Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 28-39

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Building a Comprehensive Conceptual Framework for Power Systems Resilience Metrics

Habibollah Raoufi[1], Vahid Vahidinasab[2], Kamyar Mehran[3]

[1] *Ph.D. Student, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,*

[1] *h_raoufi@sbu.ac.ir*

[2] *Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,*

[2] *v_vahidinasab@sbu.ac.ir*

[3] *Associate Professor, School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary University of London, London, UK*

[3] *k.mehran@qmul.ac.uk*

Abstract: Recently, the frequency and severity of natural and man-made disasters (extreme events), which have a high-impact low-frequency (HILF) property, are increased. These disasters can lead to extensive outages, damages, and costs in electric power systems. A power system must be built with "resilience" against disasters, which means its ability to withstand disasters efficiently while ensuring the least possible interruption in the supply of electricity, sustaining critical social services, and enabling a quick recovery and restoration to the normal operation state. Quantifying the power system resilience is a complicated and controversial problem. However, this is necessary for the evaluation and comparison of different resilience enhancement strategies. The resilience metrics are mathematical tools to measure the resilience level of a power system, which are normally employed for resilience cost-benefit in the planning and operation domains. Numerous resilience metrics have been presented in the power system literature. However, there is a lack of a comprehensive conceptual framework regarding the different types of resilience metrics in electric power systems, and existing frameworks have essential shortcomings. In this paper, after introducing and criticizing the existing frameworks, a conceptual framework is suggested to classify different types of resilience metrics in the power system literature. In this conceptual framework, power system resilience metrics are divided into "non-performance-based" and "performance-based" groups. The "performance-based" resilience metrics are also divided into "performance" and "consequence (outcome)" groups. The "performance" resilience metrics consist of five groups including "power", "duration", "frequency", "probability" and "curve". The "consequence (outcome)" resilience metrics consist of four groups including "economic", "social", "geographic" and "safety and health". In addition, both of the "performance" and "consequence (outcome)" groups have a distinct group naming "general". In order to verify and validate the comprehensiveness and inclusivity of the proposed conceptual framework, two actions are accomplished. Firstly, the existing power system resilience metrics are allocated to the framework's groups. Secondly, the proposed conceptual framework is compared with the existing frameworks. These actions show that the proposed conceptual framework can cover and classify different types of power system resilience metrics in the literature, is more comprehensive comparing the existing frameworks, and lacks the essential shortcoming of those frameworks. Thus, the proposed conceptual framework is comprehensive and useful. The proposed conceptual framework can be used by academic and industrial researchers. Academic researchers can concentrate on groups that need further research to propose new resilience metrics, whereas industrial researchers can choose the appropriate resilience metric according to their needs.

Keywords: Resilience, Resiliency, Metric, Index, Measurement, Quantification, Disaster, Extreme event, Power system, Conceptual framework

Received: 2020 September 5

Accepted: 2021 April 20

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 28-39

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

ارائه چارچوب مفهومی جامع برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

نوع مطالعه: پژوهشی

حبیب‌اله رؤفی[۱]، دانشجوی دکترا، وحید وحیدی‌نسب[۲]، استادیار، کامیار مهران[۳]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
h_raoufi@sbu.ac.ir -

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
v_vahidinasab@sbu.ac.ir -

۳- پردیس مهندسی الکترونیک و علوم کامپیوتر- دانشگاه کوئین مری لندن - لندن - انگلستان
k.mehran@qmul.ac.uk -

چکیده: در سال‌های اخیر، رخدادهای شدید (فجایع) طبیعی و انسانی با فراوانی پایین و تأثیر بالا بر سیستم‌های قدرت، به طور جدی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یک سیستم قدرت باید تاب‌آور باشد، یعنی توانایی مقابله با رخدادهای شدید، سازگاری با آنها و بازیابی از شرایط بعد از وقوع آنها را داشته باشد. شاخص‌های تاب‌آوری، ابزارهایی برای اندازه‌گیری سطح تاب‌آوری سیستم قدرت هستند که برای تحلیل هزینه – فایده تاب‌آوری در حوزه‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری به کار می‌روند. در ادبیات سیستم‌های قدرت، شاخص‌های تاب‌آوری متعددی ارائه شده‌اند؛ اما تاکنون چارچوب مفهومی جامعی در مورد انواع مختلف شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه نشده است و چارچوب‌های موجود نیز دارای ایرادهای اساسی هستند. در این مقاله، پس از معرفی و نقد چارچوب‌های موجود، چارچوب مفهومی جدیدی پیشنهاد شده است که می‌تواند انواع مختلف شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را به طور جامع توصیف و طبقه‌بندی کند. به منظور صحت‌سنجی جامعیت و کاربردی بودن چارچوب پیشنهادی، ابتدا شاخص‌های تاب‌آوری موجود به گروه‌های مختلف این چارچوب تخصیص داده شده‌اند و سپس مزایای چارچوب پیشنهادی نسبت به چارچوب‌های موجود مطرح شده است. چارچوب مفهومی پیشنهادی می‌تواند توسط محققین صنعتی و دانشگاهی به منظور انتخاب مناسب‌ترین شاخص تاب‌آوری در مسائل مختلف سیستم‌های قدرت و شناسایی بخش‌هایی که نیاز به یافتن شاخص‌های جدید دارند به کار برده شود.

واژه های کلیدی: تاب‌آوری، شاخص، اندازه‌گیری، سنجش، فاجعه، رخداد شدید، سیستم قدرت، چارچوب مفهومی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : وحید وحیدی‌نسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - حکیمیه - بلوار بهار - دانشگاه شهید بهشتی - پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور - دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

۱- مقدمه

تاب‌آوری مفهوم جدیدی است که در سال‌های اخیر، به علت گسترش رخدادهای شدید و تأثیرات بسیار مخرب آنها بر سیستم‌های قدرت، از سوی بسیاری از محققین دانشگاهی و صنعتی و در حوزه‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته است. منظور از رخداد شدید (فاجعه) (Abbey et al., 2014; MEA, 2014; NERC, 2010)، حادثه‌ای است که فراوانی وقوع آن بسیار کم، ولی تأثیر آن بر بخش‌های مختلف جامعه (از جمله سیستم قدرت) بسیار مخرب و چشمگیر است. رخدادهای شدید به دو دسته طبیعی (مانند زلزله و سیل) (Abbey et al., 2014; IEC, 2014) و انسانی (مانند حملات تروریستی فیزیکی و سایبری) (NERC, 2010; The_National_Academies, 2012b) تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر، طبق آمارهای موجود، میزان فراوانی، شدت و هزینه‌های ناشی از رخدادهای شدید طبیعی مرتبط با آب و هوا افزایش یافته است که ناشی از تغییرات گسترده آب و هوایی می‌باشد (Arghandeh et al., 2014; MEA, 2014). در صورت وقوع رخداد شدید، به خاطر ساختار متمرکز سیستم قدرت، آسیب نسبتاً کوچک به یک یا چند ناحیه کلیدی در شبکه ممکن است باعث بروز خاموشی در بخش مهمی از شبکه یا تمامی آن شود (IEC, 2014).

با وجود اینکه تعاریف متعدد و بعضا متضادی برای تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه شده است، اما تاکنون هیچ تعریفی مورد پذیرش عمومی قرار نگرفته است (Arghandeh, von Meier, Mehrmanesh, & Mili, 2016). در این مقاله، ترکیبی از تعاریف ارائه‌شده در (Khodaei, 2014b; The_National_Academies, 2012b) به عنوان تعریف مبنای تاب‌آوری سیستم‌های قدرت انتخاب شده است:

«تاب‌آوری سیستم قدرت یعنی توانایی این سیستم برای مقاومت کارآمد در برابر رخدادهای شدید با فراوانی کم و اثرات زیاد، به طوری که کمترین میزان خاموشی داده شود، خدمات اجتماعی حیاتی حفظ شوند و سپس بازیابی سریع به حالت عادی انجام شود.»

سنجش و اندازه‌گیری تاب‌آوری فرآیند ساده‌ای نیست و بسیار چالش‌برانگیز است؛ با این وجود، برای ارزیابی مؤثر بودن استراتژی‌های تاب‌آوری و اصلاح آنها کاملا ضروری است (Panteli & Mancarella, 2015a). ضرورت انجام تحلیل هزینه – فایده برای ارزیابی مقایسه‌ای استراتژی‌های بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت، به طور گسترده در ادبیات موضوع مطرح شده است (MEA, 2014; Y. Wang, Chen, Wang, & Baldick, 2016). محققین دانشگاهی و صنعتی تلاش‌های گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری سطح تاب‌آوری سیستم‌های قدرت توسط ابزارهایی با عنوان «شاخص تاب‌آوری» انجام داده‌اند و شاخص‌های تاب‌آوری متعددی را معرفی و استفاده کرده‌اند. در حال حاضر، این شاخص‌ها استانداردسازی نشده‌اند و اجماعی در مورد قابلیت‌های اصلی مورد نیاز آنها و نحوه اندازه‌گیری این قابلیت‌ها در برابر رخدادهای شدید وجود ندارد؛ ضمن اینکه ربط دادن این قابلیت‌ها به پیامدهای مطلوب هنوز به درستی درک نشده است (Ton & Wang, 2015). همچنین، شاخص‌های تاب‌آوری که کاملاً از شاخص‌های قابلیت اطمینان متمایز باشند محدودند (Z. Li, Shahidehpour, Aminifar, Alabdulwahab, & Al-Turki, 2017).

در حال حاضر، هیچ چارچوب جامع و دقیقی وجود ندارد که بتواند دید عمیقی از انواع شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه دهد و تلاش‌های برخی محققین در این زمینه (Bie, Lin, Li, & Li, 2017; Willis & Loa, 2015) دارای ایرادهایی مهم و اساسی هستند. در این مقاله، چارچوبی جامع و دقیق برای طبقه‌بندی انواع شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه شده است. به منظور صحت‌سنجی جامعیت و کاربردی بودن این چارچوب، ابتدا پس از مرور جامع ادبیات موضوع، شاخص‌های تاب‌آوری شناسایی‌شده به گروه‌های این چارچوب تخصیص داده شده‌اند و سپس، چارچوب پیشنهادی با چارچوب‌های موجود در ادبیات سیستم‌های قدرت مقایسه شده است. این بررسی نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی در مقایسه با چارچوب‌های موجود جامع‌تر و دقیق‌تر است و می‌تواند تمام انواع شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را طبقه‌بندی کند. چارچوب مفهومی پیشنهادی می‌تواند برای محققین دانشگاهی و صنعتی مفید باشد. محققین دانشگاهی می‌توانند بر گروه‌هایی متمرکز شوند که نیاز به تحقیق بیشتر دارند تا بتوانند شاخص‌های تاب‌آوری جدیدی را معرفی کنند. محققین صنعتی نیز می‌توانند ابتدا گروه مناسب را بر مبنای نیازهای خود انتخاب کنند و سپس شاخص تاب‌آوری مناسب را بیابند، که می‌تواند در برنامه‌ریزی یا بهره‌برداری سیستم‌های قدرت در برابر رخدادهای شدید به کار رود.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ مهم‌ترین چارچوب‌های مفهومی موجود در زمینه شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت معرفی می‌شوند و مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرند. در بخش ۳، چارچوب مفهومی جدید پیشنهادی به تفصیل ارائه و با چارچوب‌های موجود مقایسه می‌شود. همچنین، خلاصه‌ای از مصادیق انواع شاخص‌های تاب‌آوری نظیر گروه‌های این چارچوب ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۴ ارائه خواهد شد.

۲- معرفی و نقد چارچوب‌های موجود برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

با وجود اینکه تعداد مراجعی که مستقیم یا غیرمستقیم به ارائه یا کاربرد شاخص‌های تاب‌آوری می‌پردازند بسیار زیاد است، تنها مراجع محدودی سعی در ارائه چارچوب‌هایی برای طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری کرده‌اند. در (Hosseini, Barker, & Ramirez-Marquez, 2016)، که به مرور شاخص‌های تاب‌آوری در ۴ حوزه مهندسی،

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

اقتصادی، اجتماعی و سازمانی پرداخته است، روش‌های ارزیابی تاب‌آوری به دو گروه کیفی و کمّی تقسیم شده‌اند که خود شامل زیرگروه‌هایی هستند. اگرچه تمرکز این مرجع بر روش‌های ارزیابی کمّی تاب‌آوری در حوزه مهندسی است؛ اما ادبیات مربوط به شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در آن بررسی نشده است و خواننده آن نمی‌تواند دید عمیقی از انواع شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به دست آورد. جدول (۱) به طور خلاصه نشان می‌دهد که چارچوب‌های مفهومی موجود برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت کدامند و هریک از آنها را در کدام مراجع می‌توان یافت.

جدول (۱): چارچوب‌های مفهومی موجود برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

ردیف	دسته‌بندی شاخص‌ها بر مبنای چارچوب مفهومی	مراجع
۱	ورودی‌ها، ظرفیت‌ها، قابلیت‌ها، عملکردها، پیامدها	Willis & Loa, 2015
۲	کمّی: روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های تحلیلی، تحلیل آماری داده‌های خاموشی‌های گذشته کیفی: جنبه‌ها، قابلیت‌ها	Bie et al., 2017
۳	ویژگی‌محور، عملکردمحور	Bhusal, Abdelmalak, Kamruzzaman, & Benidris, 2020
۴	بهره‌برداری، زیرساخت	Panteli, Mancarella, Trakas, Kyriakides, & Hatziargyriou, 2017; Panteli, Pickering, Wilkinson, Dawson, & Mancarella, 2017; Panteli, Trakas, Mancarella, & Hatziargyriou, 2017

در حال حاضر، (Willis & Loa, 2015) یکی از مهم‌ترین مطالعات تفصیلی در زمینه شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت است که از سوی مؤسسه راند با هدف کمک به وزارت انرژی آمریکا به منظور ایجاد چارچوبی برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های انرژی تهیه و منتشر شده است. طبق این مرجع، معمولاً یک مجموعه شاخص نمی‌تواند همه نیازهای تصمیم‌گیری را پشتیبانی کند؛ بلکه برای هر نیاز یک مجموعه شاخص تعریف می‌شود که باید در چارچوب یک مدل منطقی قرار داشته باشند. این مدل منطقی، در حوزه بهره‌برداری نشان می‌دهد که چگونه ورودی‌ها (فعالیت‌ها، بودجه‌ها، افراد) در تحقق پیامدهای مطلوب مشارکت می‌کنند و در حوزه راهبرد نشان می‌دهد که کدام ورودی‌ها برای حمایت از راهبرد مورد نیاز هستند.

همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، مدل منطقی، که عملاً چارچوبی برای طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری است، شامل ۵ عنصر است: ورودی‌ها (هرآنچه که برای پشتیبانی از تاب‌آوری در دسترس است؛ مانند بودجه، تجهیزات، قطعات یدکی، ژنراتورها و پرسنل مورد نیاز برای بازیابی)، ظرفیت‌ها (راه‌هایی که برای سازمان‌دهی ورودی‌ها به منظور پشتیبانی از تاب‌آوری وجود دارند؛ مانند تیم‌های پاسخ‌دهی، طرح‌های بازیابی، قراردادهای همکاری متقابل و تکنولوژی‌های پیشرفته)، قابلیت‌ها (میزان استفاده مناسب از ظرفیت‌ها به منظور کمک به سیستم در شرایط مورد نیاز؛ مانند توانایی شناسایی خاموشی، تعمیر خطوط، تأمین ژنراتور پشتیبان و بازیابی خاموشی)، عملکردها (مواردی که توسط یک سیستم مهندسی ایجاد می‌شوند؛ مانند میزان انرژی تأمین‌شده یا مشخصه‌های بهره‌برداری سیستم) و پیامدها (مواردی که در اثر عملکردهای سیستم، برای جامعه ایجاد می‌شوند؛ مانند کاهش هزینه‌ها و آسیب ناشی از رخدادهای شدید، افزایش فعالیت‌های اقتصادی و رفاه مردم و کاهش کشته‌ها و زخمی‌های ناشی از رخداد شدید). در این مدل، عملکرد همان چیزی است که در ادبیات رایج در سیستم‌های قدرت معمولاً به عنوان خروجی این سیستم‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ ولی پیامد از دید جامعه دیده می‌شود نه سیستم قدرت؛ یعنی سیستم قدرت دارای عملکردهایی است که پیامدهایی برای جامعه فراهم می‌کنند. در ادامه، تعداد زیادی از شاخص‌های تاب‌آوری جمع‌آوری و در جداول تفصیلی از سه نظر دسته‌بندی شده‌اند: نوع (۵ عنصر مدل منطقی که در بالا ذکر شد)، مقیاس (سطح تأسیسات یا سیستم، سطح سیستم یا ناحیه، سطح ناحیه یا ملی) و بلوغ (کم، متوسط، زیاد).

شکل (۱): مدل منطقی ارائه‌شده از سوی مؤسسه راند (Willis & Loa, 2015)

با بررسی عمیق و دقیق جداول مندرج در (Willis & Loa, 2015)، نقدهای ذیل در مورد این چارچوب قابل طرح است:

۱) به نظر می‌رسد این چارچوب مربوط به عملکرد سیستم قدرت در حالت کلی است و رخداد شدید به طور مستقیم در این چارچوب حضور ندارد. البته می‌توان فرض کرد که ورودی، ظرفیت و قابلیت مواردی هستند که در صورت وقوع رخداد شدید در اختیار شرکت برق قرار دارند و عملکرد و پیامد هم مواردی هستند که در صورت وقوع رخداد شدید توسط شرکت برق مشاهده می‌شوند؛ اما بررسی آیتم‌های موجود در جداول نشان می‌دهد که چنین دیدگاه محدودکننده‌ای بر تدوین‌کنندگان این مرجع حاکم نبوده است و انواع مختلفی از شاخص‌های سیستم قدرت ارائه شده‌اند.

۲) در مورد شاخص‌های عملکرد، بسیاری از شاخص‌ها (به‌ویژه در سطح تأسیسات یا سیستم) مربوط به حوزه کیفیت توان هستند، مانند اعوجاج هارمونیکی، فلیکر، عدم تعادل ولتاژ، کمبود ولتاژ و بیش‌بود

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

ولتاژ؛ در حالی که به هیچ عنوان نمی‌توان آنها را مرتبط با حوزه تاب‌آوری دانست و در صورت وقوع رخداد شدید مورد توجه نیستند.

۳) برخی از شاخص‌های پیامد ذکرشده مرتبط با تاب‌آوری نیستند و در هنگام وقوع رخداد شدید مورد توجه قرار نمی‌گیرند، مانند آلایندگی CO_2 و تخصیص تلفات در بازار برق.

۴) در مورد شاخص‌های ورودی، ظرفیت و قابلیت، برخی از آیتم‌های ذکرشده هیچ شباهتی به «شاخص» ندارند، مانند سطوح سلسله‌مراتبی قابلیت اطمینان (HLI، HLII و HLIII)، ترانسفورماتورها، ذخیره‌ساز انرژی، سیستم‌های کنترلی و مخابراتی، خدمات جانبی، اندازه‌گیری و حفاظت الکتریکی.

۵) در مورد شاخص‌های عملکرد، بسیاری از شاخص‌ها (به‌ویژه در سطح سیستم یا ناحیه) مربوط به حوزه قابلیت اطمینان هستند. اگرچه تحت برخی شرایط می‌توان از شاخص‌های قابلیت اطمینان برای ارزیابی تاب‌آوری استفاده کرد (Espinoza, Panteli, Mancarella, & Rudnick, 2016)؛ اما در اینجا شاخص‌هایی ارائه شده‌اند که با توجه به تفاوت مفاهیم تاب‌آوری و قابلیت اطمینان (X. Liu et al., 2017; Panteli & Mancarella, 2015a) به هیچ عنوان نمی‌توان آنها را مرتبط با حوزه تاب‌آوری دانست؛ از آن جمله می‌توان به توان نامی تغییریافته (حاصل ضرب توان نامی نیروگاه در قابلیت اطمینان آن)، خروج برنامه‌ریزی‌نشده ژنراتور، احتمال خرابی حفاظت، قابلیت اطمینان حفاظت و قابلیت اطمینان بازبست اشاره کرد. برخی دیگر، مانند انواع نرخ‌های خرابی (گذرا و دائم) را حداقل به طور مستقیم نمی‌توان به عنوان شاخص تاب‌آوری در نظر گرفت؛ گرچه ممکن است در محاسبه شاخص‌های تاب‌آوری به کار روند. همچنین در این جداول، این شاخص‌ها همگی از مراجع مختص مطالعات قابلیت اطمینان اخذ شده‌اند؛ نه از مراجع مرتبط با تاب‌آوری و ارزیابی تأثیر رخداد شدید بر شبکه برق.

۶) بعضاً به نظر می‌رسد که برخی از شاخص‌های مربوط به یک دسته به دسته دیگری بیشتر مرتبط باشند؛ مثلاً، انرژی تأمین‌نشده جزء ورودی ذکرشده ولی به عملکرد نزدیک‌تر است، یا پارامترهای قابلیت اطمینان وسایل کلیدزنی و حفاظتی و خدمات جانبی جزء قابلیت ذکر شده‌اند، ولی به ظرفیت نزدیک‌تر هستند.

بنابراین، اگرچه اصل ایده تقسیم‌بندی تاب‌آوری به چند حوزه و ارائه شاخص‌های مختلف برای هر حوزه بسیار مفید است، به نظر می‌رسد که بررسی ارائه‌شده در (Willis & Loa, 2015) فارغ از دیدگاه تأثیر رخدادهای شدید بر سیستم قدرت انجام شده است؛ در واقع، برخی از شاخص‌های ارائه‌شده یا مرتبط با تاب‌آوری نیستند و یا اصولاً شاخص نیستند و برخی از مراجع مورد استفاده نیز بی‌ارتباط با تاب‌آوری و تأثیر رخداد شدید بر سیستم قدرت هستند؛ در نتیجه، استفاده از شاخص‌های ارائه‌شده در این مرجع باید کاملاً با احتیاط و صرفاً پس از رجوع به مرجع اصلی ارائه‌دهنده شاخص انجام شود؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که (Willis & Loa, 2015)، به عنوان یکی از مهم‌ترین مطالعات در زمینه انواع شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، نتوانسته است نیاز موجود در زمینه ارائه چارچوب مناسب برای طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری را برطرف کند.

تعداد محدودی از مراجع به موضوع چارچوب طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری به عنوان بخشی از کار خود توجه کرده‌اند. در (Bie et al., 2017)، روش‌های ارزیابی تاب‌آوری (در واقع، شاخص‌های تاب‌آوری) به دو دسته کمّی و کیفی تقسیم شده‌اند (مانند تقسیم‌بندی ارائه‌شده در (Hosseini et al., 2016)). شاخص‌های کمّی اغلب بر مبنای سنجش عملکرد سیستم محاسبه می‌شوند. برای سنجش کمّی تاب‌آوری باید اندازه و مدت انحراف عملکرد از عملکرد مطلوب لحاظ شوند. این شاخص‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند: روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های تحلیلی (که از احتمال خرابی سیستم در شرایط خاص استفاده می‌کنند) و تحلیل آماری داده‌های خاموشی‌های گذشته.

در این مرجع، برای شاخص‌های کیفی تعریف صریحی ارائه نشده است؛ اما بیان شده که در ارزیابی کیفی، جنبه‌ها و قابلیت‌های مختلفی باید لحاظ شوند. جنبه‌ها معمولاً شامل سیستم قدرت و سیستم‌های وابسته به آن (سیستم اطلاعات، زیرساخت انرژی، زنجیره تأمین سوخت، ساختار کسب و کار) هستند. قابلیت‌ها نیز شامل آماده‌سازی، کاهش، پاسخ و بازیابی هستند؛ مانند وجود برنامه اضطراری، آموزش پرسنل و دسترس‌پذیری پرسنل تعمیرات.

با بررسی دقیق دسته‌بندی ارائه‌شده در (Bie et al., 2017) و مصادیق آن، نقدهای ذیل در مورد این چارچوب قابل طرح است:

۱) تفاوت دو دسته شاخص‌ها بر مبنای کمّی و کیفی بودن نیست؛ بلکه بر مبنای وابستگی یا عدم وابستگی به عملکرد است. همچنین، عنوان «کیفی» گمراه‌کننده است؛ زیرا روش‌های ارائه‌شده از سوی آزمایشگاه ملی آرگون (Petit et al., 2013) هم در این دسته قرار می‌گیرند که محاسبات مفصل دارند؛ گرچه وابسته به عملکرد هم نیستند.

۲) چهار نوع قابلیت مربوط به شاخص‌های کیفی بر مبنای چهار دسته اقدامات تاب‌آوری در (Petit et al., 2013) تعریف شده‌اند. این «قابلیت‌ها» از «جنبه‌ها» مستقل نیستند. مثلاً طبق (Petit et al., 2013)، وابستگی به سایر زیرساخت‌ها (تکنولوژی اطلاعات، گاز طبیعی، مخابرات، آب، فاضلاب، حمل و نقل و محصولات حیاتی) در اقدامات مربوط به آماده‌سازی، کاهش، پاسخ و بازیابی لحاظ می‌شوند.

۳) روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی و روش‌های تحلیل داده‌های گذشته به هیچ وجه روش ارزیابی تاب‌آوری نیستند؛ بلکه روش‌های فرض یا پیش‌بینی عملکرد سیستم هستند و شاخص‌ها با استفاده از عملکرد (صرف نظر از اینکه چگونه به دست آمده است) محاسبه می‌شوند. عنوان روش‌های تحلیلی نیز بسیار کلی و عملاً شامل همه انواع شاخص‌ها است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

۴) میزان بررسی مقالات مرتبط با شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در این مرجع کافی نیست و از نظر تطبیق با شاخص‌های موجود به درستی صحت‌سنجی نشده است.

بنابراین، چارچوب ارائه‌شده در (Bie et al., 2017) برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت نیز کاستی‌های جدی دارد و قابل استفاده نیست.

در (Bhusal et al., 2020) شاخص‌های تاب‌آوری به دو دسته «ویژگی‌محور» و «عملکردمحور» تقسیم شده‌اند، ولی این تقسیم‌بندی جزئیات بیشتری ندارد و شاخص‌های مرورشده نیز بر این مبنا دسته‌بندی نشده‌اند. در (Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Pickering, et al., 2017; Panteli, Trakas, et al., 2017)، شاخص‌های تاب‌آوری به دو دسته شاخص‌های بهره‌برداری (مرتبط با کیفیت سرویس‌دهی در سیستم) و شاخص‌های زیرساخت (مرتبط با وضعیت در مدار بودن تجهیزات سیستم) تقسیم شده‌اند. در (Watson et al., 2014) نیز شاخص‌های تاب‌آوری از جنس پیامد (تأثیر سیستم قدرت بر جامعه) فرض شده‌اند؛ اگرچه عملکرد سیستم قدرت نیز می‌تواند به عنوان یک پیامد در نظر گرفته شود. طبق این مرجع، کمیت‌هایی که نشان‌دهنده ویژگی‌های سیستم هستند (مانند تعداد ترانسفورماتورهای یدکی در انبار) جزء شاخص‌های تاب‌آوری محسوب نمی‌شوند. با این وجود، در هیچ‌یک از این مراجع نیز تلاشی برای ارائه چارچوبی مناسب و دقیق برای طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری و تخصیص شاخص‌های موجود در ادبیات تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به گروه‌های آن انجام نشده است.

بنابراین، به نظر می‌رسد که ضرورت مطالعه‌ای مستقل در ادبیات حوزه شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، با تأکید بر تأثیر رخداد شدید بر این سیستم، و نیز ارائه چارچوب مفهومی جامع، دقیق و مناسب و طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری موجود بر مبنای آن، همچنان پابرجا باشد. این مقاله، تلاشی در راستای تحقق اهداف یادشده است و تا آنجا که نویسندگان این مقاله بررسی کرده‌اند، اولین مطالعه جامع و دقیق در حوزه شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود.

۳- معرفی چارچوب مفهومی پیشنهادی و مقایسه آن با چارچوب‌های موجود

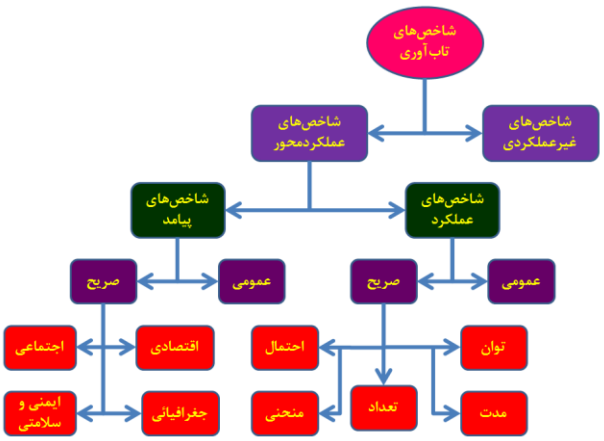
در این بخش، با بررسی و مقایسه دقیق مراجع موجود در زمینه کاربرد مستقیم یا غیرمستقیم شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، چارچوب مفهومی جدیدی مطابق با شکل (۲) برای طبقه‌بندی این شاخص‌ها پیشنهاد و به تفصیل معرفی شده است. سپس، به منظور اینکه جامعیت و کاربردی بودن چارچوب پیشنهادی مشخص شود، اقدامات زیر انجام شده‌اند:

الف) انواع شاخص‌های تاب‌آوری به‌کاررفته در مراجع به گروه‌های مختلف این چارچوب تخصیص داده شده‌اند (مطابق با جدول (۲)).

همچنین، با توجه به گستردگی انواع شاخص‌های عملکردمحور، مهم‌ترین مصادیق این شاخص‌ها به ترتیب در قالب شکل (۳) (برای شاخص‌های تاب‌آوری عملکرد صریح) و شکل (۴) (برای شاخص‌های تاب‌آوری پیامد صریح) بیان شده‌اند.

ب) چارچوب مفهومی پیشنهادی با سایر چارچوب‌های ارائه‌شده در مراجع (که در بخش ۲ مطرح و نقد شده بودند) مقایسه شده است تا مزایای چارچوب پیشنهادی مشخص شود.

مجموعه این اقدامات می‌توانند به معنای انجام صحت‌سنجی در زمینه جامعیت و کاربردی بودن چارچوب مفهومی پیشنهادی تلقی شوند.



شکل (۲): چارچوب مفهومی پیشنهادی برای شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

شکل (۳): مصادیقی از گروه‌های مختلف شاخص‌های تاب‌آوری عملکرد صریح

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

شکل (۴): مصادیقی از گروه‌های مختلف شاخص‌های تاب‌آوری پیامد صریح

جدول (۲): دسته‌بندی شاخص‌های ارائه‌شده در مراجع بر مبنای گروه‌های چارچوب مفهومی پیشنهادی

نوع شاخص			مراجع مرتبط
غیرعملکردی			Carlson et al., 2012; Chaudry et al., 2011; Fisher et al., 2010; X. Liu et al., 2017; Petit et al., 2013; The_National_Academies, 2012a; Watson et al., 2014; Willis & Loa, 2015
عملکردمحور	عملکرد	توان	M. H. Amirioun, Aminifar, & Lesani, 2018a, 2018b; Balasubramaniam, Saraf, Hadidi, & Makram, 2016; Bie et al., 2017; Chaudry et al., 2011; Chen, Wang, Qiu, & Zhao, 2016; Chen, Wang, & Ton, 2017; Ciapessoni et al., 2016; Ding, Lin, Li, & Bie, 2017; Espinoza et al., 2016; Farzin, Fotuhi-Firuzabad, & Moeini-Aghtaie, 2016; Fu et al., 2018; Gao, Chen, Mei, Huang, & Xu, 2017; Gao, Chen, Xu, & Liu, 2016; Huang, Wang, Chen, Qi, & Guo, 2017; Hussain, Bui, & Kim, 2017; Johnson, Chalishazar, Cotilla-Sanchez, & Brekken, 2020; Khodaei, 2014a, 2014b, 2015; Lei, Wang, Chen, & Hou, 2018; Y. Li, Xie, Wang, & Xiang, 2019; X. Liu et al., 2017; Nezamoddini, Mousavian, & Erol-Kantarci, 2017; Panteli & Mancarella, 2015a, 2015b; Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Pickering, et al., 2017; Panteli, Trakas, Mancarella, & Hatziargyriou, 2016; Panteli, Trakas, et al., 2017; Reed, Kapur, & Christie, 2009; Shao, Shahidehpour, Wang, Wang, & Wang, 2017; Shinozuka & Chang, 2004; Trakas, Panteli, Hatziargyriou, & Mancarella, 2019 ;C. Wang, Hou, Qiu, Lei, & Liu, 2017; Watson et al., 2014; Willis & Loa, 2015; Xiang, Wang, & Liu, 2018; Xu, Mitra, Cai, & Mou, 2014; C. Yuan, Illindala, & Khalsa, 2017; W. Yuan et al., 2016; Zhu, Yan, Tang, Sun, & He, 2014 ; امینی‌فر، ۱۳۹۷؛ صابری، ۱۳۹۹a، ۱۳۹۹b؛ علیزاده، ۱۳۹۹
			Bie et al., 2017; Chaudry et al., 2011; Fu et al., 2018; Ji, Wei, & Poor, 2017; Keogh & Cody, 2013; Lei et al., 2018; NERC, 2010; Panteli & Mancarella, 2015a, 2017; Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Trakas, et al., 2017; Shao et al., 2017; Willis & Loa, 2015 — مدت
			Dehghani, Darestani, & Shafieezadeh, 2020; Espinoza et al., 2016; Fu et al., 2018; Huang et al., 2017; Ji et al., 2017; X. Liu et al., 2017; Panteli & Mancarella, 2015a, 2017; Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Pickering, et al., 2017; Panteli et al., 2016; Panteli, Trakas, et al., 2017; Shao et al., 2017; Willis & Loa, 2015 — تعداد
			Bie et al., 2017; Chaudry et al., 2011; Ji et al., 2017; Krishnamurthy & Kwasinski, 2016; X. Liu et al., 2017; Nezamoddini et al., 2017; Panteli & Mancarella, 2015b; Shinozuka & Chang, 2004; Willis & Loa, 2015 — احتمال
			M. Amirioun, Aminifar, Lesani, & Shahidehpour, 2019; Bie et al., 2017; Gao et al., 2017; Gao et al., 2016; Kwasinski, 2010; J. Liu, Qin, & Yu, 2019; Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Trakas, et al., 2017; Reed et al., 2009; Shinozuka ; & Chang, 2004; Yang, Zhao, Wang, Gao, & Hao, 2019; امینی‌فر، ۱۳۹۷؛ صادقی خمامی، ۱۳۹۸؛ منعمی، ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ — منحنی
			Afgan, 2010; Attoh-Okine, Cooper, & Mensah, 2009; Bie et al., 2017; Ciapessoni et al., 2016; Espinoza et al., 2016; Keogh & Cody, 2013; Landegren, Johansson, & Samuelsson, 2016; Z. Li et al., 2017; NERC, 2010; Panteli & Mancarella, 2015a; Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli et al., 2016; Panteli, Trakas, et al., 2017; Shao et al., 2017; Willis & Loa, 2015 — عمومی
		پیامد	Ansari & Mohagheghi, 2015; Arab, Khodaei, Han, & Khator, 2015; Arab, Khodaei, Khator, et al., 2015; Bie et al., 2017; Farzin et al., 2016; Gholami, Shekari, Aminifar, & Shahidehpour, 2016; Huang et al., 2017; Hussain et al., 2017; Ji et al., 2017; Ma, Chen, & Wang, 2018; Manshadi & Khodayar, 2015; NERC, 2010; Shao et al., 2017; Shinozuka & Chang, 2004; Chong Wang et al., 2017; Cheng Wang et al., 2017; Watson et al., 2014; Willis & Loa, 2015; Xiang et al., 2018; منعمی، ۱۳۹۷ — اقتصادی
			NERC, 2010; Shinozuka & Chang, 2004; Watson et al., 2014; Willis & Loa, 2015 — اجتماعی
			NERC, 2010 — جغرافیائی
			Watson et al., 2014; Willis & Loa, 2015 — ایمنی و سلامتی
			Kwasinski, 2010; NERC, 2010; Shinozuka & Chang, 2004; Watson et al., 2014 — عمومی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

۱-۳- معرفی تفصیلی چارچوب مفهومی پیشنهادی

بر مبنای چارچوب مفهومی پیشنهادی، شاخص‌های تاب‌آوری به دو دسته «عملکردمحور» و «غیرعملکردی» تقسیم می‌شوند. شاخص‌های عملکردمحور، بر مبنای عملکرد سیستم (کارکرد، کیفیت)، که خروجی مستقیم سیستم است، محاسبه می‌شوند. این عملکرد می‌تواند بر مبنای داده‌های رفتار گذشته سیستم در یک بازه زمانی فرض شود، یا اینکه با استفاده از پیش‌بینی رفتار سیستم در یک بازه زمانی از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی (به‌ویژه شبیه‌سازی مونت‌کارلوی ترتیبی (Panteli & Mancarella, 2017; Shinozuka & Chang, 2004)) به دست آید. با مشخص شدن عملکرد سیستم در یک بازه زمانی، انواع مختلف شاخص‌های عملکردمحور قابل محاسبه هستند. به عنوان مثال، عملکرد سیستم می‌تواند بار تأمین‌شده باشد و شاخص تاب‌آوری عملکردمحور به صورت سطح نرمالیزه‌شده زیر منحنی بار تأمین‌شده در طول زمان تعریف شود.

در مقابل، شاخص‌های غیرعملکردی مستقل از عملکرد سیستم هستند و بر مبنای برخی عوامل که قبل، حین و بعد از رخداد شدید بر تاب‌آوری سیستم تأثیر می‌گذارند محاسبه می‌شوند. کمیت‌های نظیر این عوامل معمولاً با استفاده از روش‌هایی مانند بازرسی و پرسشنامه ارزیابی و با استفاده از برخی روش‌های ریاضی (به ویژه ترکیب خطی وزن‌دار) با هم ترکیب و به شاخص یا شاخص‌های مورد نظر تبدیل می‌شوند. شاخص‌های غیرعملکردی معیاری کلی از وضعیت عوامل مؤثر بر تاب‌آوری سیستم در برابر رخداد شدید هستند. این شاخص‌ها معمولاً برای ارزیابی تاب‌آوری یک زیرساخت تنها یا ارزیابی تاب‌آوری یک جامعه (شامل یک محله، شهر، ناحیه یا کشور) به کار می‌روند (The_National_Academies, 2012a) که زیرساخت برق تنها یکی از زیرساخت‌های آن است. البته ممکن است مطرح شود که این شاخص‌ها مربوط به شبکه برق نیستند؛ ولی باید توجه شود که آن بخشی از شاخص که نشان‌دهنده تأثیر زیرساخت‌های برق بر تاب‌آوری جامعه است، قطعاً با شبکه برق مرتبط می‌باشد و ممکن است بتواند به طور جداگانه استفاده شود. یکی از معدود شاخص‌های غیرعملکردی اختصاصی سیستم قدرت نیز شاخص بازیابی شبکه است که در (X. Liu et al., 2017) ارائه شده است. در ضمن، ویژگی‌های یک سیستم (مثلاً تعداد قطعات یدکی حیاتی در انبار) (Watson et al., 2014) هم ممکن است به عنوان یک شاخص غیرعملکردی تعریف شوند.

در چارچوب مفهومی پیشنهادی، در مورد شاخص‌های غیرعملکردی تقسیم‌بندی بیشتری انجام نشده است؛ اما شاخص‌های عملکردمحور تا چند سطح دیگر تقسیم‌بندی خواهند داشت. شاخص‌های عملکردمحور را می‌توان به دو دسته کلی «شاخص‌های عملکرد» و «شاخص‌های پیامد» تقسیم کرد. در شاخص‌های عملکرد، مقدار عملکرد سیستم (خروجی مستقیم سیستم) به عنوان شاخص ارائه می‌شود؛ در حالی که در شاخص‌های پیامد، تأثیر سیستم بر جنبه‌های مختلف جامعه مدنظر است.

شاخص‌های عملکرد و شاخص‌های پیامد، هریک به دو دسته «عمومی» و «صریح» تقسیم می‌شوند. شاخص‌های عمومی شاخص‌هایی هستند که با ابهام و با استفاده از مفاهیم کلی نظیر «عملکرد» و «تأثیر» تعریف شده‌اند. شاخص‌های صریح نیز شاخص‌هایی هستند که بدون ابهام، به طور واضح و بر مبنای کمیت‌های مشخص تعریف شده‌اند. علت وجود دسته جداگانه‌ای به عنوان شاخص‌های عمومی، بلوغ پایین شاخص‌های تاب‌آوری است. شاخص عمومی، پس از رفع ابهام و مشخص شدن همه کمیت‌های مربوط به آن، به یک شاخص صریح تبدیل شده و در یکی از دسته‌بندی‌های ارائه‌شده در شکل (۲) قرار خواهد گرفت. به عنوان نمونه، سطح بین منحنی‌های عملکرد واقعی و ایده‌آل (Panteli, Mancarella, et al., 2017) یک شاخص عمومی عملکرد است؛ اما اگر بیان شود که عملکرد سیستم بر حسب بار تأمین‌شده تعریف می‌شود، شاخص عمومی به یک شاخص صریح (از نوع منحنی) تبدیل خواهد شد. همچنین، میانگین یا CVaR نظیر منحنی توزیع احتمال پیامد (Watson et al., 2014)، یک شاخص عمومی پیامد است؛ ولی اگر بیان شود که پیامد به صورت هزینه انرژی تأمین‌نشده تعریف می‌شود، شاخص عمومی به یک شاخص صریح (از نوع اقتصادی) تبدیل خواهد شد. البته در برخی موارد، میزان ابهام در تعریف شاخص‌های عمومی بیش از این است. در آینده، انتظار می‌رود که بلوغ شاخص‌های تاب‌آوری افزایش یابد و دسته‌بندی عمومی و صریح حذف شود؛ به عبارت دیگر، همه شاخص‌های عملکردمحور از نوع صریح خواهند بود و شاخص‌های عمومی وجود نخواهند داشت.

در چارچوب پیشنهادی، در مورد شاخص‌های عمومی تقسیم‌بندی بیشتری انجام نشده است؛ اما شاخص‌های صریح (اعم از عملکرد و پیامد) تقسیم‌بندی‌های بیشتری دارند. شاخص‌های عملکرد صریح به ۵ گروه ذیل تقسیم می‌شوند و مصادیق آنها قبلاً در شکل (۳) نشان داده شده‌اند:

الف) توان: شاخص‌هایی که نشان می‌دهند که بار چطور تأمین می‌شود یا نمی‌شود، یا ظرفیت تولید چقدر در دسترس است. این شاخص‌ها می‌توانند به صورت توان یا انرژی باشند، و از آنجا که انرژی با استفاده از توان محاسبه می‌شود، نام توان برای این گروه انتخاب شده است. شاخص‌های هزینه‌ای مرتبط با بار یا تولید جزء این دسته نیستند و کلاً جزء شاخص‌های پیامد (اقتصادی) محسوب می‌شوند. شاخص‌های این گروه بیشترین کاربرد را در ادبیات موضوع دارند.

ب) مدت: شاخص‌هایی که مدت یا زمان‌های مربوط به مواردی مانند قطع بار و بازیابی بار را نشان می‌دهند.

ج) تعداد: شاخص‌هایی که موارد مرتبط با تعداد یا فراوانی جنبه‌های مرتبط با تأثیر رخداد شدید بر سیستم قدرت را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در اینجا تعداد تنها مربوط به تجهیزات یا مشترکین شبکه است و شاخص‌هایی که با مواردی نظیر تعداد افراد و خانوارهای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

تحت تأثیر سر و کار دارند جزء شاخص‌های پیامد (اجتماعی) محسوب می‌شوند.

د) احتمال: شاخص‌هایی که احتمال جنبه‌های مختلف مرتبط با تأثیر رخداد شدید بر عملکرد سیستم را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها ممکن است به شاخص‌های توان، مدت یا تعداد وابسته باشند؛ ولی به نظر می‌رسد که قرار دادن دسته جداگانه‌ای برای آنها مناسب باشد. با این وجود، مفهوم احتمال برای بسیاری از رخدادهای شدید قابل تعریف نیست؛ زیرا مفهوم ریاضی احتمال به سختی می‌تواند برای این نوع رخدادها، که فراوانی وقوع پایین دارند، به کار رود؛ طبق (NERC, 2010)، سنجش احتمال وقوع این رخدادها و تأثیر آنها کار سختی است و فراوانی و شدت رخدادهای گذشته نمی‌توانند به طور مناسبی نشان‌دهنده تأثیرات رخدادهای بالقوه در آینده باشند. در واقع، به نظر می‌رسد که در مورد رخدادهای شدید، استفاده از مفهوم «فراوانی» مناسب‌تر از مفهوم «احتمال» باشد. بنابراین، با وجود اینکه برخی مراجع معتبر از شاخص‌های این گروه استفاده کرده‌اند، به نظر می‌رسد هر شاخص تاب‌آوری که با فرض مشخص بودن احتمال رخداد شدید طراحی شود (در گروه احتمال یا گروه‌های دیگر)، در عمل قابل استفاده نخواهد بود.

ه) منحنی: شاخص‌هایی که بر مبنای تغییرات منحنی عملکرد سیستم بر حسب زمان محاسبه می‌شوند. ویژگی این شاخص‌ها آن است که به طور همزمان دو جنبه عملکرد سیستم و مدت تغییرات در آنها وجود دارند.

چنان که دیده می‌شود، تقسیم‌بندی ارائه‌شده در مورد شاخص‌های عملکرد صریح، ترکیبی از تقسیم‌بندی بر مبنای کمیت و تقسیم‌بندی بر مبنای مفهوم ریاضی است.

بسیاری از شاخص‌های تاب‌آوری مورد استفاده در ادبیات موضوع از جنس شاخص‌های قابلیت اطمینان هستند. در برخی مراجع (Espinoza et al., 2016) بیان شده است که اگر شاخص‌های قابلیت اطمینان در قالب یک چارچوب ارزیابی تاب‌آوری به‌کارگیری شوند، می‌توانند به عنوان شاخص‌های تاب‌آوری استفاده شوند؛ گرچه لزوماً نمی‌توانند همه جنبه‌های مختلف تاب‌آوری را پوشش دهند. در مقابل، در برخی مراجع (Ji et al., 2017) نشان داده شده است که تعمیم شاخص‌های قابلیت اطمینان برای تبدیل آنها به شاخص تاب‌آوری (مثلاً تعمیم SAIFI و SAIDI به شکل STAIFI و STAIDI) نتایج نادرستی را به بار می‌آورد. از این رو، به نظر می‌رسد که در ارزیابی تأثیر رخداد شدید بر سیستم قدرت، به‌منظور پرهیز از هرگونه سوءبرداشت، بهتر است حتی‌الامکان از شاخص‌های اختصاصی حوزه تاب‌آوری استفاده کرد.

در مورد شاخص‌های پیامد، از تقسیم‌بندی متفاوتی استفاده شده است که جنبه‌های مختلف تأثیر سیستم بر جامعه را نشان می‌دهد. شاخص‌های پیامد صریح به ۴ گروه ذیل تقسیم می‌شوند و مصادیق آنها قبلاً در شکل (۴) نشان داده شده‌اند:

الف) اقتصادی: شاخص‌هایی که نشان‌دهنده هزینه‌ها و تأثیرات اقتصادی رخداد شدید بر جامعه هستند. کلیه شاخص‌های هزینه‌ای در این دسته قرار دارند. شاخص‌های این گروه، پس از شاخص‌های توان، بیشترین کاربرد را در ادبیات موضوع دارند.

ب) اجتماعی: شاخص‌هایی که نشان‌دهنده تأثیرات اجتماعی رخداد شدید مانند تأثیر بر وضعیت اشتغال هستند.

ج) جغرافیائی: شاخص‌هایی که نشان‌دهنده مواردی نظیر توزیع جغرافیائی اثرات رخداد شدید هستند.

د) ایمنی و سلامتی: شاخص‌هایی که نشان‌دهنده تأثیر رخداد شدید بر جان افراد و مسائل مرتبط با حفظ سلامتی آنها هستند.

واضح است که شاخص پیامد ممکن است با استفاده از کمیت‌های عملکرد سیستم مانند توان، مدت و تعداد ساخته شود. همچنین، شاخص پیامد ممکن است به صورت احتمال یا با استفاده از یک منحنی تغییرات پیامد بیان شود. بنابراین، دسته‌بندی‌های شاخص‌های پیامد صریح در تضاد با دسته‌بندی‌های شاخص‌های عملکرد صریح نیستند.

۲-۳- مقایسه چارچوب مفهومی پیشنهادی با چارچوب‌های موجود

در مقایسه چارچوب مفهومی پیشنهادی با چارچوب مؤسسه راند (Willis & Loa, 2015)، صرف‌نظر از موارد مبهم یا نامرتبط که قبلاً در بخش ۲ اشاره شد، شاخص‌های ورودی، ظرفیت و قابلیت اکثراً جزء ویژگی‌های سیستم هستند و در چارچوب پیشنهادی می‌توانند جزء شاخص‌های غیرعملکردی محسوب شوند؛ البته این کمیت‌ها می‌توانند برای محاسبه شاخص‌های تاب‌آوری عملکردمحور (از طریق تأثیر بر عملکرد) و غیرعملکردی (از طریق حضور مستقیم در روابط محاسبه شاخص) نیز به کار روند. همچنین، شاخص‌های عملکرد و پیامد در چارچوب پیشنهادی نیز همین عنوان را دارند. در عین حال، چارچوب پیشنهادی فاقد ایرادهای چارچوب مؤسسه راند (بخش ۲) است.

در مقایسه با چارچوب ارائه‌شده در (Bie et al., 2017)، شاخص‌های کمّی و کیفی به ترتیب مطابق با شاخص‌های عملکردمحور و غیرعملکردی هستند؛ ولی هیچ‌یک از ایرادهای ذکرشده در بخش ۲ در چارچوب پیشنهادی وجود ندارند. مقایسه چارچوب پیشنهادی با تقسیم‌بندی ارائه‌شده در (Panteli, Mancarella, et al., 2017; Panteli, Pickering, et al., 2017; Panteli, Trakas, et al., 2017) (بخش ۲) نشان می‌دهد که این دو چارچوب از نظر مبنایی با هم متفاوتند و قابل تطبیق نیستند. در واقع، یک شاخص عملکردمحور ممکن است مربوط به کیفیت سرویس‌دهی (شاخص بهره‌برداری) یا وضعیت تجهیزات داخل مدار (شاخص زیرساخت) باشد. مقایسه چارچوب پیشنهادی با (Watson et al., 2014) (مورد اشاره در بخش ۲) نیز نشان می‌دهد که در آن مرجع، شاخص‌های غیرعملکردی در نظر گرفته نشده‌اند و استفاده از ویژگی‌های سیستم به عنوان شاخص

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

تاب‌آوری نیز رد شده است. همچنین، شاخص‌های تاب‌آوری در اصل مربوط به پیامد هستند و بنابراین، در چارچوب پیشنهادی جزء شاخص‌های پیامد محسوب می‌شوند؛ البته در این مرجع بیان شده که بعضاً پیامد می‌تواند عملکرد هم باشد که در این شرایط، این شاخص‌ها در چارچوب پیشنهادی به عنوان شاخص‌های عملکرد در نظر گرفته می‌شوند.

در (Bhusal et al., 2020) به طور مفصل به مرور شاخص‌های تاب‌آوری سیستم‌های قدرت پرداخته شده است، و بررسی‌های ما نشان می‌دهد که شاخص‌های معرفی‌شده در این مرجع با چارچوب مفهومی ارائه‌شده در مقاله ما کاملا تناسب دارند و مصادیق آنها قبلا در شکل‌های (۳) و (۴) پوشش داده شده‌اند. در عین حال، همان‌طور که در بخش ۲ بیان شد، این مرجع ابتدا شاخص‌های تاب‌آوری را به دو دسته «ویژگی‌محور» و «عملکردمحور» تقسیم کرده است که به ترتیب قابل تطبیق با گروه‌های «غیرعملکردی» و «عملکردمحور» در چارچوب مفهومی پیشنهادی ما هستند؛ ولی این دسته‌بندی جزئیات بیشتری ندارد و مرور تفصیلی شاخص‌ها نیز در قالب این دسته‌بندی انجام نشده است؛ در حالی که چارچوب پیشنهادی ما هم دارای جزئیات و دسته‌بندی‌های بیشتر است و هم شاخص‌های تاب‌آوری شناسایی‌شده دقیقا بر مبنای چارچوب پیشنهادی طبقه‌بندی شده‌اند.

به طور کلی، در مقایسه با چارچوب‌های موجود، چارچوب مفهومی پیشنهادی گروه‌های مشخص‌تر و دقیق‌تری دارد، جامعیت آن با تخصیص شاخص‌های تاب‌آوری موجود به گروه‌های چارچوب صحت‌سنجی شده است، دید عمیقی را از انواع شاخص‌های تاب‌آوری موجود در ادبیات سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که کدام گروه‌ها نیاز به پژوهش بیشتر دارند؛ ضمن اینکه در چارچوب مفهومی پیشنهادی، ایرادهای اساسی واردشده به چارچوب‌های موجود نیز وجود ندارند. به عبارت دیگر، چارچوب مفهومی پیشنهادی، چارچوبی جامع و کاربردی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا مهم‌ترین چارچوب‌های مفهومی موجود برای طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری مطرح شدند و مورد نقد اساسی قرار گرفتند. در ادامه، چارچوب مفهومی جامع و جدیدی برای شاخص‌های تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت ارائه شد. در این چارچوب، شاخص‌های تاب‌آوری به دو دسته غیرعملکردی و عملکردمحور تقسیم می‌شوند. شاخص‌های عملکردمحور خود به دو دسته شاخص‌های عملکرد (شامل گروه‌های توان، مدت، تعداد، احتمال و منحنی) و شاخص‌های پیامد (شامل گروه‌های اقتصادی، اجتماعی، جغرافیائی و ایمنی و سلامتی) تقسیم شده‌اند؛ ضمن اینکه در هریک از این دو دسته، یک گروه عمومی نیز وجود دارد. پس از معرفی تفصیلی چارچوب پیشنهادی، به منظور صحت‌سنجی این چارچوب، ابتدا شاخص‌های تاب‌آوری موجود در ادبیات سیستم‌های قدرت به گروه‌های مختلف این چارچوب تخصیص داده شده‌اند و سپس چارچوب پیشنهادی با چارچوب‌های موجود مقایسه شده است. این بررسی نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند انواع شاخص‌های تاب‌آوری موجود در ادبیات موضوع را پوشش دهد و طبقه‌بندی کند و فاقد ایرادهای اساسی چارچوب‌های موجود است. بنابراین، چارچوب پیشنهادی در مقایسه با چارچوب‌های موجود جامع‌تر و کاربردی‌تر است و در زمینه برنامه‌ریزی یا بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در برابر رخدادهای شدید، می‌تواند برای محققین دانشگاهی (پژوهش برای یافتن شاخص‌های جدید) و صنعتی (انتخاب شاخص متناسب با کاربرد مورد نیاز) مفید باشد.

مراجع

Abbey, C., Cornforth, D., Hatziargyriou, N., Hirose, K., Kwasinski, A., Kyriakides, E., . . . Suryanarayanan, S. (2014). Powering through the storm: Microgrids operation for more efficient disaster recovery. *IEEE Power and Energy Magazine, 12*(3), 67-76.

Afgan, N. (2010). *Sustainable resilience of energy systems.* USA: Nova Science Publishers.

Amirioun, M., Aminifar, F., Lesani, H., & Shahidehpour, M. (2019). Metrics and quantitative framework for assessing microgrid resilience against windstorms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 104*, 716-723.

Amirioun, M. H., Aminifar, F., & Lesani, H. (2018a). Resilience-oriented proactive management of microgrids against windstorms. *IEEE Transactions on Power Systems, 33*(4), 4275 - 4284.

Amirioun, M. H., Aminifar, F., & Lesani, H. (2018b). Towards proactive scheduling of microgrids against extreme floods. *IEEE Transactions on Smart Grid, 9*(4), 3900 - 3902.

Ansari, B., & Mohagheghi, S. (2015). Optimal energy dispatch of the power distribution network during the course of a progressing wildfire. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 25*(12), 3422-3438.

Arab, A., Khodaei, A., Han, Z., & Khator, S. K. (2015). Proactive recovery of electric power assets for resiliency enhancement. *IEEE Access, 3*, 99-109.

Arab, A., Khodaei, A., Khator, S. K., Ding, K., Emesih, V. A., & Han, Z. (2015). Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(2), 1046-1054.

Arghandeh, R., Brown, M., Del Rosso, A., Ghatikar, G., Stewart, E., Vojdani, A., & von Meier, A. (2014). The local team: Leveraging distributed resources to improve resilience. *IEEE Power and Energy Magazine, 12*(5), 76-83.

Arghandeh, R., von Meier, A., Mehrmanesh, L., & Mili, L. (2016). On the definition of cyber-physical resilience in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58*, 1060-1069.

Attoh-Okine, N. O., Cooper, A. T., & Mensah, S. A. (2009). Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions. *IEEE Systems Journal, 3*(2), 147-153.

Balasubramaniam, K., Saraf, P., Hadidi, R., & Makram, E. B. (2016). Energy management system for enhanced resiliency of microgrids during islanded operation. *Electric Power Systems Research, 137*, 133-141.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

resilience. *Reliability Engineering & System Safety, 145*, 47-61.

Huang, G., Wang, J., Chen, C., Qi, J., & Guo, C. (2017). Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(6), 4451 - 4463.

Hussain, A., Bui, V.-H., & Kim, H.-M. (2017). Optimal operation of hybrid microgrids for enhancing resiliency considering feasible islanding and survivability. *IET Renewable Power Generation, 11*(6), 846-857.

IEC. (2014). *Microgrids for disaster preparedness and recovery-With electricity continuity plans and systems*. Retrieved from Switzerland:

Ji, C., Wei, Y., & Poor, H. V. (2017). Resilience of energy infrastructure and services: Modeling, data analytics, and metrics. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1354-1366.

Johnson, B., Chalishazar, V., Cotilla-Sanchez, E., & Brekken, T. K. (2020). A monte carlo methodology for earthquake impact analysis on the electrical grid. *Electric Power Systems Research, 184*, 106332.

Keogh, M., & Cody, C. (2013). *Resilience in regulated utilities*. Retrieved from USA:

Khodaei, A. (2014a). Microgrid optimal scheduling with multi-period islanding constraints. *IEEE Transactions on Power Systems, 29*(3), 1383-1392.

Khodaei, A. (2014b). Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling. *IEEE Transactions on Smart Grid, 5*(4), 1584-1591.

Khodaei, A. (2015). Provisional microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(3), 1107-1115.

Krishnamurthy, V., & Kwasinski, A. (2016). Effects of power electronics, energy storage, power distribution architecture, and lifeline dependencies on microgrid resiliency during extreme events. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 4*(4), 1310-1323.

Kwasinski, A. (2010). Technology planning for electric power supply in critical events considering a bulk grid, backup power plants, and micro-grids. *IEEE Systems Journal, 4*(2), 167-178.

Landegren, F. E., Johansson, J., & Samuelsson, O. (2016). A method for assessing margin and sensitivity of electricity networks with respect to repair system resources. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2880-2889.

Lei, S., Wang, J., Chen, C., & Hou, Y. (2018). Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid, 9*(3), 2030 - 2041.

Li, Y., Xie, K., Wang, L., & Xiang, Y. (2019). Exploiting network topology optimization and demand side management to improve bulk power system resilience under windstorms. *Electric Power Systems Research, 171*, 127-140.

Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., Alabdulwahab, A., & Al-Turki, Y. (2017). Networked microgrids for enhancing the power system resilience. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1289 - 1310.

Liu, J., Qin, C., & Yu, Y. (2019). Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration. *IEEE Transactions on Smart Grid, 11*(3), 2381-2395.

Liu, X., Shahidehpour, M., Li, Z., Liu, X., Cao, Y., & Bie, Z. (2017). Microgrids for enhancing the power grid

Bhusal, N., Abdelmalak, M., Kamruzzaman, M., & Benidris, M. (2020). Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions. *IEEE Access, 8*, 18064-18086.

Bie, Z., Lin, Y., Li, G., & Li, F. (2017). Battling the extreme: A study on the power system resilience. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1253 - 1266.

Carlson, L., Bassett, G., Buehring, W., Collins, M., Folga, S., Haffenden, B., . . . Whitfield, R. (2012). *Resilience: Theory and application*. Retrieved from USA:

Chaudry, M., Ekins, P., Ramachandran, K., Shakoor, A., Skea, J., Strbac, G., . . . Whitaker, J. (2011). *Building a resilient UK energy system*. Retrieved from UK:

Chen, C., Wang, J., Qiu, F., & Zhao, D. (2016). Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(2), 958-966.

Chen, C., Wang, J., & Ton, D. (2017). Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: An integrated solution. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1267-1288.

Ciapessoni, E., Cirio, D., Kjølle, G., Massucco, S., Pitto, A., & Sforna, M. (2016). Probabilistic risk-based security assessment of power systems considering incumbent threats and uncertainties. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2890-2903.

Dehghani, N. L., Darestani, Y. M., & Shafieezadeh, A. (2020). Optimal life-cycle resilience enhancement of aging power distribution systems: A MINLP-based preventive maintenance planning. *IEEE Access, 8*, 22324-22334.

Ding, T., Lin, Y., Li, G., & Bie, Z. (2017). A new model for resilient distribution systems by microgrids formation. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(5), 4145 - 4147.

Espinoza, S., Panteli, M., Mancarella, P., & Rudnick, H. (2016). Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards. *Electric Power Systems Research, 136*, 352-361.

Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M. (2016). Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2869-2879.

Fisher, R. E., Bassett, G. W., Buehring, W. A., Collins, M. J., Dickinson, D. C., Eaton, L. K., . . . Peerenboom, J. P. (2010). *Constructing a resilience index for the enhanced critical infrastructure protection program*. Retrieved from USA:

Fu, G., Wilkinson, S., Dawson, R. J., Fowler, H. J., Kilsby, C., Panteli, M., & Mancarella, P. (2018). Integrated approach to assess the resilience of future electricity infrastructure networks to climate hazards. *IEEE Systems Journal, 12*(4), 3169 - 3180.

Gao, H., Chen, Y., Mei, S., Huang, S., & Xu, Y. (2017). Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1214 - 1233.

Gao, H., Chen, Y., Xu, Y., & Liu, C.-C. (2016). Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2837-2848.

Gholami, A., Shekari, T., Aminifar, F., & Shahidehpour, M. (2016). Microgrid scheduling with uncertainty: The quest for resilience. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2849-2858.

Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

economic impacts of disasters (pp. 289-310). Germany: Springer.

The_National_Academies. (2012a). *Disaster resilience: A national imperative*. USA: The National Academies Press.

The_National_Academies. (2012b). *Terrorism and the electric power delivery system*. USA: The National Academies Press.

Ton, D. T., & Wang, W.-T. P. (2015). A more resilient grid: The US Department of Energy joins with stakeholders in an R&D plan. *IEEE Power and Energy Magazine, 13*(3), 26-34.

Trakas, D. N., Panteli, M., Hatziargyriou, N. D., & Mancarella, P. (2019). Spatial risk analysis of power systems resilience during extreme events. *Risk Analysis, 39*(1), 195-211.

Wang, C., Hou, Y., Qiu, F., Lei, S., & Liu, K. (2017). Resilience enhancement with sequentially proactive operation strategies. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(4), 2847-2857.

Wang, C., Wei, W., Wang, J., Liu, F., Qiu, F., Correa-Posada, C. M., & Mei, S. (2017). Robust defense strategy for gas–electric systems against malicious attacks. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(4), 2953-2965.

Wang, Y., Chen, C., Wang, J., & Baldick, R. (2016). Research on resilience of power systems under natural disasters—A review. *IEEE Transactions on Power Systems, 31*(2), 1604-1613.

Watson, J.-P., Guttromson, R., Silva-Monroy, C., Jeffers, R., Jones, K., Ellison, J., . . . Walker, L. T. (2014). *Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil, and gas sectors in the United States*. Retrieved from USA:

Willis, H. H., & Loa, K. (2015). *Measuring the resilience of energy distribution systems*. Retrieved from USA:

Xiang, Y., Wang, L., & Liu, N. (2018). A Robustness-oriented power grid operation strategy considering attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid, 9*(5), 4248 - 4261.

Xu, X., Mitra, J., Cai, N., & Mou, L. (2014). Planning of reliable microgrids in the presence of random and catastrophic events. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 24*(8), 1151-1167.

Yang, L.-J., Zhao, Y., Wang, C., Gao, P., & Hao, J.-H. (2019). Resilience-oriented hierarchical service restoration in distribution system considering microgrids. *IEEE Access, 7*, 152729-152743.

Yuan, C., Illindala, M. S., & Khalsa, A. S. (2017). Modified Viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency. *IEEE Transactions on Power Delivery, 32*(1), 310-319.

Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C., & Zeng, B. (2016). Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2817-2826.

Zhu, Y., Yan, J., Tang, Y., Sun, Y. L., & He, H. (2014). Resilience analysis of power grids under the sequential attack. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 9*(12), 2340-2354.

امینی‌فر، ف؛ فرهومندی، م، (۱۳۹۷). مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۵ (۳)، صص ۹۱-۸۳.

صابری، ر؛ فلقی، ح؛ اسماعیلی، م، (۱۳۹۹a). شاخصی جدید برای ارزیابی کمی تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۰ (۳)، صص ۴۳-۳۰.

resilience in extreme conditions. *IEEE Transactions on Smart Grid, 8*(2), 589-597.

Ma, S., Chen, B., & Wang, Z. (2018). Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events. *IEEE Transactions on Smart Grid, 9*(2), 1442 - 1451.

Manshadi, S. D., & Khodayar, M. E. (2015). Resilient operation of multiple energy carrier microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(5), 2283-2292.

MEA. (2014). *Maryland resiliency through microgrids: Task force report*. Retrieved from USA:

NERC. (2010). *High-impact, low-frequency event risk to the north american bulk power system*. Retrieved from USA:

Nezamoddini, N., Mousavian, S., & Erol-Kantarci, M. (2017). A risk optimization model for enhanced power grid resilience against physical attacks. *Electric Power Systems Research, 143*, 329-338.

Panteli, M., & Mancarella, P. (2015a). The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine, 13*(3), 58-66.

Panteli, M., & Mancarella, P. (2015b). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research, 127*, 259-270.

Panteli, M., & Mancarella, P. (2017). Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events. *IEEE Systems Journal, 11*(3), 1733 - 1742.

Panteli, M., Mancarella, P., Trakas, D., Kyriakides, E., & Hatziargyriou, N. (2017). Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(6), 4732 - 4742.

Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R., & Mancarella, P. (2017). Power system resilience to extreme weather: Fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(5), 3747-3757.

Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziargyriou, N. D. (2016). Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2913-2922.

Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziargyriou, N. D. (2017). Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies. *Proceedings of the IEEE, 105*(7), 1202 - 1213.

Petit, F. D., Bassett, G. W., Black, R., Buehring, W. A., Collins, M. J., Dickinson, D. C., . . . Peerenboom, J. P. (2013). *Resilience measurement index: An indicator of critical infrastructure resilience*. Retrieved from USA:

Reed, D. A., Kapur, K. C., & Christie, R. D. (2009). Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure. *IEEE Systems Journal, 3*(2), 174-180.

Shao, C., Shahidehpour, M., Wang, X., Wang, X., & Wang, B. (2017). Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience. *IEEE Transactions on Power Systems, 32*(6), 4418 - 4429.

Shinozuka, M., & Chang, S. E. (2004). Evaluating the disaster resilience of power networks and grids. In Y. Okuyama & S. E. Chang (Eds.), *Modeling spatial and*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]

صابری، ر؛ فلقی، ح؛ اسماعیلی، م، (۱۳۹۹b). طراحی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، ۹ (۴)، صص ۴۹-۳۵.

صادقی خمامی، م؛ سپاسیان، م، (۱۳۹۸). برنامه‌ریزی بازیابی پیش از وقوع تندباد شبکه‌های توزیع فشار متوسط با هدف بهبود مدیریت بحران پیش‌اقدامانه، نشریه مدیریت بحران، ۱۵، صص ۸۹-۷۷.

علیزاده، م؛ غفارپور، ر؛ رنجبر، ع، (۱۳۹۹). بهینه‌سازی سه‌سطحی مقاوم مشارکت واحدها مقید به امنیت با هدف تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت با نفوذ بالای منابع اتکاناپذیر، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۷ (۲)، صص ۱۲۱-۱۱۳.

منعمی، م؛ حسن‌پور دربان، س، (۱۳۹۶). مدل تاب‌آور برنامه‌ریزی ورود و خروج واحدهای نیروگاهی با هدف کنترل سریع فرکانسی شبکه در حضور واحدهای مجهز به چرخ لنگر، مجله عصر برق، ۴ (۶)، صص ۳۰-۱۶.

منعمی، م؛ حسن‌پور دربان، س، (۱۳۹۷). مسأله در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی با هدف افزایش تاب‌آوری شبکه، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۴۸ (۴)، صص ۱۷۹۴-۱۷۸۵.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.2.9]