
Prioritization of Microgrid Parameters Considering Uncertainties for Use in Protection Studies

Saeed Yeganehfar¹, Ph.D. Student, Abbas Saberi Noghabi², Associate Professor
1-Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
s_yeganehfar@birjand.ac.ir
2-Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
a.saberi@birjand.ac.ir

Abstract:

The wide variations in fault current magnitude under different operating conditions pose serious challenges to conventional overcurrent protection in microgrid. Considering various uncertainties, conventional overcurrent protection based on standard characteristics, loses its coordination. One solution to this problem is to select a parameter other than current for fault detection and use it in the characteristic curve of microgrid relays. This selection requires studying the intrinsic behavior of measurable parameters at the location of primary and backup relays under various uncertainties and with considering different fault conditions in the microgrid. In this paper, three indices are proposed for selecting the best measurable parameter to be used in the characteristic curve of microgrid relays. These indices determine the impact of each uncertainty on the measurable parameters. The uncertainties considered in this paper include the outage of distributed generation sources, islanding, change in the impedance of the upstream network, change in fault type and fault resistance magnitude. The proposed indices include the Mean Square Error (MSE) index, the index for examining the possibility of the occurrence of coordination constraint violation and the index of minimum difference between the distance of the primary and backup relay curves in the post-uncertainty structure compared to the distance between these curves in the base structure. After calculating the indices, to compare the parameters for selecting the better ones, they are prioritized using the proposed Borda and Weighted Borda comparison methods. The main feature of these comparison methods is that the comparison is performed for each uncertainty separately and in a pairwise manner between the studied parameters. Using sensitivity analysis studies and simulations on the IEEE 14-bus distribution network considered as a microgrid, the effectiveness of the proposed indices and comparison methods has been proven, and the parameters have been prioritized for fault detection and use in the characteristic curve of the mentioned microgrid relays.

Keywords: Microgrid, Uncertainty, Microgrid Parameter Prioritization, Borda Method, Weighted Borda Method, Standardization, Distributed Generation (DG), Fault detection.

Date of sending: 2024/11/13
Acceptance date: 2025/07/07

Corresponding author's name: Abbas Saberi Noghabi

Corresponding author's address: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

اولویت بندی پارامترهای ریزشبه با در نظر گرفتن عدم قطعیتها به منظور استفاده در مطالعات حفاظتی

نوع مطالعه: پژوهشی

سعید یگانه فر^۱، دانشجوی دکتری، عباس صابری نوقابی^۲، استادیار

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - s_yeganeyfar@birjand.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - a.saberi@birjand.ac.ir

چکیده

تغییرات گسترده اندازه جریان خطا در شرایط مختلف بهره برداری، باعث ایجاد چالش‌های جدی در حفاظت معمول اضافه جریان در ریزشبه شده است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف، حفاظت اضافه جریان معمول بر اساس مشخصه‌های استاندارد، دچار ناهماهنگی می‌شود. یک راه حل برای رفع این مشکل، انتخاب پارامتری غیر از جریان جهت تشخیص خطا و استفاده در منحنی مشخصه رله‌های ریزشبه می‌باشد. این انتخاب نیاز به مطالعه رفتار ذاتی پارامترهای قابل اندازه‌گیری در محل رله‌های اصلی و پشتیبان به‌ازای وقوع عدم قطعیت‌های مختلف و با در نظر گرفتن شرایط مختلف خطا در ریزشبه دارد. در این مقاله برای انتخاب بهترین پارامتر قابل اندازه‌گیری به منظور استفاده در مشخصه رله‌های ریزشبه، سه شاخص پیشنهاد شده است. این شاخص‌ها میزان تأثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها بر پارامترهای قابل اندازه‌گیری را مشخص می‌کنند. عدم قطعیت‌های مورد بررسی در این مقاله خروج منابع تولید پراکنده، جزیره‌ای شدن، تغییر امپدانس شبکه بالادست، تغییر در نوع خطا و اندازه مقاومت خطا در نظر گرفته شده است. شاخص‌های معرفی شده شامل شاخص میانگین مربعات خطا (MSE)، شاخص بررسی امکان وقوع نقض قید هماهنگی و شاخص مینیمم تفاضل فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان در ساختار پس از وقوع عدم قطعیت نسبت به فاصله بین این منحنی‌ها در ساختار پایه، می‌باشند. پس از محاسبه شاخص‌ها، به منظور مقایسه پارامترها جهت انتخاب پارامترهای بهتر، اولویت بندی آن‌ها با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی بردا و بردای وزنی انجام شده است. ویژگی اصلی این روش‌های مقایسه‌ای این است که در آن‌ها عمل مقایسه به‌ازای هر عدم قطعیت به صورت مجزا و به شکل نظیر به نظیر بین پارامترهای مورد مطالعه انجام می‌شود. با استفاده از مطالعات آنالیز حساسیت و انجام شبیه‌سازی بر روی بخش توزیع شبکه ۱۴ شینه IEEE که به عنوان یک ریزشبه در نظر گرفته شده، اثربخشی شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی اثبات گردیده و پارامترها جهت تشخیص خطا و استفاده در منحنی مشخصه رله‌های ریزشبه مذکور اولویت بندی شده است.

کلمات کلیدی

ریزشبه، عدم قطعیت، اولویت بندی پارامترهای ریزشبه، روش بردا، روش بردای وزنی، استانداردسازی، تولید پراکنده، تشخیص خطا

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقابی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

1- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، تمرکز جامعه جهانی بر روی مسائلی مربوط به محیط زیست و نیاز به بهبود کیفیت توان تحویلی به مصرف‌کننده، استفاده از منابع تولید پراکنده (DGs)¹ در بستر ریز شبکه (MG)² بسیار رایج شده است (Subaramaiah & Sujatha, 2023; Selim et al., 2020).

با حضور منابع تولید پراکنده در ریز شبکه‌ها، امکان سیلان دوطرفه جریان در آن‌ها فراهم خواهد شد. از طرفی تفاوت زیاد مشارکت در جریان خطا بین منابع تولید پراکنده سنکرونی (SBDG)³ و منابع تولید پراکنده اینورتری (IBDG)⁴ و همچنین اختلاف قلیل توجه اندازه جریان خطا در مدهای عملیاتی متصل به شبکه (GCM)⁵ و جزیره‌ای (IM)⁶، سبب می‌شود اندازه جریان خطا در ریز شبکه‌ها در محدوده وسیعی تغییر نماید. در این شرایط ممکن است طرح‌های حفاظتی سنتی که از جریان به‌عنوان پارامتری برای تشخیص خطا بهره می‌برند، کارآمد نباشد (Shawon et al., 2023). از این‌رو استفاده از پارامترهای دیگر به‌همراه و یا به‌جای پارامتر جریان به‌منظور تشخیص خطا و استفاده از آن در مشخصه رله‌های ریز شبکه، یک امر ضروری است.

محققان حوزه حفاظت برای مقابله با چالش استفاده از پارامتر جریان به‌منظور تشخیص خطا در طرح‌های حفاظتی ریز شبکه‌ها راهکارهایی ارائه کرده‌اند. گروهی از مقالات کماکان جریان را پارامتر مورد استفاده جهت تشخیص خطا در طرح‌های حفاظتی دانسته و با توسعه طرح‌های حفاظتی تطبیقی⁷ (Yousaf et al., 2022; Zarour et al., 2023; Nascimento et al., 2020)، مقاوم⁸ (Shabani & Karimi, 2018; Sadeghi et al., 2021) و یا تنظیم گروهی رله‌ها (Ghotbi-Maleki et al., 2020; Ataei- et al., 2023) اقدام به حفاظت از ریز شبکه‌ها و رفع مشکلات مذکور نموده‌اند. گروه دیگری از مقالات معتقدند که جریان، پارامتر قابل اعتمادی جهت تشخیص خطا و همچنین استفاده در مشخصه حفاظتی رله‌های ریز شبکه نیست. بنابراین اقدام به معرفی پارامتر/پارامترهای جدیدی برای این منظور نموده‌اند. برای مثال در (Jamali & Borhani, 2019) پس از تجزیه و تحلیل رفتار پارامتر ولتاژ در شرایط مختلف خطا، این پارامتر نسبت به پارامتر جریان مناسب‌تر تشخیص داده شده است. بر این اساس یک روش حفاظتی مبتنی بر ولتاژ که مستقل از مدهای عملیاتی می‌باشد برای سیستم‌های توزیع دارای DG پی‌شهاد گردیده است. در (santos et al., 2023) نیز پارامتر ولتاژ به‌عنوان

جایگزین مناسب برای پارامتر جریان معرفی شده است. همچنین یکسری اصلاحات اساسی جهت بهبود و ساده‌سازی رله مبتنی بر ولتاژ ارائه شده در مرجع قبل پی‌شهاد شده است. در (Dawoud et al., 2021a; Dawoud et al., 2021b) رفتار پارامتر نرخ تغییرات ولتاژ (ROCOV)⁹ در محل نصب یکی از زوج رله‌های شبکه توزیع ولتاژ متوسط به‌زای نقاط مختلف خطا در طول خط، مورد مطالعه قرار گرفته است. با مقایسه ROCOV با پارامترهای جریان و ولتاژ، این پارامتر، پارامتر بهتری جهت استفاده در مشخصه حفاظتی رله‌های شبکه معرفی شده است. پارامتر ادمیتانس به‌عنوان جایگزین مناسبی برای جریان در مراجع (Saber et al., 2016; Hosseini et al., 2023) مطرح شده است. این پارامتر، در یک مشخصه معکوس زمانی به‌منظور تشخیص خطا و ایجاد هماهنگی بین رله‌های یک ریز شبکه استفاده شده است. مراجع (Zarour et al., 2023; Chakraborty et al., 2020) در کاری متفاوت، به‌کارگیری پارامتر ولتاژ به‌همراه پارامتر جریان را در مشخصه حفاظتی رله‌های ریز شبکه‌های دارای سیستم‌های فتوولتائیک پیشنهاد نموده است.

شکافی که در اغلب مقالات به چشم می‌خورد فقدان یک مطالعه دقیق و شاخص‌محور به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های یک ریز شبکه است. هدف از این اولویت‌بندی تعیین پارامتر/های بهتر جهت تشخیص خطا و استفاده در مشخصه رله‌های این ریز شبکه می‌باشد. برای این منظور، ابتدا رفتار ذاتی هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان به‌زای عدم قطعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس تاثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها بر روی پارامترهای ریز شبکه به کمک شاخص پی‌شهادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شاخص پی‌شهادی اول میانگین مربعات خطا (MSE)¹⁰ می‌باشد. این شاخص امکان بررسی تغییرات مقادیر پارامترهای ریز شبکه پس از اعمال یک عدم قطعیت، نسبت به مقادیر آن‌ها در ریز شبکه اولیه که در این مقاله از آن به‌عنوان ریز شبکه پایه¹¹ یاد می‌شود را فراهم می‌آورد. دومین شاخص پی‌شهادی، بررسی امکان وقوع نقض قید هماهنگی است. این شاخص امکان نقض قید هماهنگی در زوج رله مورد مطالعه پس از اعمال یک عدم قطعیت را مورد بررسی قرار می‌دهد. شاخص پی‌شهادی سوم مینیمم تفاضل فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان در ساختار پس از وقوع عدم قطعیت نسبت به فاصله بین این منحنی‌ها در ساختار پایه، نام‌گذاری شده است. با استفاده از این شاخص تفاوت فاصله بین منحنی‌های مذکور در شبکه پایه و فاصله این منحنی‌ها پس از اعمال یک عدم قطعیت بررسی خواهد شد. در آخر به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای ریز شبکه، از روش‌های مقایسه‌ای پی‌شهادی بردا و وزنی

⁶ Islanding Mode

⁷ Adaptive

⁸ Robust

⁹ Rate of Change of Voltage

¹⁰ Mean Square Error

¹¹ Basic micro grid

¹ Distributed Generations

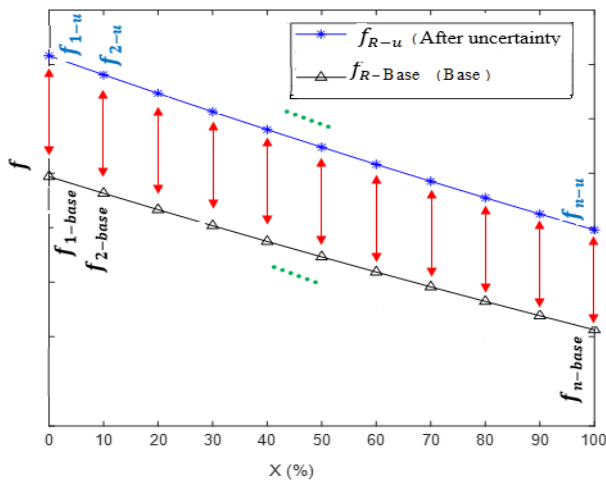
² Micro Grid

³ Synchronous-Based Distributed Generation

⁴ Inverter-Based Distributed Generation

⁵ Grid-Connected Mode

پایه و شبکه پس از وقوع عدم قطعیت u ام هستند. n تعداد مکان وقوع خطا در نقاط مختلف خط و m تعداد عدم قطعیت‌های مورد بررسی می‌باشند. در شکل (۱) منحنی تغییرات پارامتر f نسبت به تغییرات مکان وقوع خطا (x)، در طول خطی از یک ریزشکه که رله اصلی در آن قرار دارد، نشان داده شده است. منحنی‌های رسم شده با خط ممتد و خط چین، تغییرات پارامتر f نسبت به x ، به ترتیب در ریزشکه پایه و پس از اعمال یک عدم قطعیت در ریزشکه پایه را نشان می‌دهند. مقادیر پارامتر f به صورت مجزا به ازای هر یک از مکان‌های وقوع خطا، برای ریزشکه پایه (f_{i-base}) و همچنین پس از اعمال عدم قطعیت u ام به ریزشکه پایه (f_{i-u})، بدست می‌آید. در نهایت شاخص MSE برای پارامتر f به ازای اعمال عدم قطعیت u ام ($MSE f_u$)، با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه خواهد بود.



(۱) منحنی تغییرات پارامتر f نسبت به x در ریزشکه پایه و در ریزشکه پس از اعمال عدم قطعیت

هر چقدر مقدار شاخص MSE برای یک پارامتر به صفر نزدیکتر باشد، بدین مفهوم است که پس از اعمال عدم قطعیت مورد بررسی به ریزشکه پایه تحت مطالعه، میزان تغییرات این پارامتر نسبت به مقدار آن در ریزشکه پایه کمتر بوده است. به عبارت دیگر حساسیت آن پارامتر نسبت به عدم قطعیت یاد شده کمتر است.

۲-۲- شاخص دوم: بررسی امکان وقوع نقض قید

هماهنگی

برای بررسی تأثیر هر عدم قطعیت روی نقض قید هماهنگی، فاصله بین منحنی‌های تغییرات پارامتر نسبت به محل وقوع خطا مربوط به رله اصلی و پشتیبان، معیار مناسبی خواهد بود. هر چه فاصله ذاتی بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان به ازای اعمال عدم قطعیت‌های مختلف کمتر باشد، احتمال بیشتری برای نقض قید هماهنگی وجود خواهد داشت و بالعکس. شاخصی که در رابطه (۲) پیشنهاد شده است، امکان مقایسه پارامترهای مورد مطالعه را از منظر نقض قید هماهنگی فراهم می‌کند.

که بر پایه مقایسه دو به دو پارامترهای ریزشکه استوارند، استفاده می‌شود. در نهایت مراحل فوق بر روی یک ریزشکه تست پیاده سازی می‌شود. تغییر نوع و مقدار مقاومت خطا و همچنین تغییر حالت بهره‌برداری از ریزشکه از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای از جمله عدم قطعیت‌های مورد بررسی هستند که بر اندازه پارامترهای ریزشکه تأثیر گذار می‌باشند. از طرفی خروج منابع تولید پراکنده عدم قطعیت‌هایی هستند که منجر به تغییر در اندازه و جهت جریان خطا و سایر پارامترهای ریزشکه خواهند شد. ورود و خروج خطوط و سایر تجهیزات شبکه بالادست ریزشکه، تغییر جریان اتصال کوتاه ریزشکه و سایر پارامترهای دیده شده توسط رله‌های آن را به همراه داشته و تحت عنوان عدم قطعیت تغییر امیدانس شبکه بالادست مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

سایر قسمت‌های این مقاله به صورت زیر سازماندهی خواهد شد: در بخش دوم و سوم به ترتیب به معرفی شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی پرداخته می‌شود. بخش چهارم الگوریتم حل مسئله را بیان می‌کند. در بخش پنجم به منظور تأیید درستی شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی، نتایج عددی اعمال این شاخص‌ها و روش‌ها بر روی ریزشکه تست ۱۴ شینه IEEE و نیز نتایج آنالیز حساسیت ارائه شده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری کلی از مطالب بیان شده در این مقاله آورده می‌شود.

۲- شاخص‌های پیشنهادی

در این مقاله با هدف ارزیابی میزان تأثیر هر یک از عدم قطعیت‌های مورد مطالعه بر روی پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های ریزشکه، سه شاخص پیشنهاد شده است. برای این منظور از منحنی‌های رفتار ذاتی پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان ریزشکه، نسبت به تغییرات مکان وقوع خطا استفاده می‌شود. برای استخراج این منحنی‌ها، خطاهای مجزایی در طول خطی که رله اصلی در آن قرار دارد، ایجاد شده و مقادیر پارامترها در محل رله‌های اصلی و پشتیبان، اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه شاخص‌های پیشنهادی در این مقاله معرفی می‌شوند.

۲-۱- شاخص اول: میانگین مربعات خطا (MSE)

MSE ، شاخصی برای اندازه‌گیری اختلاف بین مقادیر یک پارامتر در ریزشکه پایه با مقادیر متناظر همان پارامتر پس از وقوع یک عدم قطعیت در ریزشکه است. شاخص MSE برای پارامتر f به ازای وقوع عدم قطعیت u ام در ریزشکه، مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$MSE f_u = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{i-u} - f_{i-base})^2}{n} \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

در رابطه فوق، $MSE f_u$ میانگین مربعات خطا بین حالت پایه و حالت وقوع عدم قطعیت u ام در ریزشکه، برای پارامتر f می‌باشد. f_{i-u} و f_{i-base} مقادیر اندازه‌گیری شده پارامتر f به ازای خطا در مکان u ام، به ترتیب در شبکه

۳- هر دو منحنی اصلی و پشتیبان برهم منطبق باشند ($\Delta f_u = 0$):
در این وضعیت پس از وقوع عدم قطعیت، رفتار ذاتی پارامتر f اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان به نحوی است که باعث بهبود و یا نقض قید هماهنگی نمی‌شود.

ملاحظه می‌شود که هر چه مقدار شاخص Δf_u بزرگتر (مثبت‌تر) باشد، امکان نقض قید هماهنگی ناشی از وقوع عدم قطعیت کمتر خواهد بود. باید توجه داشت که برای برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان نظیر ولتاژ و امپدانس، منحنی تغییرات پارامتر f نسبت به x به صورت صعودی است. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده برای این دسته از پارامترها کمتر باشد خطا به محل رله نزدیکتر است و در نتیجه زمان عملکرد رله کمتر می‌باشد و بالعکس. از این رو رابطه این پارامترها با زمان عملکرد رله، یک رابطه مستقیم می‌باشد ($t_{op} \propto f$). در مقابل در برخی دیگر از پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان نظیر جریان، نرخ تغییر جریان (ROCOI)¹، نرخ تغییر ولتاژ (ROCOV) و نرخ تغییر امپدانس (ROCOZ)²، منحنی تغییرات پارامتر f نسبت به x به صورت نزولی است. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده برای این پارامترها کمتر باشد، محل وقوع خطا از رله دورتر بوده و زمان عملکرد رله بیشتر خواهد بود و بالعکس. بنابراین رابطه این دسته از پارامترها، با زمان عملکرد رله یک رابطه معکوس است ($t_{op} \propto \frac{1}{f}$). به دلیل رفتار متفاوت این دو دسته از پارامترها، شاخص دوم به صورت دوضابطه‌ای تعریف شده است.

۲-۳- شاخص سوم: مینیمم تفاضل فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان در ساختار پس از وقوع عدم قطعیت نسبت به فاصله بین این منحنی‌ها در ساختار پایه

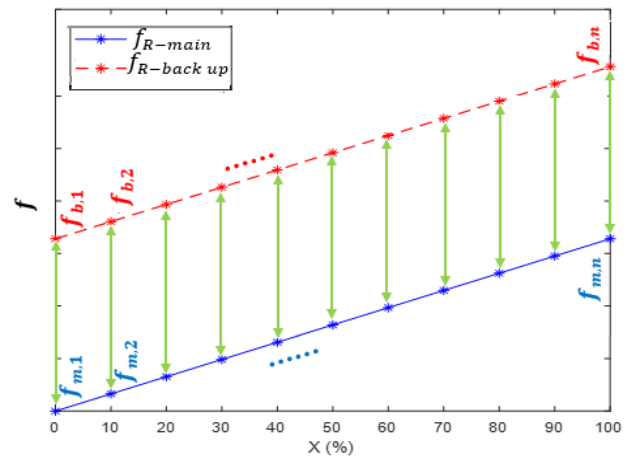
اعمال یک عدم قطعیت به ریزشکبه پایه می‌تواند سبب کم یا زیاد شدن مقدار فاصله بین منحنی‌های تغییرات پارامتر نسبت به محل وقوع خطا مربوط به رله اصلی و پشتیبان گردد. این تغییر مقدار فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان، می‌تواند جهت تعریف یک شاخص از دیدگاه نقض/عدم نقض قید هماهنگی استفاده شود.

$\Delta f_{i,new}$ و $\Delta f_{i,base}$ که بیان‌گر فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان به ترتیب در ساختار پس از اعمال عدم قطعیت و ساختار پایه هستند، توسط روابط (۳) و (۴) تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} \Delta f_{i,new} = -(f_{b,i,new} - f_{m,i,new}) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{if } t_{op} = \frac{1}{f} \\ \Delta f_{i,new} = (f_{b,i,new} - f_{m,i,new}) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{if } t_{op} = f \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta f_u = \min_i \left(-(f_{b,i} - f_{m,i}) \right) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad \text{if } t_{op} = \frac{1}{f} \\ \Delta f_u = \min_i \left(f_{b,i} - f_{m,i} \right) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad \text{if } t_{op} = f \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه فوق $f_{m,i}$ و $f_{b,i}$ مقادیر پارامتر f به ترتیب برای منحنی رله پشتیبان و رله اصلی، به هنگام وقوع خطا در مکان نام می‌باشند. Δf_u مینیمم فاصله بین منحنی رله‌های اصلی و پشتیبان پس از وقوع عدم قطعیت نام است. شکل (۲)، منحنی تغییرات پارامتر f اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان مورد مطالعه، نسبت به تغییرات مکان وقوع خطا در طول خطی که رله اصلی در آن قرار دارد را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منحنی تغییرات پارامتر f نسبت به x برای رله‌های اصلی و

پشتیبان مورد مطالعه در یک ریزشکبه

با توجه به این شکل، نحوه محاسبه شاخص دوم برای هر یک از عدم قطعیت‌های مورد بررسی بدین صورت است که ابتدا n مقدار مربوط به منحنی رله اصلی ($f_{m,1}, \dots, f_{m,n}$)، از n مقدار مربوط به منحنی رله پشتیبان ($f_{b,1}, \dots, f_{b,n}$)، به صورت نظیر به نظیر کم می‌شود. سپس مینیمم مقدار n عدد حاصل، که بیانگر حداقل فاصله بین این دو منحنی است، به عنوان نتیجه شاخص انتخاب می‌گردد. با دقت در رابطه (۲) ملاحظه می‌شود که پس از وقوع یک عدم قطعیت در ریزشکبه پایه، سه وضعیت زیر برای Δf_u قابل تصور خواهد بود:

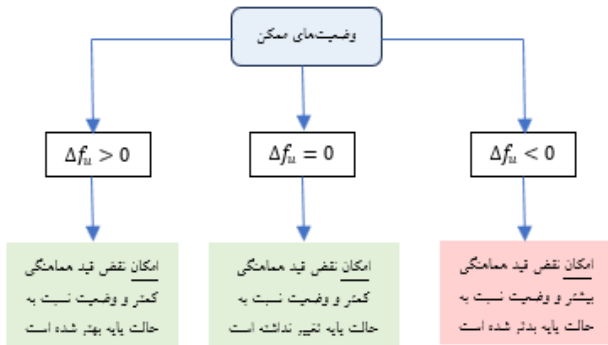
۱- منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان از هم فاصله داشته باشند. به نحوی که $\Delta f_u > 0$ باشد: این وضعیت نشان می‌دهد که پس از وقوع عدم قطعیت، رفتار ذاتی پارامتر f اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان به گونه‌ای است که بهبود قید هماهنگی را به دنبال خواهد داشت.

۲- منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان از هم فاصله داشته باشند اما $\Delta f_u < 0$ باشد: در این حالت، پس از وقوع عدم قطعیت، رفتار ذاتی پارامتر f اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان به گونه‌ای است که قید هماهنگی نقض می‌شود.

² Rate Of Change Of Impedance (ROCOZ)

¹ Rate Of Change Of Current

مطابق با این شکل، برای محاسبه شاخص سوم، ابتدا مقدار فاصله منحنی‌های رله پشتیبان و اصلی در ساختار پس از وقوع عدم قطعیت $\Delta f_{i,new}$ و در ساختار پایه $(\Delta f_{1,base}, \dots, \Delta f_{i,base})$ به صورت مجزا به ازای n نقطه مکان وقوع خطا در طول خط محاسبه می‌گردد. سپس به ازای هر مکان وقوع خطا، به طور مجزا اختلاف نظیر به نظیر مقادیر فوق سنجیده می‌شود. حاصل این محاسبه، n داده می‌باشد. در نهایت مینیمم مقدار این n داده، لندازه شاخص رابه هنگام وقوع عدم قطعیت Δf_u تعیین می‌کند. با توجه به روابط (۳) تا (۶)، حالت‌های ممکن برای Δf_u در فلوچارت شکل (۴) خلاصه شده‌اند.



شکل (۴): حالت‌های ممکن Δf_u در شاخص پیشنهادی سوم

با دقت در فلوچارت فوق ملاحظه می‌شود که:

۱- در حالت‌هایی که $\Delta f_u > 0$ و $\Delta f_u = 0$ است، امکان نقض قید هماهنگی وجود ندارد. به عبارتی یا پارامتر مورد بررسی در راستای بهبود قید هماهنگی حرکت نموده و در نتیجه وضعیت نسبت به حالت پایه بهتر شده $(\Delta f_u > 0)$ و یا تغییری ننموده است $(\Delta f_u = 0)$. بنابراین در صورتی که رله‌های ریزشکه برای حالت پایه هماهنگ شده باشند، نیازی به تغییر تنظیمات آن‌ها جهت برقرار ماندن قید هماهنگی در اثر وقوع عدم قطعیت مورد بررسی نبوده و همان تنظیمات قبلی جوابگو می‌باشد.

۲- در حالت $\Delta f_u < 0$ به دلیل کم شدن فاصله منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان نسبت به حالت پایه، امکان نقض قید هماهنگی بیشتر است. در این حالت وضعیت در شرایط جدید نسبت به حالت پایه بدتر گردیده است. بنابراین در صورتی که رله‌های ریزشکه برای حالت پایه هماهنگ شده باشند، ممکن است تنظیمات قبلی آن‌ها برای شرایط جدید جوابگو نبوده و نیاز به تغییر تنظیمات رله‌ها باشد.

3- روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی

با هدف انتخاب بهترین پارامتر جهت استفاده در مشخصه رله‌های ریزشکه برای تشخیص خطا، نیاز به اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه می‌باشد. این اولویت‌بندی با مقایسه پارامترهایی که شاخص‌های پیشنهادی

$$\Delta f_{i,base} = -\left(f_{b,i,base} - f_{m,i,base}\right) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{if } t_{op} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

$$\Delta f_{i,base} = \left(f_{b,i,base} - f_{m,i,base}\right) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{if } t_{op} = f$$

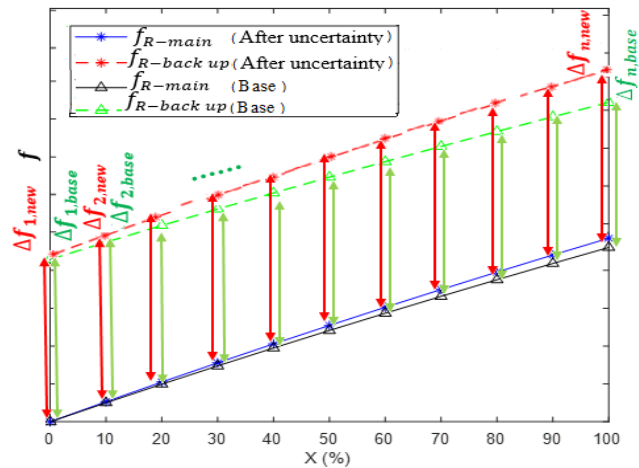
شاخص پیشنهادی سوم برای هر یک از عدم قطعیت‌های مورد مطالعه از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\Delta f_u = \left(\Delta f_{i,new} - \Delta f_{i,base}\right) \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

$$\Delta f_u = \min_i \left\{ -\left(f_{b,i,new} - f_{m,i,new}\right) + \left(f_{b,i,base} - f_{m,i,base}\right) \right\} \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad \text{if } t_{op} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\Delta f_u = \min_i \left\{ \left(f_{b,i,new} - f_{m,i,new}\right) - \left(f_{b,i,base} - f_{m,i,base}\right) \right\} \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad \text{if } t_{op} = f$$

در رابطه فوق، $f_{b,i,base}$ و $f_{b,i,new}$ مقدار پارامتر مورد بررسی f مربوط به رله پشتیبان به ازای وقوع خطا در مکان Δm به ترتیب در ساختار جدید پس از اعمال وقوع عدم قطعیت Δm و در ساختار پایه می‌باشد. به طور مشابه از اعمال وقوع عدم قطعیت Δm و در ساختار پایه $f_{m,i,base}$ و $f_{m,i,new}$ مقدار پارامتر f مرتبط با رله اصلی به ازای وقوع خطا در مکان Δm به ترتیب در ساختار جدید و در ساختار پایه است. Δf_u مینیمم اختلاف مقدار فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان در ساختار پس از وقوع عدم قطعیت Δm ، نسبت به مقدار فاصله بین این منحنی‌ها در ساختار شبکه پایه می‌باشد. شکل (۳) منحنی‌های تغییرات پارامتر f برای رله‌های اصلی و پشتیبان نسبت به تغییرات مکان وقوع خطا در طول خطی که رله اصلی در آن قرار دارد (x) ، در ساختارهای پس از اعمال عدم قطعیت و ساختار پایه یک ریزشکه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): منحنی‌های تغییرات پارامتر f نسبت به x برای رله‌های اصلی و پشتیبان در ساختارهای پس از اعمال عدم قطعیت و ساختار پایه یک ریزشکه

روی آن‌ها اعمال گردیده امکان‌پذیر می‌شود. برای انجام مقایسه سه روش زیر پیشنهاد شده‌است.

۳-۱- روش مقایسه‌ای پیشنهادی اول

روش مقایسه‌ای سه‌ای پیشنهادی اول، روش بردا است که یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. از مزایای این روش این است که در آن، عمل مقایسه به‌ازای هر عدم قطعیت به‌صورت مجزا و به‌شکل نظیر به نظیر بین پارامترهای مورد مطالعه انجام می‌شود. در ادامه، مراحل روش بردا توضیح داده خواهد شد.

۱- تشکیل ماتریس داده‌های بردا: ماتریس داده‌های بردا ماتریسی با ابعاد $p \times m$ است که p تعداد پارامترهای مورد مقایسه و m تعداد عدم قطعیت‌های مورد مطالعه می‌باشد. عنصر $a_{i,j}$ این ماتریس بیانگر حاصل اعمال شاخص پیشنهادی به پارامتر A_m به‌هنگام وقوع عدم قطعیت A_j است.

۲- تشکیل ماتریس مقایسه زوجی A : ماتریس مقایسه زوجی، ماتریسی مربعی با ابعاد p است. که p تعداد پارامترهای مورد مقایسه می‌باشد. مقادیر درایه‌های روی قطر اصلی این ماتریس همواره برابر با صفر است. سایر درایه‌ها بسته به نتایج مقایسه پارامترها با یکدیگر، مقادیر ۰ یا ۱ خواهند داشت. شکل کلی این ماتریس به صورت رابطه (۷) است.

$$A = \begin{matrix} & \text{Index } f_1 & \cdots & \text{Index } f_p \\ \text{Index } f_1 & \begin{pmatrix} 0 & \cdots & a_{1,p} \\ \vdots & a_{i,j} & \vdots \\ \text{Index } f_p & a_{p,1} & \cdots & a_{p,p} \end{pmatrix} & & \end{matrix} \quad (7)$$

در این ماتریس، f_p پارامتر مورد مقایسه p ام، $\text{Index } f_p$ شاخص پیشنهادی مورد بررسی مربوط به پارامتر f_p و $a_{i,j}$ عددی است ۰ یا ۱ که نتیجه مقایسه پارامتر A_m با پارامتر A_j مورد مطالعه می‌باشد.

اساس روش مقایسه‌ای بردا بر مقایسه دو به دو پارامترها (سطرهای ماتریس بردا) استوار است. بدین معنی که در هر مرحله درایه‌های متناظر مربوط به دو سطر در ماتریس داده‌ها با هم مقایسه می‌شوند. در فرآیند مقایسه، ملاک برتری یک درایه بر درایه دیگر، ارجح بودن آن درایه می‌باشد. لازم به‌ذکر است که ملاک ارجح بودن برای هر شاخص متفاوت است. در شاخص MSE ارجح بودن یک درایه به معنی کوچکتر بودن آن درایه می‌باشد. در شاخص پیشنهادی دوم درایه ارجح درایه بزرگتر است. از منظر شاخص سوم درایه‌ای ارجح است که قید هماهنگی به‌ازای آن نقض نشود ($\Delta f_u \geq 0$) و همچنین سرعت سیستم حفاظتی به‌ازای آن بیشتر باشد.

نحوه مقایسه بدین صورت است که در ماتریس داده‌های بردا، چنانچه تعداد حالت‌های ارجح پارامتری نسبت به پارامتر دیگر به‌ازای عدم قطعیت‌های مختلف، بیش از تعداد حالت‌های مغلوب آن پارامتر نسبت به پارامتر دیگر باشد، در ماتریس مقایسه زوجی رابطه (۷)، به‌ازای درایه مربوط به این مقایسه، عدد ۱ درج می‌شود. در غیر این‌صورت، در صورتی که تعداد

حالت‌های مغلوب بیشتر از تعداد حالت‌های ارجح باشد و یا آراء مغلوب و ارجح با هم برابر باشند، به‌ازای درایه مربوط به این مقایسه در ماتریس A ، عدد صفر لحاظ می‌گردد.

۳- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نهایی B : این ماتریس، یک ماتریس $p \times 1$ است که در آن p تعداد پارامترهای مورد مقایسه می‌باشد. مجموع عناصر هر سطر ماتریس مقایسه زوجی A ، عناصر ماتریس تصمیم‌گیری نهایی B را تشکیل می‌دهد.

$$B = \begin{matrix} \text{جمع درایه‌های سطر اول ماتریس } A \\ \vdots \\ \text{جمع درایه‌های سطر } p \text{م ماتریس } A \end{matrix} \quad (8)$$

هر یک از سطرهای ماتریس B ، تعداد حالت‌های مسلط شدن هر پارامتر بر سایر پارامترهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. هر پارامتری که بر تعداد بیشتری از پارامترهای دیگر مسلط باشد، دارای بالاترین اولویت می‌باشد. در مقابل کوچکترین مقدار در ماتریس B مربوط به پارامتری است که بر کمترین تعداد از پارامترهای دیگر تسلط داشته و در نتیجه این پارامتر در اولویت آخر قرار دارد. به همین ترتیب هر یک از پارامترها بر اساس تعداد مسلط شدن بر سایر پارامترهای مورد مطالعه اولویت‌بندی می‌شود.

در روش بردا تمامی عدم قطعیت‌ها هم‌ارزش در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین این روش برای زمانی که اهمیت عدم قطعیت‌های مورد مطالعه یکسان است، روش مناسبی می‌باشد. در برخی از ریزشک‌ها ارزش هر یک از عدم قطعیت‌ها بسته به اهمیت و/یا احتمال وقوع آن، متفاوت است. در چنین مواردی روش مقایسه‌ای بردا کارآمد نبوده و نیاز به معرفی روش مقایسه‌ای دیگری می‌باشد. راهکار این مقاله برای چنین شرایطی استفاده از روش پیشنهادی بردا وزنی است.

۳-۲- روش مقایسه‌ای پیشنهادی دوم

روش مقایسه‌ای پیشنهادی دوم، روش مقایسه‌ای بردا وزنی نام دارد. مراحل این روش بسیار شبیه به روش بردا معمولی است. با این تفاوت که در روش بردا وزنی، پس از محاسبه شاخص به‌ازای تمامی عدم قطعیت‌ها و تشکیل ماتریس داده‌های بردا، به هر یک از عدم قطعیت‌ها بر اساس اهمیت و/یا امکان وقوع آن، یک ضریب وزنی اختصاص داده می‌شود. مجموع ضرایب وزنی تمام عدم قطعیت‌ها برابر با ۱ می‌باشد. همچنین در مرحله تکمیل ماتریس مقایسه زوجی A ، چنانچه جمع ضرایب وزنی حالت‌های ارجح یکی از دو پارامتر مورد مقایسه، بیش از جمع ضرایب وزنی حالت‌های مغلوب آن پارامتر باشد، این پارامتر غالب بوده و در ماتریس A برای آن، عدد ۱ درج خواهد شد. در صورتی که رای اکثریت وجود نداشته باشد و یا آراء مغلوب و ارجح با هم مساوی باشند، در ماتریس مقایسه زوجی A عدد صفر قرار داده می‌شود.

۳-۳- روش مقایسه‌ای پیشنهادی سوم

راهکار دیگری که جهت مقایسه پارامترهای ریزشکه در این مقاله پیشنهاد شده، برای شرایطی است که تمامی عدم قطعیت‌های مورد مطالعه در ریزشکه دارای ارزش یکسان نیستند. برای چنین شرایطی رابطه (۹) معرفی شده است.

$$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot index f_u \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad (9)$$

$$\sum_{u=1}^m \omega_u = 1 \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

در روابط فوق، $index f_u$ مقدار شاخص پیشنهادی در این مقاله مربوط به پارامتر f به‌ازای عدم قطعیت u ام می‌باشد. ω_u مقدار ضریب وزنی متعلق به عدم قطعیت u ام است.

پس از محاسبه مقادیر Q در رابطه (۹) برای تمامی پارامترها، پارامتر بهتر با مقایسه دو به دو این مقادیر تعیین می‌شود. جهت مقایسه مقادیر Q به‌منظور اولویت‌بندی پارامترها، نیاز به تعیین ملاک ارجح بودن است. در فرآیند این راهکار پیشنهادی، ملاک ارجح بودن Q یک پارامتر، همان ملاک مطرح شده برای شاخص‌های پیشنهادی سه‌گانه است که در روش‌های مقایسه‌ای بردا و بردا وزنی توضیح داده شد.

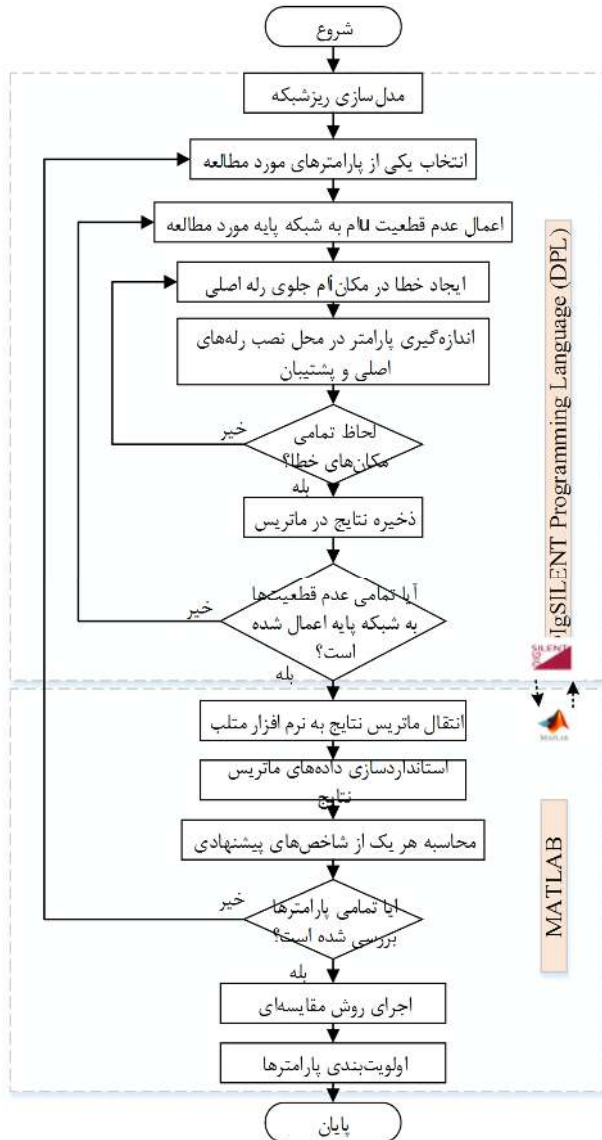
لازم بذکر است که بدست آوردن ضرایب وزنی برای هر یک از عدم قطعیت‌ها با هدف استفاده در روش بردا وزنی و نیز به‌منظور محاسبه مقادیر Q توسط رابطه (۹)، مستلزم یک مطالعه دقیق، مفصل و جداگانه است.

4- الگوریتم حل مساله

الگوریتم حل مساله در فلوچارت شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ابتدا مدل‌سازی ریزشکه مورد نظر در نرم‌افزار دیگسایلنت انجام شده و یکی از پارامترهای مورد مطالعه شامل جریان، ولتاژ، امیدانس، نرخ تغییر ولتاژ، نرخ تغییر جریان و نرخ تغییر امیدانس انتخاب خواهد شد. نحوه بدست آوردن نرخ تغییر پارامترهای یاد شده، در مرجع (Dawoud et al., 2021) بیان شده است. پس از آن، عدم قطعیت u ام به ریزشکه پایه مورد مطالعه اعمال می‌گردد. عدم قطعیت‌های مورد بررسی در این مقاله شامل خروج منابع تولید پراکنده، تغییر امیدانس شبکه بالادست، تغییر مقاومت خطا، تغییر نوع خطا و تغییر شرایط بهره‌برداری ریزشکه از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای می‌باشد. در گام بعد، n خطای مجزا با فاصله مساوی در طول خط جلو رله اصلی مورد مطالعه ایجاد شده و مقادیر پارامتر انتخابی در محل این رله و رله پشتیبان آن اندازه‌گیری می‌گردد. مراحل فوق به‌صورت مجزا برای تمامی عدم قطعیت‌های مذکور انجام شده و مقادیر در ماتریس نتایج ذخیره می‌گردد.

در فاز بعدی محاسبات، ماتریس نتایج به نرم‌افزار متلب انتقال داده می‌شود. از آن جایی که پارامترهای مورد مطالعه هم‌جنس نیستند، امکان

مقایسه آن‌ها وجود نخواهد داشت. برای حل این مشکل و نیز با هدف هم‌مقیاس کردن داده‌های پارامترها، این داده‌ها که در ماتریس نتایج ذخیره شده‌اند، با استفاده از روش Z-SCORE استانداردسازی می‌شوند. رابطه ریاضی



شکل (۵): فلوچارت روند حل مساله

این روش استانداردسازی به شکل زیر است (Curtis et al., 2016).

$$f_u = \frac{F_{i_u} - \bar{F}}{\sigma} \quad \forall i = \{1, 2, \dots, n\}, \quad \forall u = \{1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

در رابطه فوق، f_u پارامتر استانداردسازی شده پس از وقوع عدم قطعیت u ام و F_{i_u} مقدار واقعی پارامتر مورد مطالعه F به‌ازای وقوع خطا در مکان i ام پس از اعمال عدم قطعیت u ام می‌باشد. \bar{F} و σ به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار پارامتر مورد بررسی F هستند. به‌منظور بررسی میزان تاثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها بر روی پارامتر انتخابی، یکی از شاخص‌های معرفی

پشتیبان مورد مطالعه می‌باشند. سایر اطلاعات ریزشکبه در مرجع (Univ. Washington, Seattle, 2016) آورده شده‌است.

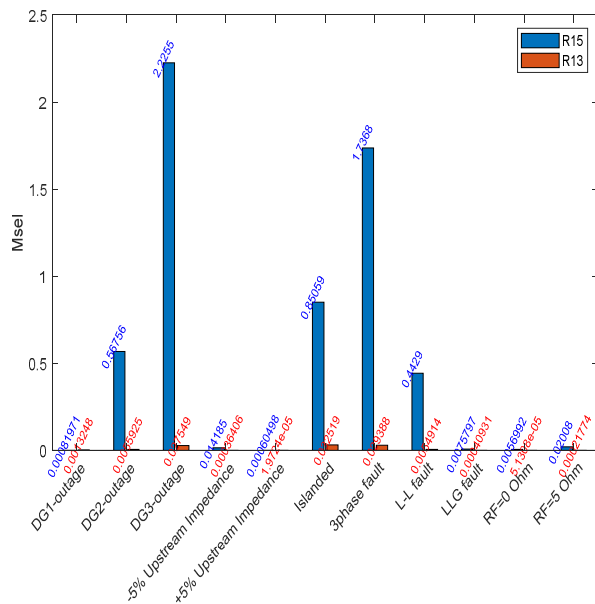
به منظور انجام محاسبات اتصال کوتاه در ریزشکبه پایه شکل (۶)، خطا از نوع تک‌فاز به زمین با مقاومت ۲ اهم در نظر گرفته شده است. با هدف محاسبه شاخص‌های پیشنهادی به‌ازای هر یک از عدم قطعیت‌های مورد بررسی، خطاهای مجزایی با گام‌های ۱۰ درصد در طول خطی که رله اصلی R15 در آن قرار گرفته است، ایجاد شده و مقادیر پارامترها در محل زوج رله مورد مطالعه اندازه‌گیری می‌گردد.

۵-۲- نتایج محاسبه مقدار شاخص‌های پیشنهادی

در این قسمت مقادیر هر یک از شاخص‌های پیشنهادی این مقاله برای پارامترهای ریزشکبه تحت مطالعه به‌ازای عدم قطعیت‌های مختلف محاسبه گردیده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. لازم به‌ذکر است که شاخص پیشنهادی اول به‌صورت جداگانه برای رله‌های اصلی و پشتیبان محاسبه می‌شود ولی شاخص‌های دوم و سوم پیشنهادی برای زوج رله مورد مطالعه محاسبه می‌گردند.

نتایج شاخص اول

نتایج محاسبه شاخص MSE پارامتر جریان اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی R15 و پشتیبان R13 در ریزشکبه تحت مطالعه به‌ازای عدم قطعیت‌های مختلف، در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر شاخص اول برای هر یک از رله‌های اصلی R15 و پشتیبان R13 به صورت مجزا از یکدیگر محاسبه گردیده و فقط به منظور مقایسه، در یک شکل ترسیم شده‌اند. نتایج این شاخص مربوط به سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده نیز در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۷): نتایج محاسبه شاخص MSE برای جریان اندازه‌گیری شده در محل رله‌های اصلی و پشتیبان R15 و R13 ریزشکبه تحت مطالعه

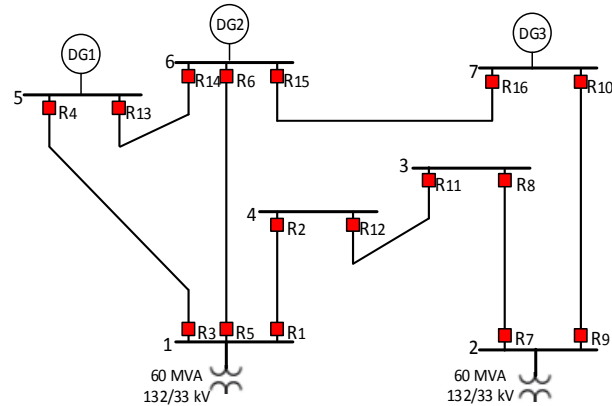
شده در بخش ۲ به کمک داده‌های استانداردسازی شده بدست می‌آید. تمامی مراحل فوق به‌طور جداگانه برای سایر پارامترهای تحت مطالعه نیز تکرار می‌شود. در نهایت به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکبه، یکی از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی بر روی داده‌های حاصل از اعمال شاخص پیشنهادی مذکور مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۵- نتایج عددی

در این بخش ابتدا ریز شبکه تحت مطالعه معرفی می‌گردد. سپس نتایج عددی حاصل از اعمال شاخص‌های پیشنهادی بر روی پارامترهای ریز شبکه و همچنین نتایج اولویت‌بندی این پارامترها با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی در زیربخش‌های مجزا ارائه می‌گردد. در نهایت نتایج آنالیز حساسیت آورده می‌شود.

۵-۱- معرفی شبکه مورد مطالعه

برای اعتبارسنجی شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی، ابتدا شاخص‌های پیشنهادی بر روی پارامترهای بخش توزیع شبکه ۱۴ شینه IEEE که به عنوان یک ریزشکبه در نظر گرفته شده است، اعمال می‌شود. سپس به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای این ریزشکبه، روش‌های مقایسه‌ای بر روی نتایج شاخص‌ها پیاده‌سازی می‌گردند. دیاگرام تک خطی این ریزشکبه در شکل (۶) نشان داده شده است (Saleh et al., 2017).



شکل (۶): ریزشکبه تست مورد مطالعه

ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بالادست این ریزشکبه 500MVA و نسبت X/R آن برابر با ۶ می‌باشد. این ریزشکبه از طریق دو ترانس با ظرفیت 60MVA و ولتاژ 132kv/33kv که در شین‌های ۱ و ۲ قرار دارند، به شبکه بالادست اتصال می‌یابد. دو DG مبتنی بر اینورتر در باس‌های ۵ و ۷ و یک DG سنکرونی در باس ۶ این ریزشکبه متصل شده‌است. ظرفیت تمامی DG ها 20MVA و راکتانس زیرگذرای منبع تولید پراکنده سنکرونی 9.67% انتخاب شده‌است. هر یک از این DG ها توسط یک ترانس 480V/33kV با راکتانس گذرای 5%، سیستم را تغذیه می‌نمایند. این ریزشکبه شامل ۱۶ رله بوده که R13 و R15 به ترتیب، رله‌های اصلی و

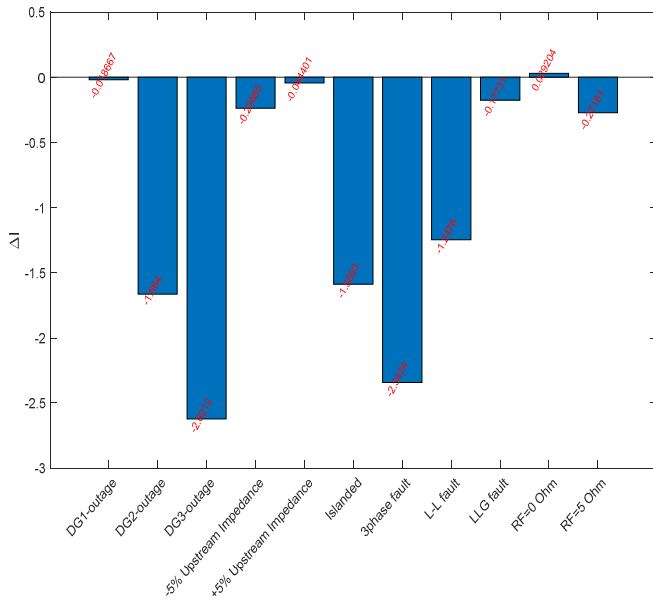
جدول (۱): ماتریس داده‌های روش بردا به‌ازای شاخص‌های سه‌گانه

عدم قطعیت‌های مورد مطالعه ↓	ضرایب وزنی مورد استفاده در روش‌های وزنی	شاخص اول (Mse) رله اصلی R15			شاخص اول (Mse) رله پشتیبان R13			شاخص دوم			شاخص سوم								
		MseRI15	MseVR15	MseZR15	MseROCOIRI	MseROCOVR	MseROCOZR	MseRI13	MseVR13	MseZR13	MseROCOIRI	MseROCOVR	MseROCOZR	ΔI	ΔV	ΔZ	ΔROCOI	ΔROCOV	ΔROCOZ
	DG1-Outage $\omega_1=0.08$	۰/۰۰۰۰۸۱	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۱۳۲	۰/۰۰۰۰۷۱۹	۰/۰۰۰۰۱۳۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸	۱/۰۰۵۵۹	۰/۰۰۲۳۷	۰/۰۰۲۷۷	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰
	DG2-Outage $\omega_2=0.08$	۰/۰۰۰۰۵۶۷	۰/۰۰۰۰۳۲۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	DG3-Outage $\omega_3=0.08$	۰/۰۰۰۰۲۲۵	۰/۰۰۰۰۴۵۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	-5%upstream Impedance $\omega_4=0.05$	۰/۰۰۰۰۱۴۱	۰/۰۰۰۰۰۷۹	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	+5%upstream Impedance $\omega_5=0.15$	۰/۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	Islanded $\omega_6=0.09$	۰/۰۰۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	3Phase fault $\omega_7=0.08$	۰/۰۰۰۰۱۳۶	۰/۰۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	L-L fault $\omega_8=0.1$	۰/۰۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	L-L-G fault $\omega_9=0.1$	۰/۰۰۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	$R_f = 0 \Omega$ $\omega_{10}=0.07$	۰/۰۰۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	$R_f = 5 \Omega$ $\omega_{11}=0.12$	۰/۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰
	$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot index f_u$ ↑	۰/۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰

مورد مطالعه نمی‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که برای سایر پارامترها، به‌ازای اعمال عدم‌قطعیت‌های خروج DG3، وقوع خطای سه‌فاز و جزیره‌ای شدن ریزشبه پایه، فاصله ذاتی بین منحنی رله‌های اصلی و پشتیبان حداقل می‌باشد. بنابراین امکان نقض قید هماهنگی بین زوج رله تحت مطالعه به‌ازای این عدم قطعیت‌ها بیشتر خواهد بود.

نتایج شاخص سوم

از دیدگاه این شاخص، تغییرات فاصله بین منحنی‌های رله اصلی و پشتیبان یک پارامتر در اثر وقوع یک عدم قطعیت، نسبت به همین فاصله در ریزشبه پایه، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. شکل (۹) و داده‌های سطرهای انتهایی جدول (۱)، نتایج محاسبه شاخص سوم به‌ترتیب برای پارامتر جریان و سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل زوج رله R13 و R15 ریزشبه تحت مطالعه را نشان می‌دهند.



شکل (۹): نتایج محاسبه شاخص سوم برای جریان اندازه‌گیری شده در محل زوج رله اصلی و پشتیبان R13 و R15 ریزشبه تحت مطالعه

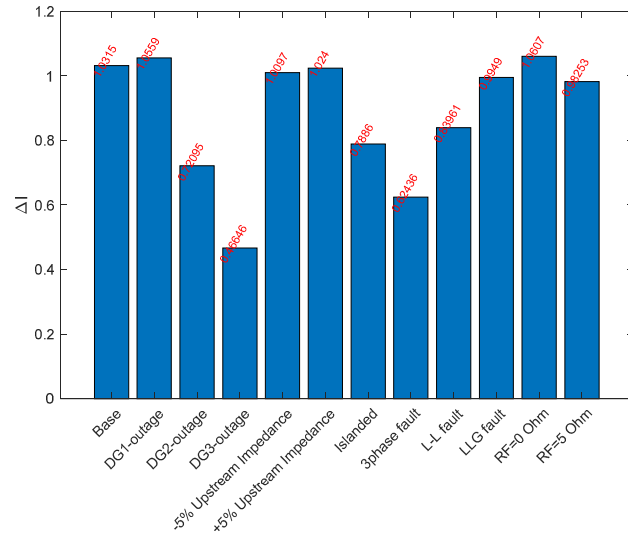
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پس از اعمال اکثر عدم قطعیت‌های مورد مطالعه، فاصله بین منحنی‌های رله اصلی R15 و پشتیبان R13 مربوط به پارامترهای V و $ROCOV$ نسبت به فاصله این منحنی‌ها در ریزشبه پایه، کمتر خواهد شد. این مساله نشانگر بدتر شدن شرایط هماهنگی رله‌های مذکور نسبت به ریزشبه پایه بوده و باید در انتخاب پارامتر مورد استفاده در مشخصه حفاظتی این رله‌ها و نیز تنظیمات آن‌ها مدنظر قرار گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین تغییرات فاصله بین منحنی رله‌های اصلی و پشتیبان مربوط به پارامترهای Z ، $ROCOI$ و $ROCOZ$ نسبت به این فاصله در ریزشبه پایه، در اثر وقوع عدم قطعیت‌های مربوط به تغییر نوع خطا اتفاق می‌افتد.

جدول (۱)، همان ماتریس داده‌های روش مقایسه‌ای بردا است با این تفاوت که یک سطر با مقادیر ضرایب وزنی مربوط به عدم قطعیت‌ها به‌منظور

با دقت در شکل (۷) و نتایج شاخص MSE در جدول (۱) ملاحظه می‌شود که در محل رله‌های اصلی و پشتیبان R13 و R15 ریزشبه تحت مطالعه خروج DG3 از ریزشبه پایه تحت مطالعه، باعث ایجاد بیشترین مقدار در شاخص MSE پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله اصلی می‌شود. همچنین اعمال عدم قطعیت‌های خروج DG3 و جزیره‌ای شدن ریزشبه، بیشترین مقدار را برای شاخص MSE پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله پشتیبان به دنبال دارد. به‌ازای اعمال یک عدم قطعیت، هر چه مقدار شاخص MSE یک پارامتر بیشتر باشد بدین مفهوم است که میزان تغییرات این پارامتر نسبت به مقدار آن در ریزشبه پایه مورد مطالعه، بیشتر بوده است. در این شرایط ممکن است تنظیمات مربوط به زوج رله مورد مطالعه در ریزشبه پایه جوابگوی این تغییرات زیاد نبوده و منجر به ایجاد ناهماهنگی بین این زوج رله گردد.

نتایج شاخص دوم

شاخص پیشنهادی دوم، امکان ارزیابی رفتار پارامترهای ریزشبه به‌هنگام وقوع عدم قطعیت‌های مختلف را از دیدگاه امکان نقض قید هماهنگی فراهم می‌کند. به‌عنوان نمونه نتایج محاسبه این شاخص برای پارامتر جریان اندازه‌گیری شده در محل زوج رله R13 و R15 ریزشبه تحت مطالعه، در شکل (۸) نشان داده شده است. مقادیر این شاخص مربوط به سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده به‌ازای عدم قطعیت‌های مختلف، در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۸): نتایج محاسبه شاخص دوم برای جریان اندازه‌گیری شده در محل زوج رله اصلی و پشتیبان R13 و R15 ریزشبه تحت مطالعه

همان‌طور که در شکل (۸) و جدول (۱) مشاهده می‌شود مقادیر $\Delta ROCOI$ به‌ازای تمامی عدم قطعیت‌های مورد مطالعه و مقادیر $\Delta ROCOZ$ به‌ازای نیمی از این عدم قطعیت‌ها منفی می‌باشند. این وضعیت نشان می‌دهد که به‌هنگام وقوع این عدم قطعیت‌ها، رفتار ذاتی پارامترهای $ROCOI$ و $ROCOZ$ در راستای نقض قید هماهنگی است. بنابراین، از دیدگاه شاخص دوم، این پارامترها گزینه مناسبی جهت استفاده در ضابطه رله‌های ریزشبه

مورد مقایسه، مقداری برابر با صفر یا ۱ خواهند داشت. درایه‌های ماتریس B از مجموع درایه‌های هر سطر ماتریس A تشکیل می‌شود. این ماتریس که تعداد مسلط شدن هر پارامتر نسبت به سایر پارامترهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد، به منظور تصمیم‌گیری نهایی جهت اولویت‌بندی پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج محاسبه این ماتریس برای تمامی شاخص‌های پیشنهادی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): نتایج ماتریس B به‌ازای شاخص‌های سه‌گانه در روش‌های

مقایسه‌ای بردا و بردا وزنی

شاخص	ماتریس B برای رله اصلی	ماتریس B برای رله پشتیبان
شاخص اول (MSE)	$\begin{bmatrix} MseI & 0 \\ MseV & 1 \\ MseZ & 5 \\ MseRocoI & 2 \\ MseRocoV & 3 \\ MseRocoZ & 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} MseI & 4 \\ MseV & 0 \\ MseZ & 3 \\ MseRocoI & 5 \\ MseRocoV & 2 \\ MseRocoZ & 1 \end{bmatrix}$
شاخص دوم	$\begin{bmatrix} \Delta I & 5 \\ \Delta V & 3 \\ \Delta Z & 4 \\ \Delta RocoI & 0 \\ \Delta RocoV & 2 \\ \Delta RocoZ & 1 \end{bmatrix}$	-
شاخص سوم	$\begin{bmatrix} \Delta I & 0 \\ \Delta V & 1 \\ \Delta Z & 2 \\ \Delta RocoI & 5 \\ \Delta RocoV & 3 \\ \Delta RocoZ & 4 \end{bmatrix}$	-

از آنجا که هر یک از شاخص‌های پیشنهادی از دیدگاه مخصوص به خود، پارامترهای ریزشکبه را مورد بررسی قرار می‌دهد، نتایج ماتریس B به‌ازای شاخص‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. نتایج نهایی اولویت‌بندی پارامترها بر اساس روش مقایسه‌ای بردا از دیدگاه هر یک از شاخص‌های پیشنهادی در جدول (۴) نشان داده شده است.

نتایج اولویت‌بندی پارامترها توسط روش مقایسه‌ای بردا وزنی

ماتریس داده‌های روش بردا به‌ازای سه شاخص پیشنهادی دقیقاً همانند جدول (۱) است. تنها تفاوت ماتریس داده‌ها در روش بردا وزنی با روش بردا معمولی در این است که یک سطر حاوی اطلاعات ضرایب وزنی مربوط به هر یک از عدم قطعیت‌ها در آن وجود دارد.

با محاسبه ماتریس‌های A و B بر اساس اصولی که برای روش مقایسه‌ای بردا وزنی بیان شد، ملاحظه می‌شود که در ریزشکبه تحت مطالعه، نتایج این ماتریس‌ها به‌ازای ضرایب وزنی فرض شده برای عدم قطعیت‌ها، همان نتایج بدست آمده برای روش بردا معمولی در جدول‌های (۲) و (۳) می‌باشد. نتایج نهایی حاصل از اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکبه مورد مطالعه با استفاده از روش مقایسه‌ای بردا وزنی در جدول (۴) نشان داده شده است.

نتایج اولویت‌بندی پارامترها بر اساس راهکار پیشنهادی Q

با استفاده از داده‌ها و ضرایب وزنی جدول (۱)، مقادیر Q در رابطه (۹)

استفاده در روش‌های مقایسه‌ای وزنی پیشنهادی و نیز یک ستون که مقادیر حاصل از محاسبه Q در رابطه (۹) به‌ازای شاخص‌های پیشنهادی می‌باشد، به آن اضافه شده است. در ادامه روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی بر روی داده‌های این جدول پیاده‌سازی می‌شوند.

۵-۳- نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکبه تحت مطالعه

در زیربخش قبل مقادیر سه شاخص پیشنهادی در این مقاله به‌ازای عدم قطعیت‌های مورد مطالعه محاسبه شده و نتایج آن به صورت یکجا در جدول (۱) آورده شد. به منظور اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکبه مورد مطالعه، هر یک از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی سه‌گانه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه هر یک از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی به صورت مجزا بر روی داده‌های جدول (۱) اعمال گردیده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتایج اولویت‌بندی پارامترها توسط روش مقایسه‌ای بردا

ماتریس داده‌های روش بردا برای هر سه شاخص پیشنهادی همان جدول (۱) است با این تفاوت که چون در این روش مقایسه‌ای تمام عدم قطعیت‌ها هم‌ارزش در نظر گرفته می‌شوند، لذا سطر حاوی اطلاعات ضرایب وزنی هر یک از عدم قطعیت‌ها در این ماتریس وجود ندارد. به روشی که پیش‌تر توضیح داده شد، ماتریس مقایسه زوجی A، با مقایسه دو به دو پارامترها به‌ازای عدم قطعیت‌های مختلف در جدول (۱) محاسبه می‌گردد. مقادیر این ماتریس برای ریزشکبه مورد مطالعه، به‌ازای شاخص‌های سه‌گانه پیشنهادی، در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج ماتریس A به‌ازای شاخص‌های سه‌گانه در روش‌های

مقایسه‌ای بردا و بردا وزنی

شاخص	ماتریس A برای رله اصلی	ماتریس A برای رله پشتیبان
شاخص اول (MSE)	$\begin{bmatrix} MseI & MseV & \dots & MseRocoZ \\ MseI & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ MseV & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ MseZ & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ MseRocoI & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ MseRocoV & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ MseRocoZ & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} MseI & MseV & \dots & MseRocoZ \\ MseI & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ MseV & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ MseZ & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ MseRocoI & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ MseRocoV & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ MseRocoZ & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
شاخص دوم	$\begin{bmatrix} \Delta I & \Delta V & \dots & \Delta RocoZ \\ \Delta I & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \Delta V & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \Delta Z & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \Delta RocoI & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta RocoV & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \Delta RocoZ & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	-
شاخص سوم	$\begin{bmatrix} \Delta I & \Delta V & \dots & \Delta RocoZ \\ \Delta I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta V & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta Z & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta RocoI & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \Delta RocoV & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta RocoZ & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	-

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمامی درایه‌های روی قطر اصلی این ماتریس برابر با صفر بوده و سایر درایه‌ها بسته به نتیجه مقایسه دو پارامتر

جدول (۴): نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزش‌بکه مورد مطالعه به‌ازای شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی

شاخص	رله	روش مقایسه	نتیجه اولویت بندی
شاخص اصلی	رله اصلی	$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot Msef_u$	1-Z 2-RocoZ 3-RocoI 4-I 5-RocoV 6-V
		بردا معمولی	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4- RocoI 5- V 6-I
		بردا وزنی	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4- RocoI 5- V 6-I
شاخص MSE	رله پشتیبان	$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot Msef_u$	1- I 2-RocoI 3-Z 4- RocoV 5-V 6- RocoZ
		بردا معمولی	1- RocoI 2-I 3-Z 4- RocoV 5- RocoZ 6-V
		بردا وزنی	1-RocoI 2-I 3-Z 4- RocoV 5- RocoZ 6-V
شاخص دوم	-	$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot Af_u$	1- I 2-Z 3-V 4- RocoV 5-RocoZ 6- RocoI
		بردا معمولی	1- I 2-Z 3-V 4- RocoV 5-RocoZ 6- RocoI
		بردا وزنی	1- I 2-Z 3-V 4- RocoV 5-RocoZ 6- RocoI
شاخص سوم	-	$Q = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot Af_u$	1-Z 2-RocoI 3- - 4- - 5- - 6- -
		بردا معمولی	1-RocoI 2-RocoZ 3- RocoV 4-Z 5-V 6-I
		بردا وزنی	1- RocoI 2-RocoZ 3-RocoV 4-Z 5-V 6-I

برای تمامی پارامترهای مورد مطالعه از دیدگاه سه شاخص پیشنهادی محاسبه گردیده و نتایج آن در ستون آخر جدول (۱) آورده شده است. اولویت‌بندی پارامترهای ریزش‌بکه تحت مطالعه از دیدگاه هر شاخص، با مقایسه مقادیر Q مربوط به آن شاخص در ستون آخر جدول (۱) انجام می‌شود. ملاک ارجح بودن یک پارامتر در شاخص MSE مینیمم بودن آن پارامتر است. بنابراین در راهکار پیشنهادی Q ، برای اولویت‌بندی پارامترها از دیدگاه شاخص MSE، مقادیر Q آن‌ها از کمترین مقدار به بیشترین مقدار مرتب می‌شود. با توجه به اینکه از دیدگاه شاخص پیشنهادی دوم پارامتری بهتر است که مقدار بیشتری داشته باشد، برای اولویت‌بندی پارامترها از دیدگاه این شاخص، مقادیر Q آن‌ها از بیشترین مقدار به کمترین مقدار مرتب می‌شوند. از منظر شاخص سوم پارامتری بهتر است که هم قید هماهنگی را نقض نکند و هم سرعت سیستم حفاظتی به‌ازای آن بیشتر باشد. بر این اساس نتایج اولویت‌بندی پارامترها در ریزش‌بکه تحت مطالعه، از دیدگاه راهکار پیشنهادی Q در جدول (۴) آورده شده است.

با دقت در نتایج جدول (۴) ملاحظه می‌شود که:

(الف) نتایج اولویت‌بندی از دیدگاه شاخص‌های پیشنهادی مختلف، متفاوت است. با توجه به اینکه هر یک از شاخص‌های معرفی شده از دیدگاه خاصی

تغییرات پارامترهای ریزش‌بکه را مورد بررسی قرار می‌دهد، این تفاوت در نتایج اولویت‌بندی، یک امر طبیعی می‌باشد. بنابراین برای بهره‌گیری از نتایج اولویت‌بندی پارامترها در مطالعات حفاظتی، ابتدا باید دیدگاه موردنظر مشخص شود. سپس با توجه به آن، شاخصی که به آن دیدگاه نزدیک‌تر است انتخاب گردد.

(ب) نتایج اولویت‌بندی پارامترها در ریزش‌بکه تحت مطالعه تنها از دیدگاه شاخص پیشنهادی دوم به‌ازای روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی سه‌گانه یکسان می‌باشد. این درحالی است که از دیدگاه شاخص‌های پیشنهادی اول و سوم نتایج اولویت‌بندی پارامترها با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای بردا معمولی و بردا وزنی یکسان است.

(ج) به‌عنوان یک نتیجه‌گیری جامع می‌توان بیان نمود که از دیدگاه تمامی شاخص‌های پیشنهادی و به‌ازای همه روش‌های مقایسه‌ای معرفی شده در این مقاله، پارامتر Z نسبت به سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های ریزش‌بکه از اولویت نسبی بهتری برخوردار است. بنابراین این پارامتر می‌تواند گزینه مناسبی جهت تشخیص خطا و استفاده در مشخصه رله‌های ریزش‌بکه باشد.

۴-۵- نتایج آنالیز حساسیت

در این بخش تاثیر تغییر در ضرایب وزنی عدم قطعیت‌ها، تغییر زوج رله مورد مطالعه و نیز تغییر نوع DG بر روی نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزش‌بکه مورد مطالعه با استفاده از روش مقایسه‌ای بردا وزنی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تغییر در ضرایب وزنی عدم قطعیت‌ها

به‌منظور بررسی تاثیر تغییر ضرایب وزنی عدم قطعیت‌های مورد بررسی بر روی اولویت‌بندی پارامترهای ریزش‌بکه تحت مطالعه، ضرایب وزنی ω_2 ، ω_4 ، ω_5 ، ω_6 ، ω_7 و ω_{11} در جدول (۱) به‌ترتیب به مقادیر $0/11$ ، $0/15$ ، $0/05$ ، $0/1$ ، $0/07$ و $0/09$ تغییر می‌یابد. نتایج جدید اولویت‌بندی پارامترها در ستون پنجم جدول (۵) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با تغییر ضرایب وزنی عدم قطعیت‌ها، اولویت‌بندی پارامترها در ریزش‌بکه تحت مطالعه شکل (۶) نسبت به قبل تغییری نداشته است. نکته قابل توجه این است که در صورتی که ریزش‌بکه تحت مطالعه عوض شود، با تغییر ضرایب وزنی، امکان تغییر نتایج اولویت‌بندی پارامترها وجود دارد. بنابراین به منظور استفاده از نتایج اولویت‌بندی پارامترهای یک ریزش‌بکه در مطالعات حفاظتی ابتدا باید شاخص‌ها و روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی این مقاله را بر روی پارامترهای آن ریزش‌بکه پیاده‌سازی نمود.

تغییر نوع منابع تولید پراکنده ریزش‌بکه تحت مطالعه

به‌منظور انجام آنالیز حساسیت بر روی اطلاعات ریزش‌بکه، سناریو تغییر در نوع منابع تولید پراکنده ریزش‌بکه تحت مطالعه انتخاب شده است. برای این منظور DG1 و DG3 در ریزش‌بکه از نوع مبتنی بر اینورتر به نوع سنکرونی تغییر می‌یابند. نتایج اولویت‌بندی پس از اعمال شاخص‌ها و

از اعمال یک عدم قطعیت نسبت به مقادیر آن‌ها در ریزشکه پایه تحت مطالعه بود. دیدگاهی که در تعریف شاخص دوم مدنظر قرار گرفت، امکان نقض قید هماهنگی بین زوج رله‌های ریزشکه پس از اعمال یک عدم قطعیت بود. همچنین تغییرات فاصله بین منحنی‌های پارامتر نسبت به تغییر مکان وقوع خطا مربوط به رله‌های اصلی و پشتیبان پس از اعمال یک عدم قطعیت در مقایسه با همین فاصله در ریزشکه پایه تحت مطالعه، دیدگاهی است که در معرفی شاخص سوم استفاده گردید. جهت اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه، روش‌های مقایسه‌ای وزنی و غیروزنی کارآمدی ارائه شد. اصول مقایسه در روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادی بردا و بردای وزنی، بر پایه مقایسه دو به دوی پارامترها و نیز مقایسه نظیر به نظیر مقادیر شاخص‌ها به‌ازای عدم قطعیت‌های مورد مطالعه می‌باشد. از آنجایی‌که پارامترهای ریزشکه هم‌جنس نیستند، مقایسه مستقیم آن‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین قبل از اعمال شاخص‌های پیشنهادی بر روی این پارامترها و نیز انجام عمل مقایسه توسط روش‌های مقایسه‌ای، عملیات استانداردسازی بر روی آن‌ها انجام پذیرفت. بر اساس این مطالعات مشخص گردید که به دلیل وجود تفاوت دیدگاه در تعریف شاخص‌های پیشنهادی، نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه می‌تواند از دیدگاه هر شاخص متفاوت باشد. بنابراین قبل از اقدام به اولویت‌بندی پارامترهای یک ریزشکه باید دیدگاه موردنظر تعیین گردد. همچنین مشخص گردید که نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه از دیدگاه شاخص پیشنهادی دوم به‌ازای هر سه روش مقایسه‌ای معرفی شده، یکسان است. بنابراین نتایج اولویت‌بندی بر اساس این شاخص دارای اعتبار قابل قبولی می‌باشد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی ملاحظه گردید که از دیدگاه سه شاخص پیشنهادی و به‌ازای روش‌های مقایسه‌ای معرفی شده در این مقاله، پارامتر Z نسبت به سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل رله‌های ریزشکه دارای اولویت بهتری می‌باشد. بنابراین این پارامتر می‌تواند گزینه مناسبی جهت تشخیص خطا و استفاده در مشخصه عملکرد رله‌های حفاظتی ریزشکه باشد.

روش‌های پیشنهادی بر روی ریزشکه تغییر یافته، در ستون ششم جدول (۵) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با تغییر نوع منابع تولید پراکنده نتایج اولویت‌بندی نسبت به حالت قبل تغییری نخواهد کرد.

تغییر زوج رله مورد بررسی در ریزشکه تحت مطالعه

با هدف بررسی تاثیر تغییر زوج رله مورد مطالعه بر روی نتایج اولویت‌بندی پارامترها در ریزشکه، زوج رله جدید R13-R6 انتخاب می‌گردد. رله R6 به عنوان رله اصلی و رله R13 به‌عنوان رله پشتیبان در نظر گرفته می‌شود. نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه تحت مطالعه، با اعمال شاخص‌های سه‌گانه پیشنهادی بر روی پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل این زوج رله و نیز استفاده از روش مقایسه‌ای بردا وزنی بدست آمده است. این نتایج در ستون آخر جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج اولویت‌بندی به‌ازای شاخص MSE رله اصلی و نیز شاخص سوم در زوج رله جدید R13-R6، همانند زوج رله R13-R15 می‌باشد. همچنین نتایج اولویت‌بندی به‌ازای شاخص دوم در زوج رله جدید تفاوت جزئی با این نتایج در زوج رله قبلی دارد که این تفاوت قابل اغماض می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

انتخاب پارامتر مناسب اندازه‌گیری شده در محل رله، به‌منظور تشخیص وقوع خطا و استفاده در مشخصه عملکرد رله‌های سیستم حفاظتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این انتخاب مستلزم اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه می‌باشد. در این مقاله سه شاخص به‌منظور بررسی تاثیر هر یک از عدم قطعیت‌های مورد مطالعه بر روی پارامترهای یک ریزشکه پیشنهاد گردید. برای محاسبه این شاخص‌ها از منحنی‌های تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل زوج رله مورد مطالعه نسبت به تغییر مکان وقوع خطا استفاده شد. در تعریف هر یک از این شاخص‌ها دیدگاه خاصی مورد توجه قرار گرفت. دیدگاه شاخص MSE بررسی تغییرات مقدار پارامترها پس

جدول (۵): نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشکه مورد مطالعه پس از انجام مطالعات آنالیز حساسیت

شاخص	رله	روش مقایسه	نتیجه اولویت بندی برای زوج رله R13 و R15	نتیجه اولویت بندی برای زوج رله R13 و R15 پس از تغییر ضرایب وزنی	نتیجه اولویت بندی برای زوج رله R13 و R15	نتیجه اولویت بندی برای زوج رله R13 و R6
شاخص MSE	رله اصلی	بردا وزنی	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4-RocoI 5-V 6-I	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4-RocoI 5-V 6-I	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4-RocoI 5-V 6-I	1-Z 2-RocoZ 3-RocoV 4-RocoI 5-V 6-I
شاخص دوم	-	بردا وزنی	1-RocoI 2-I 3-Z 4-RocoV 5-RocoZ 6-V	1-RocoI 2-I 3-Z 4-RocoV 5-RocoZ 6-V	1-I 2-Z 3-V 4-RocoV 5-RocoZ 6-RocoI	1-I 2-Z 3-V 4-RocoV 5-RocoZ 6-RocoI
شاخص سوم	-	بردا وزنی	1-RocoI 2-RocoZ 3-RocoV 4-Z 5-V 6-I	1-RocoI 2-RocoZ 3-RocoV 4-Z 5-V 6-I	1-RocoI 2-RocoZ 3-RocoV 4-V 5-Z 6-I	1-RocoI 2-RocoZ 3-RocoV 4-V 5-Z 6-I

Dawoud, M. A., Ibrahim, D. K., & Gilany, M. I. (2021b). Robust coordination scheme for microgrids protection based on the rate of change of voltage. *IEEE Access*, 9, 156283-156296.

Ghotbi-Maleki, M., Chabanloo, R. M., Zeineldin, H. H., & Miangafsheh, S. M. H. (2020). Design of setting group-based overcurrent protection scheme for active distribution networks using MILP. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2), 1185-1193.

Hosseini, S. A., Abyaneh, H. A., Sadeghi, S. H. H., Razavi, F., & Nasiri, A. (2016). An overview of microgrid protection methods and the factors involved. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 174-186.

Jamali, S., & Borhani-Bahabadi, H. (2018). Protection method for radial distribution systems with DG using local voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 651-660.

Nascimento, J. P., Brito, N. S., & Souza, B. A. (2020). An adaptive overcurrent protection system applied to distribution systems. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106545-106554.

Saber, A., Zeineldin, H. H., El-Fouly, T. H., & Al-Durra, A. (2023). Overcurrent protection coordination with flexible partitioning of active distribution systems into multiple microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 151, 109205-109216.

Sadeghi, M. H., Dastfan, A., & Damchi, Y. (2021). Robust and adaptive coordination approaches for co-optimization of voltage dip and directional overcurrent relays coordination. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 129, 106850 - 106859.

Saleh, K. A., Zeineldin, H. H., & El-Saadany, E. F. (2017). Optimal protection coordination for microgrids considering N-1 contingency. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), 2270-2278.

Santos, G. P., Tsutsumi, A., & Vieira, J. C. M. (2023). Enhanced voltage relay for AC microgrid protection. *Electric Power Systems Research*, 220, 109310 -109316.

Selim, A., Kamel, S., Alghamdi, A. S., & Jurado, F. (2020). Optimal placement of DGs in distribution system using an improved Harris Hawks optimizer based on single-and multi-objective approaches. *IEEE Access*, 8, 52815-52829.

Shabani, M., & Karimi, A. (2018). A robust approach for coordination of directional overcurrent relays in active radial and meshed distribution networks considering uncertainties. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(5), 2532-2545.

Shawon, S. M. R. H., Liang, X., & Janbakhsh, M. (2023). Optimal placement of distributed generation units for microgrid planning in distribution networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(3), 2785-2795.

در انتهای این مقاله به منظور بررسی تاثیرپذیری نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشبه نسبت به تغییر عوامل مختلف، اقدام به انجام مطالعات آنالیز حساسیت گردید. در این مطالعات مشخص گردید که تغییر ضرایب وزنی عدم قطعیت‌های مورد مطالعه و نیز تغییر در نوع منابع تولید پراکنده، تاثیری بر نتایج اولویت‌بندی پارامترها ندارد. همچنین نشان داده شد که تغییر زوج رله تحت مطالعه باعث تغییرات ناچیزی در نتایج اولویت‌بندی پارامترهای ریزشبه شده که معمولاً قابل چشم‌پوشی است.

جدول (۶) خلاصه‌ای از ویژگی‌های هر یک از پارامترهای مورد بررسی در این مقاله از دیدگاه شاخص‌های سه‌گانه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۶): خلاصه ویژگی‌های پارامترهای مورد بررسی از دیدگاه

شاخص‌های پیشنهادی

پارامتر	حساسیت به بروز عدم قطعیت بر اساس شاخص پیشنهادی اول (MSE)	امکان نقض قید بر اساس شاخص پیشنهادی دوم	امکان نقض قید بر اساس شاخص پیشنهادی سوم	سهولت اندازه‌گیری
I	زیاد	کم	زیاد	آسان
V	نسبتاً زیاد	متوسط	نسبتاً زیاد	آسان
Z	کم	کم	متوسط	آسان
RocoI	متوسط	زیاد	کم	پیچیده
RocoV	متوسط	متوسط	متوسط	پیچیده
RocoZ	کم	نسبتاً زیاد	کم	پیچیده

مراجع:

Ataee-Kachoe, A., Hashemi-Dezaki, H., & Ketabi, A. (2023). Optimized adaptive protection coordination of microgrids by dual-setting directional overcurrent relays considering different topologies based on limited independent relays' setting groups. *Electric Power Systems Research*, 214, 108879 - 108891.

Chakraborty, S., & Das, S. (2020). Communication-less protection scheme for AC microgrids using hybrid tripping characteristic. *Electric Power Systems Research*, 187, 106453-106466.

Curtis, A. E., Smith, T. A., Ziganshin, B. A., & Elefteriades, J. A. (2016). The mystery of the Z-score. *Aorta*, 4(04), 124-130.

Dawoud, M. A., Ibrahim, D. K., Gilany, M. I., & El'gharably, A. F. (2021a). Proposed application for rate of change of phasor voltage in fault detection and coordination studies in MV distribution networks. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 45, 815-831.

Subbaramaiah, K., & Sujatha, P. (2023). Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis. *Electric Power Systems Research*, 214, 108869-108881.

Univ. Washington, Seattle, WA, USA, "Power systems test case archive," 2016. [Online]. Available: <http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>

Yousaf, M., Jalilian, A., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2022). An adaptive overcurrent protection scheme for dual-setting directional recloser and fuse coordination in unbalanced distribution networks with distributed generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(2), 1831-1842.

Zarour, E., Alasali, F., Alsmadi, O., & El-Naily, N. (2023). A new adaptive protection approach for overcurrent relays using novel nonstandard current-voltage characteristics. *Electric Power Systems Research*, 216, 109083 -109094.