



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Resilient-Oriented Energy Management of Multi-Microgrids Considering Energy Storage and Demand Response Programs Based on a Robust Optimization

Aliakbar Noori ^a, Abuzar Samimi ^{a,*} , Abolfazl Salami ^a 

^a Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-10-01

Revised: 2025-05-05

Accepted: 2025-05-25

Keywords:

Resilience;
Multi-microgrids;
Energy storage;
Responsive loads;
Robust optimization.

ABSTRACT

The increase in the number and severity of natural disasters and their significant social and economic effects have made power system planners pay special attention to the security and resilience of power networks. For this purpose, this article tries to provide an efficient model for strengthening the resilience of distribution networks based on multi microgrids by optimally using energy storage systems and demand response programs. In the proposed method, a two-stage hierarchical approach has been developed in which the first stage of the incident is modeled and their impact on the distribution network is determined. Then, in the next stage, preventive and corrective measures are implemented to increase system readiness and reduce damages caused by severe accidents. At this stage, various tools such as energy storage, distributed and renewable production sources have been used in addition to responsive loads. In order to consider the uncertainty and the risk caused by it on the proper performance of the proposed design, the problem is done by robust optimization to obtain more realistic results than the deterministic state. Finally, in order to confirm the effectiveness of the proposed method in improving the resilience of distribution systems, a standard network of 33 buses has been used with different operating conditions, and the results obtained indicate its proper performance in the face of severe accidents and maintaining the resilience of the system.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.31958.2539>

© 2026 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir

How to cite this article:

A. Samimi , A. Noori and A. Salami, "Resilient-oriented energy management of multi-microgrids considering energy storage systems and demand response programs based on a robust optimization," Journal of Modeling in Engineering, 24 84 (2026): 291-303, doi: 10.22075/jme.2025.31958.2539

مدیریت انرژی تاب آور محور ریزشکته های چندگانه با در نظر گرفتن ذخیره سازی های انرژی و برنامه های پاسخگویی بار مبتنی بر بهینه سازی مقاوم

علی اکبر نوری^۱، ابوذر صمیمی^{۱*}، ابوالفضل سلامی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹	افزایش تعداد و شدت بلایای طبیعی و تاثیرات اجتماعی و اقتصادی قابل توجه آن ها باعث شده تا برنامه ریزان سیستم های قدرت توجه ویژه ای به امنیت و تاب آوری شبکه های قدرت داشته باشند. به همین منظور، این مقاله سعی دارد با بکارگیری بهینه از منابع ذخیره ساز انرژی و برنامه های مدیریت مصرف یک مدل کارآمد برای تقویت تاب آوری شبکه های توزیع مبتنی بر ریزشکته های چندگانه ارائه دهد. در طرح پیشنهادی، یک رویکرد دو مرحله ای سلسله مراتبی توسعه داده شده که در مرحله اول حادثه مدل سازی شده و تاثیر آن ها بر روی شبکه توزیع تعیین می گردد. سپس در مرحله بعد اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای افزایش آمادگی سیستم و کاهش خسارات ناشی از حوادث شدید اجرا می شود. در این مرحله، از تجهیزات مختلف مانند ذخیره سازهای انرژی، منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر در کنار بارهای پاسخگو استفاده شده است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک ناشی از آن بر عملکرد مناسب طرح پیشنهادی، مسأله توسط بهینه سازی مقاوم حل شده تا نتایج واقع گرایانه تر نسبت به حالت قطعی به دست آید. به منظور تایید کارایی روش پیشنهادی در بهبود تاب آوری سیستم های توزیع، شبکه استاندارد ۳۳ باسه با شرایط بهره برداری مختلف استفاده شده که نتایج کسب شده حاکی از عملکرد مناسب آن در مواجهه با حوادث شدید و حفظ تاب آوری سیستم دارد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴	
واژگان کلیدی: تاب آوری، ریزشکته های چندگانه، ذخیره سازی های انرژی، بارهای پاسخگو، بهینه سازی مقاوم.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.31958.2539>

© 2026 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه
امروزه تغییرات شدید آب و هوایی باعث افزایش قابل ملاحظه تعداد و شدت وقوع بلایای طبیعی فاجعه بار در سراسر جهان گردیده است. تنها در عرض شش ماه در سال ۲۰۲۰، هشت رویداد مرتبط با آب و هوا (از جمله دو سیل بزرگ و شش طوفان شدید) هر کدام با تلفات مالی بیش از یک میلیارد دلار در ایالات متحده گزارش شده است [۱]. زیرساخت های برق به شدت نسبت به در اثر این حوادث شدید حساس هستند به طوری که قدرت تخریب آن ها می تواند به طور

سریع و گسترده خسارات دامنه داری ایجاد کرده و به دنبال آن باعث قطعی های بزرگ در سیستم های قدرت شوند که این مسأله اهمیت تاب آوری را بیش از پیش نمایان می سازد [۲]. ذکر این نکته ضروری است که اگر چه احتمال وقوع این حوادث پایین است، اما با این حال شدت وقوع آن ها و اثراتی که بر روی شبکه قدرت دارند باعث شده است که توجه زیادی سمت آن ها معطوف گردد و محققان متعددی در تلاش برای کاهش تاثیر آن ها بر عملکرد مناسب شبکه بوده اند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir

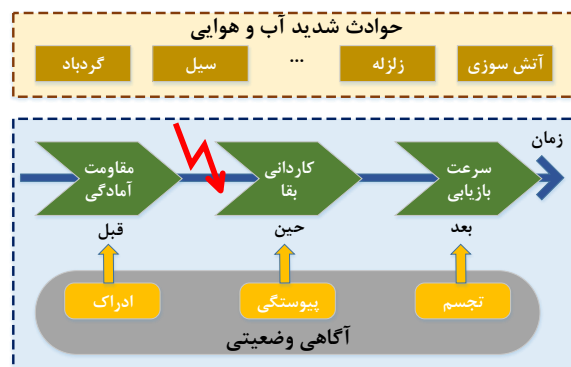
۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

استناد به این مقاله:

بهبود استحکام تجهیزات سیستم قدرت گران قیمت بوده و عمدتاً بر روی عناصر کلیدی و آسیب‌پذیر سیستم اجرا می‌شوند. به طور مثال، مرجع [۶] یک ساختار سه سطحی برای پیدا کردن بهترین استراتژی طراحی برای تقویت تاب آوری سیستم توزیع هوشمند در برابر حملات سایبری پیشنهاد می‌دهد که در سطح اول آن تصمیمات طراحی سیستم توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری اتخاذ می‌گردد و سپس در سطح دوم حالتی را که بیشترین خسارت وارد سیستم می‌شود را شناسایی کرده و در سطح سوم تلاش می‌کند تا با بهره‌گیری از اقدامات بهره‌برداری مانند بازآرایی میزان خسارت سیستم را به حداقل برساند. در مرجع [۷] یک مدل تجمیع شده برای طراحی بهینه زیرساخت‌های مهم سیستم قدرت با در نظر گرفتن برنامه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات ارائه شده است. هدف [۸] افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع با جایابی بهینه منابع تولیدپراکنده می‌باشد که با بهره‌گیری منابع توزیع شده و متعاقب آن با تبدیل شبکه توزیع به ریزشبکه میزان مقاومت سیستم در برابر قطعی‌های ناشی از حوادث شدید آب و هوایی بهبود داده می‌شود. جایابی و مسیریابی بهینه ذخیره‌سازهای سیار در مرجع [۹] بصورت یک مدل دو مرحله‌ای توسعه داده شده است به طوری که در مرحله اول، جایابی بهینه ذخیره‌سازهای سیار در حالت عادی شبکه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام می‌گردد. سپس، در مرحله دوم مسیریابی بهینه آنها به منظور تامین توان پشتیبان برای فیدهای دچار خطا شده انجام می‌شود.

دسته دوم برخلاف دسته اول شامل روش‌های بهره‌برداری کوتاه مدت بوده که هدف آنها آماده‌سازی سیستم قدرت برای مقابله موثر در برابر حادثه قریب الوقوع می‌باشد. این روش‌ها قبل از وقوع رخداد اجرا می‌شوند و عمدتاً هزینه‌های بسیار کم‌تری نسبت به دسته اول دارند. مرجع [۱۰] یک روش چندسطحی برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های چندگانه در شرایط بهره‌برداری مختلف ارائه کرده است. در روش ارائه شده، ابتدا یک پخش بار اقتصادی به منظور تعیین تولیدات منابع تولیدپراکنده موجود در ریزشبکه‌ها انجام می‌شود تا میزان کمبود یا مازاد توان ریزشبکه‌ها مشخص گردد. نویسندگان در [۱۱] یک برنامه‌ریزی مقاوم دوسطحی برای بهره‌برداری ریزشبکه‌ها در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای ارائه کرده‌اند. در این روش ابتدا وضعیت منابع تولیدی، میزان شارژ ذخیره‌سازهای انرژی و همچنین نحوه

از طرفی دیگر، با توجه به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر، کشورهای مختلف در حال تغییر ساختار شبکه‌های قدرت خود به منظور پیشینه‌سازی هرچه بیشتر ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر هستند. بر این اساس، ساختار کلی شبکه‌های توزیع از حالت غیرفعال به سوی شبکه‌های فعال مبتنی بر خوشه‌هایی از ریزشبکه‌های چندگانه در حال حرکت است [۳]. ریزشبکه‌ها با داشتن تکنولوژی‌های پیشرفته کنترلی و حفاظتی باعث ایجاد بستری مناسب برای نفوذ منابع تجدیدپذیر با مقیاس کوچک در سطح شبکه‌های توزیع می‌گردد. همچنین آنها می‌توانند هماهنگی بیشتری برای مدیریت بهتر حامل‌های مختلف انرژی برای مشترکان به ارمغان آورند. از طرف دیگر، همانطور که حفظ بارهای ضروری در طول شرایط اضطراری مهم است، بهره‌گیری از سیستم‌های قدرت توزیع شده مانند ریزشبکه‌ها، یک گزینه سودمند برای حفظ افزایش تاب‌آوری و امنیت مصرف‌کنندگان در مواجهه با حوادث ویرانگر می‌باشد [۴]. در این مقاله تاب‌آوری به صورت مجموعه‌ای از ویژگی‌های سیستم قدرت از جمله توانایی آن برای ایستادگی در برابر صدمات وارده، پاسخ‌دهی مناسب به این حوادث و بازیابی سریع در برابر حوادثی با احتمال کم و عواقب شدید تعریف می‌شود [۵]. شکل (۱) فازهای مختلف تاب‌آوری و تاثیر هر کدام از آنها بر ویژگی‌های بهره‌برداری شبکه‌های قدرت را به تصویر می‌کشد.



شکل ۱- تقابل فازهای تاب‌آوری و بهره‌برداری سیستم قدرت.

مراجع مختلفی مسأله افزایش تاب‌آوری ریزشبکه‌ها را بررسی کرده‌اند که بطور کلی می‌توان در سه گروه عمده جای داد. دسته اول که روش‌های مبتنی بر طراحی‌های بلندمدت هستند عمدتاً بر روی تقویت استحکام زیرساخت‌های سیستم قدرت متمرکز شده‌اند. روش‌های پیشنهادی برای

با توجه به مرور کارهای قبلی در فوق و شناسایی چالش‌های باقی‌مانده در حوزه مطالعه، این مقاله سعی در ارائه نوآوری‌های زیر دارد که بطور کلی عبارتند از:

- ❖ استفاده همزمان از ذخیره‌سازهای انرژی و برنامه‌های مدیریت تقاضا با هدف افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع
- ❖ مدل‌سازی حادثه شدید و پیشنهاد شاخص برای اندازه‌گیری دقیق میزان تاب‌آوری شبکه
- ❖ مدل‌سازی شبکه به صورت ریزش‌بکه‌های چندگانه و بهره‌گیری از تبادلات توان میان ریزش‌بکه‌ها

۲- فرمول‌بندی مسأله

هدف اصلی این مقاله ارائه یک استراتژی جامع برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع مبتنی بر ریزش‌بکه‌های چندگانه در برابر حوادث شدید آب و هوایی می‌باشد. در استراتژی پیشنهادی، اولین قدم تعیین یک شاخص دقیق برای تعیین و سنجش میزان تاب‌آوری شبکه قدرت می‌باشد. در قدم دوم ویژگی‌ها و مشخصات حادثه مورد نظر مدل‌سازی می‌شود و متعاقباً در سطح سوم رفتار سیستم در قبال این حادثه و آثار آن بر روی شبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در مرحله پایانی برنامه پیشگیرانه پیشنهادی برای افزایش آمادگی شبکه انجام می‌پذیرد تا میزان تاب‌آوری شبکه نسبت به حادثه افزایش یابد. به طور کلی، هدف مدیریت پیشگیرانه افزایش آمادگی و مقاومت شبکه در برابر حادثه پیش‌رو می‌باشد که این کار با بهره‌گیری از امکانات شبکه مانند ذخیره‌سازهای انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار صورت می‌پذیرد. تاب‌آوری سیستم در مقابل یک رویداد می‌تواند به صورت معکوس تلفات عملکرد سیستم اندازه‌گیری شود. به عبارت دیگر میزان افت عملکردی سیستم پس از وقوع حادثه نشان دهنده میزان کارایی آن در برابر حادثه مذکور می‌باشد که هرچقدر این افت عملکردی کم باشد سیستم تاب‌آوری بیشتری دارد [۱۸]:

$$resilience = \frac{1}{loss} \quad (1)$$

$$loss = \frac{1}{t_4 - t_1} \int_{t_1}^{t_4} \left[\frac{Q_0 - Q(t)}{Q(t)} \right] dt \quad (2)$$

که در رابطه (۲) افت عملکرد از طریق انتگرال‌گیری از انحراف نسبی در طول مدت زمان عملکرد از زمان وقوع رویداد شدید (t_1) تا زمان حالت نرمال (t_4) محاسبه می‌گردد.

اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در حالت نرمال سیستم تعیین می‌شود. در مرجع [۱۲] استفاده از ذخیره‌سازها به عنوان منبع پشتیبان برای تامین انرژی ریزش‌بکه‌ها در شرایط بحرانی برای افزایش تاب‌آوری سیستم پیشنهاد شده است. در این مقاله، میزان انرژی ذخیره شده در باتری‌ها به عنوان شاخص تاب‌آوری مطرح شده و سناریوهای مختلفی برای بررسی تاثیر روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. مرجع [۱۳] یک مدل بهینه برای پایداری فرکانسی ریزش‌بکه‌ها در حالت جزیره‌ای ارائه می‌کند که در آن از معادلات پخش توان جریان متناوب برای ایجاد چارچوبی دقیق استفاده شده که متعاقباً توسط برنامه ریزی محدب فرمول‌بندی شده است. دسته سوم به دنبال بازگشت سریع سیستم قدرت به حالت عملکرد نرمال خود بعد از وقوع حادثه هستند. هدف اصلی آن‌ها بازیابی هرچه سریع‌تر و بهتر به سطح عملکرد بالا با کم‌ترین هزینه و بالاترین قابلیت اعتماد است. در مرجع [۱۴] یک روش سریع و بهینه برای بازیابی شبکه‌های توزیع با استفاده از تقسیم‌بندی شبکه به مجموعه‌ای از ریزش‌بکه‌های چندگانه پیشنهاد شده است. در این روش، پس از وقوع رخداد سیستم توزیع به چندین جزیره کوچک تقسیم شده سپس هر ریزش‌بکه به صورت جداگانه شروع به بازیابی بارهای خود می‌نماید. مرجع [۱۵] مسأله بازیابی سیستم‌های انتقال انرژی با هدف افزایش تاب‌آوری و کاهش خسارات سیستم مورد بررسی قرار داده است. در این مرجع، یک مدل بهینه پس از حادثه برای تعیین برنامه‌ریزی تعمیر سیستم، محاسبات در مدار قرارگیری نیروگاه‌ها و همچنین نحوه انرژی‌دار کردن خطوط سیستم توسعه داده شده است. در مرجع [۱۶] از روش تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی برای تعیین استراتژی بالارونده مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از وقوع حوادث شدید استفاده شده است. بازیابی سیستم‌های قدرت یک مسأله بسیار پیچیده با تعداد متغیر و قیود زیاد بوده که برای مدل‌سازی آن از برنامه‌ریزی مرتبه دوم استفاده شده تا جواب بهینه کلی برای مسأله به ارمغان آورد. نویسندگان در مرجع [۱۷] یک الگوریتم بازگردانی بار با استفاده هماهنگ از منابع تولیدپراکنده و بازارایی شبکه توزیع با ارضای قیود بهره‌برداری مختلف پیشنهاد کرده‌اند. روش پیشنهادی در این مرجع از انعطاف‌پذیری ناشی از مدرن‌سازی سیستم توزیع به منظور افزایش بازگردانی بار استفاده می‌نماید.

وقوع حادثه به منظور کنترل آسیب‌های ناشی از وقوع آن انجام می‌گردد. که P_F احتمال خرابی دکل‌های برق می‌باشد. مدیریت پیشگیرانه به طور ویژه در زمان فاز اجتناب انجام می‌پذیرد و هدف اصلی آن ارتقا آمادگی سیستم و تخفیف صدمات ناشی از وقوع حادثه بالقوه می‌باشد که این کار با افزایش میزان انرژی ذخیره شده در باتری‌ها میسر می‌گردد. معادله (۶) نشان دهنده میزان انرژی ذخیره شده در باتری‌ها بوده که بایستی بیشینه گردد تا در زمان وقوع حادثه به شبکه دشارژ گردند و منجر به تامین بخشی از بارهای حساس شبکه گردند.

$$\text{Max}_{H\&N} F_t^{H\&N} = \sum_{t=1}^{T_c} \left\{ \sum_{e=1}^{N_e} \text{SoC}_{et}^{ESS} \right\} \quad (6)$$

در این مقاله فرض بر این است که چهار واحد مختلف درون ریزشبه‌ها وجود دارد که شامل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی، پیل سوختی، ذخیره‌ساز گاز طبیعی و واحد ترکیبی تولید حرارت و توان که توسط اتصالات مختلف به یکدیگر متصل شده‌اند. معادلات تعادل برق و حرارت در داخل هر ریزشبه در روابط (۷) و (۸) آورده شده است.

$$E_t^{grid} + E_t^{ful} + E_t^{CHP} + \eta_{dis}^{ESS} E_{dis}^{ESS} = \frac{E_t^{app}}{\eta^{app}} + \frac{E_{ch}^{ESS}}{\eta_{ch}^{ESS}} \quad (7)$$

$$H_t^{app} + H_t^{CHP} + \eta_{dis}^{NGS} H_{dis}^{NGS} = H_t^D + \frac{1}{\eta_{ch}^{NGS}} H_{ch}^{NGS} \quad (8)$$

$$H_t^{app} = \eta^{gapp} (1 - \nu_t) G_t, \quad \forall t \quad (9)$$

$$E_t^{CHP} = \eta^{g-e} \nu_t G_t, \quad \forall t \quad (10)$$

$$H_t^{CHP} = \eta^{g-h} \nu_t G_t, \quad \forall t \quad (11)$$

سمت چپ معادله (۷) کل انرژی الکتریکی تأمین شده توسط منابع مختلف از جمله انرژی خریداری شده از شبکه بالادست (E_t^{grid})، انرژی تولید شده توسط پیل سوختی (E_t^{ful})، واحدهای تولید همزمان حرارت و توان (E_t^{CHP}) و توان دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی (E_{dis}^{ESS}) را نشان می‌دهد. به همین ترتیب، سمت راست این معادله نیز انرژی الکتریکی مصرف‌شده درون ریزشبه‌ها مانند شارژ توان در ذخیره‌سازها (E_{ch}^{ESS}) و لوازم‌خانگی (E_t^{app}) را نشان می‌دهد.

به علاوه، زمان تنزل عملکرد سیستم می‌تواند صراحتاً برای تاکید بر اهمیت سرعت بازیابی سیستم مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، متغیر زمان در شاخص می‌تواند گنجانده شود تا بیانگر اهمیت سرعت پاسخ‌دهی و بازیابی بر تاب‌آوری سیستم قدرت باشد. فرم کلی شاخص تاب‌آوری به صورت نسبت به واحد مبتنی بر رابطه (۳) می‌باشد.

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_r} P(t) dt}{\int_{t_0}^{t_r} P_0 dt} = \frac{\int_{t_0}^{t_r} P(t) dt}{P_0 (t_r - t_0)} \quad (3)$$

توجه شود که در فرمول (۳) مقدار صفر نشان دهنده تاب‌آوری کامل است و مقدار یک نشان دهنده تاب‌آور نبودن سیستم نمونه می‌باشد. ذکر این نکته مهم است که عملکرد سیستم می‌تواند به صورت ویژگی‌های فنی سیستم (مانند فرکانس، ولتاژ، میزان بار قطع شده، میزان تولید در دسترس و غیره) و یا فعالیت اقتصادی مورد نظر بهره‌بردار در نظر گرفته شود [۱۹].

قدم بعدی مدل‌سازی حوادث شدید آب و هوایی بوده که در آن باید به تاب‌آوری تجهیزات نسبت به این حوادث توجه شود و آستانه تحمل تجهیزات سیستم برآورد گردد. بدین منظور در این مقاله از منحنی‌های شکنندگی برای تجهیزات سیستم قدرت در برابر طوفان استفاده شده است [۲۰]. روابط (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده آستانه شکنندگی تجهیزات و احتمال شکست آن‌ها در برابر حادثه شدید مذکور می‌باشند که تعداد تجهیزات آسیب دیده را محاسبه خواهند کرد [۲۱].

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (4)$$

$$P_F = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - P_k) \quad (5)$$

که Φ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد، $\bar{S}_{d,ds}$ مقدار متوسط پارامتر تقاضای مهندسی که در آن تجهیزات به آستانه وضعیت خرابی ds می‌رسند، β_{ds} انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی پارامتر تقاضای مهندسی که در آن به آستانه وضعیت خرابی تجهیزات ds رسیده است را نشان می‌دهد. بعد از مشخص نمودن تجهیزات آسیب دیده توسط منحنی شکنندگی، مجموعه‌ای از اعمال پیشگیرانه قبل از

$$0 \leq P_{et}^{DIS} \leq \bar{P}_{et}^{DIS} \left(\frac{1 - SoC_{et}^{CH}}{1 - SoC_e^{sat}} \right) (1 - \psi_{et}^{ESS}) \quad (17)$$

مناطق بهره‌برداری ممنوعه منابع تولید پراکنده در معادلات (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است. علاوه بر این، محدودیت‌های مربوط به شیب افزایش توان (RU_n^{DG}) و شیب کاهش توان (RD_n^{DG}) واحدهای تولید پراکنده کنترل پذیر به ترتیب توسط قیود (۲۰) و (۲۱) محدود می‌شوند. در این معادلات، P_{nt}^{DG} و Q_{nt}^{DG} توان اکتیو و راکتیو هستند که توسط منابع در هر ساعت تولید می‌شوند و ξ_{nt} وضعیت تعهد آن‌ها را در هر بازه زمانی نشان می‌دهد [۲۴].

$$\xi_{nt} \underline{P}_n^{DG} \leq P_{nt}^{DG} \leq \xi_{nt} \bar{P}_n^{DG} \quad (18)$$

$$\xi_{nt} \underline{Q}_n^{DG} \leq Q_{nt}^{DG} \leq \xi_{nt} \bar{Q}_n^{DG} \quad (19)$$

$$P_{nt}^{DG} - P_{n(t-1)}^{DG} \leq RU_n^{DG} \quad (20)$$

$$P_{n(t-1)}^{DG} - P_{nt}^{DG} \leq RD_n^{DG} \quad (21)$$

در این مقاله، برای دستیابی به جواب بهینه ایده‌آل با کمترین زمان ممکن از یک مدل خطی‌سازی شده برای محاسبات پخش‌بار در شبکه‌های توزیع شعاعی استفاده شده است [۲۵]. معادلات خطی پخش‌بار برای محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توسط (۲۲) و (۲۳) تعیین می‌شوند. پس از وقوع رخداد شدید در شبکه، قیود (۲۴) و (۲۵) تعادل توان اکتیو و راکتیو بین تولید و مصرف را در هر بازه زمانی در داخل ریزش‌بکه‌ها تضمین می‌کنند. محدودیت خطوط برای عبور توان‌های اکتیو و راکتیو توسط (۲۶) و (۲۷) در نظر گرفته شده و همچنین قید (۲۸) محدودیت دامنه ولتاژ را به گره‌های شبکه اعمال می‌کند. در اینجا، متغیرهای Q_i^{inj} ، P_i^{inj} قدرت خالص اکتیو و راکتیو تزریق شده به باس‌های شبکه هستند، و Q_i^{flw} ، P_i^{flw} توان‌های اکتیو و راکتیو در خطوط شبکه می‌باشند. همچنین V^{bus} و θ_i نشان دهنده اندازه و زاویه ولتاژ در باس‌های شبکه بوده که از پخش بار بدست می‌آیند و G_{ii} و B_{ii} به ترتیب کاندوکتانس و سوسپتانس خطوط توزیع را نشان می‌دهند.

همین امر در مورد انرژی حرارتی در معادله (۸) نیز صادق است. که در این معادله تولید گرما در وسایل مصرف‌کننده گاز طبیعی (H_t^{app}) در معادله (۹) براساس گاز طبیعی وارد شده در هر بازه زمانی (G_t) تعیین می‌شود. انرژی الکتریکی و حرارت تامین شده توسط واحدهای تولید همزمان برق و حرارت به ترتیب با روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه و بر اساس ضریب توزیع U_t ، و ضرایب مربوط به راندمان تبدیل گاز به برق η^{g-e} و گاز به گرما η^{g-h} تعیین می‌شود [۲۲].

ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی نقش کلیدی در بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع مدرن بازی می‌کنند. آن‌ها همانند پلی هستند که از لحاظ زمانی نقاط مختلف شبکه را به هم وصل و باعث انتقال توان از ساعاتی به ساعات دیگر می‌شوند [۲۳]. معادله (۱۲) میزان انرژی ذخیره شده در ذخیره‌سازها را بر اساس میزان توان شارژ و دشارژ آنها نشان می‌دهد. توجه شود که در این معادلات ψ_{et}^{ESS} یک متغیر باینری برای تعیین حالت شارژ یا دشارژ ذخیره‌ساز در هر ساعت به خصوص می‌باشد. همچنین قیود فنی و بهره‌برداری ذخیره‌سازها مانند محدوده مجاز انرژی ذخیره شده، توان-های شارژ و دشارژ در روابط (۱۳) تا (۱۵) ارائه شده است. شایان ذکر است که در این مقاله مدل‌سازی خطی برای شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها انجام شده است (۱۶) و (۱۷) تا در حالت شارژ شرایط انتقال از حالت جریان ثابت به ولتاژ ثابت در نظر گرفته شود. در این معادلات ψ_{et}^{ESS} و P_{et}^{DIS} به ترتیب نشان دهنده توان‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها بوده و همچنین η_e^{DIS} و η_e^{CH} راندمان آنها برای شارژ و دشارژ را نشان می‌دهد.

$$SoC_{et}^{ESS} = SoC_{e(t-1)}^{ESS} + \frac{\eta_e^{CH} \psi_{et}^{ESS} P_{et}^{CH} \Delta t}{E_e^{ESS}} \quad (12)$$

$$- \frac{P_{et}^{DIS} (1 - \psi_{et}^{ESS}) \Delta t}{\eta_e^{DIS} E_e^{ESS}}$$

$$\underline{SoC}_e^{ESS} \leq SoC_{et}^{ESS} \leq \bar{SoC}_e^{ESS} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{et}^{CH} \leq \bar{P}_{et}^{CH} \psi_{et}^{ESS} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{et}^{DIS} \leq \bar{P}_{et}^{DIS} (1 - \psi_{et}^{ESS}) \quad (15)$$

$$0 \leq P_{et}^{CH} \leq \bar{P}_{et}^{CH} \left(\frac{1 - SoC_{et}^{CH}}{1 - SoC_e^{sat}} \right) \psi_{et}^{ESS} \quad (16)$$

نشان می‌دهند [۲۷].

$$D_t^{net} = (1 - DR_t) D_t^{int} + (\kappa_t^{inc} D_t^{inc} - D_t^{dec} \kappa_t^{dec}) \quad (29)$$

$$D_t^{int} - D_t = DR_t \times D_t^{int} - (\kappa_t^{inc} D_t^{inc} - D_t^{dec} \kappa_t^{dec}) \quad (30)$$

$$\sum_t (\kappa_t^{inc} D_t^{inc} - D_t^{dec} \kappa_t^{dec}) = \sum_t DR_t \times D_t^{int} \quad (31)$$

$$D_t^{inc} - D_{t-1}^{inc} \leq \kappa_t^{inc} \bar{D}^{inc} \quad (32)$$

$$D_{t-1}^{dec} - D_t^{dec} \leq \kappa_t^{dec} \bar{D}^{dec} \quad (33)$$

$$DR_t \leq \bar{DR} \quad (34)$$

$$\kappa_t^{inc} + \kappa_t^{dec} \leq 1 \quad (35)$$

در این مقاله برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی که ممکن است در طول برنامه‌ریزی مسأله رخ دهد از بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده است [۲۸]. این روش نه تنها بار محاسباتی مدل‌سازی مبتنی بر سناریو را کاهش می‌دهد، بلکه شرایط بدبینانه را نیز در نظر می‌گیرد و سعی می‌کند سیستم را در برابر بدترین سناریوی ممکن ایمن سازد. در مسأله ارائه شده، فرض بر این است که زمان شروع و پایان حادثه دارای عدم قطعیت بوده ($\xi_t \in \{\xi_t^{srt}, \xi_t^{end}\}$) و بنابراین مبتنی بر معادلات (۳۶)–(۳۷) بهینه‌سازی مقاوم انحرافات پارامترها را به گونه‌ای تعیین می‌کند تا مقدار تابع هدف در سطح قابل قبول بماند. در روش بهینه‌سازی مقاوم پارامتر دارای عدم قطعیت می‌تواند بین دو مقدار حاشیه‌ای (۳۸) و (۳۹) با شعاع عدم قطعیت α در نوسان باشد و این روش تلاش دارد که حداکثر مقدار شعاع عدم قطعیت را به گونه‌ای پیدا کند که حداقل مقدار تابع هدف کمتر از یک مقدار مشخص شده نباشد (F_w^{RA}). لازم به ذکر است که مقدار قابل تحمل تابع هدف توسط اپراتور شبکه توسط رابطه (۴۰) تعیین می‌شود که بستگی به سیاست‌های بهره‌برداری، میزان ریسک‌پذیری و بودجه مالی او دارد تا میزان ریسک مطلوب خود را بسنجد.

$$F_w^{base} = \max F(\mathbf{U}, \xi_t^{srt}), \quad \forall w \in \{1, 2, \dots, N_w\} \quad (36)$$

$$\alpha(\mathbf{U}, F_w^T) = \max_F \left\{ \alpha : \min_{\xi \in \mathbf{U}} F(\mathbf{U}, \xi_t^{end}) \geq F_w^{RA} \right\} \quad (37)$$

$$P_i^{inj} = (2|V_i^{Bus}| - 1)G_{ii} + \sum_{i' \in \mathbb{R}} \left[G_{ii'} (|V_i^{Bus}| + |V_{i'}^{Bus}| - 1) + B_{ii'} (\theta_i - \theta_{i'}) \right] \quad (22)$$

$$Q_i^{inj} = -(2|V_i^{Bus}| - 1)B_{ii} + \sum_{i' \in \mathbb{R}} \left[-B_{ii'} (|V_i^{Bus}| + |V_{i'}^{Bus}| - 1) + G_{ii'} (\theta_i - \theta_{i'}) \right] \quad (23)$$

$$\sum_n P_{nt}^{DG} + \sum_e [P_{et}^{DIS} - P_{et}^{CH}] - \sum_i P_{it}^D = P_{it}^{inj} \quad (24)$$

$$\sum_n Q_{nt}^{DG} - \sum_i Q_{it}^D = Q_{it}^{inj} \quad (25)$$

$$-\overline{FP}_l \leq P_l^{flw} \leq \overline{FP}_l \quad (26)$$

$$-\overline{FQ}_l \leq Q_l^{flw} \leq \overline{FQ}_l \quad (27)$$

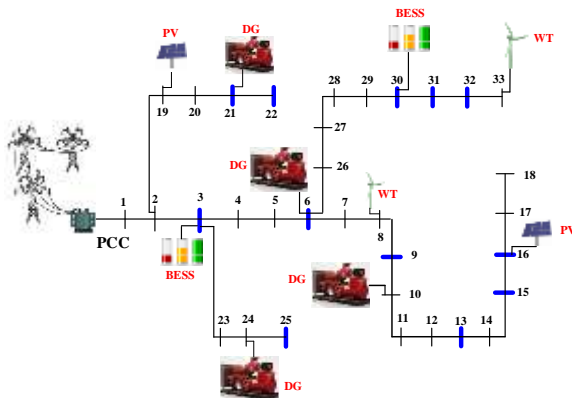
$$\underline{V}_i \leq V_{it} \leq \bar{V}_i \quad (28)$$

یکی از گزینه‌های مناسب برای کنترل بار شبکه در شرایط بهره‌برداری اضطراری استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار و تحریک مصرف کنندگان پاسخگو در جهت کمک به بهره بردار برای دستیابی به یک بازیابی سریع و مطمئن است. در این مقاله از برنامه کنترل بار مستقیم برای کاهش مستقیم مصرف سیستم در شرایط اضطراری توسط اپراتور استفاده شده است [۲۶]. معادلات (۲۹) تا (۳۵) مدل ریاضی برنامه کنترل بار مستقیم پیشنهادی را بصورت ریاضی بیان می‌کنند. محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۱) به معنای برابری تقاضای افزایش یافته و کاهش یافته در هر بازه زمانی است تا مجموع خالص انرژی قطع شده صفر بماند. قیود (۳۲) و (۳۳) محدودیت‌های افزایش و کاهش شیب توان را برای افزایش و کاهش تقاضا در هر بازه زمانی نشان می‌دهند. همچنین، قید (۳۴) حداکثر سطح نفوذ برنامه پیشنهادی در شبکه توزیع را محدود می‌کند و (۳۵) استنباط می‌کند که در هر بازه زمانی بار پاسخگو نمی‌تواند همزمان افزایش و کاهش یابد. در اینجا، D_t^{dec} و D_t^{inc} نشان دهنده افزایش و کاهش تقاضا در هر ساعت هستند، و بطور مشابه κ_t^{inc} و κ_t^{dec} متغیرهای باینری مربوطه برای کاهش و افزایش بار را

اضافه می‌شوند.

- حالت چهارم: برنامه‌های پاسخگویی بار به حالت سوم اضافه می‌شوند.

در سیستم توزیع ۳۳ باسه بکارگرفته شده، چندین منبع تولیدپراکنده نصب شده است که شامل چهار واحد تولیدپراکنده قابل استفاده از گاز با حداکثر ظرفیت ۳۰۰ کیلووات برای هر واحد، دو واحد ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی هرکدام با حداکثر ظرفیت ۲۵۰ کیلووات، دو توربین بادی با



شکل ۲- ساختار بهینه شبکه توزیع ۳۳ باسه با منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی [۲۹].

ظرفیت ۲۰۰ کیلووات و همچنین دو مازول فتوولتائیک هر کدام با ظرفیت ۱۵۰ کیلووات می‌باشد. داده‌های فنی مربوط به این واحدهای تولیدی (به عنوان مثال، محدودیت‌های حداقل/حداکثر تولید توان، محدودیت‌های ناشی از رمپ‌های افزایشی و کاهش‌ی و حداقل و حداکثر زمان خاموش و روشن بودن واحدها، و غیره) از مراجع تا [۳۲] برداشته شده است.

شکل (۳) پاسخ موقت سیستم به طوفان را در موارد مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل می‌توان نتیجه گرفت، عملکرد سیستم در هنگام وقوع رویداد (ساعت ۴) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، به طوری که میزان خسارت به مقاومت و افزونگی آن بستگی دارد. به عنوان مثال، سطح عملکرد در حالت دوم-مورد دوم حدود ۱۵/۴۸٪ است در حالی که در حالت اول-مورد اول ۵۸/۶۶٪ درصد است که نشان می‌دهد روش پیشنهادی ۷۳/۶۱ درصد سطح عملکرد شبکه را بهبود بخشیده است. این افزایش در سطح عملکرد سیستم عمدتاً به دلیل تقسیم شبکه به ریزشبه‌های مستقل و استفاده از پتانسیل‌های ریزشبه‌ها است که انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این،

$$\forall \alpha \in U(\xi_t^{end}, \alpha) = \left\{ \xi_t^{end} : \left| \frac{\xi_t^{end} - \xi_t^{end}}{\xi_t^{end}} \right| \leq \alpha \right\}, \alpha \geq 0 \quad (38)$$

$$\xi_t^{end} (1 - \alpha) \leq \xi_t^{end} \leq (1 + \alpha) \xi_t^{end} \quad (39)$$

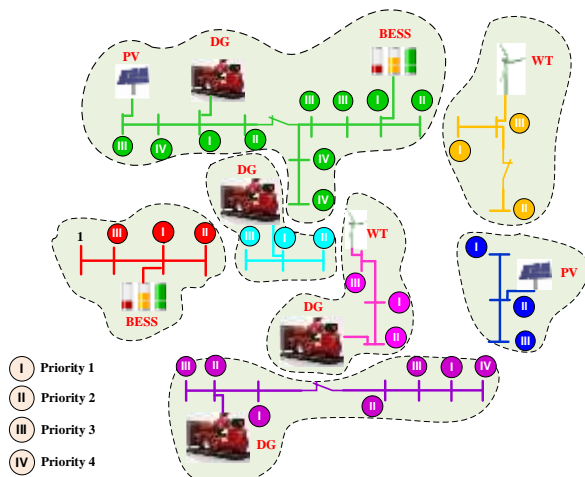
$$F_w^{RA} = (1 - \beta^{RA}) F_w^{Base} \quad (40)$$

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

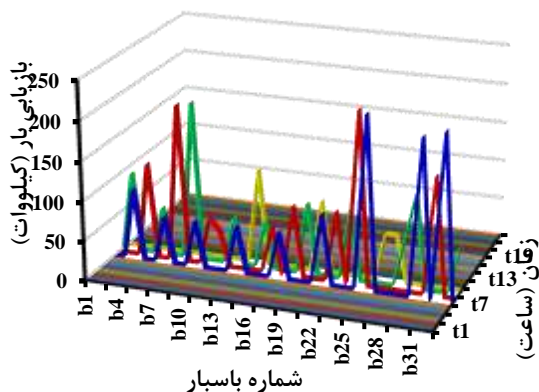
در این بخش، نتایج مربوط به طرح پیشنهادی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع ارائه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. هدف مسأله افزایش امنیت شبکه توزیع با بکارگیری بهینه ذخیره‌سازهای انرژی در کنار بارهای پاسخگو بوده بطوری که میزان قطعی بار شبکه در لحظه وقوع حادثه حداقل گردد. به همین منظور، از بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده تا نتایج به دست آمده نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در مسأله ایمن باشند. طرح پیشنهادی بر روی شبکه ۳۳ باسه [۲۹] مورد اجرا درآمده و نتایج تفصیلاً بررسی می‌گردند. نوع حادثه در نظر گرفته طوفان و گردباد بوده و فرض می‌گردد اطلاعات و دیتاهای مورد نیاز جهت مدل‌سازی حادثه توسط سیستم‌های بر خط مخابرات اطلاعات هواشناسی در دسترس می‌باشد. همچنین، منحنی شکنندگی طوفان از مرجع [۳۰] گرفته شده و اطلاعات مربوط به منابع شبکه (ذخیره‌سازها و منابع تولید پراکنده) از مراجع [۱۰] و [۳۱] اقتباس شده است. شکل (۲) حالت بهینه شبکه ۳۳ باسه را همراه با منابع و ریزشبه‌ها نشان می‌دهد. نقاط آبی موجود در شکل (۲) بارهای مهم و اولویت‌دار شبکه را نشان می‌دهد که در برنامه پاسخگویی بار استفاده خواهد شد. ذکر این نکته ضروری است که منابع تجدیدپذیر نصب شده در سیستم در اختیار بهره‌بردار شبکه بوده و قادر است در هر لحظه میزان توان تولیدی آن‌ها را کنترل نماید. در شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که حادثه در ساعت ۴ صبح اتفاق می‌افتد و بهره‌بردار شبکه از سه ساعت قبل از وقوع آن اطلاع دارد. برای انجام مطالعات و شناسایی نقاط ضعف و قدرت ابزارات استفاده شده، روش پیشنهادی در ۴ حالت بررسی می‌گردد:

- حالت اول: بدون استفاده از ریزشبه‌ها و منابع است.
- حالت دوم: فقط منابع تولید پراکنده موجود می‌باشند.
- حالت سوم: ذخیره‌سازهای انرژی به حالت دوم

پیوسته نه تنها باعث کاهش میزان قطعی برق مشترکین میگردد، بلکه امکان انجام عملیات اصلاحی موازی را نیز فراهم نموده و در نتیجه زمان قطعی ها را نیز بطور چشمگیری کاهش میدهد. در این فرایند، منابع خودراه انداز پس از انرژی دادن به سایر فیدها و ایجاد توان راه اندازی به منابع غیر خودراه انداز می توانند بارها را به ترتیب اولویت آنها بازایی کنند. ذخیره سازها می توانند در این حالت به عنوان منبع پشتیبان عمل کرده و موجب راه اندازی سایر منابع گردند. همچنین برنامه های پاسخگویی بار نیز می توانند به ایجاد تعادل توان کمک کرده و از وقوع بارزدایی های ناخوسته جلوگیری کنند. توالی زمانی و مکانی بازایی بارهای شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است که براساس اهمیت هر نقطه بارگذاری و شرایط بازایی بار سرد بدست می آید. اولویت اصلی برای بازایی بار با بارهای مهم و حساس بوده و سپس سایر بارها به ترتیب اهمیت برق دار می شوند.

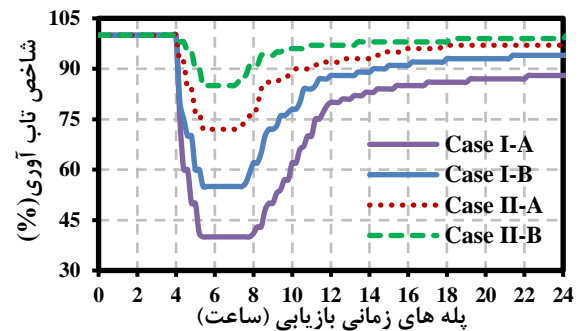


شکل ۴- ساختار شبکه پس از وقوع حادثه و توالی زمانی بازایی بار شبکه بر اساس اولویت آنها.



شکل ۵- توالی مکانی و زمانی بازایی بار شبکه

محدود کردن دامنه خطا با تقسیم بندی نه تنها سرعت پاسخگویی در سیستم قدرت را افزایش می دهد، بلکه باعث کاهش بار قطع شده آن نیز می شود. این ادعاها را می توان به وضوح از جدول ۱ با مقایسه نتایج موارد مطرح شده به عنوان دو حالت حدی تفسیر کرد. همانطور که مشاهده می شود، میزان کاهش بار در حالت اول ۸۲۶۸/۷۵ کیلووات ساعت است که در حالت دوم به ۲۵۸۰/۱۲ کیلووات ساعت کاهش می یابد (حدود ۶۸/۷۹ درصد کاهش) در حالی که سرعت بازایی سیستم ۶۴/۳۴ درصد به دلیل بازایی موازی بهبود یافته است. توجه داشته باشید که نتایج موارد اول و دوم بین این دو حالت مرزی متوسط است، بنابراین بهترین حالت زمانی رخ می دهد که هم ذخیره ساز و هم استفاده از مدیریت تقاضا به طور همزمان در نظر گرفته شوند.



شکل ۳- منحنی تاب آوری دوزنقه ای برای حالت های مختلف

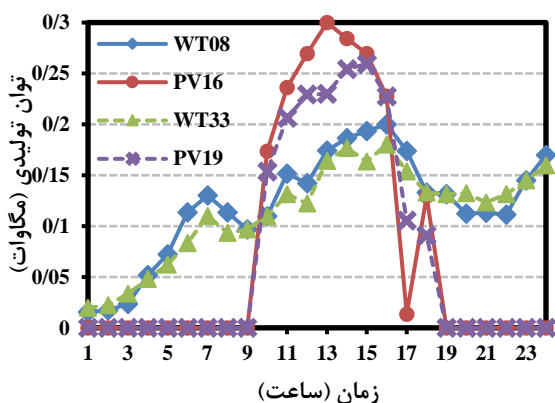
جدول ۱- کمیت های فنی سیستم در حالت های مختلف

حالت ها	بارزدایی (kWh)	شاخص بازایی (٪)	بازایی (h)	زمان
اول	۸۲۶۸/۷۵	۴۱/۱۱۷	۳۷۵/۲۰	۶/۴۵
دوم	۶۵۵۲/۳۴	۵۵/۷۹۱	۴۹۱/۲۳	۵/۱۵
سوم	۴۲۷۸/۹۱	۷۱/۶۸۵	۶۸۵/۰۴	۴/۰۱
چهارم	۲۵۸۰/۱۲	۸۴/۵۲۳	۸۲۱/۶۶	۲/۳۰

به طور ویژه، شکل (۴) وضعیت پیکربندی شبکه را برای بعد از رویداد نشان می دهد که در آن سیستم توزیع بزرگ به هفت ریز شبکه تقسیم شده و حالت سوئیچ ها طوری تعیین می شود تا مسیرهایی برای تامین انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان و همچنین انتقال توان برای راه اندازی واحدهای تولید غیر خودراه انداز ایجاد شود. جزیره سازی شبکه های توزیع شعاعی بصورت مجموعه ای از ریز شبکه های به هم

شکل (۷) برنامه شارژ/دشارژ پیشگیرانه ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی را قبل از وقوع حادثه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود استراتژی پیشنهادی سعی دارد مقدار انرژی ذخیره شده در واحدهای ذخیره‌ساز را قبل از وقوع حادثه به حداکثر برساند تا آمادگی سیستم هنگام وقوع طوفان افزایش یابد.

در انتها، میزان تولید منابع تجدیدپذیر بصورت روزانه در شکل (۸) آورده شده است که برنامه‌ریزی‌ها باید به گونه‌ای انجام شود که این منابع رایگان حداقل میزان دور ریز توان را داشته باشند و حداکثر توان قابل تولید را به شبکه تزریق نمایند. توجه شود که حداکثر توان تولیدی منابع تجدیدپذیر توسط قیود فنی و امنیتی سیستم محدود می‌شود و این منابع علی‌رغم ارزان بودن نمی‌توانند به دلیل وقوع تراکم در شبکه ماکزیمم توان ممکن خود را تولید و تحویل شبکه دهند. اما با این حال، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌توانند با ذخیره توان مازاد منابع تجدیدپذیر تا حدود زیادی این مساله را حل نمایند.

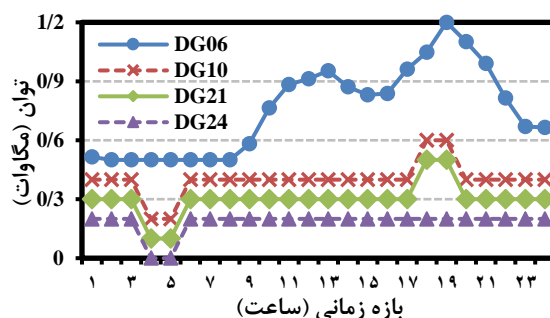


شکل ۸- تولید روزانه منابع تجدیدپذیر بر اساس ماکزیمم توان قابل تولید.

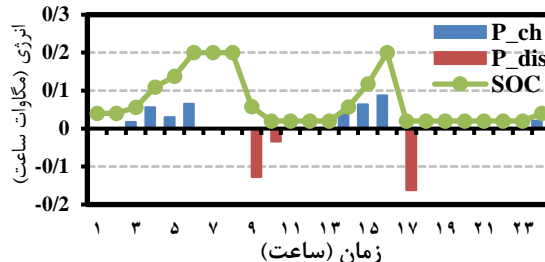
جدول ۲- نتایج احتمالاتی توابع هدف مساله

توابع	مقدار	انحراف	بدترین سناریو	سناریو پایه
	انتظاری	معیار	سناریو	پایه
بازیابی	۸۲۱/۶۶	۲۶۱/۸۴	۶۵۸/۰۱	۱۰۵/۳۶
بار	(kw)	(kw)	(kw)	۲ (kw)
قطعی	۲۵۸/۱۱	۱۲۶/۴۲	۳۸۴/۳۵	۱۴۳/۷۷
بار	(kwh)	(kwh)	(kwh)	۶ (kwh)
شاخ	۸۴/۱	۱۳/۴	۷۱/۴	۹۲/۶
ص	(%)	(%)	(%)	(%)

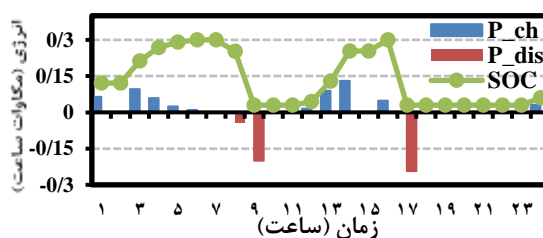
مجموعه شکل‌های (۶) تا (۸) برنامه‌ریزی محافظه‌کارانه در مدار قرارگیری واحدهای تولیدپراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی را در مرحله آمادگی سیستم نشان می‌دهند. هدف این برنامه‌ریزی‌ها افزایش هرچه بیشتر آمادگی شبکه با تغییر در سیاست‌های بهره‌برداری به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه در برابر حادثه قریب‌الوقوع می‌باشد. به طور خاص، شکل (۶) در مدار قرارگیری مبتنی بر تاب‌آوری واحدهای تولید پراکنده خودراه‌انداز را نشان می‌دهد که در آن بخشی از تولید آن‌ها صرف انرژی دادن به فیدرها و راه‌اندازی مجدد منابع غیرخودراه‌انداز می‌شود. علاوه بر این، در طول حالت جزیره-ای این منابع قابل کنترل وظیفه ایجاد تعادل توان و کنترل ولتاژ در هر بخش را دارند تا سیستم از لحاظ فرکانسی پایدار بماند. شایان ذکر است که با توجه به اهمیت امنیت سیستم در شرایط بحرانی از اهداف و قیمت‌های اقتصادی صرف نظر شده است.



شکل ۶- در مدار قرارگیری تاب‌آور محور واحدهای فسیلی



(الف) ذخیره‌سازی واقع در باس ۳



(ب) ذخیره‌ساز واقع در باس ۳۰

شکل ۷- برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها برای مدیریت پیشگیرانه شبکه

ذخیره شده در باتری‌ها این هدف برآورده گردید. در مرحله مدیریت فعال، مجموعه اقدامات بهره‌برداری از جمله مدیریت انرژی منابع توزیع شده، بارهای پاسخگو و استفاده از ریزشبه‌ها انجام شد تا میزان انرژی تامین نشده سیستم در حین حادثه به کم‌ترین میزان ممکن برسد. در کلیه مراحل فوق‌الذکر، عدم قطعیت‌های مسأله توسط بهینه‌سازی مقاوم در نظر گرفته شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های به دست آمده در فصل قبل، مهم‌ترین نتایج طرح پیشنهادی به صورت خلاصه در زیر آمده است:

- پارتیشن‌بندی شبکه بصورت ریزشبه‌های مستقل میزان تاب‌آوری شبکه را به طرز چشم‌گیری بهبود می‌دهد که دلیل آن امکان اجرای برنامه‌های موازی می‌باشد. با تقسیم شبکه‌های توزیع بزرگ به مجموعه‌ای از ریزشبه‌ها این امکان را برای بهره‌بردار ایجاد می‌کند تا از منابع محلی بهره گرفته و بارهای حیاتی سیستم را تامین نماید.
- ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با ذخیره انرژی در زمان‌های غیرضروری و تحویل آن به شبکه در زمان مورد نیاز به عنوان یک منبع پشتیبان قابل اطمینان و در دسترس عمل کرده و باعث افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت می‌شود. همچنین، با توجه به سرعت عملکرد بالای آن می‌تواند نوسانات ناشی از منابع تجدیدپذیر را پوشش دهد.
- بارهای منعطف با تنظیم الگوی مصرف خود باعث کاهش فشار بر روی منابع محلی شده که اینکار باعث تحویل توان بیشتری به منابع دیگر جهت راه اندازی می‌گردد. این بارها در حالت جزیره‌ای ریزشبه‌ها به کمک سیستم آمده و باعث ایجاد تعادل میان تولید و مصرف شده و از ناپایداری شبکه جلوگیری می‌کنند.

ماهیت تناوبی منابع تجدیدپذیر و همچنین عدم قطعیت شدید در زمان وقوع و اتمام حوادث آب و هوایی باعث شده است تا برنامه‌ریزی‌های تاب‌آوری شبکه دچار خطای زیادی باشند که در این مسأله بهینه‌سازی‌های مقاوم با اتخاذ سیاست‌های بدبینانه می‌توانند کمک شایانی به کاهش ریسک مسأله نمایند.

برای بررسی بیشتر اثر عدم قطعیت ناشی از زمان وقوع طوفان و اتمام آن بر تصمیمات شبکه، یک تجزیه و تحلیل مطابق جدول ۲ انجام شده است. همان‌طور که از جدول ۲ استنباط می‌شود، میزان بازیابی بار در بدترین سناریو نسبت به مقدار مورد انتظار ۱۹/۹۳ درصد کاهش یافته است در حالی که در بهترین حالت افزایش ۲۸/۱۳ درصد را نشان می‌دهد. فراتر از آن، شاخص ترمیم کاهش ۱۵/۷۲ درصدی در سناریوی بدبینانه نسبت به مقدار مورد انتظار را نشان می‌دهد. برای بررسی بیشتر اثر عدم قطعیت ناشی از زمان وقوع طوفان و اتمام آن بر تصمیمات شبکه، یک تجزیه و تحلیل مطابق جدول ۲ انجام شده است. همان‌طور که از جدول ۲ استنباط می‌شود، میزان بازیابی بار در بدترین سناریو نسبت به مقدار مورد انتظار ۱۹/۹۳ درصد کاهش یافته است در حالی که در بهترین حالت افزایش ۲۸/۱۳ درصد را نشان می‌دهد. فراتر از آن، شاخص ترمیم کاهش ۱۵/۷۲ درصدی در سناریوی بدبینانه نسبت به مقدار مورد انتظار را نشان می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کند که اگر زمان وقوع طوفان کوتاه‌تر از زمان پیش‌بینی شده باشد عملکرد بازیابی سیستم به دلیل کاهش آمادگی شبکه کاهش می‌یابد و اپراتور زمان کافی برای اجرای کامل برنامه‌های پیشگیرانه خود را نخواهد داشت. در نهایت مشاهده می‌شود که با اعمال برنامه‌های پیشگیرانه آمادگی سیستم برای مواجهه با حوادث غیرقابل پیش‌بینی افزایش یافته که این مسأله نیز به نوبه خود باعث افزایش امنیت در تامین بار پایدار شبکه خواهد شد. شایان ذکر است که بهره‌برداری شبکه بصورت پیشگیرانه مستلزم تمهیدات طراحی بوده که در پروسه برنامه‌ریزی بلندمدت سیستم جای می‌گیرد و نقش آن را در بهره‌برداری کوتاه مدت سیستم برجسته می‌نماید. به عبارت دیگر، تجهیزات احداث شده در زمان طراحی بلندمدت در زمان بهره‌برداری کوتاه مدت بکار گرفته می‌شوند تا اینکه تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرحی جامع برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر حوادث آب و هوایی ارائه شد که در آن هر دو فاز تاب‌آوری شامل مدیریت پیشگیرانه (قبل از حادثه)، و مدیریت فعال (حین حادثه) در نظر گرفته شده است. در مرحله مدیریت پیشگیرانه، هدف اصلی افزایش آمادگی شبکه در برابر حادثه قریب‌الوقوع بود که با بهینه‌سازی انرژی

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از آزمایشگاه کیفیت توان دانشگاه صنعتی اراک به دلیل فراهم نمودن امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

علی اکبر نوری: انجام پژوهش، نرم‌افزار، گردآوری و

مراجع

مدیریت داده‌ها، تأمین منابع و نگارش نسخه اولیه مقاله.

ابوذر صمیمی: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی پژوهش، مصورسازی نتایج و تحلیل داده‌ها، نظارت بر پژوهش و اعتبارسنجی نتایج، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازبینی و ویرایش مقاله.

ابوالفضل سلامی: روش‌شناسی، گردآوری و مدیریت داده‌ها، بازبینی و ویرایش مقاله و اعتبارسنجی نتایج.

منابع مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌ها، مؤسسات یا نهادهای دولتی و خصوصی دریافت نکرده است.

- [1] Ayyub, Bilal M. "Systems Resilience for Multihazard Environments: Definition, Metrics, and Valuation for Decision Making." *Risk Analysis* 34, no. 2 (2014): 340-355.
- [2] Tielens, Pieter, and Dirk Van Hertem. "The Relevance of Inertia in Power Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016): 999-1009.
- [3] Zamuda, Craig D. "Climate Change Impacts on the Nation's Electricity Sector." In *Evaluating Climate Change Impacts*, 277-305: Chapman and Hall/CRC, 2020.
- [4] Ma, Tengfei, Junyong Wu, and Liangliang Hao. "Energy Flow Modeling and Optimal Operation Analysis of the Micro Energy Grid Based on Energy Hub." *Energy Conversion and Management* 133 (2017): 292-306.
- [5] Orehounig, Kristina, Ralph Evins, and Viktor Dorer. "Integration of Decentralized Energy Systems in Neighbourhoods Using the Energy Hub Approach." *Applied Energy* 154 (2015): 277-289.
- [6] Gazijahani, Farhad Samadi, and Javad Salehi. "Optimal Bilevel Model for Stochastic Risk-Based Planning of Microgrids under Uncertainty." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, no. 7 (2018): 3054-3064.
- [7] Lin, Yanling, and Zhaohong Bie. "Tri-Level Optimal Hardening Plan for a Resilient Distribution System Considering Reconfiguration and Dg Islanding." *Applied Energy* 210 (2018): 1266-1279.
- [8] Arab, Ali, Eylem Tekin, Amin Khodaei, Suresh K Khator, and Zhu Han. "System Hardening and Condition-Based Maintenance for Electric Power Infrastructure under Hurricane Effects." *IEEE Transactions on Reliability* 65, no. 3 (2016): 1457-1470.
- [9] Sedzro, Kwami Senam Afenefa, Alberto J Lamadrid, and Luis F Zuluaga. "Allocation of Resources Using a Microgrid Formation Approach for Resilient Electric Grids." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 3 (2017): 2633-2643.
- [10] Kim, Jip, and Yury Dvorkin. "Enhancing Distribution System Resilience with Mobile Energy Storage and Microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 5 (2018): 4996-5006.
- [11] Yuan, Wei, Jianhui Wang, Feng Qiu, Chen Chen, Chongqing Kang, and Bo Zeng. "Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning against Natural Disasters." *IEEE Transactions on Smart Grid* 7, no. 6 (2016): 2817-2826.
- [12] Soroudi, Alireza, Pouria Maghouli, and Andrew Keane. "Resiliency Oriented Integration of Dsrns in Transmission Networks." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11, no. 8 (2017): 2013-2022.
- [13] Gazijahani, Farhad Samadi, and Javad Salehi. "Reliability Constrained Two-Stage Optimization of Multiple Renewable-Based Microgrids Incorporating Critical Energy Peak Pricing Demand Response Program Using Robust Optimization Approach." *Energy* 161 (2018): 999-1015.

- [14] Hussain, Akhtar, Van-Hai Bui, and Hak-Man Kim. "A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 3 (2016): 2127-2139.
- [15] Gholami, Amin, and Xu Andy Sun. "Towards Resilient Operation of Multimicrogrids: An Misocp-Based Frequency-Constrained Approach." *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 6, no. 3 (2018): 925-936.
- [16] Chen, Kening, Wenchuan Wu, Boming Zhang, and Hongbin Sun. "Robust Restoration Decision-Making Model for Distribution Networks Based on Information Gap Decision Theory." *IEEE Transactions on Smart Grid* 6, no. 2 (2014): 587-597.
- [17] Ding, Tao, Yanling Lin, Zhaohong Bie, and Chen Chen. "A Resilient Microgrid Formation Strategy for Load Restoration Considering Master-Slave Distributed Generators and Topology Reconfiguration." *Applied Energy* 199 (2017): 205-216.
- [18] Li, Zhiyi, Mohammad Shahidehpour, Farrokh Aminifar, Ahmed Alabdulwahab, and Yusuf Al-Turki. "Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience." *Proceedings of the IEEE* 105, no. 7 (2017): 1289-1310.
- [19] Che, Liang, and Mohammad Shahidehpour. "Adaptive Formation of Microgrids with Mobile Emergency Resources for Critical Service Restoration in Extreme Conditions." *IEEE Transactions on Power Systems* 34, no. 1 (2018): 742-753.
- [20] Roggatz, Carsten, Michael Power, and Nisheeth Singh. "Power System Restoration: Meeting the Challenge to Resiliency from Distributed Generation." *IEEE Power and Energy Magazine* 18, no. 4 (2020): 31-40.
- [21] Cong, Hao, Yang He, Xu Wang, and Chuanwen Jiang. "Robust Optimization for Improving Resilience of Integrated Energy Systems with Electricity and Natural Gas Infrastructures." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 6, no. 5 (2018): 1066-1078.
- [22] Gazijahani, Farhad Samadi, and Javad Salehi. "Game Theory Based Profit Maximization Model for Microgrid Aggregators with Presence of Edrp Using Information Gap Decision Theory." *IEEE Systems Journal* 13, no. 2 (2018): 1767-1775.
- [23] Liu, Yutian, Rui Fan, and Vladimir Terzija. "Power System Restoration: A Literature Review from 2006 to 2016." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 4, no. 3 (2016): 332-341.
- [24] Wang, Yezhou, Chen Chen, Jianhui Wang, and Ross Baldick. "Research on Resilience of Power Systems under Natural Disasters—a Review." *IEEE Transactions on Power Systems* 31, no. 2 (2015): 1604-1613.
- [25] Arif, Anmar, Shanshan Ma, Zhaoyu Wang, Jianhui Wang, Sarah M Ryan, and Chen Chen. "Optimizing Service Restoration in Distribution Systems with Uncertain Repair Time and Demand." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 6 (2018): 6828-38.
- [26] Gholami, Amin, and Farrokh Aminifar. "A Hierarchical Response-Based Approach to the Load Restoration Problem." *IEEE Transactions on Smart Grid* 8, no. 4 (2015): 1700-09.
- [27] Gazijahani, Farhad Samadi, Javad Salehi, Miadreza Shafie-Khah, and João PS Catalão. "Spatiotemporal Splitting of Distribution Networks into Self-Healing Resilient Microgrids Using an Adjustable Interval Optimization." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17, no. 8 (2020): 5218-5229.
- [28] Chen, Bo, Chen Chen, Jianhui Wang, and Karen L Butler-Purry. "Multi-Time Step Service Restoration for Advanced Distribution Systems and Microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 6 (2017): 6793-6805.
- [29] Poudel, Shiva, and Anamika Dubey. "Critical Load Restoration Using Distributed Energy Resources for Resilient Power Distribution System." *IEEE Transactions on Power Systems* 34, no. 1 (2018): 52-63.
- [30] Dunn, Sarah, Sean Wilkinson, David Alderson, Hayley Fowler, and Carmine Galasso. "Fragility Curves for Assessing the Resilience of Electricity Networks Constructed from an Extensive Fault Database." *Natural Hazards Review* 19, no. 1 (2018): 04017019.
- [31] Gholami, Amin, Tohid Shekari, Mohammad Hassan Amirioun, Farrokh Aminifar, M Hadi Amini, and Arman Sargolzaei. "Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience." *IEEE Access* 6 (2018): 32035-32053.
- [32] Gazijahani, Farhad Samadi, and Javad Salehi. "Robust Design of Microgrids with Reconfigurable Topology under Severe Uncertainty." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9, no. 2 (2018): 559-569.