



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 2, 2023
Research Paper

Systematic Topological Assessment of Power System for Restoration Process Based on the Fractal Dimension

Noureyeh Zahiroidin¹, Mahtab Khalilifar¹, S. Mohammad Shahrtaash¹

¹ Center of Excellence for Power System Automation and Operation (CEPSAO), Iran
University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Despite the extensive studies that have been done regarding the restoration problems and issues of power systems, the impact of the topological extent of the power grid structure on power system restoration has not been analyzed or assessed. This objective, which is neglected in the process of planning and development of transmission systems, could make operators encounter more challenges during the restoration process and prolongation of the restoration procedures. In this study, an attempt is made to evaluate the desirability of a power system network structure according to the main requirement of the restoration process, i.e. restoration time. To address this concern, a systematic approach on the basis of a fractal-based quantitative index is introduced to measure the topological extent of a power system network as a representative of restoration time. The proposed approach combines the feeding point condition, topological extent, and support routes to deliver an index associated with the time and success probability of the power system restoration process.

Keywords: Topological assessment, power system restoration, fractal dimension.



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



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2023.135446.1588>

مقاله پژوهشی

ارزیابی سیستماتیک مطلوبیت ساختار شبکه برق برای اجرای فرآیند بازیابی مبتنی بر عدد

فراکتال برای توپولوژی شبکه

نوریه ظهیرالدین^۱، مهتاب خلیلی فر^۲، سید محمد شهرتاش^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

n_zahiroddin@elec.iust.ac.ir

۲- محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

mahtab_khalilifar@mail.iust.ac.ir

۳- استاد، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت، دانشگاه علم و صنعت

ایران، تهران، ایران

shahrtash@iust.ac.ir

چکیده: با وجود مطالعات گسترده در خصوص چالش‌ها و مسائل مرتبط با بازیابی شبکه‌های برق، تا کنون نظم و پراکندگی ساختار شبکه برق از منظر نیاز مبرم در اجرای فرآیند بازیابی و به‌عنوان شاخص معادلی با قابلیت اطمینان شبکه و مدت زمان بازیابی بررسی نشده است. بی‌توجهی به این امر در طرح توسعه شبکه انتقال باعث شده است راهبران شبکه در اجرای فرآیند بازیابی با چالش‌های بیشتری مواجه شوند که ممکن است به طولانی‌شدن اجرای فرآیند بازیابی منجر شود. هدف این مقاله، پاسخ به چگونگی ارزیابی سیستماتیک مطلوبیت ساختار شبکه (یا توسعه آن) برای اجرای فرآیند بازیابی موفق است. در این راستا با معرفی روشی سیستماتیک بر حسب شرایط تغذیه در حین بازیابی، وسعت جغرافیایی شبکه و نیز وجود مسیرهای تقویتی که توسط شاخص کمی مبتنی بر عدد فراکتال برای توپولوژی شبکه صورت می‌گیرد، شاخصی را معادل مدت زمان و احتمال موفقیت بازیابی در یک شبکه انتقال ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی مطلوبیت ساختار شبکه، بازیابی، عدد فراکتال.

۱- مقدمه

است که در صورت وقوع می‌تواند اثرات درخور توجهی نه تنها بر شبکه برق، بلکه بر بخش‌های مختلف جامعه گذارد [۲]؛ زیرا تمامی زیرساخت‌های حیاتی جامعه از جمله حوزه انرژی، سلامت، بانکداری، آب، گاز، حمل‌ونقل و مخابرات به‌نوعی وابسته به برق هستند [۳]؛ بنابراین، لازم است تا حد امکان از وقوع خاموشی در شبکه‌های برق جلوگیری کرد و در صورت وقوع آن، هرچه سریع‌تر به بازیابی شبکه پرداخت تا بتوان به‌صورت پیوسته، ایمن و مطمئن پاسخگوی نیاز جامعه بود.

عوامل متعددی بر بهره‌برداری ایمن و مطمئن شبکه برق اثر می‌گذارد. این عوامل شامل عدم کنترل صحیح شبکه

با توجه به توسعه ابعاد و پیچیدگی‌های شبکه برق و نیز مشکلات اقتصادی و در نتیجه آن، بهره‌برداری شبکه‌ها در نزدیک مرز پایداری، احتمال وقوع خاموشی‌های سراسری افزایش یافته است [۱]. خاموشی شبکه برق از جمله حوادثی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

نام نویسنده مسئول: سید محمد شهرتاش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت

ایران- کلینیک برق ایران

ریزشبکه‌هایی که با انرژی‌های تجدیدپذیری چون انرژی‌های خورشیدی و بادی کار می‌کنند، جایگزین شبکه کنونی کنند [۶].

بنابراین، این سؤال مطرح می‌شود که مطلوبیت ساختار یک شبکه از منظر بازیابی را چگونه می‌توان ارزیابی کرد و بر مبنای آن نسبت به بهبود آن اقدام کرد. آیا با تغییر ساختار شبکه، برای مثال اضافه کردن منابع خودراه‌انداز، روند بازیابی شبکه لزوماً تسریع می‌یابد یا ایجاد تغییرات در بخش‌های کلیدی شبکه انتقال به‌تنهایی کفایت می‌کند. با استفاده از کدام شاخص ارزیابی می‌توان تأثیرگذاری اقدامات و پیشنهادات برای بهبود وضعیت بازیابی شبکه را مقایسه کرد و کفایت اقدامات را برای رسیدن به مطلوبیت ساختار شبکه از منظر معیارهای بازیابی سنجید.

بر این اساس، نیاز به تعریف شاخص کمی برای ارزیابی وضعیت ساختار شبکه از منظر خاموشی و قبل از وقوع احساس می‌شود تا به کمک آن بتوان نقاط ضعف و قوت ساختار شبکه را سنجید و در صورت امکان، برای توسعه شبکه انتقال، مشکلات احتمالی را مرتفع کرد و وضعیت شبکه را بهبود بخشید.

در ادامه، ابتدا مروری بر ادبیات موضوع شامل موضوع بازیابی و شاخص‌های موجود برای ارزیابی ساختار شبکه از منظر بازیابی صورت می‌گیرد. در بخش سوم، شاخص پیشنهادی برای ارزیابی ساختار شبکه، مطرح و صحت‌سنجی می‌شود و سپس نتایج عددی برای سه شبکه واقعی محاسبه و ارزیابی می‌شوند. در نهایت، در بخش چهارم، جمع‌بندی از مسائل مطرح‌شده آورده شده است.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱- موضوع بازیابی

بازیابی شبکه برق پس از خاموشی جزئی یا سراسری یک فرآیند کاملاً پیچیده است. در این فرآیند، چالش‌ها و مسائل فنی متفاوتی از جمله نوع حادثه، ساختار شبکه از نقاط مبدأ بازیابی (شامل واحدهای خودراه‌انداز یا

برق، عدم عملکرد صحیح شبکه حفاظتی، بروز حوادث طبیعی مانند زلزله، طوفان و سیل، حملات تروریستی سایبری و فیزیکی، و مواردی از این قبیل اند [۳، ۴] که طبق بررسی‌های صورت‌گرفته، حوادث طبیعی، علت اصلی وقوع خاموشی در شبکه برق هستند [۳-۵]. با توجه به ماهیت پیش‌بینی‌ناپذیر حوادث طبیعی، وقوع خاموشی در ابعاد مختلف پیامدی پیش‌بینی نشده است؛ از این رو، بازیابی هرچه سریع‌تر شبکه نقش مهمی در کاهش خسارت‌های فنی و غیرفنی دارد.

اگرچه مطالعات گسترده‌ای درخصوص نحوه رویارویی با خاموشی و بازیابی شبکه برق صورت گرفته است، حوزه ارزیابی وضعیت ساختار یک شبکه از منظر بازیابی و وجود شاخص‌های کمی و معیارهایی که با به‌کارگیری آنها بتوان نظم و پراکندگی شبکه‌های مختلف را نسبت به یکدیگر سنجید و مدیران و مسئولین ذی‌ربط درخصوص توسعه ساختار شبکه به این شاخص برای تصمیم‌گیری توجه و استناد کنند، در این مقاله برای نخستین بار مبنای تحقیق قرار گرفته است.

برای مثال، در سپتامبر ۲۰۱۷ میلادی، وقوع طوفان ماریا در پورتوریکو به خاموشی سراسری این جزیره منجر شد. پس از گذشت سه ماه از وقوع خاموشی و انجام اقدامات لازم در راستای بازیابی، تنها برق ۵۵ درصد از ساکنان ۱/۵ میلیون نفری، جزیره تأمین شد تا اینکه سرانجام در آگوست سال ۲۰۱۸ میلادی (حدود یک سال بعد)، برق کل جزیره تأمین شد. این خاموشی، طولانی‌ترین خاموشی رخ داده در قاره آمریکا و از جمله خاموشی‌های طولانی‌مدت جهان با ۳/۴ میلیارد نفر - ساعت بی‌برقی است [۶].

به گفته مسئولین شبکه، پراکندگی نیروگاهها و فاصله زیاد آن از بارهای اصلی شبکه، یکی از عوامل مؤثر در طولانی شدن مدت زمان بازیابی بوده است؛ به نحوی که نیروگاهها در سواحل جنوبی جزیره واقع شده‌اند؛ در حالی که بارهای حساس شبکه چون پایتخت در شمال جزیره قرار دارند. این مهم، مسئولان آن شبکه را به این فکر واداشت تا برای جلوگیری از وقوع حوادث مشابه، ساختار

پشتیبان بازیابی [۸، ۱۸].

همچنین، برای افزایش سرعت بازیابی، قابلیت اطمینان [۱۴] و پایداری شبکه [۱۹] و کاهش مدت زمان، هزینه [۸]، تلفات و تعداد کلیدزنی‌ها [۱۶]، توابع هدف با در نظر گرفتن قیود، حدود مجاز، عدم قطعیت‌ها [۱۹] و حفظ امنیت سایبری [۸] تعریف شده‌اند و معمولاً با استفاده از الگوریتم‌های چندمعیاره، ژنتیک، یادگیری ماشین، تئوری گراف و درخت تصمیم، کنترل منطق فازی، تئوری شبکه پیچیده و ... حل شده‌اند [۱۶] و تا کنون شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی وضعیت شبکه از منظر ساختار شبکه حین بازیابی مطرح شده‌اند که در ادامه آورده شده‌اند.

۲-۲- شاخص‌های موجود برای ارزیابی ساختار

شبکه

مسائل مربوط به توپولوژی و ساختار شبکه در دو دسته مسائل فنی مربوط به ساختار کلی شبکه و مسائل فنی مربوط به تجهیزات شبکه تقسیم‌بندی می‌شوند که شاخص‌های موجود متمرکز بر مسائل فنی مربوط به تجهیزات شبکه‌اند. این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

- شاخص ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه؛
- شاخص ارزیابی میزان در دسترس بودن تجهیزات در مقابل حادثه؛
- شاخص بهره‌وری بازآرایی شبکه؛
- شاخص تاب‌آوری شبکه و ژنراتورهای آن؛
- شاخص ارزیابی روند بازیابی (پس از بازیابی).

با توجه به جدول ۱، شاخص‌های موجود معیاری برای ارزیابی آسیب‌پذیری، در دسترس بودن، بهره‌وری، تاب‌آوری تجهیزات شبکه و استحکام آن در روند بازیابی هستند و شاخصی برای ارزیابی وضعیت ساختار شبکه قبل از وقوع خاموشی از منظر اجرای فرآیند بازیابی وجود ندارد و این ارزیابی صرفاً براساس حدس و گمان در ذهن افراد انجام می‌گیرد؛ در حالی که بررسی این امر، لازمه سیاست‌گذاری‌های توسعه‌ای بخش تولید و انتقال شبکه است. در این مقاله، شاخصی به‌منظور ارزیابی مطلوبیت

ایستگاه‌های درگاهی، رفتار شبکه، در دسترس بودن تجهیزات و ... بر مدت زمان بازیابی و موفقیت‌آمیز بودن آن تأثیرگذار است. همچنین، به حجم زیادی از تجزیه و تحلیل‌ها و تأییدیه‌ها نیاز است که در کنار آن اقداماتی نظیر تصمیم‌گیری و اعزام افراد مربوطه نیز باید صورت گیرد. بنابراین، بازیابی شبکه برق یک مسئله چندهدفه با بهینه‌سازی چندمرحله‌ای، چندمتغیری و چندقیدی است که غیرخطی است و عدم قطعیت هم دارد [۷، ۸].

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در خصوص طراحی برنامه بازیابی و نحوه پیاده‌سازی آن با در نظر گرفتن مسائل فنی و کنترلی از جمله راهبرد بازیابی و نقطه شروع، چگونگی تأمین توان مورد نیاز [۹]، نحوه برقرارکردن تجهیزات شبکه به خصوص خطوط و ترانسفورماتورها و بازیابی بارهای سرد با هدف کاهش مدت زمان بازیابی، ملاحظات حفاظتی (اضافه‌ولتاژها [۱۰] و ...) و حفظ هماهنگی شبکه برای بازیابی ایمن، مطمئن و پایدار شبکه انجام شده است [۱۱] که به‌طور کلی، این اقدامات عبارت‌اند از:

- نحوه پیش‌بینی حوادث احتمالی و وسعت آن با ارزیابی تاب‌آوری شبکه و آسیب‌پذیری و دسترس‌پذیری تجهیزات آن [۵، ۱۲-۱۵]؛
- داشتن راه‌حل متناسب با علل وقوع خاموشی و یا گسترده‌گی خاموشی [۱۶]؛
- نحوه مدل‌سازی شبکه و تجهیزات آن بعد از خاموشی و حین بازیابی [۸، ۱۱]؛
- تهیه و بهبود برنامه بازیابی براساس میزان موفقیت‌آمیز بودن آن [۱۱]؛
- نحوه پیاده‌سازی برنامه بازیابی با بررسی مسائل دینامیکی و حفاظتی [۱۰، ۲۳]؛
- نحوه انجام تمرینات دورمیزی، پیاده‌سازی و اجرای برنامه بازیابی [۱۷]؛
- تهیه، نگهداری و به‌روزرسانی مستندات شامل پایگاه اطلاعات، گزارش‌ها و دستورالعمل‌های بازیابی [۱۶]؛
- طراحی و پیاده‌سازی برنامه‌های تصمیم‌گیری

ساختار شبکه پیشنهاد می‌شود.

شمارش جعبه‌ای است که علاوه بر سادگی، نتایج آن از دقت زیادی برخوردار است. برای محاسبه بعد فراکتالی به روش شمارش جعبه‌ای لازم است تا مراحل زیر انجام شود:

(۱) کل فضای مورد مطالعه به وسیله شبکه‌های مربعی پوشیده شود.

(۲) تعداد مربع‌هایی که متغیر مدنظر را پوشش می‌دهند، شمارش شود.

(۳) مرحله اول و دوم به‌ازای شبکه‌های مربعی با ابعاد و مساحت کمتر (مقیاس دقیق‌تر) تکرار شود.

معمولاً از روش شمارش فوق در دستگاه لگاریتمی به‌منظور بررسی چگونگی پراکنش پدیده مدنظر استفاده می‌شود. برای این کار از طرفین رابطه (۱) لگاریتم، گرفته و به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned} \log N_n &= \log C - FD * \log R_n \\ &= c + FD * \log \left(\frac{1}{R_n} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$y = c + FD * x \quad (3)$$

که N_n برابر با تعداد مربع‌هایی است که پدیده مدنظر در ضریب مقیاس مربوطه (R_n) قرار دارد و c برابر با مقدار لگاریتم ضریب ثابت C است. مبتنی بر مرحله سوم روش شمارش جعبه‌ای، می‌توان در صفحه مختصات y بر حسب x مقادیر y را برای مقادیر مختلف x مشخص کرد. سپس با برازش خطی با فرمولاسیون مشابه رابطه (۳)، خطی با کمینه مربعات خطا رسم کرد که شیب این خط، همان بُعد فراکتال کلی (FD) است.

۳-۲- تعریف شاخص پیشنهادی

در این بخش، ابتدا شاخص فراکتالی پیشنهادی برای بررسی شکل عمومی شبکه در راستای بازیابی شبکه (با فرض امکان راهبری هم‌زمان مسیرهای مستقل) تعریف و نحوه محاسبه آن، مطابق روندنمای شکل ۱، مطرح می‌شود. برای محاسبه شاخص فراکتالی لازم است تا مراحل زیر انجام شود:

(۱) رسم یک دایره به مرکز محل تغذیه (واحد خودراه‌انداز/ ایستگاه درگاهی) تا دورترین نقطه

جدول (۱): شاخص‌های موجود برای ارزیابی ساختار

شبکه از منظر بازیابی

مرجع	توپولوژی و ساختار شبکه	
	مسائل فنی	تجهیزات
[۴]	ارزیابی آسیب‌پذیری	خطوط و ترانسفورماتورها
[۱۲]	ارزیابی استحکام	ساختار شبکه
[۱۶]	ارزیابی تاب‌آوری	خطوط
[۲۰]	ارزیابی در دسترس بودن	تجهیزات
[۲۱]	ارزیابی بهره‌وری بازآرایی	بارها
[۲۲]	ارزیابی تاب‌آوری	ژنراتورها
[۲۳]	ارزیابی روند بازیابی پس از بازیابی	بارها

۳- شاخص پیشنهادی برای ارزیابی ساختار

شبکه

منظم بودن و میزان پراکندگی شبکه برق نقش مؤثری در مدت زمان بازیابی دارد که تا کنون شاخصی برای ارزیابی آن مطرح نشده است. یکی از روش‌های رایج در ارزیابی نظم و پراکنش یک پدیده، استفاده از روش فراکتال و محاسبه بُعد فراکتالی آن پدیده است. در این مقاله مبتنی بر این مفاهیم، شاخصی برای ارزیابی ساختار شبکه برق از منظر بازیابی پیشنهاد شده است.

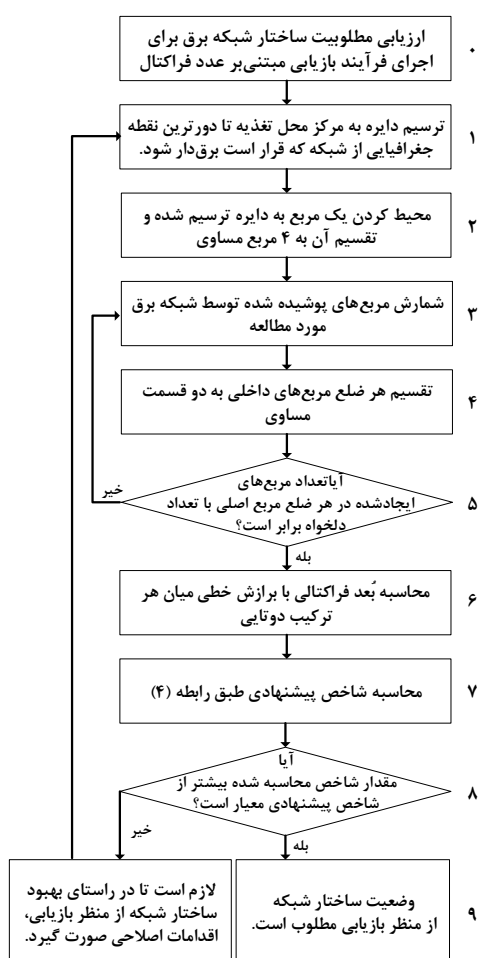
۳-۱- فراکتال

هر پدیده در جهان دارای درجه‌ای از نظم است؛ اگرچه ممکن است در آن بی‌نظمی هم دیده شود. یکی از روش‌های کمی‌سازی نظم هر پدیده، محاسبه بُعد فراکتال است که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۴، ۲۵].

$$N_n = \frac{C}{R_n^{FD}} \quad (1)$$

در این رابطه N_n تعداد متغیرهای موجود برای یک پدیده، C ضریب ثابت، R_n ضریب مقیاس و FD بُعد فراکتال است. روش‌های متعددی برای محاسبه بُعد فراکتال وجود دارد که یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین آنها، روش

بازیابی هرچه سریع‌تر شبکه وجود خواهد داشت. (۹) درنهایت، اگر نمودار شبکه مورد مطالعه (نموداری مشابه شکل ۳)، بالاتر از نمودار شبکه معیار - شکل ۳ - باشد، آنگاه ساختار شبکه مورد مطالعه از نظر بازیابی وضعیت مطلوبی دارد؛ اما در صورتی که نمودار شبکه مورد مطالعه پایین‌تر از نمودار شبکه معیار باشد و این اختلاف قابل توجه باشد، آنگاه لازم است تا در راستای بهبود ساختار شبکه از منظر بازیابی، اقدامات اصلاحی صورت گیرد.



شکل (۱): روندنمای نحوه محاسبه شاخص پیشنهادی

۳-۳- تعریف و صحت‌سنجی نمودار معیار

در این بخش، شاخص حداقل ایده‌آل برای شبکه هشت‌پر منظم به‌عنوان نمودار معیار، تعریف و سپس صحت آن با تغییر نظم حاکم بر شبکه ارزیابی می‌شود.

جغرافیایی از شبکه که قرار است مسیر بازیابی از آن عبور کند؛

(۲) یک مربع به دایره مذکور محیط شود و به چهار مربع مساوی تقسیم شود ($N_{total}=4$)؛

(۳) مربع‌های پوشیده‌شده توسط شبکه برق مورد مطالعه شمارش شود (N_n)؛

توجه: در صورتی که در هنگام شمارش مربع‌های پوشیده‌شده توسط شبکه برق، مسیر دو مداره وجود داشته باشد، آنگاه تعداد مربع‌های شمارش‌شده برای آن مسیر، دو برابر شود.

(۴) هر ضلع مربع‌های داخلی به دو قسمت تقسیم شود ($N_{total}^{new} = N_{total}^{old} * 4$).

(۵) مرحله سوم و چهارم تکرار شوند تا تعداد مربع‌های ایجادشده در هر ضلع مربع اصلی از مقدار دلخواه بیشتر شود. در این مقاله، مقدار دلخواه برابر با ۳۲ انتخاب شده است.

(۶) حال، به‌ازای هر ترکیب دو تایی N_n و N_{total} در صفحه مطابق شکل ۳ و برآزش خطی مطابق رابطه (۳)، مقدار FD کل و C محاسبه شود.

(۷) با داشتن مقدار FD کل و C، شاخص پیشنهادی (V_{ratio}) طبق رابطه زیر محاسبه شود.

$$V_{ratio} = \frac{N_n}{N_{total}} = \frac{C \left(\frac{1}{R_n^{FD}} \right)}{A \left(\frac{1}{R_n^2} \right)} = \frac{C}{A} R_n^{2-FD} \quad (۴)$$

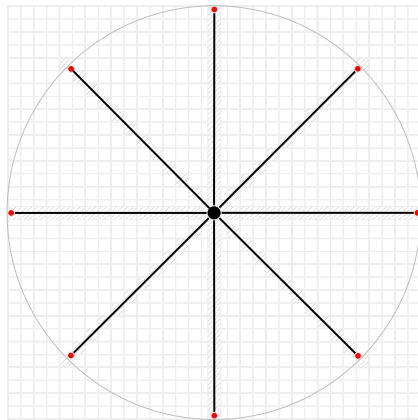
که A طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$A = \frac{C}{c} \quad (۵)$$

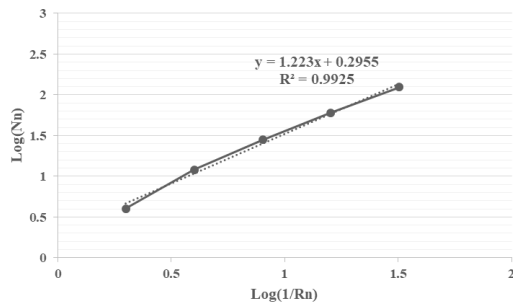
(۸) پس از محاسبه V_{ratio} ، مقدار آن به‌ازای X رسم شود

تا با مقدار حداقل شاخص پیشنهادی معیار مقایسه شود.

توجه: شاخص پیشنهادی معیار (حداقل ایده‌آل) به‌ازای شبکه منظمی تعریف می‌شود که محل تغذیه در مرکز آن قرار دارد و نقاط بار به‌صورت مستقیم و به یک فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند (مانند شکل ۲). در این صورت با توجه به اینکه تمامی نقاط بار، دسترسی مستقیم به محل تغذیه دارند، آنگاه امکان برقرارکردن هم‌زمان چند مسیر و



شکل (۲): شبکه هشت پر منظم (شبکه معیار)



شکل (۳): نمودار فراکتالی شبکه هشت پر منظم (نمودار معیار)

جدول (۲): تعداد مربعها و مقدار شاخص حداقل ایده آل در

هر مرحله

مقدار معیار (V_{ratio})	تعداد مربعهای پوشیده شده (N_n)	تعداد کل مربعها (N_{total})	ضریب مقیاس ($1/R_n$)
۰/۵۱	۴	۴	۲
۰/۸۶	۱۲	۱۶	۴
۱/۴۹	۲۸	۶۴	۸
۲/۵۵	۶۰	۲۵۶	۱۶
۴/۳۷	۱۲۴	۱۰۲۴	۳۲

• شبکه هشت پر منظم (شبکه معیار): در صورتی که فرض شود در مرکز شبکه، یک واحد خودراه انداز قرار دارد و با هشت مسیر هم اندازه، این واحد خودراه انداز، به تمامی نقاط بار شبکه با فاصله یکسان متصل است، آنگاه تعداد مربعهای پوشیده شده در هر مرحله برابر با مقادیر ستون سوم جدول ۲ خواهد بود و نمودار فراکتالی آن مشابه شکل ۳ به دست می آید. با مشخص شدن مقادیر FD و c ، V_{ratio} طبق مرحله هفتم روش پیشنهادی محاسبه می شود. مقادیر معیار در ستون چهارم جدول ۲ و نمودار معیار در شکل ۳ مشاهده می شوند.

حال در صورت بروز خاموشی در شبکه هشت پر منظم، پس از درمدار آمدن واحد خودراه انداز آن، برقرار کردن هشت مسیر در دستور کار قرار می گیرد. برای برقرار شدن این مسیرها (که به موازات هم قابل برقرار شدن هستند) کافی است تا دو کلیدزنی، انجام و توان مورد نیاز نقاط بار تأمین شود. اگر مدت زمان هر کلیدزنی t دقیقه لحاظ شود (مقدار متداول هر کلیدزنی برابر با ۵ دقیقه است)، آنگاه مدت زمان بازیابی مسیرهای شبکه هشت پر منظم برابر با $2t$ یا ۱۰ دقیقه خواهد بود.

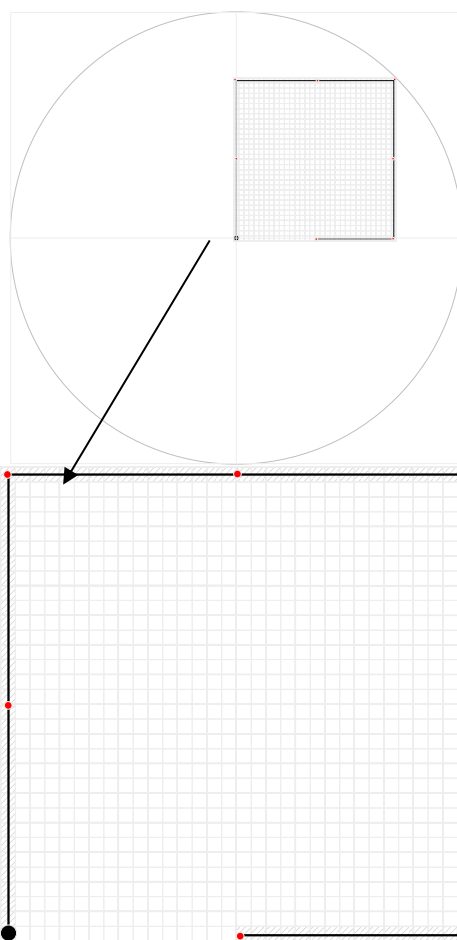
• شبکه دارای مسیر کاملاً سریال: در صورتی که مطابق شکل ۴ شبکه کاملاً به صورت سریال فرض شود، یعنی محل تغذیه در گوشه سمت چپ و پایین شکل مربع قرار داشته و آخرین نقطه بار در وسط ضلع پایینی مربع باشد و تنها از طریق یک مسیر به نقطه بار وصل شود، آنگاه نمودار فراکتالی آن طبق شکل ۵ به دست می آید.

در این مسیر با توجه به سریال بودن آن، لازم است تا تمامی خطوط میان واحد خودراه انداز تا آخرین نقطه بار برقرار شود تا شبکه بازیابی شود. در این صورت، مدت زمان بازیابی شبکه با مسیر کاملاً سریال برابر با $14t$ یا 70 دقیقه خواهد بود.

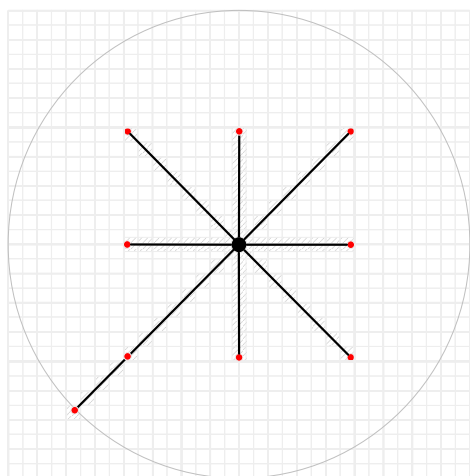
صورت، حداکثر زمان بازیابی شبکه 4t یا ۲۰ دقیقه است.

• شبکه هشت‌پر منظم با یک مسیر تقویتی: در صورتی که یکی از مسیرهای ساختار شبکه هشت‌پر منظم با یک خط مطابق شکل ۸ تقویت شده باشد، آنگاه نمودار فراکتالی آن مشابه شکل ۹ خواهد بود.

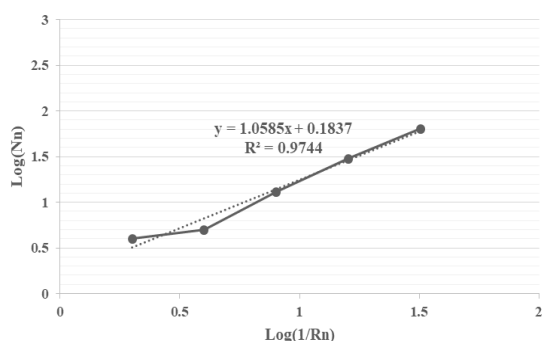
با تقویت ساختار شبکه هشت‌پر منظم، قابلیت اطمینان آن تصریحاً افزایش و مقدار شاخص پیشنهادی نیز افزایش می‌یابد. شایان ذکر است برقرارکردن خط دوم (مسیر تقویتی)، پس از برقرارشدن مسیر اصلی در دستور کار قرار می‌گیرد؛ بنابراین، مدت زمان بازیابی برابر با 4t یا ۲۰ دقیقه می‌شود.



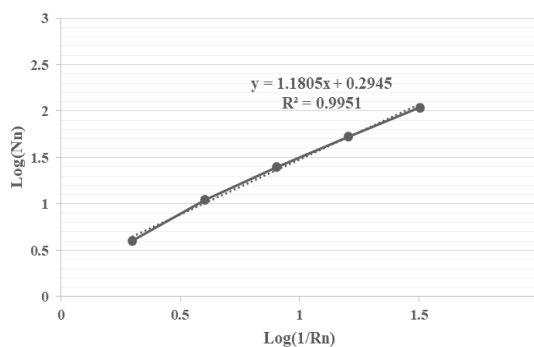
شکل (۴): شبکه دارای مسیر کاملاً سریال



شکل (۶): شبکه هشت‌پر نامنظم



شکل (۷): نمودار فراکتالی شبکه هشت‌پر نامنظم



شکل (۵): نمودار فراکتالی شبکه دارای مسیر کاملاً سریال

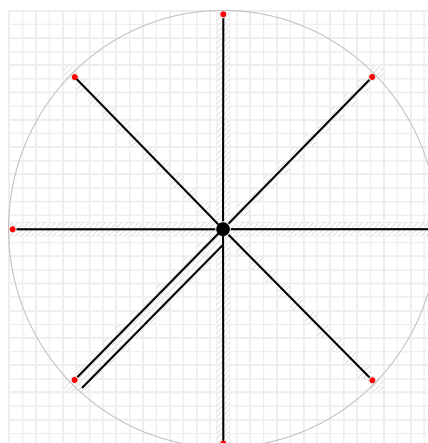
• شبکه هشت‌پر نامنظم: اگر شبکه هشت‌پر منظم دارای یک مسیر با طول متفاوت از سایر مسیرها مطابق شکل ۶ باشد، آنگاه نمودار فراکتالی آن مشابه شکل ۷ به دست می‌آید.

تفاوت این شبکه با شبکه هشت‌پر منظم در اضافه‌شدن یک خط سریال در امتداد یکی از مسیرها است که در این

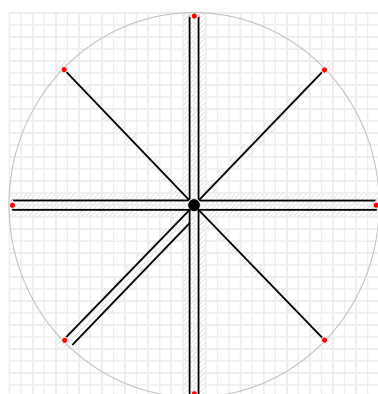
ارزیابی سیستماتیک مطلوبیت ساختار شبکه برق برای اجرای فرآیند بازیابی مبتنی بر عدد فراکتال برای توپولوژی شبکه

شاخص معیار (شبکه هشت پر منظم)، نمودار ۲، شاخص مسیر کاملاً سریال، نمودار ۳، شاخص شبکه هشت پر نامنظم، نمودار ۴ و نمودار ۵ شاخص شبکه هشت پر منظم به ترتیب با یک مسیر دومااره و پنج مسیر دومااره مشاهده می شود.

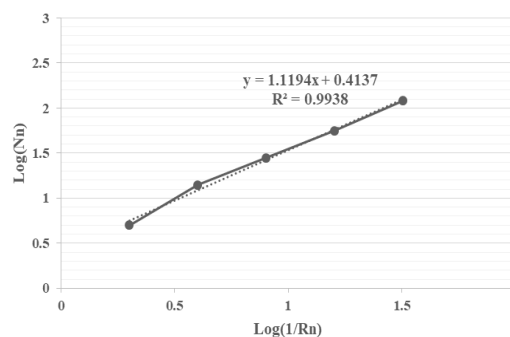
همان طور که ملاحظه می شود نمودار ۲ پایین ترین نمودار و دارای کمترین مقدار است که با توجه به نبود مسیر جایگزین و طولانی بودن آن انتظار می رفت فرآیند



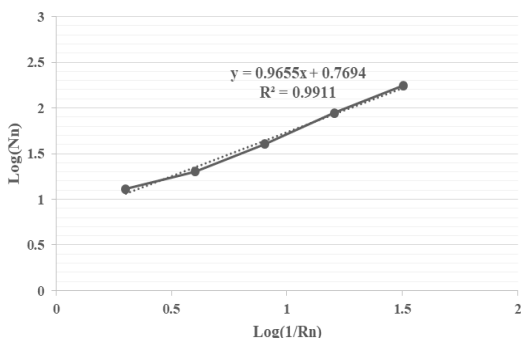
شکل (۸): شبکه هشت پر منظم با یک مسیر دومااره



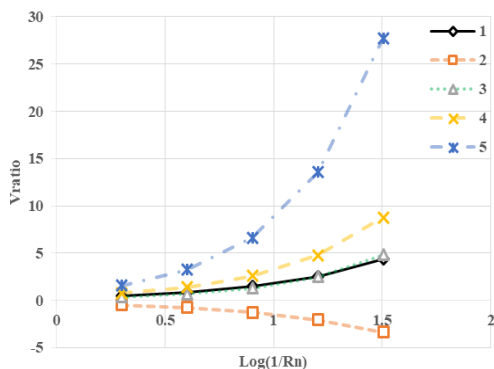
شکل (۱۰): شبکه هشت پر منظم با پنج مسیر دومااره



شکل (۹): نمودار فراکتالی شبکه هشت پر منظم با یک مسیر دومااره



شکل (۱۱): نمودار فراکتالی شبکه هشت پر منظم با پنج مسیر دومااره



شکل (۱۲): مقایسه شاخص پیشنهادی برای شبکه معیار و

• شبکه هشت پر منظم با پنج مسیر تقویت: در صورتی که ساختار شبکه هشت پر منظم با دومااره شدن پنج عدد از خطوط آن مطابق شکل ۱۰ تقویت شود، آنگاه نمودار فراکتالی آن مشابه شکل ۱۱ خواهد بود.

همان طور که اشاره شد در این شبکه نیز قابلیت اطمینان و مقدار شاخص پیشنهادی افزایش می یابد. با توجه به اینکه برقرار کردن مدار دوم، پس از برقرار شدن مسیره های اصلی در دستور کار قرار می گیرد و با توجه به ساختار شبکه که امکان برقرار کردن تمامی مدارهای دوم به صورت هم زمان وجود دارد، مدت زمان بازیابی این شبکه نیز 4t یا ۲۰ دقیقه می شود.

ارزیابی شبکه های معیار و مثالی: طبق بند ۷ بخش ۲-

۳، پس از تعیین مقادیر FD و c، شاخص پیشنهادی برای هر شبکه، محاسبه و در صفحه مختصات بر حسب $\log(1/R_n)$ ترسیم می شود که در شکل ۱۲، نمودار ۱،

چهار شبکه مثالی

بازیابی آن بسیار زمان بر باشد و ساختار این شبکه از منظر اجرای فرآیند بازیابی نامطلوب شود. این در حالی است که اگر شبکه هشت پر منظم یک مسیر طولانی داشته باشد، طبق نمودار ۳، شاخص پیشنهادی آن اگرچه کمتر از معیار خواهد بود، فاصله آن از نمودار ۱ قابل چشم پوشی است. نمودار ۴ و ۵، بالاتر از شاخص معیار (حداقل ایده آل) قرار دارند؛ زیرا وجود هر مسیر موازی ساختار شبکه را از منظر بازیابی بهبود می دهد.

۳-۴- محاسبه شاخص پیشنهادی برای چند

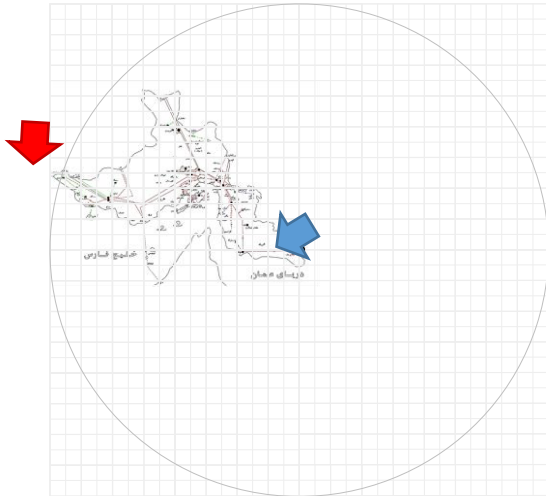
شبکه واقعی

در این بخش، ساختار و نمودار فراکتالی برای شبکه برق منطقه ای هرمزگان و شبکه برق منطقه ای باختر و شبکه برق کشور پورتوریکو محاسبه شده است که نتایج آن در شکل های ۱۳ تا ۱۸ آورده شده اند. در شکل های ۱۳، ۱۵ و ۱۷ فلش آبی رنگ، محل تغذیه و فلش قرمز رنگ، دورترین نقطه جغرافیایی از شبکه را مشخص کرده اند. شایان ذکر است محل تغذیه (فلش قرمز) در شبکه برق هرمزگان با توجه به نبود واحد خودراه انداز در این شبکه از یکی از ایستگاه های درگاهی (ایستگاه ۲۳۰ کیلوولت زرآباد) در نظر گرفته شده است. در شبکه برق باختر فلش قرمز روی موقعیت جغرافیایی نیروگاه خودراه انداز سد رودبار قرار گرفته است و در شبکه برق پورتوریکو نیز از آنجایی که محل تغذیه این شبکه در جنوب آن قرار دارد، یکی از نیروگاه های واقع در جنوب جزیره، محل تغذیه آن لحاظ شده است.

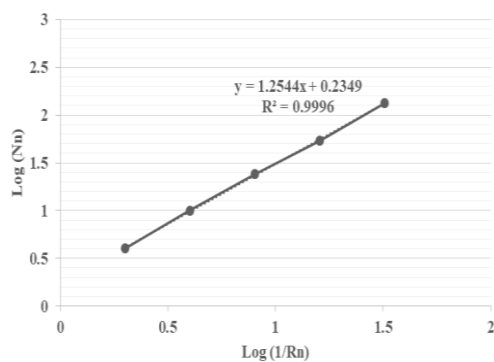
در ادامه، شاخص پیشنهادی هر شبکه به صورت نموداری در شکل ۱۹ ترسیم شده و با شاخص معیار (همان شاخص به دست آمده برای شبکه هشت پر منظم یا شاخص حداقل ایده آل) مقایسه شده است.

در شکل ۱۹، نمودار ۱، نتایج عددی شاخص پیشنهادی شبکه معیار و سه نمودار دیگر به ترتیب نتایج عددی شاخص پیشنهادی مربوط به شبکه هرمزگان، باختر و پورتوریکو نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود در مقایسه با شبکه معیار، ساختار شبکه و فاصله قابل توجه

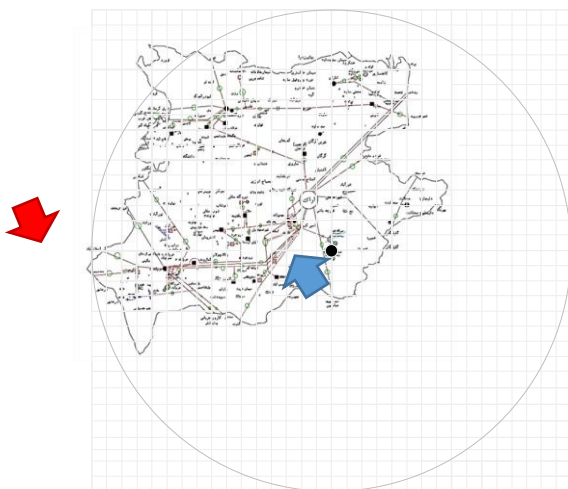
منابع توان تا ایستگاه های بار، یکی از عوامل طولانی شدن



شکل (۱۳): ایجاد شبکه مربعی روی دیاگرام تک خطی شبکه برق هرمزگان (سطح ولتاژ ۱۳۲، ۲۳۰، ۴۰۰ کیلوولت)



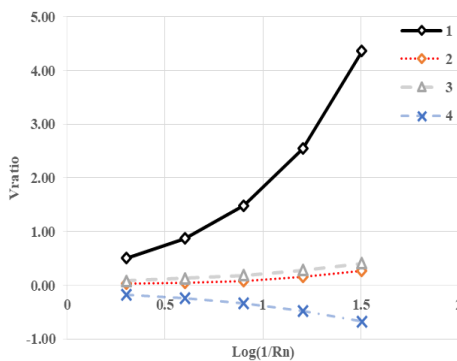
شکل (۱۴): نمودار فراکتالی شبکه برق هرمزگان



شکل (۱۵): ایجاد شبکه مربعی روی دیاگرام تک خطی شبکه برق باختر (سطح ولتاژ ۱۳۲، ۲۳۰، ۴۰۰ کیلوولت)

ارزیابی سیستماتیک مطلوبیت ساختار شبکه برق برای فرآیند بازیابی مبتنی بر عدد فراکتال برای توپولوژی شبکه

از مدت زمان موردنیاز برای بازیابی شبکه معیار است؛ بنابراین، برای افزایش قابلیت اطمینان آنها و کاهش مدت زمان بازیابی، بهبود ساختار این شبکه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس، لازم است موضوع ارتقای مطلوبیت ساختار آنها از منظر بازیابی، در طرح‌های توسعه این شبکه‌ها مدنظر قرار گیرد.



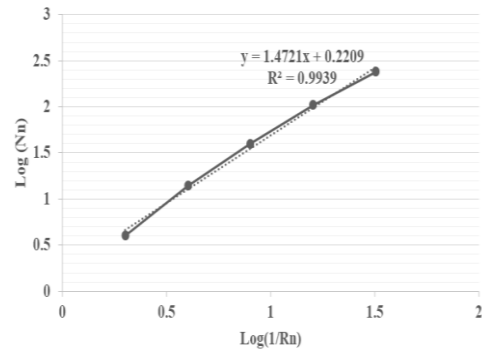
شکل (۱۹): مقایسه شاخص پیشنهادی برای سه شبکه واقعی

۴- نتیجه گیری

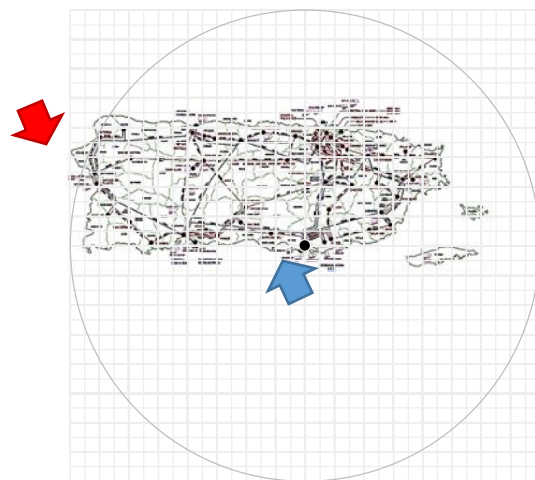
عوامل متعددی بر مدت زمان بازیابی شبکه پس از خاموشی اثرگذارند که ساختار توپولوژیکی شبکه، یکی از این عوامل است. در مقاله حاضر، شاخص کمی و شبکه معیار برای ارزیابی نظم ساختاری شبکه‌های برق مبتنی بر بُعد فراکتال تعریف شد و نتایج عددی به‌زای چند شبکه فرضی و واقعی بررسی و ارزیابی شدند. با کمک این شاخص می‌توان میزان قابلیت اطمینان شبکه را تصریحاً و مدت زمان بازیابی شبکه را تلویحاً سنجید و قدمی در راستای بهبود وضعیت ساختار شبکه از منظر فرآیند بازیابی برداشت. ارزیابی روش‌های به‌کارگیری این شاخص در افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش مدت زمان بازیابی از جمله اقداماتی است که نویسندگان مقاله حاضر در حال بررسی آنها هستند.

مراجع

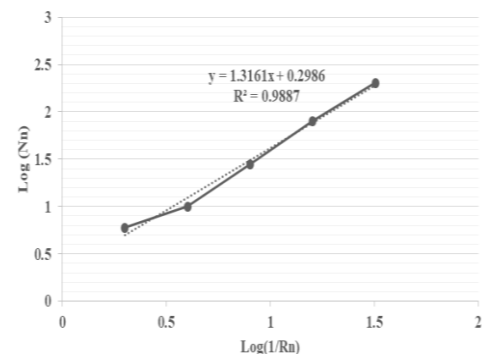
[1] I. Sadeghkhani, A. Ketabi and R. Feullet, "An Intelligent Switching Overvoltages Estimator for Power System Restoration Using Artificial Neural Network", International



شکل (۱۶): نمودار فراکتالی شبکه برق باختر



شکل (۱۷): ایجاد شبکه مربعی روی دیاگرام تک‌خطی شبکه برق پورتوریکو (سطح ولتاژ ۱۱۵ و ۲۳۰ کیلوولت)



شکل (۱۸): نمودار فراکتالی شبکه برق پورتوریکو

فرآیند بازیابی کامل است؛ بنابراین، طبق انتظار، شاخص فراکتال هر سه شبکه بررسی شده از مقدار شاخص معیار کمتر است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود قابلیت اطمینان این شبکه‌ها نسبت به شبکه معیار تصریحاً کمتر است؛ در حالی که مدت زمان مورد نیاز برای بازیابی آنها تلویحاً بیش

- Review of Robustness in Power Grids Using Complex Networks Concepts*”, *Energies*, Vol. 8, No. 9, pp. 9211-9265, 2015.
- [13] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella and N. D. Hatziargyriou, “*Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding*”, *IEEE Transactions on Smart*
- [14] T. Rahimi, R.A. Milani, N. Moshtaghian and A. Ghorbanpour Oskooyi, “*Evaluating the Reliability and Resilience of Power Systems - A Case Study of High Voltage Substations*”, *International Conference on Electrical Engineering, Iran*, pp. 1-7, 2017.
- [15] W. Liu, J. Zhan, C.Y. Chung and L. Sun, “*Availability Assessment Based Case-Sensitive Power System Restoration Strategy*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 2, pp. 1432-1445, 2020.
- [16] M. S. Khan and A. Kumar, “*A Comprehensive Literature Review Report on Basic Issues of Power System Restoration Planning*”, *IEEE India Council International Subsections Conference, India*, pp. 180-187, 2020.
- [17] M. Keogh, “*Conducting an Energy Emergency Tabletop Exercise in Your State: A Step By Step Guide*”, *The National Association of Regulatory Utility Commissioners*, pp. 1-26, 2010.
- [18] Y.T. Chou, C.W. Liu, Y.J. Wang, C.C. Wu and C.C. Lin, “*Development of a Black Start Decision Supporting System for Isolated Power Systems*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 2202-2210, 2013.
- [19] X. Cao, H. Wang, Y. Liu, R. Azizpanah-Abarghoee and V. Terzija, “*Coordinating Self-healing Control of Bulk Power Transmission System Based on a Hierarchical Top-down Strategy*”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 90, No. 9, pp. 147-157, 2017.
- [20] Committee on Enhancing the Resilience of the Nation’s Electric Power Transmission and Distribution System, “*Enhancing the Resilience of the Nation’s Electricity System*”, *The National Academies Press Washington, DC*, 2017.
- [21] T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem and S.Liu, “*Review on Optimization Methodologies in Transmission Network Reconfiguration of Power Systems for Grid Resilience*”. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 31, No. 3, pp. 1-38, 2021.
- Journal of Innovation Computing*, Vol. 10, No. 5, pp. 1791-1808, 2014.
- [2] D. K. Maina and N. C. Nair, “*Recent Advancements on Power System Restoration*”, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, New Zealand*, pp. 1-5, 2017.
- [3] S. Afzal, H. Mokhlis, H.A. Ilias, N.N. Mansor and H. Shareef, “*State-of-the-art Review on Power System Resilience and Assessment Techniques*”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 14, No. 25, pp. 6107-6121, 2020.
- [4] A. Karimi, S.M. Madani and A. Ebrahimi, “*Power Transmission System Vulnerability Assessment Using Genetic Algorithm*”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 3, nNo. 3, pp. 1-10, 2012.
- [5] C. Qin, J. Liu and Y. Yu, “*A Unified Two-Stage Reconfiguration Method for Resilience Enhancement of Distribution Systems*”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, No. 9, pp. 1734-1745, 2019.
- [6] H. Firouzi, S.M. Mortazavi, N. Zahiroddin, M. Khalilifar and S.M. Shahrtash, “*Power System Restoration Basics and Principles*”, pp. 24-40, 2022.
- [7] S. Datta, S. Kolluri, T. He and B. Khodabakhchian, “*Development of an Alternative Black-Start Plan for System Restoration*”, *IEEE Power Systems Conference and Exposition, Atlanta*, pp. 1833-1839, 2006.
- [8] Y. Liu, R. Fan and V. Terzija, “*Power System Restoration: A Literature Review from 2006 to 2016*”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 4, pp. 332-341, 2016.
- [9] M. Esmaili, A. Khodabakhshian and R. Hooshmand, “*A New Multi-Objective Design for Optimal Placement of Gas Turbines considering Black-start Capability Improvement*”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 19-23, 2019.
- [10] R. Shariatinasab, M. Akafi and M. Farshad, “*Estimation of Switching Overvoltages on Transmission Lines Using Neuro-Fuzzy Method*”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 55-66, 2012.
- [11] H. Khoshkhoo, M. Khalilifar and S.M. Shahrtash, “*Survey of Power System Restoration Documents Issued from 2016 to 2021*”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 2022, No. 1754013, pp. 1-23, 2022.
- [12] L. Cuadra, S.S. Sancho, J. D. Ser, S. J. Fernández and Z. W. Geem, “*A Critical*

- and D. Bhattacharjee, "Differential box counting methods for estimating fractal dimension of gray-scale images: A survey. *Chaos Solitons & Fractals*", Vol. 126, pp.178-202, 2019.
- [25] M. Nazari Sarem, R. Dabiri, M. Ansari and M. Vosoughi Abedini, "Estimate of Shore Geomorphology Fractal Dimension North of Persian Gulf by Box – Counting Method", *Geomorphologyjournal*, Vol. 9, No. 2, pp. 159-174, 2020.
- [22] J. Zhang, D. Wang, C. Xu, C. Li and N. Zhang, "Greedy Algorithm for Generator Start-Up Sequence Optimization in Power System Restoration Considering Transmission Path", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe, Romania*, pp. 1-5, 2019.
- [23] S. Cole, F. Promel, R. Llopis, J. A. Marqués and L. M. Zamarreño, "FAST DTS — AGORA: Automatic Generation and Dynamic Evaluation of Power System Restoration Plans", *IEEE International Energy Conference, Cyprus*, pp. 1-6, 2018.
- [24] C. Panigrahy, A. Seal, N. Mahato, B. Nihar