترتیب توسط روابط (۲۲) و (۲۳) اعمال می شود. روابط (۲۴) و (۲۵) به ترتیب فلوی توان اکتیو راکتیو خطوط را تعیین می کنند. روابط (۲۴) و (۲۵) غیرخطی هستند که به منظور خطی سازی به ترتیب توسط روابط (۲۶) و (۲۷) جایگزین شده اند [۲۷]. با در نظر گرفتن اختلاف فاز حداکثر ۱۰ درجه ای بین شین های مجاور، $\omega_{b\hat{b},d,h}$ تخمین تکه ای خطی رابطه $\cos(\theta_{b,d,h} - \theta_{\hat{b},d,h})$ در نظر گرفته می شود. محدودیت ولتاژ گرهی و فلوی خطوط به ترتیب توسط روابط (۲۸) و (۲۹) فرمول بندی شده است.

مدل سازی تاب آوری:

در مدل پیشنهادی در این مقاله، به منظور در نظر گرفتن شرایط تاب آوری، فاصله زمانی بین زمان وقوع خطا تا زمان برگشت سیستم به شرایط نرمال به صورت قید مسأله بهینه سایی فرمول بندی شده است. در واقع در فاصله زمانی مشخص شده باید معیار تاب آوری یعنی تأمین شدن بارهای حساس برآورده شود. در این مدل، بدترین حالت در نظر گرفته شده و چنین فرض شده است که هر ناحیه پس از وقوع خطا، رابطه ای با سایر نواحی و شبکه بالادست نخواهد داشت و بارهای حیاتی در هر ناحیه باید توسط منابع تولید پراکنده موجود



در ناحیه مورد نظر و ذخیره‌سازهای انرژی قابل حمل، تأمین شوند. این شرایط می‌تواند در اثر حوادث مختلفی مثل سیل و طوفان اتفاق بیفتد. بنابراین معیار تاب‌آوری، برآورده شدن بارهای حیاتی در هر ناحیه توسط منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای قابل حمل موجود در ناحیه در نظر گرفته شده است. به این منظور، قیود مربوط به شرایط تاب‌آور، باید در کنار قیود در حالت نرمال (روابط (۱) تا (۲۹)) برآورده شوند. در ادامه قیود مربوط به شرایط تاب‌آور، ارائه شده است.

رابطه تعادل توان در هر ناحیه در شرایط تاب‌آور با استفاده از رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\sum_{b \in Z} (p_{b,d,h}^{portable\ storage,dis,resilience} - p_{b,d,h}^{portable\ storage,ch,resilience}) = \sum_{b \in Z} (DZ_{b,d,h}^{active,critical\ load,net}) \quad \forall h \in [NT_z, NE] \quad (30)$$

بار حیاتی خالص برای شین‌های دارای منبع تولید پراکنده با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$DZ_{b,d,h}^{active,critical\ load,net} = D_{b,d,h}^{active,critical\ load} - p_{b,d,h}^{MT,resilience} - p_{b,d,h}^{RES} + p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch,resilience} - p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis,resilience} \quad \text{for buses with DGs} \quad (31)$$

مطابق رابطه (۳۱)، ذخیره‌سازهای ثابت در شین‌های دارای منبع تولید پراکنده در شرایط تاب‌آوری می‌توانند مورد استفاده قرار گرفته و بهره‌برداری شوند. اما اگر ذخیره‌ساز ثابت در شینی قرار گیرد که فاقد منبع تولید پراکنده است، به دلیل عدم ارتباط با سایر نقاط شبکه حتی در داخل ناحیه، قابلیت شارژ ندارد و بنابراین در این شرایط استفاده نخواهد شد. بنابراین، بار حیاتی خالص برای شین‌های فاقد منبع تولید پراکنده براساس رابطه زیر برابر با بار حیاتی در شین مورد نظر در نظر گرفته می‌شود.

$$DZ_{b,d,h}^{active,critical\ load,net} = D_{b,d,h}^{active,critical\ load} \quad \text{for buses without DGs} \quad (32)$$

قید تولید منابع تولید پراکنده در شرایط تاب‌آوری نیز باید براساس رابطه زیر برقرار باشد.

$$p_b^{MT} \leq p_{b,d,h}^{MT,resilience} \leq \overline{p_b^{MT}} \quad (33)$$

همچنین قیود بهره‌برداری از ذخیره‌ساز ثابت نیز مشابه روابط ارائه شده برای شرایط نرمال شبکه، باید مطابق روابط زیر اعمال شوند.

$$\sum_{h=1}^{24} EF_b^{fixed\ storage,ch} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch,resilience} = \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage,dis}} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis,resilience} \quad (34)$$

$$E_{b,d,h}^{fixed\ storage,resilience} = E_{b,h-1}^{fixed\ storage,resilience} + EF_b^{fixed\ storage,ch} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch,resilience} - \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage,dis}} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis,resilience} \quad \forall h \in [2, NE] \quad (35)$$

$$E_{b,d,1}^{fixed\ storage,resilience} = (1 - DOD_b^{fixed\ storage}) * EC_b^{fixed\ storage} + EF_b^{fixed\ storage,ch} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch,resilience} - \frac{1}{EF_b^{fixed\ storage,dis}} * p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis,resilience} \quad (36)$$

$$(1 - DOD_b^{fixed\ storage}) * EC_b^{fixed\ storage} \leq E_{b,d,h}^{fixed\ storage,resilience} \leq DOD_b^{fixed\ storage} * EC_b^{fixed\ storage} \quad (37)$$

$$0 \leq p_{b,d,h}^{fixed\ storage,ch,resilience}, p_{b,d,h}^{fixed\ storage,dis,resilience} \leq PC_b^{fixed\ storage} \quad (38)$$

ذخیره‌ساز قابل حمل به دلیل امکان جابجایی در شرایط تاب‌آور دارای قیود متفاوتی نسبت به شرایط نرمال خواهد داشت. حالت شارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شرایط تاب‌آور توسط روابط (۳۹) و (۴۰) تعیین می‌شود.

$$E_{b,d,h}^{portable\ storage,resilience} = E_{b,d,h-1}^{portable\ storage,resilience} + EF_b^{portable\ storage,ch} * p_{b,d,h}^{portable\ storage,ch,resilience} - \frac{1}{EF_b^{portable\ storage,dis}} * p_{b,d,h}^{portable\ storage,dis,resilience} \quad \forall h = [2: NE] \quad (39)$$



$$E_{b,d,1}^{portable\ storage, resilience} = (1 - DOD_b^{portable\ storage}) * EC_b^{portable\ storage} + EF_b^{portable\ storage, ch} * p_{b,d,1}^{portable\ storage, ch, resilience} - \frac{1}{EF_b^{portable\ storage, dis} * p_{b,d,1}^{portable\ storage, dis, resilience}} \quad (40)$$

مطابق روابط (۳۹) و (۴۰)، رابطه تعادل توان برای هر یک از ذخیره‌سازهای قابل حمل در هر ناحیه در طول ساعات شرایط تاب‌آور باید برقرار باشد.

$$(1 - DOD_b^{portable\ storage}) * EC_b^{portable\ storage} \leq E_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} \leq DOD_b^{portable\ storage} * EC_b^{portable\ storage} \quad (41)$$

$$0 \leq p_{b,d,h}^{portable\ storage, ch, resilience} \leq PC_b^{portable\ storage} * ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} \quad (42)$$

$$0 \leq p_{b,d,h}^{portable\ storage, dis, resilience} \leq PC_b^{portable\ storage} * dis_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} \quad (43)$$

$$ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} + dis_{b,d,h+N}^{portable\ storage, resilience} \leq 1 \quad \forall N = [0: NT_z], \forall h = [1: NE - NT_z] \quad (44)$$

$$dis_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} + ch_{b,d,h+N}^{portable\ storage, resilience} \leq 1 \quad \forall N = [0: NT_z], \forall h = [1: NE - NT_z] \quad (45)$$

$$dis_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} + ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} \leq 1 \quad \forall h = [NE - NT_z: NE] \quad (46)$$

$$ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} = 0 \quad \forall h = [NE - NT_z: NE] \quad (47)$$

روابط (۴۱) تا (۴۳) به ترتیب بیانگر محدودیت انرژی و توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز قابل حمل در شرایط تاب‌آور هستند. به منظور در نظر گرفتن فاصله زمانی مورد نیاز برای انتقال ذخیره‌سازهای انرژی قابل حمل، روابط (۴۴) تا (۴۷) باید برقرار باشد. روابط (۴۲) و (۴۳) غیر خطی هستند. به منظور خطی‌سازی رابطه (۴۲) می‌توان روابط زیر را جایگزین آن نمود.

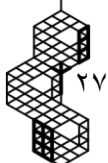
$$\begin{aligned} p_{b,d,h}^{portable\ storage, ch, resilience} &\leq e \\ e &\leq PC_b^{portable\ storage} \\ e &\leq B * ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience} \\ e &\geq PC_b^{portable\ storage} - B * (1 - ch_{b,d,h}^{portable\ storage, resilience}) \end{aligned} \quad (48)$$

که B یک عدد بزرگ در نظر گرفته می‌شود. به‌طور مشابه می‌توان رابطه (۴۳) را خطی‌سازی نمود.

۳- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی

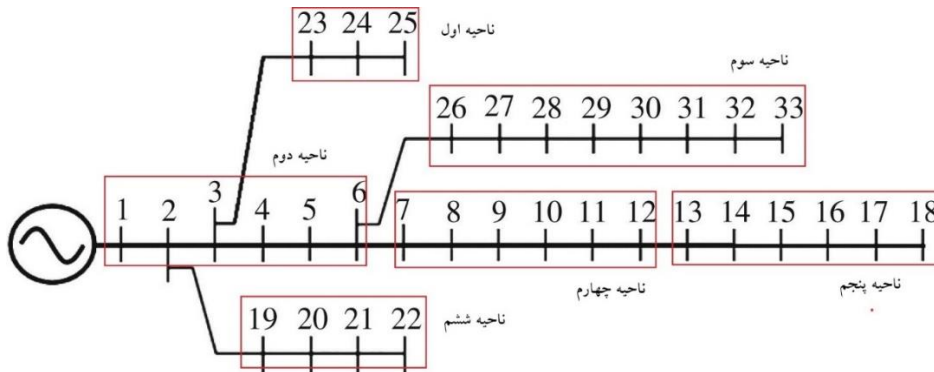
مدل پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه ۳۳ شینه استاندارد IEEE پیاده شده است. ساختار کلی این شبکه در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز نمایش داده شده، شبکه مورد مطالعه به ۶ ناحیه تقسیم شده است. تقسیم‌بندی با این فرض انجام شده است که امکان انتقال ذخیره‌ساز قابل حمل بین شین‌های موجود در هر ناحیه، در زمان وقوع حادثه، وجود دارد. همچنین این فرض در نظر گرفته شده است که در هر ناحیه حداقل یک منبع تولید پراکنده وجود دارد.

مشخصات میکروتوربین‌های موجود در شبکه مورد مطالعه در جدول (۳) قابل مشاهده است. چنین فرض شده است که نیروگاه‌های بادی و خورشیدی به ترتیب در شین‌های ۷ و ۲۶ تعبیه شده‌اند. در مدل پیشنهادی به منظور مدل‌سازی تولید واحدهای تجدیدپذیر، متوسط تولید ساعتی حاصل از اطلاعات مربوط به روزهای گذشته، به‌عنوان تولید ساعتی روز نمونه در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب تولید واحدهای بادی و خورشیدی تعبیه‌شده در شین‌های ۷ و ۲۶ نمایش داده شده است. ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده^۶ به‌عنوان ذخیره‌ساز ثابت کاندید و باتری لیتیوم‌یون^۷ به‌عنوان ذخیره‌ساز قابل حمل کاندید برای توسعه در شبکه توزیع مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. در جدول (۲) مشخصات ذخیره‌سازهای مذکور ارائه شده است [۲۶]. در این جدول، منظور از هزینه سرمایه‌گذاری





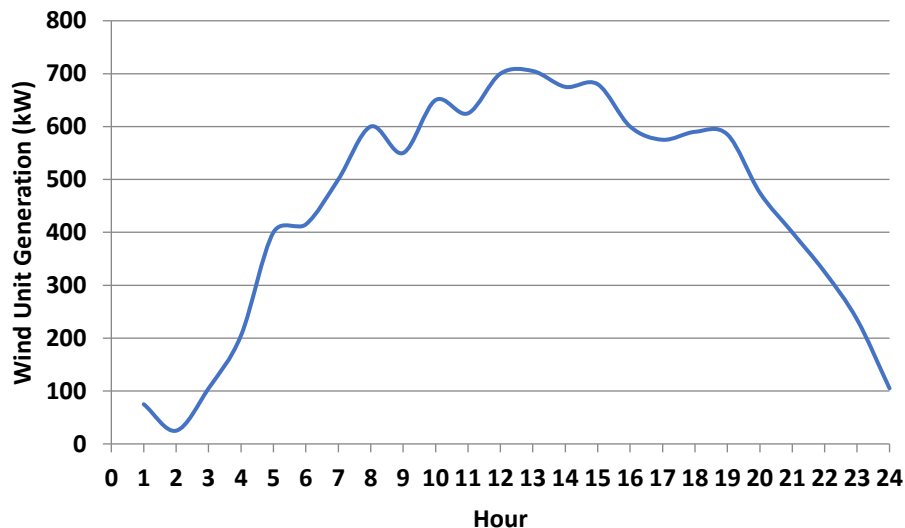
توان، هزینه تجهیزات تأمین‌کننده ظرفیت توان ذخیره‌ساز مثل ادوات الکترونیک قدرت و هزینه سرمایه‌گذاری انرژی، هزینه تجهیزات تأمین‌کننده ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز مثل باتری است. طول عمر ذخیره‌ساز نیز به‌منظور تعیین مقدار سالانه هزینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲): ساختار کلی شبکه ۳۳ شینه استاندارد IEEE

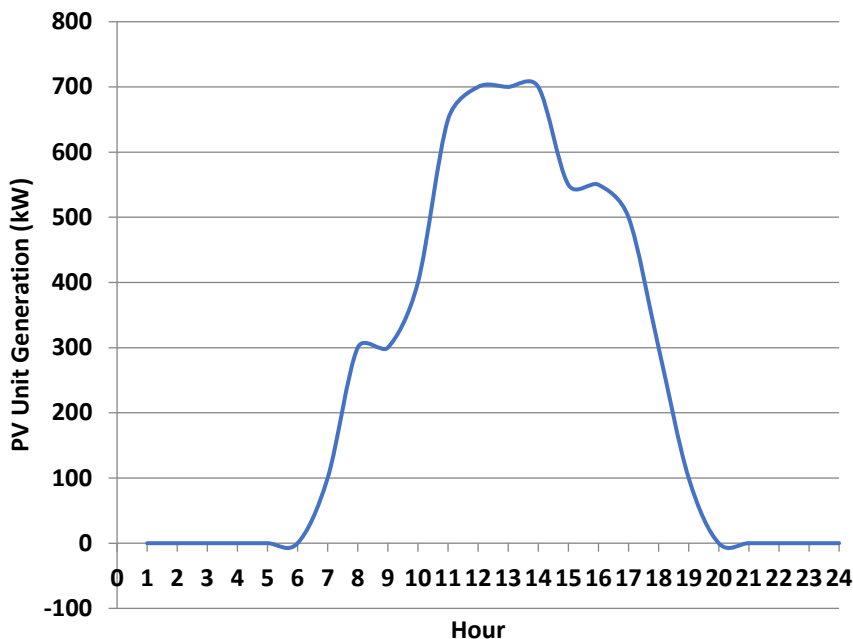
جدول (۲): مشخصات فنی و اقتصادی میکروتوربین‌ها

شماره	شین محل نصب	حداکثر ظرفیت تولید توان اکتیو (کیلووات)	حداقل ظرفیت تولید توان اکتیو (کیلووات)	حداکثر ظرفیت تولید توان راکتیو (کیلووار)	حداقل ظرفیت تولید توان راکتیو (کیلووار)	هزینه بهره‌برداری واحد توان (دلار بر مگاوات)
۱	۴	۳۰۰	۰	۲۰۰	۰	۱۸
۲	۸	۲۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۷
۳	۱۶	۳۰۰	۰	۱۵۰	۰	۱۵
۴	۲۰	۲۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۷
۵	۲۴	۴۰۰	۰	۲۰۰	۰	۲۰
۶	۳۰	۳۰۰	۰	۱۰۰	۰	۲۰



شکل (۳): تولید ساعتی واحد بادی تعبیه شده در شین ۷





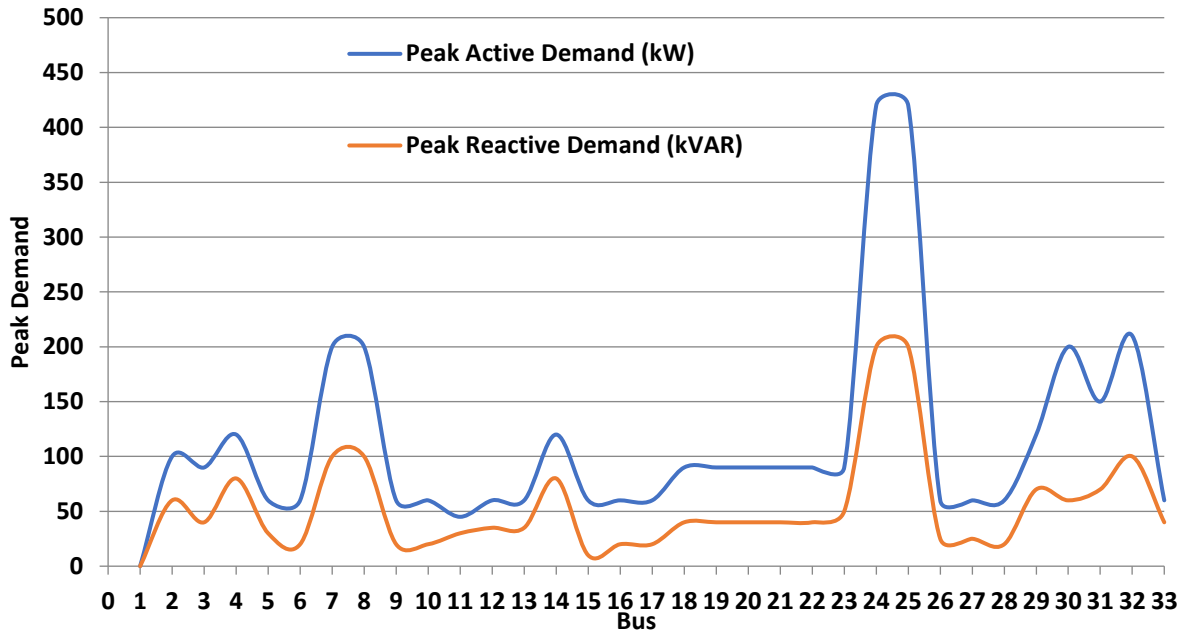
شکل (۴): تولید ساعتی واحد خورشیدی تعبیه شده در شین ۲۶

جدول (۳): مشخصات ذخیره‌سازهای انرژی کاندید برای توسعه در شبکه مورد مطالعه

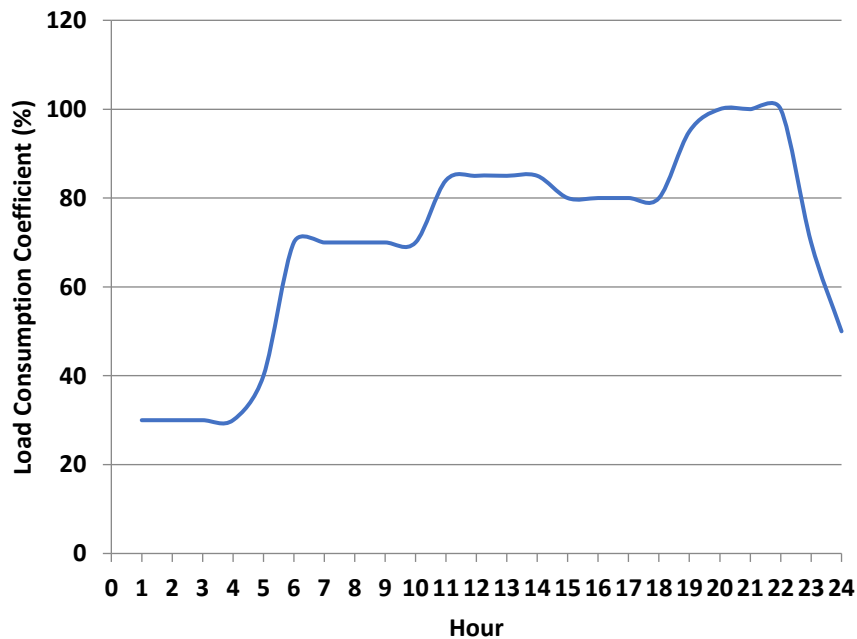
نوع ذخیره‌ساز انرژی	تکنولوژی ذخیره‌سازی	هزینه سرمایه‌گذاری توان (دلار کیلووات)	هزینه سرمایه‌گذاری انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	هزینه نهایی شارژ (دلار بر مگاوات ساعت)	هزینه نهایی دشارژ (دلار بر مگاوات ساعت)	بازده	طول عمر	ظرفیت سیکل‌های شارژ و دشارژ
ذخیره‌ساز انرژی ثابت	هوای فشرده	۴۰۰	۳۰	۲	۲	۸۰	۲۵	۱۰۰۰۰۰
ذخیره‌ساز انرژی قابل حمل	باتری لیتیوم‌یون	۴۰۰	۳۰۰	۱/۵	۱/۵	۹۰	۱۵	۳۵۰۰

قابلیت تبادل با شبکه بالادست در شرایط نرمال برابر ۳ مگاوات و با هزینه ۲۵ دلار بر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است [۲۷]. در شکل (۵)، پیک بار اکتیو و راکتیو روزانه در شین‌های مختلف سیستم نمایش داده شده است. ده درصد از بارهای سیستم به‌عنوان بارهای حیاتی در نظر گرفته شده‌اند. پروفیل بار روزانه در شین‌های مختلف سیستم به‌صورت درصد بار پیک روزانه در شکل (۶) قابل مشاهده است.

در این مقاله، مدت‌زمان یک هفته معادل ۱۶۸ ساعت برای شرایط تاب‌آور سیستم در نظر گرفته شده است. در واقع چنین فرض شده است که پس از یک هفته تجهیزات آسیب‌دیده، تعمیر و جایگزین شده و بدین ترتیب، سیستم یک هفته بعد از وقوع حادثه از شرایط تاب‌آور خارج شده و به حالت نرمال بازخواهد گشت. همچنین در شبیه‌سازی‌ها چنین در نظر گرفته شده است که حادثه در ساعت اول روز اتفاق افتاده و ذخیره‌سازهای انرژی، حداقل ذخیره انرژی را دارند. همچنین حداکثر مدت‌زمان لازم برای جابجایی ذخیره‌ساز قابل حمل بین محل شارژ و بارهای حیاتی برابر ۳ ساعت فرض شده است. مسأله بهینه‌سازی توسعه‌یافته در این مقاله با استفاده از موتور حل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح^۸ در نرم‌افزار گمز^۹ نسخه 21.7 بر روی کامپیوتر با مشخصات حافظه رم ۴ گیگابایت و پردازشگر ۲/۶۸ گیگاهرتز حل شده است.



شکل (۵): پیک بار روزانه در شین‌های مختلف سیستم



شکل (۶): درصد بار پیک مصرفی در شین‌های مختلف

در جدول (۴)، نتایج توسعه ذخیره‌سازهای انرژی در شرایط نرمال ارائه شده است. در این شرایط، تاب‌آوری در مدل پیاده‌شده در نظر گرفته نشده و چنین فرض شده است که سیستم دچار حادثه نخواهد شد. در چنین شرایطی، نصب ذخیره‌سازهای ثابت هوای فشرده در سه شین ۷، ۲۳ و ۲۶ پیشنهاد شده است. در این شرایط، به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، نسبت به باتری لیتیوم‌یون، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده پیشنهاد شده است. نکته قابل توجه این‌که در شین‌های ۷ و ۲۶ که برای نصب ذخیره‌ساز انرژی انتخاب شده‌اند، به ترتیب منابع تولید تجدیدپذیر بادی و خورشیدی حضور دارند.



در جدول (۵)، نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی شبکه تست با لحاظ شرایط تاب‌آوری ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول، چند نکته قابل مشاهده و استنباط است. نکته اول این‌که، تعداد مکان‌های نصب ذخیره‌سازهای انرژی در شرایط تاب‌آور نسبت به حالت نرمال، افزایش یافته است. این مسأله به این دلیل است که در شرایط تاب‌آور به‌منظور تأمین بارهای حیاتی، در زمان وقوع حادثه، باید ذخیره‌سازهای انرژی در تمام نواحی موجود باشند. در این شرایط، هیچ‌گونه ارتباطی با سایر نواحی وجود ندارد. از طرفی، در این شرایط، باتری‌های لیتیوم‌یون به‌عنوان ذخیره‌سازهای قابل حمل برای تمام نواحی پیشنهاد شده‌اند. البته ذخیره‌سازهای ثابت هوای فشرده همچنان در شین‌های ۷ و ۲۳ انتخاب شده‌اند، اما همچنان نیاز به حضور ذخیره‌سازهای قابل حمل در نواحی شامل این ذخیره‌سازها برای ارائه خدمات در شرایط تاب‌آور وجود دارد. نکته بعد آن‌که در شرایط تاب‌آور، ظرفیت انرژی کمتر و ظرفیت توان بیشتری، نسبت به شرایط نرمال برای ذخیره‌سازهای انرژی پیشنهاد شده است. این مسأله به دو دلیل اتفاق می‌افتد. دلیل اول این‌که، در شرایط تاب‌آور باید شارژ باتری‌های لیتیوم‌یون با سرعت بالاتری انجام شود و باتری‌ها، سریع‌تر به محل بارهای حیاتی منتقل شوند. از طرفی، باتری‌های لیتیوم‌یون نسبت به ذخیره‌سازهای هوای فشرده، هزینه سرمایه‌گذاری انرژی بسیار کمتری دارند.

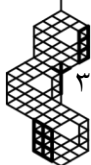
به‌منظور بررسی تأثیر زمان انتقال باتری‌های قابل حمل لیتیوم‌یون به محل بارهای حیاتی، در شکل (۶)، ظرفیت توان و انرژی پیشنهادی برای ذخیره‌سازهای انرژی به ازای حداکثر زمان انتقال باتری‌های مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زمان انتقال، ظرفیت توان و انرژی مورد نیاز افزایش یافته است. به‌طوری‌که با افزایش زمان انتقال از ۱ به ۳ و ۵ ساعت، ظرفیت توان ۲۵ و ۷۰ درصد و ظرفیت انرژی ۴۲ و ۱۱۷ درصد افزایش یافته است. افزایش توان به دلیل بالا رفتن سرعت شارژ توجیه می‌شود. از طرفی، بالا رفتن ظرفیت انرژی به دلیل تأمین هرچه بیشتر بارهای حیاتی در زمان دشوار است. بنابراین، تأمین زیرساخت لازم برای انتقال هرچه سریع‌تر باتری‌ها با کاهش ظرفیت توان و انرژی مورد نیاز و در نتیجه کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری توجیه می‌شود.

در این مقاله ذخیره‌سازهای هوای فشرده و باتری لیتیوم‌یون مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که قابلیت سیکل شارژ و دشارژ آن‌ها به ترتیب برابر ۱۰۰۰۰۰ و ۳۵۰۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به عمر ۲۵ و ۱۵ ساله در نظر گرفته شده برای این دو ذخیره‌ساز و فرض عملکرد یکنواخت در سال‌های مختلف، تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ سالانه ذخیره‌سازهای هوای فشرده و لیتیوم‌یونی به ترتیب برابر ۴۰۰۰ و ۲۳۳ سیکل خواهد بود. با بررسی تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ سالانه می‌توان به این نتیجه رسید که ذخیره‌ساز هوای فشرده محدودیتی برای سیکل شارژ و دشارژ نخواهد داشت. از طرفی، باتری لیتیوم‌یون هم می‌تواند در ۲۳۳ روز از سال و در هر روز یک سیکل شارژ و دشارژ کامل داشته باشد. بدین ترتیب این ذخیره‌ساز نیز، با توجه به هدف اصلی استفاده از این باتری یعنی بهبود تاب‌آوری سیستم در شرایط بروز حادثه، چالش سیکل شارژ و دشارژ نخواهد داشت.

به‌منظور بررسی تأثیر حضور ذخیره‌ساز انرژی در شرایط بروز حادثه، انرژی تأمین‌نشده در دو حالت با و بدون استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی محاسبه شده است. در این حالت، انرژی تأمین‌نشده بارهای حساس در شرایط تاب‌آور (زمان بروز حادثه تا شرایط بازیابی کامل سیستم و بازگشت به شرایط نرمال) تعیین شده است. در شرایط بروز حادثه، بدون حضور ذخیره‌سازهای انرژی، تنها بارهای حساس متصل به شین‌های دارای منبع تولید تأمین می‌شوند. بدین ترتیب با فرض بروز حادثه، در ساعت ابتدایی روز و مدت زمان یک هفته برای بازیابی کامل سیستم، انرژی تأمین‌نشده برای بارهای حساس در شرایط با و بدون حضور ذخیره‌ساز انرژی به ترتیب برابر ۱۴۵۵ و ۲۷۰۱۲ کیلووات‌ساعت خواهد بود. شایان ذکر است که دلیل داشتن انرژی تأمین‌نشده با حضور ذخیره‌ساز، طول کشیدن مدت‌زمان سه ساعت برای انتقال باتری‌های قابل حمل از محل شارژ به محل بارهای حساس برای اولین بار است. نتایج نشان می‌دهد که با حضور ذخیره‌سازهای انرژی، انرژی تأمین‌نشده، یک بیستم برابر شده است.

جدول (۴): ظرفیت توان و انرژی در حالت نرمال

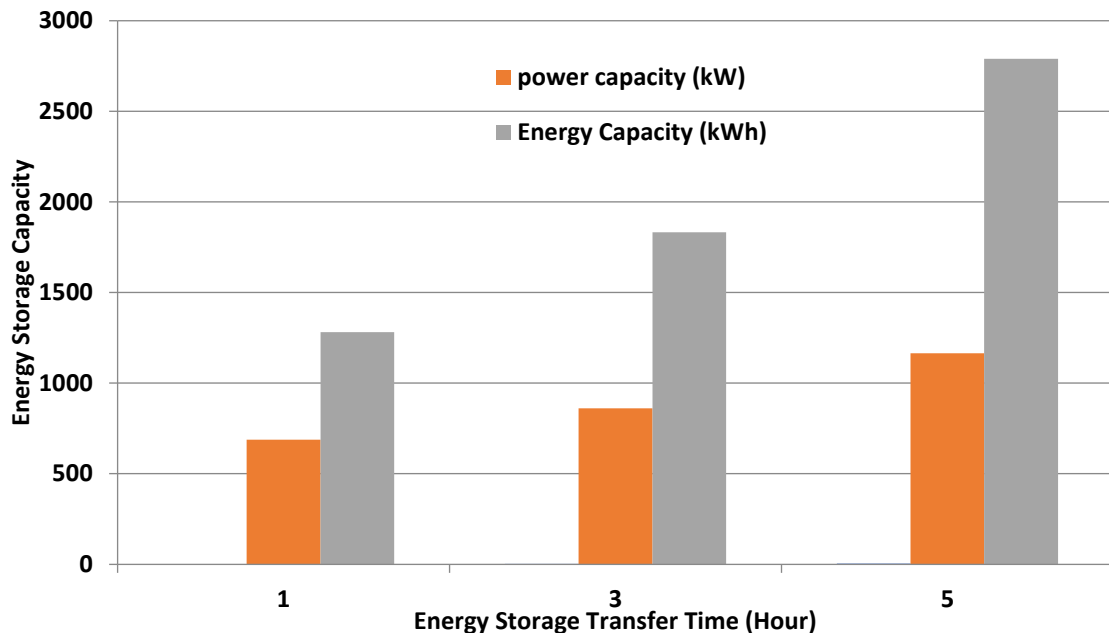
شین محل نصب	ناحیه محل نصب	تکنولوژی ذخیره‌سازی	ظرفیت توان (کیلووات)	ظرفیت انرژی (کیلووات‌ساعت)
۷	۴	ذخیره‌ساز هوای فشرده	۳۴۸	۹۵۳
۲۳	۱	ذخیره‌ساز هوای فشرده	۲۷۳	۶۷۲
۲۶	۳	ذخیره‌ساز هوای فشرده	۱۶۴	۴۹۳





جدول (۵): نتایج توسعه ذخیره‌ساز با لحاظ تاب‌آوری

ظرفیت توان (کیلووات)	ظرفیت انرژی (کیلووات‌ساعت)	تکنولوژی ذخیره‌سازی	ناحیه محل نصب	شین محل نصب
۲۷۹	۷۹۱	ذخیره‌ساز هوای فشرده	۴	۷
۵۳	۷۴	باتری لیتیوم‌یون	۴	۸
۵۶	۶۹	باتری لیتیوم‌یون	۲	۳
۴۱	۵۲	باتری لیتیوم‌یون	۶	۲۱
۱۸۲	۴۲۷	ذخیره‌ساز هوای فشرده	۱	۲۳
۴۹	۵۴	باتری لیتیوم‌یون	۱	۲۴
۵۷	۶۳	باتری لیتیوم‌یون	۵	۱۴
۴۳	۹۴	باتری لیتیوم‌یون	۳	۲۶
۵۲	۱۰۷	باتری لیتیوم‌یون	۳	۳۰
۴۹	۱۰۱	باتری لیتیوم‌یون	۳	۳۲



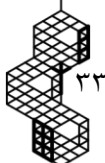
شکل (۷): ظرفیت انرژی پیشنهادی به ازای زمان انتقال ذخیره‌سازهای قابل حمل

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به ارائه یک مدل جدید برای توسعه ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های توزیع به‌منظور بهبود تاب‌آوری شبکه پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی علاوه بر توسعه ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده به‌عنوان ذخیره‌ساز ثابت، امکان توسعه باتری‌های لیتیوم‌یون با قابلیت جابجایی بین شین‌های مختلف نیز در نظر گرفته شده است. در این مدل، علاوه بر در نظر گرفتن شرایط نرمال شبکه توزیع، شرایط تاب‌آوری در زمان وقوع حادثه نیز مد نظر شده است. برآورده شدن بارهای حیاتی به‌عنوان معیار تاب‌آور بودن شبکه در زمان وقوع حادثه در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در شرایطی که تنها حالت نرمال شبکه در نظر گرفته شده است تنها ذخیره‌ساز هوای فشرده برگزیده شده است، اما در زمان لحاظ‌نمودن شرایط تاب‌آوری، بیشتر باتری لیتیوم‌یون انتخاب شده است. همچنین می‌توان از نتیجه شبیه‌سازی‌ها استنباط نمود که در شرایط تاب‌آور نسبت به شرایط نرمال، ظرفیت انرژی کمتر و ظرفیت توان بیشتری، برای ذخیره‌سازهای انرژی پیشنهاد شده است. از نتایج مطالعات این چنین نتیجه می‌شود که با افزایش زمان انتقال قابل حمل باتری لیتیوم‌یون به محل بارهای حیاتی، ظرفیت توان و انرژی مورد نیاز برای باتری‌ها، افزایش یافته است.



- [1] M. Yadav, N. Pal, and D. K. Saini, "Resilient electrical distribution grid planning against seismic waves using distributed energy resources and sectionalizers: An Indian's urban grid case study," *Renewable Energy*, vol. 178, pp. 241-259, 2021. doi: 10.1016/j.renene.2021.06.071.
- [2] "Electric Power System Resiliency: Challenges and Opportunities," document *EPRI 3002007376*, Feb. 2016.
- [3] F. Katiraei, R. Irvani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, pp. 54-65, 2008. doi: 10.1109/MPE.2008.918702.
- [4] M. S. Khomami, K. Jalilpoor, M. T. Kenari, and M. S. Sepasian, "Bi-level network reconfiguration model to improve the resilience of distribution systems against extreme weather events," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 3302-3310, 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6971.
- [5] J. Liu, Y. Yu, and C. Qin, "Unified two-stage reconfiguration method for resilience enhancement of distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 1734-1745, 2019. doi:10.1049/iet-gtd.2018.6680.
- [6] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 7, pp. 958-966, 2015. doi:10.1109/TSG.2015.2429653.
- [7] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, and Y. Hou, "Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, pp. 5650-5662, 2018. doi:10.1109/TSG.2018.2889347.
- [8] K. Kopsidas and M. Abogaleela, "Utilizing demand response to improve network reliability and ageing resilience," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, pp. 2216-2227, 2018. doi:10.1109/TPWRS.2018.2883612.
- [9] S. Y. Hui, C. K. Lee, and F. F. Wu, "Electric springs—A new smart grid technology," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1552-1561, 2012. doi:10.1109/TSG.2012.2200701.
- [10] L. Liang, Y. Hou, D. J. Hill, and S. Y. R. Hui, "Enhancing resilience of microgrids with electric springs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 2235-2247, 2016. doi:10.1109/TSG.2016.2609603.
- [11] M. R. Sheibani and A. Moshari, "Operation planning of a microgrid considering the resiliency in the presence of energy storage systems," in *2020 10th Smart Grid Conference (SGC)*, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/SGC52076.2020.9335757.
- [12] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, M. A. Latify, and S. Hacopian Dolatabadi, "Energy storage system expansion planning in power systems: a review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, pp. 1203-1221, 2018. doi:10.1049/iet-rpg.2018.0089.
- [13] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Robust model for optimal allocation of renewable energy sources, energy storage systems and demand response in distribution systems via information gap decision theory," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 511-520, 2019. doi:10.1049/iet-gtd.2018.5671.
- [14] R. Li, W. Wang, and M. Xia, "Cooperative planning of active distribution system with renewable energy sources and energy storage systems," *IEEE access*, vol. 6, pp. 5916-5926, 2017. doi:10.1109/ACCESS.2017.2785263.
- [15] C. Dong, Q. Gao, Q. Xiao, R. Chu, and H. Jia, "Spectrum-domain stability assessment and intrinsic oscillation for aggregated mobile energy storage in grid frequency regulation," *Applied Energy*, vol. 276, p. 115434, 2020. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115434.
- [16] S. Yao, P. Wang, X. Liu, H. Zhang, and T. Zhao, "Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, pp. 1030-1043, 2019. doi:10.1109/TSG.2019.2930012.
- [17] M. Nazemi, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, "Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, pp. 795-806, 2019. doi:10.1109/TSTE.2019.2907613.





- [18] J. Kim and Y. Dvorkin, "Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, pp. 4996-5006, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2872521.
- [19] Y. Wang, A. O. Rousis, and G. Strbac, "Resilience-driven optimal sizing and pre-positioning of mobile energy storage systems in decentralized networked microgrids," *Applied Energy*, vol. 305, p. 117921, 2022. doi:10.1016/j.apenergy.2021.117921.
- [20] A. Srivastava, S. R. Kuppannagari, R. Kannan, and V. K. Prasanna, "Minimizing cost of smart grid operations by scheduling mobile energy storage systems," *IEEE Letters of the Computer Society*, vol. 2, pp. 20-23, 2019. doi:10.1109/lcs.2019.2931967.
- [21] M. Tavakoli, F. Shokridehaki, M. F. Akorede, M. Marzband, I. Vechiu, and E. Pouresmaeil, "CVaR-based energy management scheme for optimal resilience and operational cost in commercial building microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 100, pp. 1-9, 2018. doi:10.1016/j.ijepes.2018.02.022.
- [22] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution networks embedding grid reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 1577-1590, 2017. doi:10.1109/TPWRS.2017.2734942.
- [23] A. S. Awad, T. H. El-Fouly, and M. M. Salama, "Optimal ESS allocation for benefit maximization in distribution networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, pp. 1668-1678, 2015. doi:10.1109/TSG.2015.2499264.
- [24] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, and M. A. Latify, "Stochastic price based coordinated operation planning of energy storage system and conventional power plant," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, pp. 1020-1032, 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0534-5.
- [25] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, and M. A. Latify, "Economics of energy storage options to support a conventional power plant: A stochastic approach for optimal energy storage sizing," *Journal of Energy Storage*, vol. 33, p. 101892, 2021. doi:10.1007/s40565-019-0534-5.
- [26] M. R. Sheibani, G. R. Yousefi, H. Raoufi, and N. Moslemi, "Modeling the Energy Storage Systems in the Power System Studies," in *Synergy Development in Renewables Assisted Multi-carrier Systems*, ed: Springer, 2022, pp. 497-517. doi: 10.1007/978-3-030-90720-4_18.
- [27] A. Gholami, T. Shekari, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Microgrid scheduling with uncertainty: The quest for resilience," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 2849-2858, 2016. doi: 10.1109/TSG.2016.2598802.

زیر نویس ها

-
- ¹ Resilience
² Electric power system institute (EPRI)
³ Reliability
⁴ Reconfiguration
⁵ Electric springs
⁶ Compressed air energy storage
⁷ Li-ion battery
⁸ Mixed integer linear programming (MILP)
⁹ GAMS
¹⁰RAM

