

مقاله علمی-ترویجی

## تاب‌آوری ریز شبکه‌ها: چالش‌ها، معیارهای ارزیابی و روش‌های بهبود

■ سعید جعفرپور<sup>\*</sup>، دانشگاه شاهد، Saeid.jafarpour@shahed.ac.ir

■ سید محمد صادق‌زاده، دانشگاه شاهد، Sadeghzadeh@shahed.ac.ir

■ محمد حسن امیریون، دانشگاه اصفهان، M.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

<sup>\*</sup> نویسنده مسنول

### چکیده

وقوع روزافزون رخداد های طبیعی شدید در سال‌های گذشته در نقاط مختلف دنیا، توجه بهره‌برداران سیستم قدرت را به این گونه پدیده‌ها و اثرات آن بر روی سیستم قدرت برانگیخته است. بررسی گزارش‌های در دسترس وقوع حوادث نشان می‌دهد که پدیده‌های طبیعی شدید می‌توانند بخش قابل توجهی از سیستم قدرت را در خاموشی فرو ببرند و باعث اختلال در روند عادی زندگی مردم بشوند. پژوهشگران برای تحلیل رفتار سیستم قدرت در مقابل حوادث شدید و نادر، به تازگی مفهوم تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را معرفی نموده‌اند. در این کار پژوهشی ابتدا با مرور انواع حوادث تهدیدکننده سیستم قدرت، اثرات این پدیده‌ها بر سیستم قدرت بررسی می‌شود. در بخش بعد مفاهیم و عناصر پایه‌ای تاب‌آوری سیستم قدرت بیان می‌شود. سپس با مرور کارهای پژوهشی انجام شده در این زمینه انواع معیارهای ارزیابی شده برای ارزیابی تاب‌آوری معرفی و مقایسه می‌شوند. در پایان انواع رویکردهای ارزیابی شده برای بهبود تاب‌آوری شرح داده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** حوادث نادر و شدید، تاب‌آوری، معیارهای ارزیابی تاب‌آوری، روش‌های بهبود تاب‌آوری، ریز شبکه.

## Microgrids Resilience: Challenges, Metrics, and Improvement Methods

■ Saeid Jafarpour<sup>\*</sup>, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, saeid.jafarpour@shahed.ac.ir

■ Seyed Mohammad Sadeghzadeh, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, sadeghzadeh@shahed.ac.ir

■ Mohammad Hassan Amirioun, Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran, m.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

<sup>\*</sup>Corresponding Author

### Abstract

Recently, the ever-increasing occurrence rate of high-impact rare (HR) natural events has attracted the attention of researchers to the effects of such incidents on power systems. Examination of available data shows that HR events have the potential to shut down a significant part of the power system and disrupt the routine life of customers. To analyze the power system behavior in the face of HR events, researchers introduced the concept of power system resiliency. Reviewing HR event types threatening Microgrids, the effects of these incidents

are investigated. Then, the basic concepts and elements of resilience are discussed. Presenting a state-of-the-art review of the literature, resilience-assessment metrics are discussed and compared. Finally, resilience-improving measures for Microgrids are described. Conclusive remarks are given as well.

**Keywords:** Microgrid, extreme weather events, resilience, resilience metrics, resilience improvement measures.

## ۱- مقدمه

در شبکه‌های برق، هرروزه تجهیزات متعددی از واحدهای تولید برق گرفته تا فیدرهای فشار ضعیف توزیع برق به دلایل گوناگونی از مدار خارج می‌شوند و پس از تعمیر مجدداً وارد مدار می‌گردند. با این وجود به دلیل لحاظ نمودن افزونگی در طراحی سامانه‌های زیرساختی مهندسی، برق‌رسانی به مشترکین عموماً در این شرایط تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. گاهی هم حوادث طبیعی و یا انسانی شدیدی در نقطه‌ای از جهان گزارش می‌شوند که اثرات به مراتب شدیدتر و گسترده‌تری را به جا می‌گذارد و بخش اعظمی از ساکنین آن منطقه را با مشکل و خاموشی مواجه می‌سازد. به ندرت هم حوادث تجربه نشده‌ای رخ می‌دهد که در سوابق گذشته آن منطقه هیچ رد پایی از آن موجود نیست. از دیدگاه احتمال وقوع، طبق شکل (۱) حوادث را می‌توان برحسب شدت اثرگذاری و احتمال وقوع به سه دسته حوادث شناخته‌شده، حوادث شناخته نشده‌ای قوی خاکستری و حوادث غیرقابل شناسایی یا قوی مشکی تفکیک نمود. حوادث شناخته‌شده احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آن‌ها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است. برای مثال در یک شبکه برق، نرخ خروج اضطراری یک واحد تولید مشخص بوده و به صورت سالیانه به‌روزرسانی می‌شود. حوادث شناخته‌نشده به ندرت رخ می‌دهند و به همین دلیل پایگاه داده غنی از این حوادث موجود نیست که بتوان مقادیری برای تابع توزیع احتمال وقوع آن‌ها استخراج نمود. اما، عواقب وقوع این حوادث به دلیل تجربه رخدادهای مشابه قبلی تا حدی قابل برآورد است (برای مثال، وقوع یک طوفان با یک سرعت معین)؛ بنابراین می‌توان این‌گونه جمع بندی کرد که این حوادث نادر، شدید و تا حدی قابل پیش‌بینی هستند. نوع اول حوادث که احتمال وقوع زیاد و تخریب کمی دارد به صورت مکرر در اثر فرسایش، خستگی و استهلاک و در قالب خرابی تجهیزات و اشتباهات انسانی اتفاق می‌افتد که در این راستا روش‌های مختلف و متنوعی تحت عنوان مطالعات قابلیت اطمینان برای مقابله با این موارد توسعه یافته است. نوع دوم حوادث که عموماً نرخ رخداد پایینی دارند حوادث نادر و شدید نامیده می‌شوند. این نوع حوادث به‌طور معمول اثرات بسیار مخربی بر روی زیر ساخت‌ها، خصوصاً شبکه‌های برق می‌گذارند. [۱]، [۲]

زمین تا ۱.۵ درجه سانتی‌گراد شده است. در این راستا اخیراً تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی سبب بالا رفتن نرخ وقوع پدیده‌های آب و هوایی نادر و شدید شده است [۴]. برای مثال طوفان کم سابقه‌ای در تاریخ ۱۳۹۳/۰۳/۱۲ شهر تهران را درنوردید که موجب پیامدهای مختلفی از جمله سقوط بسیاری از درختان، پارگی سیم‌های مخابراتی و قطع تعدادی از خطوط برق شد. طبق گزارش مقامات رسمی شرکت توزیع برق تهران بر اثر این طوفان ۶۵ خط ۲۰ کیلوولت دچار قطعی شد که موجب قطعی برق حدود ۵۰۰۰ مشترک در نواحی جنوب غربی و غرب شهر گردید [۵]. [۶]. در مورد دیگر طوفان سندی که از آن به‌عنوان پرهزینه‌ترین طوفان تاریخ آمریکا یاد می‌شود باعث ایجاد خسارت ۷۰ میلیارد دلاری بر زیر ساخت ایالات متحده شد. این طوفان سبب قطعی برق ۸.۵ میلیون نفر شد که حدوداً ۱۰ روز طول کشید تا شبکه برق به صورت ۹۵ درصدی بازیابی شود. در موردی مشابه در فوریه سال ۲۰۲۱ طوفان زمستانی بخش‌های وسیعی از تگزاس را در دمای زیر صفر فرو برد که زیرساخت‌های برق این ایالت را تحت تأثیر قرار داد و باعث قطعی برق گسترده شد. به دلیل این که تقریباً نیمی از کل ظرفیت تولید برق شبکه اصلی برق دولتی از مدار خارج شده بودند، در اوج بحران نزدیک به ۴۵ میلیون خانه و مرکز تجاری تگزاس چندین روز بدون برق شدند [۷]. با توجه به سوابق موجود که نشان می‌دهد احتمال وقوع این دست از حوادث افزایش پیدا کرده است لزوم آمادگی و مطالعه روش‌های مقابله و کاهش اثرات این حوادث هر چه بیشتر از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این راستا به‌تازگی مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت مطرح شده است.

## ۲- مفهوم تاب‌آوری

تاب‌آوری از نظر ریشه‌شناسی از کلمه لاتین "Resilio" گرفته شده و به توانایی یک سیستم برای پیش‌بینی و مقاومت در برابر تنش‌های خارجی، بازگشت به حالت قبل از تنش خود در سریع‌ترین زمان ممکن و سازگاری برای آمادگی بهتر برای رویدادهای فاجعه بار آینده اشاره می‌کند. این مفهوم به‌طور گسترده در علوم مختلف جامعه‌شناسی، محیط زیست، سیستم‌های مهندسی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاب‌آوری سیستم قدرت، توانایی یک سیستم قدرت برای پاسخگویی به حوادث نادر و شدید است و بر این تمرکز دارد که چگونه می‌توان سیستم قدرت را با سرعت و کارایی به حالت قبل از حادثه بازگرداند. به عبارت دیگر هدف از اقداماتی که جهت بالا بردن تاب‌آوری سیستم قدرت انجام می‌شود این است که سیستم در مواجهه با حوادث نادر و شدید به جای اینکه درهم‌شکسته شود از خود انعطاف نشان بدهد. [۱]، [۸]

### ۱-۲- تفاوت تاب‌آوری و قابلیت اطمینان

در سیستم‌های قدرت برای ارزیابی حوادث نوع اول (احتمال زیاد، خسارت کم)، از مفهوم قابلیت اطمینان و معیارهای توسعه یافته مربوط به آن از جمله SAIDI<sup>۴</sup> و SAIFI<sup>۵</sup> استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این معیارها برای حوادث نوع اول طراحی شده‌اند و برای



شکل ۱: طبقه‌بندی حوادث بر اساس نحوه شناخت پیامدها و احتمالات مربوطه [۳]  
توسعه انسانی و صنعتی و به تبع آن انتشار مضاعف گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر موجب افزایش میانگین دمای کره

رسیدگی به اثرات حوادث نوع دوم (احتمال کم، خسارت شدید) کافی نیست. به عبارت دیگر اگرچه معیارهای قابلیت اطمینان می‌توانند بینش بیشتری در مورد رفتار غیرعادی سیستم‌های قدرت به بهره‌برداران ارائه دهند، اما ماهیت ایستای این معیارها آن‌ها را برای اندازه‌گیری اثرات مکانی و زمانی حوادث نادر و شدید بر روی شبکه‌های قدرت نامناسب می‌سازد. به جهت شفاف‌سازی و درک بهتر تفاوت‌های این دو مفهوم، جدول شماره (۱) ارائه شده است [۹]، [۱۱]. از این‌رو با توجه به محدودیت‌های معیارهای قابلیت اطمینان در ارزیابی و بهبود وضعیت شبکه در مقابل تهدیدات حوادث با تأثیر شدید و نادر، معیارهای مرتبط با مفهوم تاب‌آوری توسعه یافته‌اند.

جدول ۱: مقایسه مفاهیم قابلیت اطمینان و تاب‌آوری

معیار مقایسه	تاب‌آوری	قابلیت اطمینان
مفهوم	پویا <sup>۲</sup>	لحظه‌ای و ایستا <sup>۲</sup>
کاربرد	انطباق‌پذیری شبکه	استحکام شبکه
تمرکز اصلی	ارائه سرویس	تجهیزات سیستم
حوزه مرتبط	طراحی و بهره‌برداری	طراحی
راهبرد تأمین	فعال	غیرفعال

### ۲-۲- منحنی تاب‌آوری سیستم

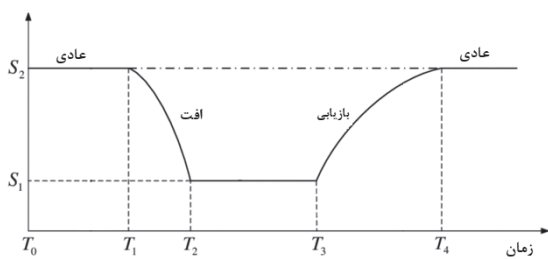
طبق تعریف موسسه<sup>۸</sup> (EPRI) تاب‌آوری یک سیستم توانایی مقاومت<sup>۹</sup>، جذب<sup>۱۰</sup> و بهبود سریع<sup>۱۱</sup> در مواجهه با یک حادثه نادر و شدید می‌باشد که هر کدام از ویژگی‌های نامبرده شده در بازه‌های زمانی مختلفی از رویداد به وسیله معیارهای خاصی ارزیابی می‌شود [۱۰]. قابلیت مقاومت توانایی سیستم برای حفظ سطح قابل قبولی از عملکرد ضروری در شرایط اختلال و در مدت طولانی می‌باشد. در شرایط رخداد حادثه که دیگر سیستم توانایی مقاومت نداشته باشد قابلیت جذب مطرح می‌شود. قابلیت جذب توانایی سیستم برای جذب تأثیر رویداد مخرب در زمان به نسبت کوتاه و در نتیجه به حداقل رساندن آسیب سیستم می‌باشد. پس از جذب شوک وارد شده به سیستم، قابلیت بازیابی نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری سیستم بازی می‌کند. در این هنگام سیستم به وسیله قابلیت بازیابی با سرعت هر چه تمام سعی در رسیدن به سطح عملکردی قابل قبولی پس از وقوع حادثه می‌کند [۱۱]. [۱۲]

در این راستا منحنی تاب‌آوری سیستم ارائه شده است که سطح عملکرد سیستم را از زمان قبل وقوع حادثه تا پس از خرابی و بازیابی کلی سیستم نشان می‌دهد. سطح عملکرد سیستم را می‌توان بسته به مورد مطالعه، با معیارهای مختلفی مانند میزان بار حیاتی تأمین شده، تعداد تجهیزات حیاتی در وضعیت عملیاتی و یا مقدار انرژی تأمین شده اندازه‌گیری می‌شود. عموماً سطح عملکرد سیستم قبل از رخداد حادثه در بیش‌ترین حالت ممکن یعنی ۱۰۰ درصد می‌باشد که هنگام وقوع حادثه این مقدار کاهش یافته و پس از بازیابی کامل سیستم دوباره به بیش‌ترین حالت ممکن می‌رسد. به عبارت دقیق‌تر، چنانچه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، قبل از وقوع حادثه یعنی در بازه زمانی  $t_0$  تا  $t_1$ ، با توجه به اینکه سیستم در حالت عادی خود می‌باشد، سطح عملکرد در حالت عادی و به عبارتی بهترین حالت ممکن قرار دارد. در این مرحله، به جهت افزایش آمادگی سیستم، اقدامات پیشگیرانه قبل

از وقوع حادثه اعمال می‌شود. در محل اختلال هم‌زمان با وقوع حادثه در  $t_1$ ، سطح عملکرد سیستم با توجه به شدت و نوع حادثه شروع به کاهش کرده و پس از مدتی در زمان  $t_2$  به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به میزان مقاومت و تطبیق‌پذیری سیستم در برابر حادثه، میزان کاهش سطح عملکرد سیستم می‌تواند متفاوت باشد.

در طول این مرحله، اقدامات اصلاحی برای کاهش تأثیر تنش خارجی و آغاز روند بازیابی سیستم اعمال می‌شود. نظر به اینکه هنگام وقوع حادثه امکان بازیابی و ارزیابی دقیق میزان خسارات به دلیل محدودیت‌های جوی، خطرات جانی و مالی و شرایط نامساعد کم می‌باشد، سیستم از  $t_2$  تا پایان حادثه یعنی  $t_3$  در وضعیت کمینه سطح عملکردی باقی می‌ماند. پس از اتمام رخداد اقدامات ترمیمی برای بازیابی سریع بارهای قطع شده و تعمیر/تعویض زیرساخت‌های آسیب دیده اعمال می‌شود. چنانچه واضح است در این مرحله سطح عملکرد سیستم شروع به افزایش کرده و تا رسیدن به سطح عملکرد قبل از حادثه در  $t_4$  ادامه می‌یابد.

سطح عملکرد سیستم



شکل ۲: منحنی فازهای مختلف تاب‌آوری [۱۳]

### ۳- معیارهای ارزیابی تاب‌آوری

چنانچه در شکل (۳) نشان داده شده با توجه به ماهیت سیستم و هدف مورد مطالعه معیارهای ارزیابی تاب‌آوری به صورت‌های گوناگون دسته‌بندی می‌شوند [۱۱]، [۱۲]، [۱۴] که در ادامه به جزئیات هر یک می‌پردازیم.

#### ۳-۱- معیارهای منطبق بر مشخصه کلی تاب‌آوری

کلی‌ترین دسته‌بندی بر اساس مشخصه‌های کلی تاب‌آوری یعنی



شکل ۳: معیارهای مختلف ارزیابی تاب‌آوری

مقاومت پذیری، انعطاف پذیری (جذب) و بازیابی می باشد. برای مثال در [۱۵] از سه معیار احتمال مقاومت پذیری، احتمال انعطاف پذیری و احتمال بازیابی که مبتنی بر مشخصه کلی تاب آوری هستند برای ارزیابی رفتار سیستم در فازهای مختلف استفاده شده است.

### ۳-۲- معیارهای قابلیت اطمینان پایه

دسته ای از معیارهای ارزیابی تاب آوری بر پایه ی معیارهای قابلیت اطمینان توسعه یافته اند. برای مثال در مرجع [۱۶] از شاخص انرژی تامین نشده<sup>۱۲</sup> که یک معیار قابلیت اطمینان پایه می باشد در فازهای زمانی رویداد حادثه به جهت ارزیابی تاب آوری سیستم استفاده شده است. در این کار سعی می شود تاثیر مشارکت پنل های خورشیدی و دیزل ژنراتورها را بر تاب آوری شبکه در شرایط بحرانی حادثه ارزیابی کند. یافته های این مقاله نشان می دهد که با افزایش مشارکت پنل های خورشیدی و دیزل ژنراتورها، شاخص انرژی تامین نشده کاهش می یابد که این مساله نشان دهنده ی افزایش تاب آوری سیستم در این شرایط می باشد.

### ۳-۳- معیارهای زمان، انرژی و هزینه محور

معیارهای هزینه محور تاب آوری سیستم را بر اساس مفاهیمی مانند: هزینه بازیابی سطح عملکرد سیستم، هزینه فرصت های از دست رفته به دلیل قطعی برق، هزینه انرژی تامین نشده و ارزش بار تامین نشده ارزیابی می کند. معیارهای مبتنی بر انرژی، تاب آوری را با اندازه گیری توان و یا انرژی از دست رفته یا حفظ شده پس از حادثه ارزیابی می کنند. همچنین معیارهای مبتنی بر زمان، سرعت تحت تاثیر قرار گرفتن سیستم در اثر حادثه و سرعت بازیابی سیستم پس از اتمام حادثه را ارزیابی می کنند [۱۲]، [۱۷]، [۱۸].

### ۴-۳- معیارهای ایستا و پویا

معیارهای پویا تحولات سیستم و اجزای آن را مبتنی بر زمان دنبال می کنند در حالی که معیارهای ایستا تغییرناپذیر با زمان می باشند. به عبارت دیگر معیارهای پویا کارکردهایی از سیستم را که مبتنی بر زمان است در نظر می گیرد در حالی که در معیارهای ایستا اینگونه نیست. برای مثال در مرجع [۱۶] چند معیار پویا برای فازهای زمانی مختلف منحنی ارزیابی تاب آوری ارائه کرده و براساس این معیارها با توزیع بهینه منابع ذخیره انرژی نسبت به افزایش تاب آوری اقدام می کند.

### ۳-۵- معیارهای احتمالی و قطعی

در محاسبات معیارهای تاب آوری احتمالی، عدم قطعیت ها مانند: نرخ خرابی و زمان بازیابی تجهیزات مشارکت داده می شود در حالی که در معیارهای قطعی، عدم قطعیت های تجهیزات و حادثه در نظر گرفته نمی شود. برای مثال در مرجع [۱۹] یک معیار تاب آوری برای شبکه های برق بر اساس مسیره های محتمل برای تحویل توان از ژنراتور به بار، با در نظر گرفتن اهمیت بار قبل و بعد از اختلال و مبتنی بر پخش بار بهینه ایجاد شده است. در مورد دیگر مرجع [۱۵] از سه معیار احتمالی ترکیبی با مشخصه کلی تاب آوری، جهت ارزیابی تاب آوری استفاده کرده است.

### ۴- رویکردهای بهبود معیارهای تاب آوری

به صورت کلی به مجموعه اقداماتی که بهره بردار جهت بهبود و افزایش تاب آوری سیستم انجام می دهد، رویکردهای بهبود تاب آوری می گویند. رویکردهای بهبود تاب آوری به عنوان آخرین مرحله در روند بهبود تاب آوری سیستم قدرت و متناسب با شرایط، اولویت ها و اهداف بهره برداری و پس از انتخاب و ارزیابی دقیق

معیارسنجش مد نظر پیاده سازی می گردند. رویکردهای بهبود تاب آوری به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند: ۱- رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی<sup>۱۳</sup> ۲- رویکردهای بهره برداری<sup>۱۴</sup>.

### ۴-۱- رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی

در این رویکرد سعی می شود شبکه به صورت بلند مدت برای مواجهه با حوادث شدید و نادر احتمالی آینده برنامه ریزی و طراحی شود. در این مدل رویکرد، تمرکز اصلی بر عدم قطعی بارهای حیاتی مانند: بیمارستان ها، ایستگاه های پمپاژ آب و پست های گاز که با نیازهای اساسی زندگی انسان مرتبط هستند می باشد. انواع راهبردهای ذکر شده به شرح زیر می باشد:

### ۴-۱-۱- تخصیص و ترکیب پیشگیرانه منابع

از دیرباز یکی از روش های سنتی تقویت شبکه در برابر آسیب ها و تنش های وارده به سیستم قدرت تخصیص و ترکیب بهینه ی انواع منابع در دسترس بهره بردار شبکه مانند منابع تجدید پذیر، دیزل ژنراتورها، ذخیره سازی های انرژی و... بوده است [۲۰]، [۲۱]. در این راستا مرجع [۲۲] با معرفی یک معیار ارزیابی احتمالی و با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی به هدف کنترل بهینه ریز شبکه در هنگام حادثه، مدلی برای بهبود تاب آوری ریز شبکه های متصل به شبکه ارائه کرده است. در این کار معیار اصلی ارزیابی تاب آوری، معیار بقا پذیری در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر میزان احتمال این که در حین رویداد بارهای حساس ریز شبکه تامین شوند به عنوان معیار بقا پذیری برای ارزیابی تاب آوری شبکه توصیف شده است. الگوریتم بهینه سازی ارائه شده در این کار با تخصیص و ترکیب بهینه منابع در دسترس ریز شبکه مانند سلول های خورشیدی، دیزل ژنراتور، منابع ذخیره سوخت و باتری های ذخیره ساز انرژی، تاب آوری ریز شبکه را بهبود می بخشد. نتایج عددی و کیس های مورد مطالعه در این کار نشان می دهد که تخصیص بهینه ی ترکیبی از منابع در این مدل، باعث کاهش مصرف سوخت و به تبع آن هزینه شبکه و همچنین افزایش تاب آوری شبکه می شود. در مرجع [۲۳] ابتدا معیارهای تاب آوری در معیارهای اقتصادی ادغام می شوند تا علاوه بر توجه به شاخصه اصلی سیستم یعنی سود و زیان مالی، تاب آوری نیز تضمین بشود. سپس به وسیله رویکرد تخصیص بهینه ی منابع، سعی در بهبود معیار تاب آوری می شود. نتایج این کار تحقیقاتی نشان می دهد که استفاده از منابع تولید پراکنده مانند دیزل ژنراتورها، توربین های بادی، پارکینگ خودروهای الکتریکی و ذخیره سازی های انرژی الکتریکی در کنار ادغام معیارهای تاب آوری و اقتصادی می تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود تاب آوری شبکه هنگام وقوع حوادث شدید داشته باشد. مقاوم سازی<sup>۱۵</sup> دارایی های شبکه یکی از مهم ترین رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی برای ارتقای تاب آوری ریز شبکه ها در برابر حوادث شدید می باشد.

### ۴-۱-۲- تشکیل چندین ریز شبکه درون یک شبکه توزیع

در این رویکرد به هدف افزایش تاب آوری شبکه در مقابل حوادث شدید احتمالی، پتانسیل و زیرساخت های لازم برای تقسیم یک شبکه توزیع به چندین ریز شبکه با محوریت منابع تولید پراکنده فراهم می شود که در این حالت ریز شبکه های تشکیل شده با تعامل با یکدیگر می توانند عملکرد بسیار بهتری نسبت به یک شبکه توزیع سنتی داشته باشند. برای مثال در مرجع [۲۴] چارچوبی برای برنامه ریزی و توسعه یک شبکه توزیع ولتاژ پایین تاب آور برای یک شهر جدید ایجاد شده است. در این مدل برنامه ریزی، بسته به مقتضیات مسئله باید تعدادی ریز شبکه

در سطح شبکه توزیع شکل بگیرند که در این مورد با مطرح کردن یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه سعی می‌شود منطقه سرویس‌دهی (مرکز ریزش‌بکه‌ها)، مشخصات فنی و تعداد و اندازه آن‌ها مشخص بشود. در این کار جهت حل مسئله یاد شده از یک رویکرد هزینه محور در کنار مسائل مربوط به تاب‌آوری استفاده شده است. به همین لحاظ جهت اعمال ملاحظات تاب‌آوری در تابع هزینه از یک معیار جدید استفاده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل مربوطه به صورت موثری می‌تواند باعث کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری سیستم بشود.

#### ۴-۱-۳- افزونگی<sup>۱۶</sup> و بهبود استحکام تجهیزات شبکه

تجهیزات شبکه به دلیل اینکه همواره در معرض آسیب‌های ناشی از حوادث می‌باشند معمولاً یکی از دلایل عمده اختلال عملکرد شبکه برق هنگام وقوع حادثه هستند. به این لحاظ می‌توان با مقاوم‌سازی و افزونگی تجهیزاتی که نقش کلیدی در عملکرد سیستم دارند و بیشتر در معرض حوادث طبیعی مورد نظر می‌باشند، تاب‌آوری شبکه را به صورت قابل توجهی افزایش داد. برای مثال در مناطقی که نرخ وقوع طوفان‌های شدید زیاد است، می‌توان با زمینی کردن خطوط انتقال اصلی، تاب‌آوری سیستم قدرت در مقابل طوفان را افزایش داد. در این راستا مقاله [۲۵] با ارائه روشی ترکیبی از ظرفیت‌های هر دو سمت شبکه و بار برای بهبود تاب‌آوری سیستم بهره‌گیری می‌کند. در این مدل از یک روش مقاوم‌سازی بهینه منابع، مانند زیرزمینی کردن کابل‌ها و استفاده از واحدهای ذخیره انرژی با مقاومت بالا در سمت شبکه استفاده شده و در سمت بار از ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی خانگی مانند خودروهای الکتریکی و پنل‌های خورشیدی در کنار زیر ساخت‌های مخایراتی مقاوم آن استفاده شده است. علاوه بر این، به وسیله یک الگوریتم کارآمد، مناطق آسیب‌پذیر خوشه‌بندی می‌شود که به صورت موثری می‌تواند مشکل بهره‌بردار را برای تامین تقاضا در شرایط اضطراری حل کند.

#### ۴-۲- رویکردهای بهره‌برداري

رویکردهای بهره‌برداري به مجموعه اقدامات کوتاه‌مدت و اضطراری پس از وقوع حادثه گفته می‌شود که هدف آن‌ها تامین هر چه سریع‌تر انرژی الکتریکی مصرف کنندگان طبق اولویت‌های از قبل تعیین شده می‌باشد. رویکردهای بهره‌برداري ارائه شده جهت بهبود معیارهای تاب‌آوری شبکه عموماً به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

#### ۴-۲-۱- استفاده از استعداد خودروهای برقی

یکی از توانایی‌های ذاتی خودروهای برقی، توانایی انتقال انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری به شبکه برق است که قابلیت V2G نامیده می‌شود شکل (۴). این ویژگی خودروهای برقی می‌تواند خدمات جانبی مختلفی را در اختیار سیستم قدرت قرار دهد. در این راستا، در شرایط اضطراری خودروهای برقی می‌توانند نقش مهمی در بازیابی بارهای حساس شبکه پس از حادثه ایفا کنند. برای مثال در مقاله [۲۶]، یک ساختار دو سطحی با بهره‌گیری از ظرفیت ایستگاه‌های تعویض باتری خودروهای الکتریکی برای افزایش تاب‌آوری ریزش‌بکه‌ها در برابر رویدادهای با تأثیر کم و احتمال بالا ارائه شده است. یکی از رویکردهایی که به تازگی برای شارژ سریع خودروهای برقی ارائه شده، تعویض باتری خالی خودرو در ایستگاه و جابجایی با یک باتری کامل شارژ شده از قبل می‌باشد. این رویکرد علاوه بر تسریع زمان شارژ خودروهای الکتریکی که یکی از معضله‌های اصلی این صنعت

نیز می‌باشد، سبب کنترل بهتر اپراتورهای شبکه بر روند شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی شده و می‌تواند در بهره‌برداری بهینه شبکه‌های توزیع شامل خودروهای الکتریکی موثر باشد. نتایج بررسی‌های عددی مدل ارائه شده نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت خودروهای برقی و به خصوص ایستگاه‌های تعویض باتری می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود تاب‌آوری ریزش‌بکه‌ها داشته باشد.



شکل ۴: یک خودروی الکتریکی شرکت تسلا در حال تبادل انرژی با شبکه (V2G)  
۴-۲-۲- بازآرایی شبکه<sup>۱۷</sup>

راهبرد کارآمد دیگری که به‌تازگی مورد استفاده قرار گرفته، بازآرایی بهینه شبکه با توجه به الزامات تاب‌آوری سیستم هنگام بروز حادثه می‌باشد. به‌طور معمول در هر شبکه توزیع تعدادی کلید حالت عادی باز و تعدادی کلید حالت بسته وجود دارد که می‌توان با باز و بسته کردن این کلیدها تغییراتی در آرایش شبکه در جهت ارتقای تاب‌آوری به وجود آورد. برای مثال مرجع [۲۷] به بررسی تاب‌آوری و مدیریت انرژی در یک سیستم شامل چند ریزش‌بکه می‌پردازد. در مدل پیشنهادی این تحقیق، ریزش‌بکه اصلی از چهار ریزش‌بکه فرعی تشکیل شده است که این ریزش‌بکه‌های فرعی منابع و ظرفیت‌های خود را با هم ترکیب می‌کنند تا یک ریزش‌بکه جدید و پیچیده‌تر را تشکیل بدهند که عملکرد بیشتری نسبت به هر یک از ریزش‌بکه‌های فرعی ارائه می‌دهد. در این مدل ریزش‌بکه‌های فرعی به منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور و ذخیره‌سازهای انرژی مجهز شده‌اند و تنها یکی از ریزش‌بکه‌های فرعی به شبکه بالا دست متصل می‌باشند. علاوه بر آن ریزش‌بکه‌های فرعی به یکدیگر نیز متصل می‌باشند به صورتی که برخی از اتصالات در حالت عادی باز و بقیه معمولاً بسته می‌باشند. در این شرایط زمانی که مقتضیات تاب‌آوری شبکه یا مقتضیات فنی و اقتصادی حکم کند وضعیت این اتصالات تغییر کرده و توپولوژی شبکه اصلی به نوعی بازآرایی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مدل تایید می‌کند که با اعمال مدل یاد شده تاب‌آوری بهبود می‌یابد. علاوه بر این، در همه ریزش‌بکه‌های فرعی، هزینه‌های بهره‌برداري به حداقل می‌رسد و حوادث به نحو مطلوب مدیریت می‌شود به صورتی که هم در شرایط عادی و هم در شرایط تحت خطا میزان اصلاح بار صفر می‌باشد.

#### ۴-۲-۳- اختصاص منابع ذخیره انرژی قابل حمل<sup>۱۸</sup>

منابع ذخیره انرژی قابل حمل عموماً به صورت یک کشنده با محموله‌ای از باتری‌ها و مبدل‌ها هستند (شکل ۵). این منابع به دلیل قابلیت جابه‌جایی، ظرفیت بالایی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع به وجود آورده‌اند. مقاله [۲۸] یک راهبرد بازیابی

شده در این زمینه انجام بشود.

### پی‌نوشت‌ها

- 1 Restore
- 2 Resilience
- 3 Reliability
- 4 System Average Interruption Duration Index
- 5 System Average Interruption Frequency Index
- 6 Dynamic
- 7 Static
- 8 Electric Power Research Institute
- 9 Resist
- 10 Absorb
- 11 Rapid recovery
- 12 Energy not supplied
- 13 Planning and infrastructural Strategies
- 14 Operational Strategies
- 15 Hardening
- 16 Redundancy
- 17 Reconfiguration
- 18 Transportable Energy Storages
- 19 Demand Response

### مراجع

- [1] Y. Wang, A. O. Rousis, and G. Strbac, "On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.134, no. November 2019, p.110313, 2020.
- [2] M. H. Spiegel, E. M. S. P. Veith, and T. I. Strasser, "The spectrum of proactive, resilient multi-microgrid scheduling: A systematic literature review," *Energies*, vol.13, no. 17, pp.1-37, 2020.
- [3] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, "Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience," *IEEE Access*, vol.6, pp.32035-32053, 2018.
- [4] D. L. Swain, D. Singh, D. Touma, and N. S. Diefenbaugh, "Attributing Extreme Events to Climate Change: A New Frontier in a Warming World," *One Earth*, vol.2, no. 6, pp.522-527, 2020.
- [5] "مروری بر طوفان ۱۲ خرداد سال ۱۳۹۳ تهران," پژوهشکده سوانح طبیعی.
- [6] "قطع برق ۵۰ هزار مشترک تهرانی," خبرگزاری ایسنا.
- [7] SAMI SPARBER, "WINTER STORM 2021," <https://www.texastribune.org/2021/03/15/texas-winter-storm-deaths/>.
- [8] M. Bao, Y. Ding, M. Sang, D. Li, C. Shao, and J. Yan, "Modeling and evaluating nodal resilience of multi-energy systems under windstorms," *Appl. Energy*, vol.270, no. May, 2020.
- [9] P. Cicilio, L. Swartz, B. Vaagensmith, C. Rieger, J. Gentle, T. McJunkin, and E. Cotilla-Sanchez, "Electrical grid resilience framework with uncertainty," *Electr. Power Syst. Res.*, vol.189, no. March, p.106801, 2020.
- [10] T. Kemabonta and G. Mowry, "A syncretistic approach to grid reliability and resilience: Investigations from Minnesota," *Energy Strategy Rev.*, vol.38, p.100726, 2021.
- [11] A. Umunnakwe, H. Huang, K. Oikonomou, and K. R. Davis, "Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.149, no. June, p.111252, 2021.

◀ ادامه در صفحه ۶۸

بار با استفاده از منابع سیار ذخیره انرژی ارائه می‌کند. در این مدل با استفاده از دو راهبرد توزیع بهینه منابع سیار ذخیره انرژی و شکل‌دهی بهینه ریزش‌بکه‌ها در سطح سیستم توزیع، سعی در به بیشینه رساندن بارهای بازیابی شده پس از حادثه شدید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این کار نشان می‌دهد که سیستم‌های ذخیره انرژی قابل حمل به طور قابل توجهی عملکرد بازیابی و تاب‌آوری سیستم را بهبود می‌بخشد.



شکل ۴: یک سیستم ذخیره انرژی قابل حمل [۲۹]

### ۴-۲-۴- پاسخگویی بار<sup>۱۹</sup>

برنامه‌های پاسخگویی بار که به معنای مشارکت مصرف‌کنندگان در بهبود الگوی مصرف انرژی می‌باشد، یکی از عمده‌ترین روش‌های مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در شبکه‌های توزیع می‌باشند. برنامه‌های پاسخگویی بار عموماً از دو طریق قیمت‌گذاری و یا پرداخت طرح‌های تشویقی به مصرف‌کنندگان اجرا می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده استفاده از رویکرد پاسخگویی بار نیز می‌تواند به صورت موثر در ارتقای تاب‌آوری مورد استفاده قرار بگیرد. برای مثال مقاله [۳۰] یک چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی برای برنامه‌ریزی بهینه یک ریزش‌بکه‌ی تاب‌آور در برابر حوادث شدید ارائه کرده است. رویکرد پیشنهادی سعی می‌کند تا بهره‌برداری ریزش‌بکه را در دو حالت عادی و تحت حادثه بهبود بخشد. علاوه بر این در این کار، برنامه‌های پاسخگویی بار به‌عنوان ابزاری برای بهبود تاب‌آوری استفاده شده است. نتایج عددی مدل نشان می‌دهد که عملکرد ریزش‌بکه در حالت تاب‌آور منجر به افزایش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌شود که این موضوع ناشی از عملکرد جزیره‌ای ریزش‌بکه می‌باشد. علاوه بر این، نشان داده شده که عملیات بهبود تاب‌آوری ریزش‌بکه می‌تواند به دلیل استفاده بیشتر از تجهیزات سیستم و کاهش طول عمر آن‌ها، هزینه‌های عملیات سیستم را در افق برنامه‌ریزی آینده افزایش دهد.

### ۵- نتیجه‌گیری

سیستم‌های قدرت به‌طور معمول به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که از استقامت لازم در برابر حوادث عادی یعنی حوادث با احتمال زیاد و تخریب کم برخوردار باشند. اما در عین حال این‌گونه سیستم‌ها بایستی به‌گونه‌ای طراحی شده باشند که بتوانند در برابر حوادث نادر و شدید هم مقاومت کرده و در سریع‌ترین زمان ممکن عملکرد عادی خود را بازیابی کنند. با توجه به سوابق موجود که نشان می‌دهد احتمال وقوع حوادث نادر و شدید افزایش پیدا کرده است. معیار تاب‌آوری سیستم اهمیت مضاعفی نسبت به قبل پیدا کرده است. از این‌رو ارزیابی موثر وضعیت سیستم به وسیله‌ی معیارهای جدید ارایه شده، در کنار رویکرد مناسب و منطبق بر شرایط و گزینه‌های در دسترس بهره‌بردار، نقش کلیدی در راستای ارتقای سطح تاب‌آوری سیستم‌های قدرت بازی می‌کنند که در این کار پژوهشی سعی شده مروری جامع بر کارهای اخیر انجام