

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱

## مکان‌یابی خطای بهبود یافته با به کارگیری نشانگرهای خطا و مدل احتمالاتی بار

امید دریجانی<sup>۱</sup>، روح‌الله فدایی‌نژاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

darijany@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

rfadaein@kgut.ac.ir

**چکیده:** امروزه هوشمندسازی شبکه‌های توزیع از موضوعات چالشی و جدید محسوب می‌شود. یکی از مشخصه‌های هوشمندسازی در این شبکه‌ها قابلیت مکان‌یابی سریع و دقیق خطا در آنهاست. این موضوع موجب کاهش بخشی از زمان خاموشی‌هایی می‌شود که گروه‌های تعمیرات صرف جست‌وجوی محل خطا به روش سنتی می‌کنند. اما مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع با توجه به ذات توپولوژیک آن‌ها (انشعابات متعدد، بارهای میانی، خطا در تخمین میزان بارها، نا همگن بودن خطوط و...) کار بسیار دشوار و متفاوت از شبکه‌های انتقال برق است. در این تحقیق، برای کاهش تعداد جواب‌های مکان‌یاب خطا از اطلاعات نشانگرهای خطا استفاده شده است. در این مقاله، برای مکان‌یابی خطا، روشی مبتنی بر جاروب پس‌رو پیش‌رو معرفی شده است. در این راستا با توجه به تخمینی بودن میزان بارهای موجود در شبکه، به طبع با پارامترهای دارای عدم قطعیت سروکار خواهیم داشت. به دلیل شرایط آب‌وهوایی تقریباً یکسان برای فیدرهای توزیع و رفتارهای گاه مشابه مشترکین، بین این پارامترها همبستگی نیز وجود خواهد داشت. لذا برای مدل‌سازی مسئله و به دست آوردن تأثیر پارامترهای احتمالاتی بر روی محل محاسبه شده خطا از دو روش مرسوم مونت کارلو و تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است. در نهایت، برای ارزیابی روش پیشنهادی از شبکه تست ۱۱ باس، و شبکه واقعی ۳۰۶ باسه فیدر شرف‌آباد در شهر کرمان استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی خطا، پس‌رو پیش‌رو، شبکه‌های توزیع، پارامترهای احتمالاتی.

بایستی ساختار شبکه و اطلاعات جغرافیایی خطوط آن مشخص باشند [۹].

مقالات [۱۳ و ۱۴] مکان‌یابی خطا مبتنی بر یادگیری را معرفی کرده‌اند. در این مقالات، برای مکان‌یابی خطا از شبکه‌های عصبی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی برای مدل کردن رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم‌های پیچیده، کاربردهای گسترده‌ای دارند. از مزیت‌های به‌کارگیری شبکه عصبی می‌توان به سرعت بالا در محاسبات و ساده شدن تحلیل‌های مکان‌یابی خطا اشاره کرد. به‌رغم مزایای ذکر شده، در صورت تغییر در ساختار شبکه توزیع همانند مانورهای موقت، اضافه شدن بارهای میانی در طول زمان و... نیازمند یادگیری مجدد هستند.

با وجود پیشرفت‌ها در روش‌های مختلف مکان‌یابی خطا، از جمله روش‌های امواج سیار خطا، روش‌های بر مبنای اندازه‌گیری‌های پراکنده، روش‌های بر مبنای یادگیری و...، روش‌های بر مبنای اندازه‌گیری امیدانس خطا، به دلیل سادگی در پیاده‌سازی، همچنان به‌طور وسیعی در صنایع به کار گرفته می‌شوند [۱۵]. روش راکتانس ساده از روش‌های سنتی مکان‌یابی خطا بر مبنای اندازه‌گیری امیدانس است که از یک ترمینال ولتاژ و جریان برای مکان‌یابی استفاده می‌شود [۱۶]. در روش راکتانس، فاصله تا محل خطا در یک فیدر، توسط نسبت راکتانس اندازه‌گیری شده به راکتانس کل خط محاسبه می‌شود. در مراجع [۱۷ و ۱۸] مشهورترین روش‌های راکتانس پیشنهاد شده که در آن‌ها پیشرفت‌های بسیاری در راستای بهبود دقت صورت گرفته است. اما مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع به نسبت به‌کارگیری آن‌ها در شبکه‌های انتقال، شامل مشکلات جدید و چالشی خواهد بود. اکثر خطوط انتقال به حفاظت‌های متعدد، دستگاه‌های اندازه‌گیری و مکان‌یاب خطا مجهز هستند. در مقابل شبکه‌های توزیع در طول خط خود شامل بارهای میانی و انشعابات متعدد می‌باشند که فرایند مکان‌یابی خطا در این شبکه‌ها را پیچیده خواهد کرد. برخی از مشکلات مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع و چالش‌های پیش روی آن شامل موارد زیر است [۳]:

- پراکندگی جغرافیایی شبکه توزیع در یک منطقه وسیع
- ناهمگن بودن خطوط شبکه توزیع؛
- وجود بارهای میانی و انشعابات متعدد و برخی اوقات بارهای تک‌فاز یا دو فاز؛
- اندازه‌گیری‌های محدود و مشخص فقط در پست فوق توزیع؛

تشخیص محل دقیق خطا در شبکه‌های توزیع سبب کاهش چشمگیر در زمان خاموشی‌های ناخواسته خواهد شد. این در حالی است که زمان خاموشی بر مشترک یکی از اصلی‌ترین معیارهای قابلیت اطمینان در بازار برق تجدید ساختار یافته امروزی محسوب می‌شود. خاموشی‌ها عمدتاً موجب ایجاد وقفه در تولید به‌همراه خسارت‌های اقتصادی خواهند شد؛ از این رو وجود سیستمی که بتواند محل خطا را در کمترین زمان ممکن محاسبه کند، ضروری است. با توجه به روند افزایشی پیچیدگی و اندازه شبکه‌های توزیع، مکان‌یابی خطا نمی‌تواند فقط توسط اپراتور انسانی صورت بگیرد. شبکه‌های مدرن امروزی شامل زیرساخت‌های شبکه هوشمند هستند [۱ و ۲]. لذا در صورت اطلاع از محل دقیق خاموشی، در یک شبکه توزیع با کلیدهای کنترل از راه دور، می‌توان به‌صورت اتوماتیک نسبت به جداسازی تجهیزات آسیب‌دیده مبادرت ورزید و همچنین نسبت به برقرار کردن قسمت سالم شبکه از راه دور اقدام کرد.

روش‌های مکان‌یابی خطا به روش‌های بر مبنای اندازه‌گیری امیدانس، الگوریتم‌های بر مبنای اندازه‌گیری‌های پراکنده، روش‌های بر مبنای امواج سیار خطا، روش‌های بر مبنای یادگیری (شبکه‌های عصبی) و روش‌های ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. در مراجع [۴ و ۵] روش‌هایی بر مبنای اندازه‌گیری‌های پراکنده در طول فیدر معرفی شده است. به‌کارگیری دستگاه‌های اندازه‌گیری هوشمند با قابلیت پردازش کیفیت توان یا ذخیره‌کننده‌های دیجیتال در مکان‌های متعدد در طول شبکه توزیع از ملزومات آن است. البته همین موضوع سبب محدودیت استفاده از آن در کاربردهای عملی شده است.

در مراجع [۶-۱۱] روش‌های امواج سیار خطا برای شبکه‌های توزیع ارائه شده است. این روش‌ها در سیستم‌های انتقال دقیق هستند اما در شبکه‌های توزیع، به دلیل انشعاب‌های متعددی که دارند، انعکاس‌های متعددی را از خطا ایجاد می‌کنند. البته با اضافه کردن این انعکاس‌ها می‌توان به یک مصالحه برای رسیدن به دقت مطلوب دست پیدا کرد. در مرجع [۱۰] روشی برای امواج سیار خطا ارائه شده است که با استفاده از تبدیل موجک، ابتدا انشعاب خطا را مشخص می‌کند و سپس از طریق روشی بر مبنای اندازه‌گیری امیدانس، محل دقیق خطا مشخص می‌شود [۱۲]. تبدیل موجک پیوسته با فرکانس‌های مشخص، می‌تواند برای تشخیص هر کدام از انواع خطا در شبکه توزیع مورد استفاده قرار بگیرد. در این راستا

شده است [۳۴]. این مقاله مشکلات مکان‌یابی محل احتمالی خطا با استفاده از وضعیت آشکارسازهای خطا را که از راه دور به مرکز دیسپاچینگ توزیع مخابره شده‌اند، بررسی می‌کند. در مرجع [۳۵]، الگوریتم مکان‌یابی قسمت خطا توسط جمع‌آوری اطلاعات آشکارسازهای خطا معرفی شده است. در این روش، قسمت خطادار طوری پیدا می‌شود که اگر تعدادی از آشکارسازهای خطا سیگنال اشتباه مخابره کنند، قسمت خطادار با احتمال بالا درست تشخیص داده شود.

به هر حال، اگر توسط آشکارسازهای منصوبه در شبکه، مشکل جواب‌های چندگانه در مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع مرتفع شود، بحث پیش‌بینی بارهای میانی تا محل خطا و تأثیرات منفی آن بر دقت مکان‌یابی خطا باقی خواهد ماند. در مرجع [۳۶]، روشی برای مکان‌یابی خطا بر اساس اندازه‌گیری امیدانس در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در این روش، خطای تک‌فاز بررسی و به میزان تأثیر بحث احتمالاتی بودن بارها پرداخته شده، اما مدلی برای پارامترهای احتمالاتی ارائه نشده است. برای میزان مقاومت خطا به مقدار ۵۰ اهم بسنده شده و انواع دیگر خطا مورد بررسی قرار نگرفته است. در مرجع [۳۷]، روش مکان‌یابی خطا و در مرجع [۳۶] برای خطاهای دو فاز، دو فاز به زمین و سه فاز توسعه داده شده است. مقاله [۲۲] الگوریتمی برای تصحیح تخمین بار در مکان‌یابی خطا معرفی کرده است. این الگوریتم تا حدی خطای تخمین بار را کاهش می‌دهد، اما عملکرد آن تحت مدل‌سازی بارهای احتمالاتی ارائه نشده است. به هر حال در شبکه‌های توزیع، بارهای احتمالاتی همبسته وجود دارند که بایستی مدل‌سازی قابل قبولی از آن‌ها در نظر گرفته شود. در ادامه، مقاله [۳۸] روشی جامع برای مکان‌یابی خطا معرفی می‌کند که برای مدل‌سازی کابل‌های زیرزمینی از روابط پیوسته ولتاژ و جریان در طول فیذر استفاده شده است. در این روش، به بحث احتمالاتی بودن بارها پرداخته نشده است. اما این روش توانسته است توسط مدل‌سازی خاصیت خازنی کابل‌های زیرزمینی تا حد زیادی دقت مکان‌یابی خطا را بالا ببرد. در این مقاله، مقاومت خطا فقط تا ۱۰ اهم بررسی شده است. مقاله [۳۹] برای مکان‌یابی خطا به روش امیدانسی از تبدیل مودال استفاده کرده است. در این راستا به‌رغم پیشرفت‌های حاصل شده در نتایج، مقاله بدون در نظر گرفتن احتمالاتی بودن بار و مدل کامل خطوط توزیع (مدل پی خط یا مدل پارامترهای توزیع شده آن) نتایج خروجی خود را مورد ارزیابی قرار داده است. حال آنکه مقدار نامشخص بار که تحت کنترل و اندازه‌گیری دیسپاچینگ‌های توزیع نیستند، می‌تواند

- ماهیت دینامیک شبکه‌های توزیع؛
- تأثیر مقاومت خطا، که در اکثر موارد غیرقابل چشم‌پوشی است؛
- جواب‌های چندگانه که به‌خاطر وجود شاخه‌های متعدد در طول فیذرهای توزیع است.

در این راستا با توجه به موارد بیان‌شده، در مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع، با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان فقط در یک پست فوق توزیع، می‌توان چندین محل خطا در خروجی مشاهده کرد. برای مقابله با این چالش‌ها در مرجع [۱۹] یک روش جدید پیشنهاد شده است. این روش ارائه‌شده بر اساس آنالیز حالت دائم فیذر توزیع و یک الگوریتم مبتنی بر تکرار که فاصله خطا را مشخص می‌کند، عمل می‌نماید. در این راستا روش مذکور با یک الگوریتم جست‌وجوی محل خطا که در آن از استراتژی جست‌وجوی عمق اول استفاده می‌شود، ترکیب شده و به ساختار درختی شبکه اعمال می‌گردد. موارد متعددی از پیشرفت‌های گزارش‌شده بر اساس روش‌های آنالیز مداری شبکه وجود داشته است [۲۰-۲۲]. در این روش، مشکل اساسی یعنی احتمال یافتن نقاط چندگانه خطا باقی خواهد ماند. این موضوع موجب اعزام بیهوده تیم تعمیرات به نقاط مشکوک در چندین محل متفاوت خواهد شد. روش‌های مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع، زمانی که با اطلاعات اضافی شامل مشخصه افت ناگهانی ولتاژ توسط دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند گزارش شده باشد، می‌تواند بهبود پیدا کند [۲۳]. این بهبود می‌تواند توسط جمع‌آوری داده از آشکارسازهای خطا نیز ایجاد شود [۱۵] و [۲۴-۲۶].

آشکارسازهای خطا فقط برای تشخیص رخ دادن یک خطا طراحی شده‌اند [۲۷ و ۲۸]. اگرچه بیش از دو دهه از کاربرد آشکارسازهای خطا در شبکه‌های توزیع می‌گذرد، تا سال‌های اخیر، این آشکارسازها قابلیت ارسال وضعیت خود از راه دور را نداشتند [۲۹] و تیم تعمیرات فقط از طریق دیدن در محل متوجه رخ دادن خطا در فیذر می‌شدند. امروزه آشکارسازهای خطا با قابلیت مخابره، بخش مهمی از شبکه‌های هوشمند شده‌اند. این موضوع موجب شناسایی سریع‌تر محل خطا شده است. به‌تازگی اهمیت آشکارسازهای خطا در شبکه‌های هوشمند توزیع در مطالعات متعددی با عنوان مکان‌یابی بهینه آشکارسازهای خطا در شبکه‌های توزیع انعکاس داده شده است [۲۴، ۳۰-۳۳].

مکان‌یابی محل‌های خطا بر اساس وضعیت آشکارسازهای خطا در مرجع [۲۵] بررسی شده و در ایالات متحده آمریکا ثبت اختراع

در این راستا روش پیشنهادی برای اولین بار، خروجی مکان‌یابی خطا به صورت احتمالاتی ارائه می‌شود؛ به طوری که گروه اعزامی اتفاقات به جای نقطه، یک بازه با احتمال مشخص و بالا را جست‌وجو می‌کند. همچنین مقاله حاضر به دلیل استفاده ترکیبی از داده‌های آشکارسازهای منصوبه و سیگنال‌های ولتاژ و جریان ابتدای فیدر قادر است تعداد جواب‌های چندگانه را کاهش دهد.

در مقاله حاضر از روش پس‌رو پیش‌رو برای محاسبات حین اتصالی استفاده شده است. ضمن اینکه تمام انشعابات بدون سرجمع شدن و به طور دقیق در محاسبات آورده می‌شود. این موضوع در طرح‌واره‌های الگوریتم پیشنهادی کاملاً مشخص می‌شود.

مابقی مقاله بدین شرح است: بخش دوم مقاله مکان‌یابی خطا مبتنی بر جاروب پس‌رو پیش‌رو معرفی می‌کند. در بخش سوم درباره بهبود مکان‌یابی خطا توسط آشکارسازهای خطا بحث خواهد شد. در بخش چهارم، مدل‌سازی احتمالاتی مکان‌یابی خطا معرفی خواهد شد. نتایج عددی در بخش پنجم ارائه شده است. در بخش ششم، مقایسه عددی روش پیشنهادی با روش‌های پیشین آورده شده است. در بخش هفتم نتیجه‌گیری مقاله بیان خواهد شد.

## ۲. روش پیشنهادی جهت مکان‌یابی خطا

برای پیاده‌سازی مکان‌یابی خطا به روش پیشنهادی، ابتدا خطا تشخیص و دسته‌بندی می‌شود. این کار می‌تواند توسط رله‌های حفاظتی موجود در پست فوق توزیع انجام شود. در صورت نبود امکان استفاده از خروجی رله‌های حفاظت، در مرجع [۳۷] روش جامعی برای تشخیص و دسته‌بندی خطا مبتنی بر تبدیل موجک معرفی شده است.

شکل (۱) طرح‌واره کلی تشخیص و دسته‌بندی خطا را نشان می‌دهد. جزئیات این روش در مرجع [۳۷] موجود است. در ادامه، برای مکان‌یابی خطا ضمن مشخص بودن زمان وقوع خطا و نوع خطا بایستی میزان توان مصرفی بارها نیز مشخص باشد. لذا با توجه به اینکه عمدتاً برای بار پست‌های توزیع از ابزارهای اندازه‌گیری آنلاین استفاده نمی‌شود، برای مشخص کردن میزان بارها به‌ناچار از روش‌های پیش‌بینی بار استفاده می‌شود؛ البته این موضوع عموماً همراه با خطاست. در مرجع [۲۲] روشی برای بهبود قابل ملاحظه در تخمین میزان بارها در شبکه‌های توزیع آورده شده است. بر اساس این روش، میزان بارها بر اساس اندازه‌گیری بار ابتدای فیدر در پست فوق توزیع اصلاح می‌شوند. پرواضح است اگر جمع بارهای تخمینی و تلفات شبکه در یک لحظه خاص با کل بار تحویلی به فیدر برابر نباشد، دقت لازم در تخمین بار وجود نداشته است.

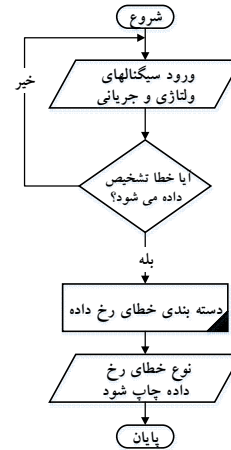
منجر به انحراف از مکان واقعی خطا در خروجی مکان‌یاب خطا شود. همچنین لحاظ نشدن خاصیت خازنی به‌ویژه در کابل‌ها، خروجی مکان‌یاب خطا را با انحرافات قابل ملاحظه از جواب واقعی روبه‌رو خواهد کرد. در مجموع مقالات معرفی شده، هیچ‌یک مدل‌سازی قابل قبولی از بحث احتمالاتی بودن بار انجام نداده‌اند. مقاله حاضر روشی مبتنی بر جاروب پس‌رو پیش‌رو با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای دارای عدم قطعیت بر محاسبه محل خطا برای مکان‌یابی احتمالاتی خطا پیشنهاد داده است. در این راستا این مقاله نشان می‌دهد که در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت در مکان‌یابی خطا سبب پایداری بیشتر الگوریتم مکان‌یابی خطا می‌شود. ضمن اینکه به جای نقطه خطا، طولی از فیدر با احتمال وجود فالت در آن محل به اپراتور شبکه‌های توزیع در دیسپاچینگ ارائه خواهد کرد. روش جاروب پس‌رو پیش‌رو ارائه شده می‌تواند مدل دقیق‌تری از شبکه توزیع را در محاسبات مکان‌یابی خطا اعمال کند. این روش بهبود یافته که در این مقاله به‌عنوان مکان‌یابی احتمالاتی خطا مبتنی بر جاروب پس‌رو پیش‌رو از آن نام برده شد، مزیت‌های اجرایی نسبت به روش‌های پیشین خواهد داشت. در نظر گرفتن ذات احتمالاتی شبکه‌های توزیع برق در روش مکان‌یابی احتمالاتی خطا موجب شده است که برای کاربردهای عملی مفید باشد. جدول (۱) به صورت خلاصه مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف [۲۲، ۳۶ و ۳۸-۴۰] مکان‌یابی خطا که بر مبنای اندازه‌گیری امیدانسن عمل می‌کنند، نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه بین روش‌های منتخب مختلف مکان‌یابی خطای

امپدانس		Srinivasan 1989	Choi 2004	Salim 2009	Nouri 2011	Gabr 2017	روش پیشنهادی
مدل خطا		Z Matrix	Z Matrix	Z Matrix	DPM	Z Matrix	$\pi$ Model
احتمالاتی		قطعی	قطعی	تخمینی	تخمینی	قطعی	
همبستگی بین بارها							✓
ناهمگنی				✓	✓	✓	✓
نامتعادلی			✓	✓	✓		✓
انشعابات				✓	✓	✓	✓
بارهای میانی		✓		✓	✓	✓	✓
انواع خطا		All	L-G	All	All	All	All
محاسبات توالی		✓	✓		✓		
محاسبات فاز				✓		✓	✓
احتمالاتی		قطعی	قطعی	قطعی	قطعی	قطعی	
کاهش جوابهای چندگانه توسط آشکارسازهای منصوبه							✓

بر اساس این جدول، مشخص می‌شود در روش پیشنهادی، مدل بارها به صورت احتمالاتی و همبسته در نظر گرفته شده است.

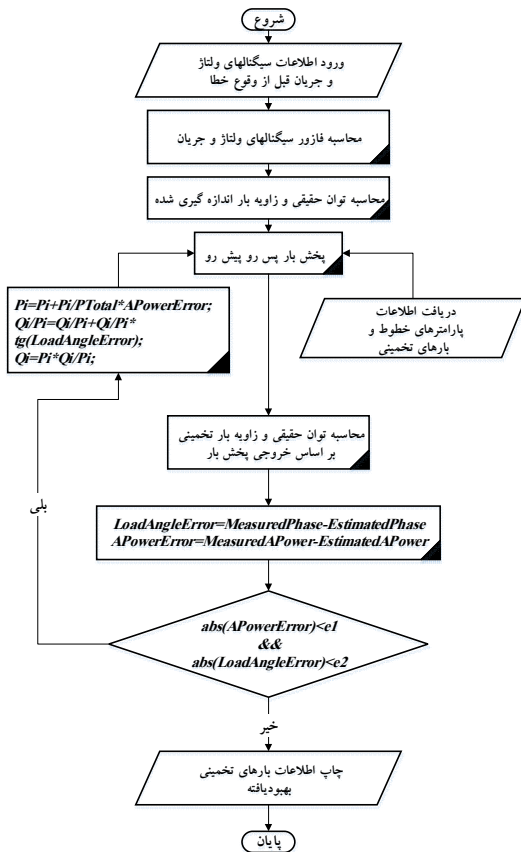
شده باشند. لذا برای شاخه‌ای که در وضعیت بدون بررسی قرار دارد، می‌توان شرط دوم را نیز بررسی کرد؛ شرط دوم یعنی تمام شاخه‌های بالادست آن در تکرارهای قبلی الگوریتم، سالم ارزیابی شده باشند. بر اساس طرح‌واره شکل (۳)، پیش از اجرای مکان‌یابی خطا برای هر شاخه، شرایط لازم بررسی می‌شود. جزئیات مکان‌یابی خطا برای هر شاخه از شبکه، در شکل (۴) به نمایش گذاشته شده است. بعد از هر بار وارد شدن به این طرح‌واره لازم است ولتاژ و جریان ابتدای شاخه بر اساس ولتاژ و جریان ابتدای فیدر، اطلاعات بار و مشخصات شبکه محاسبه شود.



شکل (۱): الگوریتم کلی تشخیص و دسته‌بندی خطا

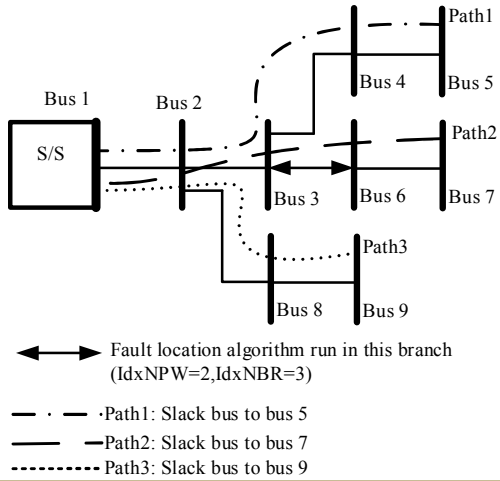
در این مقاله، برای بهبود دقت تخمین بار در هنگام خطا از طرح‌واره شکل (۲) استفاده شده است. با توجه به طرح‌واره پیشنهادی، ابتدا توان اکتیو و زاویه بار فیدر بر اساس مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری و در ابتدای فیدر در پست فوق توزیع، محاسبه خواهد شد. در مرحله بعد با توجه به ولتاژ ابتدای فیدر و بارهای تخمینی فیدر، بر اساس پخش بار یک توان اکتیو و زاویه بار مصرفی برای فیدر مورد نظر محاسبه خواهد شد. حال اگر این دو عدد با هم برابر نباشند، الگوریتم با توجه به میزان انحراف این دو عدد، مقادیر بارهای تخمینی فیدر را تغییر می‌دهد تا انحراف این دو مقدار از یکدیگر از یک حد تعیین شده کمتر شود.

بعد از مشخص شدن ورودی‌های لازم، برای شروع مکان‌یابی خطا، طرح‌واره شکل (۳) برای جست‌وجوی خطا در تمام شاخه‌های شبکه اجرا می‌شود. در حقیقت، طرح‌واره تصحیح‌کننده تخمین بارهای فیدر، بخشی از این طرح‌واره است که پیش‌تر و با جزئیات در شکل (۲) نشان داده شد. بر اساس طرح‌واره شکل (۳) بایستی تمام شاخه‌های شبکه بر اساس اولویت بالادست به پایین‌دست مرتب شوند. برای هر شاخه، یک متغیر که وضعیت (بدون بررسی، سالم، دارای خطا) آن را مشخص می‌کند، اختصاص می‌یابد. در ابتدا این متغیرها، برای همه شاخه‌های شبکه، به صورت بدون بررسی مقادیردهی می‌شوند. در این راستا مرتب‌سازی بالادست به پایین‌دست دارای این مزیت است که اگر یک شاخه دارای خطا تشخیص داده شود، می‌توان تمام شاخه‌های پایین دست و متصل به آن شاخه که هنوز بررسی نشده‌اند، سالم و بدون خطا ارزیابی کرد. این امر سبب می‌شود تعداد تکرارهای الگوریتم جست‌وجوگر خطا، بسیار زیاد کاهش یابد. لذا سرعت و کارایی روش پیشنهادی بالاتر می‌رود. در این زمینه، شرط اجرای الگوریتم مکان‌یابی خطا در هر شاخه این است که تمام شاخه‌های بالادست آن، در تکرارهای قبلی سالم ارزیابی



شکل (۲): طرح‌واره تصحیح‌کننده تخمین بارهای فیدر

برای یک مثال ساده، شبکه توزیع نمونه در شکل (۵) را در نظر بگیرید. در این شبکه، ۳ باس انتهایی (باس‌های ۵، ۷ و ۹) و در نتیجه سه مسیر وجود خواهد داشت. فرض کنید در مسیر شماره ۱ در شاخه‌های ۲ و ۳ (شماره باسی که در پایین دست هر شاخه قرار دارد، به عنوان شماره آن شاخه در نظر گرفته می‌شود) خطایی یافت نشده باشد. لذا الگوریتم در مسیر ۲ نیز در شاخه‌های ۲ و ۳ خطایی مشاهده نخواهد کرد (البته الگوریتم به دلیل اینکه قبلاً خطایی در این شاخه‌ها مشاهده نشده است، برچسب سالم به آن‌ها اختصاص داده و در نتیجه برای بهبود سرعت الگوریتم در تمام مسیرهای دیگر که شامل این دو شاخه هستند، بدون انجام مکان‌یابی خطا، سالم در نظر



شکل (۵): شبکه توزیع نوعی شامل ۹ باس

برای اینکه مکان‌یابی خطا برای شاخه ۶ بر اساس طرح‌واره شکل (۴) اجرا شود، نیازمند ولتاژ و جریان ابتدای این شاخه است. با توجه به اینکه میزان مقاومت اتصال کوتاه و محل آن مشخص نیست، نمی‌توان به‌صورت مستقیم برای به‌دست‌آوردن ولتاژ و جریان ابتدای شاخه ۶، از روش جاروب پس‌رو پیش‌رو استفاده کرد. بنابراین برای به‌دست‌آوردن ولتاژ و جریان ابتدای شاخه ۶، از روش جاروب پس‌رو اصلاح‌شده استفاده شده است. بر اساس این روش، گام‌های زیر بایستی انجام شوند:

۱. با فرض بارهای تخمینی بهبود یافته از طرح‌واره شکل (۲) با یک جاروب پس‌رو جریان در تمام شاخه‌ها ( $J_{dur}$ ) به دست می‌آید:

$$J_{ij} = I_{bus_j} + \sum_{m \in M} J_{jm} \quad (1)$$

۲. در مسیر شاخه ۶ (مسیر دو) با یک جاروب پیش‌رو جریان شاخه‌های این مسیر به‌روز می‌شود. این عمل تا شاخه ششم ادامه می‌یابد؛ زیرا در این مرحله فرض شده است که خطا در شاخه ششم می‌باشد. لذا جریان اتصال کوتاه از پست فوق توزیع شروع و بعد از عبور از شاخه‌های ۲ و ۳ وارد شاخه ۶ می‌شود. جریان در پست فوق توزیع برابر با جریان اتصال کوتاه است.

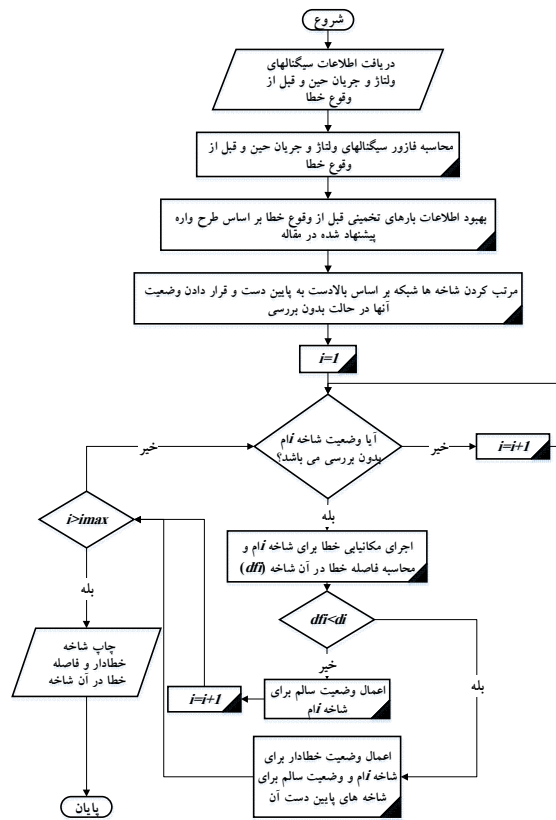
$$J_{ij}^{k+1} = J_{Upstream}^{k+1} - \sum_{m \in M} J_{im}^k + J_{ij}^k \quad (2)$$

۳. در این مرحله، ولتاژ باس‌ها با توجه به معادله (۳) به‌روز می‌شود.

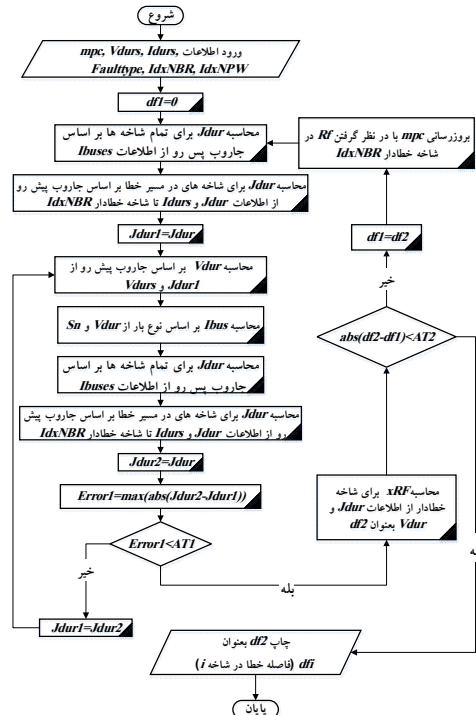
$$V_{bus_i} = V_{bus_j} - Z_{ij} \times J_{ij} \quad (3)$$

۴. با توجه به ولتاژهای به‌روز شده باس‌ها و همچنین نامی بارها، کیلووات و کیلووار مصرفی در هر باس مطابق معادله‌های (۴) و (۵) به‌روز می‌شود. در این راستا رفتار ذاتی بار توسط ضرایب نمایشی ( $e_{aP}, e_{bP}, e_{cP}, e_{aQ}, e_{bQ}, e_{cQ}$ )

گرفته می‌شوند) و در نتیجه بر اساس اولویت بالادست به پایین‌دست در این مسیر، شاخه بعدی که باید در آن مکان‌یابی خطا بررسی شود، شاخه ۶ می‌باشد.



شکل (۳): طرح‌واره جست‌وجوگر خطا در مکان‌یابی قطعی خطا

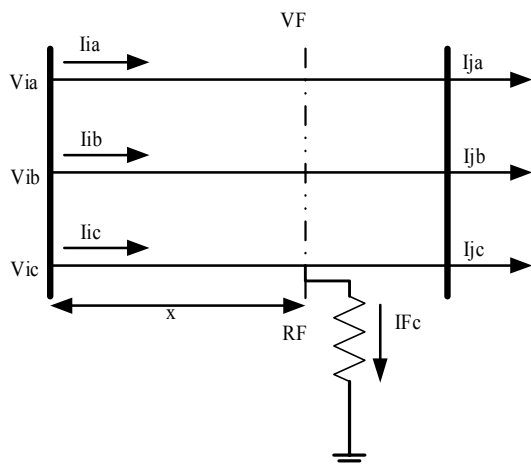


شکل (۴): الگوریتم مکان‌یابی خطا به‌ازای یک شاخه

$$M_{2x} = \sum_k (Z_{xk_{re}} I_{ik_{im}} + Z_{xk_{im}} I_{ik_{re}}) \quad (۸)$$

در روابط (۶)، (۷) و (۸) داریم:

- $V_{ix}$  ولتاژ فاز  $x$  از باس  $i$
- $Dis$  فاصله نقطه خطا از باس  $i$  برحسب متر
- $I_{Fx}$  جریان خطا در فاز  $x$
- $k$  می تواند مقادیر فاز  $a$ ،  $b$  و  $c$  را به خود بگیرد.
- $Z_{xk}$  امپدانس متقابل بین فاز  $x$  و  $k$
- $I_{ik}$  جریان فاز  $k$  از باس  $i$



شکل (۶): مدار معادل خطای تک فاز به زمین

### ۲.۱.۲. خطای دو فاز به زمین

مدار معادل خطای دو فاز به زمین در شکل (۷) نمایش داده شده است. برای محاسبه مقاومت های خطا و فاصله خطا در شاخه انتخاب شده از رابطه (۹) استفاده می شود.

$$\begin{bmatrix} Dis \\ R_{Fx} \\ R_{Fy} \\ R_{Fxy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1x} & I_{F_{x_{re}}} & 0 & I_{F_{x_{re}}} + I_{F_{y_{re}}} \\ M_{2x} & I_{F_{x_{im}}} & 0 & I_{F_{x_{im}}} + I_{F_{y_{im}}} \\ M_{1y} & 0 & I_{F_{y_{re}}} & I_{F_{x_{re}}} + I_{F_{y_{re}}} \\ M_{2y} & 0 & I_{F_{y_{im}}} & I_{F_{x_{im}}} + I_{F_{y_{im}}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{ix_{re}} \\ V_{ix_{im}} \\ V_{iy_{re}} \\ V_{iy_{im}} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

که در آن داریم:

- $V_{ix}$  ولتاژ فاز  $x$  از باس  $i$
  - $I_{Fx}$  جریان خطا در فاز  $x$
  - $V_{iy}$  ولتاژ فاز  $y$  از باس  $i$
  - $I_{Fy}$  جریان خطا در فاز  $y$
  - $Dis$  فاصله نقطه خطا از باس  $i$  برحسب متر
- همچنین در رابطه (۹) برای محاسبه  $M_{1x}$ ،  $M_{2x}$ ،  $M_{1y}$  و  $M_{2y}$  از روابط (۷) و (۸) استفاده می شود.

$e^{-cQ}$  مدل می گردد. بدین ترتیب برای یک بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت مقادیر نمایی بایستی به ترتیب برابر  $۰$ ،  $۱$  و  $۲$  باشند [۴۱].

$$P = P_0 \left( aP \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-aP}} + bP \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-bP}} + (1-aP-bP) \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-cP}} \right) \quad (۴)$$

$$Q = Q_0 \left( aQ \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-aQ}} + bQ \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-bQ}} + (1-aQ-bQ) \left( \frac{v}{v_0} \right)^{e^{-cQ}} \right) \quad (۵)$$

۵. با توجه به ولتاژها و توان های به روز شده در مراحل قبل، جریان بار محاسبه و به روز می شود. سپس با اجرای جاروب پس رو و بر اساس جریان های به روز شده بار، توسط معادله (۱)، جریان شاخه ها محاسبه و بروز می شود.

۶. مرحله ۲ به طور کامل اجرا می شود (جاروب پیش رو برای محاسبه جریان اتصال کوتاه در شاخه های مربوط).

۷. شرط همگرایی جریان شاخه ها بررسی می شود. در صورت همگرایی برای محاسبه  $xRF$  الگوریتم وارد مرحله بعد می شود. در غیر این صورت، مراحل دوم تا ششم برای رسیدن به شرط همگرایی تکرار می شود.

۸. محاسبه  $xRF$  (مقاومت خطا و فاصله باس ابتدا تا محل خطا در شاخه انتخاب شده برای مکان یابی خطا).

### ۲.۱.۲. محاسبه $xRF$

$xRF$  بر اساس معادلات مرجع [۲۲] محاسبه می شود. در ادامه معادلات دسته بندی و ارائه می شود:

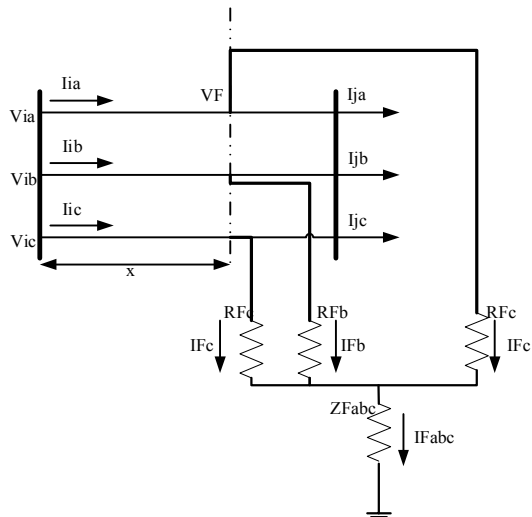
### ۲.۱.۱. خطای تک فاز به زمین

$xRF$  در خطاهای تک فاز بر اساس معادلات (۶)، (۷) و (۸) محاسبه خواهد شد. شکل (۶) مدار معادل خطای تک فاز به زمین را نشان می دهد.

$$\begin{bmatrix} Dis \\ RF \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{1x} I_{F_{x_{im}}} - M_{2x} I_{F_{x_{re}}}} \begin{bmatrix} I_{F_{x_{im}}} & -I_{F_{x_{re}}} \\ -M_{2x} & M_{1x} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\times \begin{bmatrix} V_{ix_{re}} \\ V_{ix_{im}} \end{bmatrix}$$

$$M_{1x} = \sum_k (Z_{xk_{re}} I_{ik_{re}} - Z_{xk_{im}} I_{ik_{im}}) \quad (۷)$$



شکل (۹): مدار معادل خطای سه فاز به زمین

$$[Dis \quad R_{Fa} \quad R_{Fb} \quad R_{Fc} \quad R_{Fabc} \quad X_{Fabc}] =$$

$$\begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa_{re}} & 0 & 0 & I_{3ph_{re}} & -I_{3ph_{im}} \\ M_{2a} & I_{Fa_{im}} & 0 & 0 & I_{3ph_{im}} & I_{3ph_{re}} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb_{re}} & 0 & I_{3ph_{re}} & -I_{3ph_{im}} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb_{im}} & 0 & I_{3ph_{im}} & I_{3ph_{re}} \\ M_{1c} & 0 & 0 & I_{Fc_{re}} & I_{3ph_{re}} & -I_{3ph_{im}} \\ M_{2c} & 0 & 0 & I_{Fc_{im}} & I_{3ph_{im}} & I_{3ph_{re}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{ia_{re}} \\ V_{ia_{im}} \\ V_{ib_{re}} \\ V_{ib_{im}} \\ V_{ic_{re}} \\ V_{ic_{im}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$I_{3ph} = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc} \quad (14)$$

$$Z_{Fabc} = R_{Fabc} + X_{Fabc} \quad (15)$$

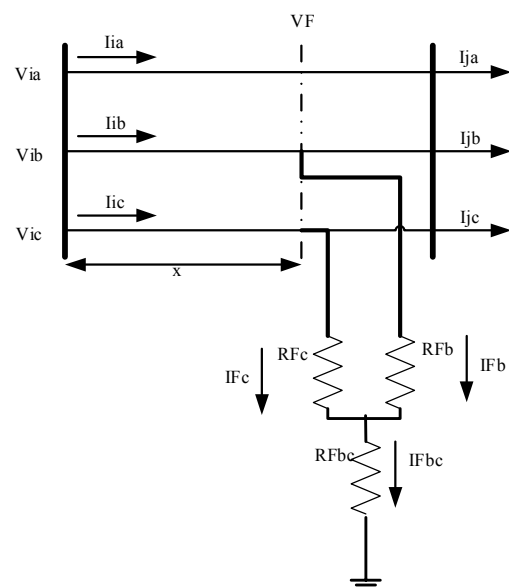
همچنین در رابطه (۱۳) برای محاسبه  $M_{1a}$ ,  $M_{2a}$ ,  $M_{1b}$ ,  $M_{2b}$ ,  $M_{1c}$  و  $M_{2c}$  از روابط (۷) و (۸) استفاده می‌شود.

### ۳. کاهش جواب‌های چندگانه مکان‌یاب خطا

از میان روش‌های متعدد کاهش تعداد مسیرهای خطا (گزارش‌های تلفنی مشترکین برق، بررسی کاهش میزان سطح بار فیدر، فعال شدن آشکارساز خطا و...)، آشکارسازهای خطا روشی سریع و پرکاربرد در سطح شرکت‌های توزیع نیروی برق تبدیل شده است. این ابزار قادر است اپراتور دیسپاچینگ توزیع را از وجود خطا در جلو محل نصب خود مطلع کند، اما نمی‌تواند نقطه خطا را مشخص کند.

به هر حال، اطلاعات آشکارسازهای منصوبه در سطح شرکت توزیع نیروی برق می‌تواند در جهت کاهش جواب‌های چندگانه یک مکان‌یاب خطا مفید واقع شود. آشکارسازهای خطا به سه دسته کلی بدون جهت، تک‌جهت و دو جهت تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۵]. این در حالی است که در شبکه‌های توزیع ایران به دلیل ساختار شعاعی، فقط از آشکارسازهای بدون جهت استفاده می‌شود.

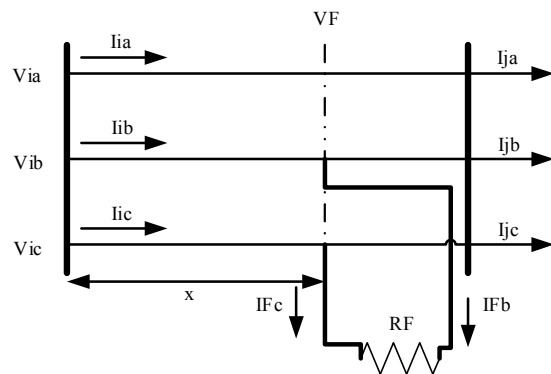
آشکارسازهای خطای بدون جهت، ساده‌ترین نوع آشکارساز



شکل (۷): مدار معادل خطای دو فاز به زمین

### ۲. ۱. ۲. خطای دو فاز به هم

شکل (۸) مدار معادل خطای دو فاز به هم را نشان می‌دهد. برای محاسبه مقاومت خطا و فاصله تا محل خطا برای این نوع از خطا از روابط (۱۰) تا (۱۲) استفاده می‌شود.



شکل (۸): مدار معادل خطای دو فاز به هم

$$[Dis \quad R_F] = \begin{bmatrix} M_{3xy} & I_{Fx_{re}} \\ M_{4xy} & I_{Fx_{im}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{ix_{re}} - V_{iy_{re}} \\ V_{ix_{im}} - V_{iy_{im}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_{3xy} = \sum_k [(Z_{xk_{re}} - Z_{yk_{re}}) I_{ik_{re}} - (Z_{xk_{im}} - Z_{yk_{im}}) I_{ik_{im}}] \quad (11)$$

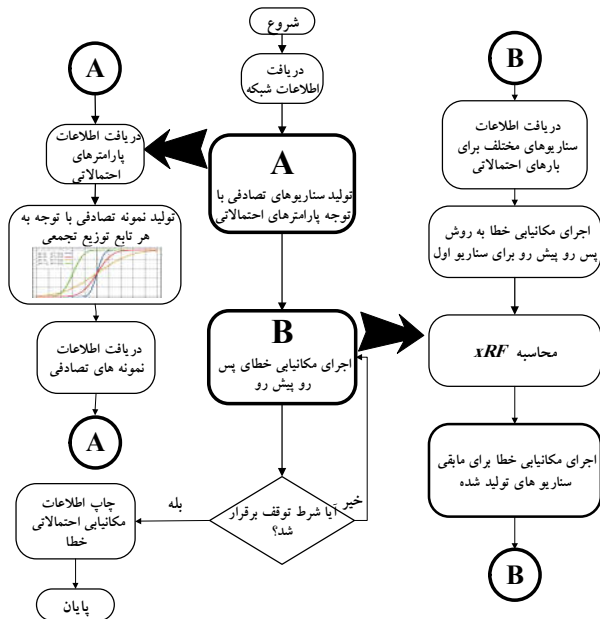
$$M_{4xy} = \sum_k [(Z_{xk_{re}} - Z_{yk_{re}}) I_{ik_{im}} + (Z_{xk_{im}} - Z_{yk_{im}}) I_{ik_{re}}] \quad (12)$$

### ۲. ۱. ۴. خطای سه فاز به زمین

با توجه به مدار معادل خطای سه فاز به زمین که در شکل (۹) نشان داده شده است، برای محاسبه  $xRF$  از روابط (۱۳) تا (۱۴) استفاده می‌شود.



است. در این روش، ورودی‌های احتمالاتی با توجه به تابع چگالی احتمالشان، به صورت تصادفی تولید می‌شود. پس از هر بار تولید کردن ورودی‌های احتمالاتی یک مرحله مکان‌یابی خطا با پارامترهای قطعی انجام می‌شود. سپس خروجی آن به‌عنوان یک سناریوی خاص ذخیره می‌شود. این کار آنقدر ادامه پیدا می‌کند که میانگین داده‌های خروجی تغییر محسوس نداشتند باشد. شکل (۱۱) طرح‌واره مکان‌یابی احتمالاتی خطا به روش مونت‌کارلو را نشان می‌دهد.

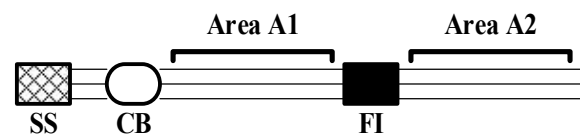


شکل (۱۱): الگوریتم مکان‌یابی احتمالاتی خطا به روش مونت کارلو

#### ۲.۴. روش تخمین دونقطه‌ای

روش تخمین دونقطه‌ای حالتی از روش کلی تخمین  $n$  نقطه‌ای است. این روش جدید برای مطالعات احتمالاتی دارای عدم قطعیت در ورودی است. در روش مذکور، مسئله دارای عدم قطعیت به چند زیرمسئله فرعی تقسیم شده و در هر یک از این زیرمسئله‌های جدید، مقادیر خاصی به متغیرهای دارای عدم قطعیت اختصاص داده می‌شود. سپس مسئله همانند یک مسئله معین حل خواهد شد. در آخر، جواب مسئله اولیه دارای عدم قطعیت به دست می‌آید. در این روش، به‌اندازه دو برابر تعداد متغیرهای دارای عدم قطعیت زیر مسئله حل می‌شود، تا بتوان خروجی را با دقت مناسبی به دست آورد. در هر کدام از این زیرمسئله‌ها، فقط یکی از پارامترهای احتمالاتی (یک بار مقداری بالاتر از مقدار میانگین و یک بار مقداری پایین‌تر از مقدار میانگین همان پارامتر) تغییر می‌کند. در این راستا مابقی پارامترهای دارای عدم قطعیت در مقدار میانگین خود بدون تغییر لحاظ خواهند شد.

خطا هستند. این نوع آشکارساز خطا برای شناسایی عبور جریان خطا از یک فیدر طراحی شده است. شکل (۱۰) شامل یک پست فوق توزیع، یک بریکر و یک آشکارساز بدون جهت بین دو ناحیه A1 و A2 را در نظر بگیرید. اگر یک خطا در ناحیه A2 اتفاق بیفتد، جریان خطا به‌ناچار از پست فوق توزیع و از ناحیه A1 بعد از عبور از آشکارساز خطا به سمت ناحیه A2 خواهد رفت. به این ترتیب آشکارساز خطا می‌تواند عبور جریان خطا را از سمت ناحیه A1 به سمت ناحیه A2 شناسایی کند. لذا آشکارساز مربوط فعال می‌شود. شایان ذکر است که اگر خطایی در ناحیه A1 اتفاق بیفتد، آشکارساز خطا قادر به شناسایی آن نخواهد بود. این بدان دلیل است که جریان خطا از آشکارساز خطا عبور نمی‌کند.



شکل (۱۰): پیکربندی شبکه شعاعی نوعی

اگر آشکارساز خطا فعال شود، یک خطا در ناحیه A2 اتفاق افتاده است و آشکارساز خطا یک نشان خطا در ناحیه A2 و یک نشان بدون خطا به ناحیه A1 اختصاص می‌دهد. اگر آشکارساز خطا فعال نشده باشد، هیچ خطایی در ناحیه A2 اتفاق نیفتاده است؛ لذا یک نشان بدون خطا به ناحیه A2 اختصاص می‌یابد. در این شرایط، ناحیه A1 نشان نامشخص را می‌گیرد. این به دلیل عدم مشاهده این ناحیه توسط آشکارساز خطاست. موارد ذکر شده در جدول (۲) به صورت خلاصه آورده شده است.

جدول (۲): نحوه علامت‌گذاری آشکارساز بدون جهت در شبکه

توزیع شعاعی

FI Flag	Area A1	Area A2
Set	Not Faulty	Faulty
Not Set	XX	Not Faulty

#### ۴. روش‌های احتمالاتی

روش‌های احتمالاتی اغلب به دو دسته کلی روش‌های شبیه‌سازی و روش‌های تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شوند [۴۲]. در این مقاله روش مونت کارلو از مجموعه روش‌های شبیه‌سازی و روش تخمین دونقطه‌ای از مجموعه روش‌های تحلیلی استفاده می‌شوند. برای مدل شدن متغیرهای همبسته احتمالاتی، روش معرفی شده در مرجع [۴۲] برای این مقاله استفاده شده است.

#### ۴.۱. روش مونت کارلو

روش مونت کارلو از دسته روش‌های شبیه‌سازی و مبتنی بر تکرار

این دو مقدار با توجه به تابع توزیع متغیرهای ورودی می‌توانند متقارن یا نامتقارن باشند. در این راستا اگر متغیری دارای تابع توزیع متقارن مثل تابع توزیع نرمال باشد، دو نقطه مورد نظر نسبت به مقدار میانگین خود متقارن و از طرف دیگر اگر تابع توزیع متغیری غیرمتقارن مثلاً ویبول باشد، فاصله این دو نقطه نسبت به مقدار میانگین با توجه به وزن‌هایی که روش حل تعیین می‌کند، متفاوت خواهد بود. بنابراین به‌طور کلی می‌توان روش دونقطه‌ای را به دو نوع متقارن و غیرمتقارن دسته‌بندی کرد. گام‌های مربوط برای روش دونقطه‌ای متقارن مطابق روابط (۱۶) تا (۲۵) هستند.

گام ۱: تعداد و نوع متغیرهای دارای عدم قطعیت را شناسایی و تعیین کنید.

گام ۲: مقدار گشتاورهای مرتبه اول و دوم متغیرهای مورد نظر خروجی را مقدار صفر اختصاص دهید.

$$\mu_{x,k}: \text{مقدار میانگین متغیر } K$$

$$\sigma_{x,k}: \text{میزان انحراف معیار متغیر } K$$

گام ۶: به‌ازای  $i = 1, 2$

$$X = [\mu_{x,1}, \mu_{x,2}, \dots, \mu_{x,i}, \dots, \mu_{x,n}] \text{ و مکان‌یابی}$$

خطا به‌صورت قطعی برای هرکدام از  $\chi_{k,i}$  ها انجام دهید.

گام ۷: مقادیر  $E(Y)$  و  $E(Y^2)$  را با توجه به روابط زیر برای متغیر خروجی حساب کنید.

$$E(Y) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^2 (p_{k,i} f([\mu_{x,1}, \mu_{x,2}, \dots, \chi_{k,i}, \dots, \mu_{x,n}])) \quad (22)$$

$$E(Y^2) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^2 (p_{k,i} f([\mu_{x,1}, \mu_{x,2}, \dots, \chi_{k,i}, \dots, \mu_{x,n}])^2) \quad (23)$$

گام ۸: میانگین و انحراف معیار را برای متغیرهای خروجی با توجه به روابط پرکاربرد زیر به دست آورید.

$$\mu_Y = E(Y) \quad (24)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{E(Y^2) - (E(Y))^2} \quad (25)$$

این روابط نشان می‌دهد که کلیت روش بر پایه انتخاب هدف‌دار و شایسته نقاط نمونه‌برداری از داده‌های ورودی صورت می‌گیرد. این مهم چنان صورت می‌گیرد که تعداد تکرارهای حل مسئله به کمترین میزان ممکن برسد به‌طوری که کماکان جواب‌ها دقیق مانده و به‌علاوه بتوان سرعت شبیه‌سازی را بالا برد. اگر متغیرهای نامعین ورودی دارای تابع توزیع نامتقارن باشند، باید از روش دونقطه‌ای نامتقارن استفاده کرد؛ در نتیجه نقاط شایسته برای انتخاب از متغیرها از روابط زیر استخراج می‌شوند.

$$\varepsilon_{k,1} = \lambda_{k,3} / 2 + \sqrt{n + (\lambda_{k,3} / 2)^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

$$\varepsilon_{k,1} = \lambda_{k,3} / 2 - \sqrt{n + (\lambda_{k,3} / 2)^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (27)$$

$$p_{k,1} = \frac{\varepsilon_{k,2}}{n \xi_k} \quad (28)$$

$$p_{k,1} = \frac{\varepsilon_{k,1}}{n \xi_k} \quad (29)$$

$$\xi_k = 2 \sqrt{n + (\lambda_{k,3} / 2)^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^n p_{k,1} + p_{k,2} = 1 \quad (31)$$

$$p_{k,1} + p_{k,2} = 1/n \quad (32)$$

گام ۳: از مقدار  $K=1$  تا تعداد متغیرهای نامعین، گام‌های ۴ تا ۶ را تکرار کنید.

گام ۴: مقادیر  $\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2}, p_{k,1}$  و  $p_{k,2}$  را با به‌کار بستن روابط (۱۷) تا (۱۹) مشخص کنید.

$$E(Y) = 0 \quad (16)$$

$$E(Y^2) = 0$$

گام ۵: مقادیر  $\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2}, p_{k,1}$  و  $p_{k,2}$  را با به‌کار بستن روابط (۱۷) تا (۱۹) مشخص کنید.

گام ۶: مقادیر  $\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2}, p_{k,1}$  و  $p_{k,2}$  را با به‌کار بستن روابط (۱۷) تا (۱۹) مشخص کنید.

$$\varepsilon_{k,1} = \sqrt{n} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{k,2} = -\sqrt{n} \quad (18)$$

$$p_{k,1} = p_{k,2} = 1/2n \quad (19)$$

در روابط بالا داریم:

$n$ : تعداد متغیرهای عدم قطعیت‌دار (احتمالاتی و دارای یک تابع چگالی احتمال خاص)

$K$ : شماره متغیر نامعین که از ۱ تا  $n$  افزایش می‌یابد.

$p_{k,1}$  و  $p_{k,2}$ : مقادیر احتمالات مرتبط با دو نقطه انتخابی برای یک متغیر نامعین.

گام ۵: مقادیر مربوط به هر متغیر را در هر مرحله به دست آورید.

$$\chi_{k,1} = \mu_{x,k} + \varepsilon_{k,1} \sigma_{x,k} \quad (20)$$

$$\chi_{k,2} = \mu_{x,k} + \varepsilon_{k,2} \sigma_{x,k} \quad (21)$$

به‌طوری که:

$\chi_{k,1}$ : مقدار شایسته انتخابی برای متغیر  $K$  که بالاتر از مقدار میانگین است.

۲.۴. متغیرهای تصادفی همبسته

از آنجا که در شبکه‌های برق واقعی پارامترهای دارای عدم قطعیت به یکدیگر وابسته هستند، برای مدل‌سازی دقیق یک سیستم قدرت بایستی تأثیر این وابستگی‌ها در نظر گرفته شود. در مقاله [۴۲] روشی برای تبدیل متغیرهای تصادفی غیرهمبسته به متغیرهای همبسته آورده شده است. این راهکار برای هر دو روش مونت کارلو و تخمین دونقطه‌ای قابل استفاده است. برای اجرای این روش گام‌های زیر به ترتیب بایستی اجرا شوند.

**گام اول:** تعیین پارامترهای تابع توزیع نرمال گاوسی برای هر یک از متغیرهای موجود در سیستم قدرت  
**گام دوم:** تولید نمونه‌های تصادفی توسط توابع موجود در نرم‌افزارهایی مانند متلب، بعد از تولید نمونه‌های تصادفی به تعداد  $n$  نمونه برای مجموعه‌ای با  $m$  متغیر دارای عدم قطعیت ماتریسی مطابق معادله (۳۴) ایجاد خواهد شد.

$$\psi = \begin{bmatrix} \chi_{1,1} & \chi_{1,2} & L & \chi_{1,n} \\ \chi_{2,1} & \chi_{2,2} & L & \chi_{2,n} \\ M & M & M & M \\ \chi_{m,1} & \chi_{m,2} & L & \chi_{m,n} \end{bmatrix}_{mn} \quad (34)$$

**گام سوم:** با توجه به پارامترهای تعیین شده برای هر متغیر در گام اول، نمونه‌های تصادفی ایجاد شده به معادل تابع توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌شود.

**گام چهارم:** با توجه به پارامترهای تعیین شده برای هر متغیر در گام اول، نمونه‌های تصادفی ایجاد شده با توجه به معادله (۳۵) به معادل تابع توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌شود.

$$\tilde{\chi} = \frac{(\chi_{\mu,\sigma} - \mu)}{\sigma} \quad (35)$$

**گام پنجم:** در این مرحله با توجه به روابط (۳۶) تا (۳۸) ماتریس متغیرهای همبسته تصادفی نرمال استاندارد  $\tilde{\psi}_{XX}$  محاسبه می‌شود. در معادله (۳۶) ماتریس  $L$  توسط نرم‌افزار متلب و کد دستوری  $L = chol(\rho_{XX})$  محاسبه می‌گردد.

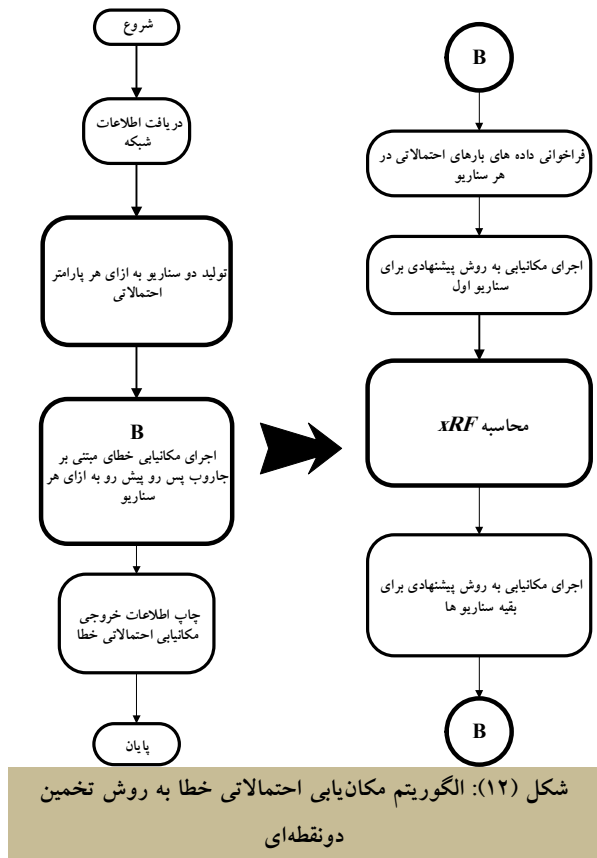
**گام ششم:** با توجه به پارامترهای تعیین شده برای هر متغیر در گام اول، نمونه‌های تصادفی نرمال استاندارد و همبسته شده، توسط معادله (۳۹) به معادل تابع توزیع نرمال خود تبدیل می‌شوند.

$$\rho_{XX} = L \times L^T \quad (36)$$

$$\rho_{XX} = \begin{bmatrix} cov_{11} & L & cov_{1m} \\ M & O & M \\ cov_{m1} & L & cov_{lm} \end{bmatrix}_{mm} \quad (37)$$

$$\lambda_{k,3} = \frac{M'_3(x_k)}{\sigma_{x,k}^3} \quad (33)$$

شایان ذکر است در روابط مذکور،  $\lambda_{k,3}$  میزان چولگی متغیر  $K$  و  $M'_3(x_k)$  گشتاور مرتبه سوم آن حول مبدأ است. بنابراین برای توابع متقارن همانند تابع نرمال، مقدار صفر را برمی‌گرداند. با کمی اندیشه درمی‌یابیم، فرمول‌های فوق به متناظر آن‌ها در روش دونقطه‌ای متقارن مبدل می‌شوند. بنا به آنچه گفته شد، روش دونقطه‌ای برای حل یک مسئله مفروض احتمالاتی با تعداد  $n$  متغیر نامعین، به تعداد  $2n$  تکرار برای حل مسئله نیاز دارد تا به دقت مطلوب دست یابد. باید در نظر داشت در پدیده‌های تصادفی که تعداد متغیرهای نامعین آن‌ها کم است، این روش از نظر زمان حل مسئله بسیار مناسب می‌باشد و از نظر صحت جواب‌های خروجی هم دقت بسیار زیادی دارد. این موضوع نشان می‌دهد در مسائلی که تعداد متغیرهای نامعین به نسبت بالاست، بازده زمانی این روش نسبت به روش‌های شبیه‌سازی نظیر مونت کارلو به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، کاهش دقت جواب‌ها نیز کاملاً مشهود است. به‌عنوان نتیجه می‌توان گفت با افزایش عدم قطعیت شبکه، روش دونقطه‌ای مزیت‌های خود را نسبت به روش‌های شبیه‌سازی از دست می‌دهد. طرح‌واره کلی مکان‌یابی احتمالاتی به روش تخمین دونقطه‌ای در شکل (۱۲) آورده شده است.



بارهای احتمالاتی، برابر با مقدار ۰/۲۵ فرض شده است. برای روش مونت کارلو ۱۰۰۰۰ نمونه اجرا می شود. شکل (۱۴) تابع توزیع چگالی احتمال را برای دو روش مونت کارلو و تخمین دونقطه ای نشان می دهد. بر اساس اطلاعات به دست آمده روش تخمین دونقطه ای با دقت مطلوب و قابل قبولی برای مکان یابی احتمالاتی خطا قابل استفاده است.

$$\bar{\psi}_{XX} = L \times \bar{\psi} \quad (38)$$

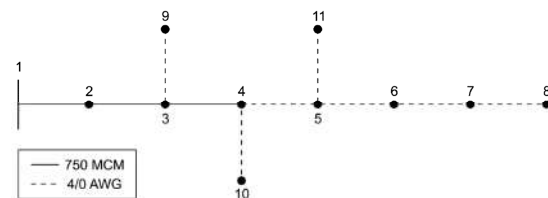
$$\chi_{XX}^{\mu, \sigma} = (\bar{\chi} \times \sigma) + \mu \quad (39)$$

## ۵. نتایج شبیه سازی

برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی برای شبیه سازی از دو شبکه با ابعاد مختلف (شبکه تست ۱۱ باسه، شبکه واقعی ۳۰۶ باسه شهر کرمان) استفاده شده است.

### ۵.۱. شبکه تست ۱۱ باس

دیگرام تک خطی شبکه تست ۱۱ باس در شکل (۱۳) به نمایش گذاشته شده است. اطلاعات این شبکه در مقاله [۲۲] ارائه شده است. این شبکه شامل ۳ انشعاب تک فاز است. همچنین مجموع طول سکشن های این شبکه ۴۰۱۵ متر است.



شکل (۱۳): شبکه تست توزیع ۱۱ باسه [۲۲]

جدول (۳): مقایسه دو روش مونت کارلو و تخمین دونقطه ای برای خطای تک فاز

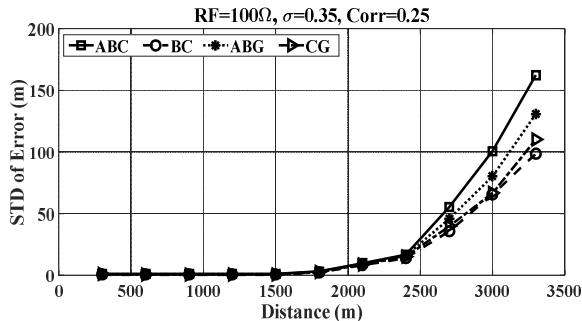
Dis (m)	Mean (m)		STD (m)		TIME(s)	
	MCS	2PEM	MCS	2PEM	MCS	2PEM
۳۰۰	۰/۹۷۱۴	۱/۳۸۶۹	۰/۷۶۳۷۱۳	۰/۸۴۸۵۷	۹۷۴	۵
۶۰۰	۰/۹۶۴	۱/۴۱۱۷	۰/۷۳۰۱۵	۰/۸۰۳۳۵	۹۸۱	۵
۹۰۰	۰/۹۵۶۱	۱/۴۳۷۲	۰/۶۹۵۶۹۱	۰/۷۷۲۹۹	۹۹۴	۶
۱۲۰۰	۰/۹۴۷۶	۱/۴۶۳۲	۰/۶۵۵۱۱۶	۰/۷۶۱۲۴	۱۰۲۳	۶
۱۵۰۰	۱/۹۳۸۸	۱/۴۸۹۹	۰/۶۲۹۳۷	۰/۷۷۱۰۳	۱۰۴۷	۸
۱۸۰۰	۲/۱۰۹۲	۱/۵۸۰۸	۲/۲۵۰۲	۲/۵۰۷۸	۱۰۷۰	۹
۲۱۰۰	۲/۱۰۰۲	۱/۵۲۹۲	۷/۸۳۲۹۷	۸/۷۰۳۳	۱۱۶۵	۹
۲۴۰۰	۲/۱۰۰۷	۱/۴۷۸۷	۱۶/۵۴۸۵۱	۱۵/۰۴۴۱	۱۲۴۳	۱۲
۲۷۰۰	۳/۸۶۲۹	۲/۱۰۷۵	۴۱/۶۶۷۱۲	۳۹/۶۷۹۲	۱۳۰۹	۱۵
۳۰۰۰	۰/۳۰۳۲	۰/۷۳۰۸	۶۹/۳۰۷۷۴	۶۶/۶۲۳۴	۱۴۶۰	۱۶
۳۳۰۰	-۵/۶۱۰۷	-۳/۲۷۰۸	۱۱۵/۱۵۴۷۷	۱۱۰/۱۴۰۷	۱۵۰۸	۱۶

شکل (۱۵) تابع توزیع تجمعی احتمال برای چهار نوع خطا را وقتی که فاصله خطا ۳۳۰۰ متر است، نشان می دهد. مقدار پارامتر انحراف معیار در تابع توزیع نرمال گاوسی مربوط به بارهای موجود در شبکه ۱۱ باس برابر ۰/۳۵ فرض شده است. میزان همبستگی بین بارهای موجود نیز برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار مقاومت خطا برای هر چهار نوع خطا برابر ۱۰۰ اهم می باشد. در این شکل، فاصله ۳۳۶۳ متر برابر طول فیدر، توسط یک خط عمودی مشخص شده است. همان طور که از شکل مشخص است، مقدار محاسبه شده فاصله خطا با هر نوع فالتی که باشد، می تواند از محدوده طول فیدر بیشتر شود. در این صورت، الگوریتم مکان یابی خطا که به صورت قطعی عمل می کند، واگرا خواهد شد و محل خطا گزارش نمی شود. اما در مکان یابی احتمالاتی خطا در درجه اول الگوریتم همگرا شده و در درجه دوم، احتمال اینکه خطا در محدوده طول فیدر باشد، گزارش می شود. در این راستا الگوریتم مکان یابی خطا با احتمال ۲۲ تا ۳۸٪ با توجه به نوع فالت، برای این سناریو واگرا خواهد شد. در واقع توسط الگوریتم مکان یابی احتمالاتی خطا طولی از فیدر که بایستی توسط گروه اتفاقات برای پیدا کردن محل فالت جستجو شود، با احتمال بالای ۹۹/۷٪ مشخص می شود. در ادامه، بدون در نظر گرفتن مقدار میانگین خطا، اثرات تغییر پارامترهای خطا بر روی مقدار

برای ارزیابی دقت روش تخمین دونقطه ای در به دست آوردن میانگین و انحراف معیار خروجی مکان یابی احتمالاتی خطا، در فواصل مختلف خطای تک فاز به زمین با مقاومت خطای ۱۰۰ اهم شبیه سازی می شود. بارهای احتمالاتی به صورت نرمال گاوسی با انحراف معیار ۰/۳۵ در نظر گرفته می شود. برای همبستگی بین بارهای احتمالاتی مقدار ۰/۲۵ فرض شده است. نتایج خروجی در جدول (۳) مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشخص است، مقدار میانگین و انحراف معیار خروجی برای هر دو روش احتمالاتی تقریباً یکسان است. زمان شبیه سازی دو روش در جدول (۳) آورده شده است. زمان شبیه سازی روش تخمین دونقطه ای بسیار پایین تر از روش مونت کارلو است. البته این موضوع با توجه به ذات روش مونت کارلو و تخمین دونقطه ای بدیهی است.

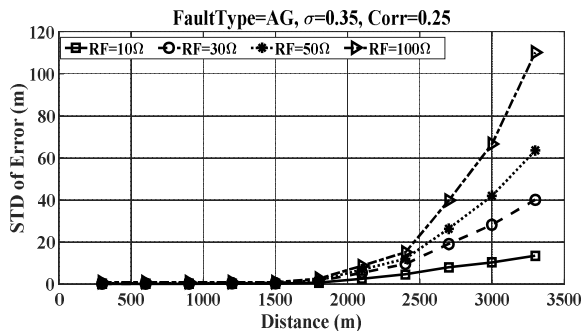
برای مشخص شدن تابع چگالی احتمال مکان یابی خطا از روش مونت کارلو استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی دقت روش احتمالاتی تخمین دونقطه ای در به دست آوردن تابع چگالی احتمال برای مسئله مکان یابی خطا، با روش مونت کارلو مقایسه شده است. برای این کار، یک سناریو فالت AG با مقاومت خطای ۱۰۰ اهم بر روی ۵۰٪ شاخه (باس ۷ به باس ۸) در نظر گرفته شده است. پارامترهای انحراف معیار در تابع توزیع نرمال گاوسی برای بارهای موجود در شبکه ۱۱ باسه برابر ۰/۳۵ و همبستگی بین

بر اساس احتمال ۹۹/۷٪ تعریف کند، برای این سناریو از خطا بایستی شعاع ۳۰۰ متری حول نقطه پیش‌بینی خطا را جست‌وجو کند. شعاع ۳۰۰ متر حول نقطه پیش‌بینی محل خطا به معنی یک قسمت ۶۰۰ متری است.



شکل (۱۶): انحراف معیار خطا بر حسب متر به ازای فواصل مختلف برای هر نوع خطا

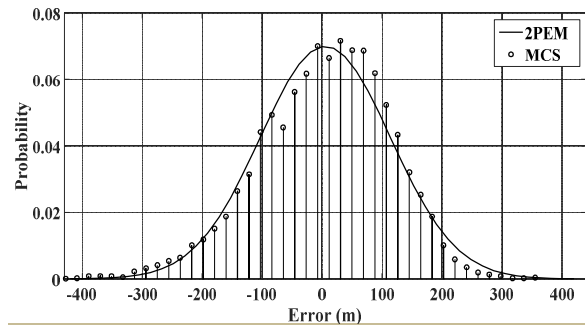
تأثیر میزان مقاومت خطا بر میزان انحراف از محل وقوع فالت از موارد جذاب است. شکل (۱۷) میزان انحراف معیار خطا بر حسب متر برای فواصل مختلف و حالت‌های متفاوت مقاومت خطا را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای به دست آمده میزان انحراف معیار خطا با افزایش مقاومت خطا افزایش دارد. همچنین از نمودارهای شکل (۱۷) مشخص است که هرچه فاصله از پست فوق توزیع بیشتر شده، میزان اختلاف مقادیر انحراف معیار بین حالت‌های مختلف مقاومت خطا بیشتر شده است. این موضوع در فاصله‌های کم از پست فوق توزیع چندان متفاوت نیست.



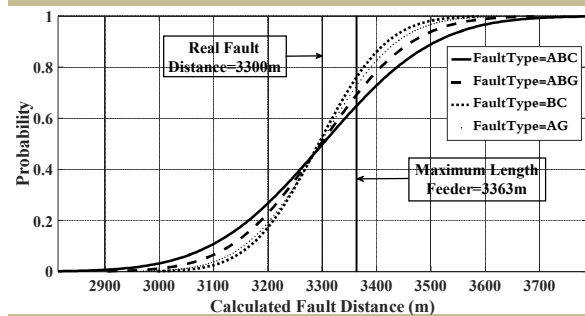
شکل (۱۷): انحراف معیار خطا به ازای فواصل مختلف برای هر مقاومت خطا

برای نشان دادن میزان تأثیر احتمالاتی بودن بارها بر روی میزان انحراف معیار خروجی، همه بارها به صورت نرمال گوسی در نظر گرفته می‌شود. در این راستا میزان پارامتر انحراف معیار در تابع توزیع نرمال گوسی برای تمام بارها از میزان ۰/۰۱ تا ۰/۳۵ افزایش داده می‌شود. اطلاعات جدول (۴) خروجی سناریو شرح داده شده را نشان می‌دهد. مقدار همبستگی بین بارها ۰/۲۵، مقاومت خطا ۱۰۰ اهم و نوع خطا تک‌فاز به زمین فرض شده است. بر اساس

انحراف معیار خروجی الگوریتم مکان‌یابی خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل (۱۴): تابع توزیع چگالی احتمال برای خطای الگوریتم بر حسب متر



شکل (۱۵): تابع توزیع احتمال تجمعی خروجی مکان‌یاب برای انواع خطا

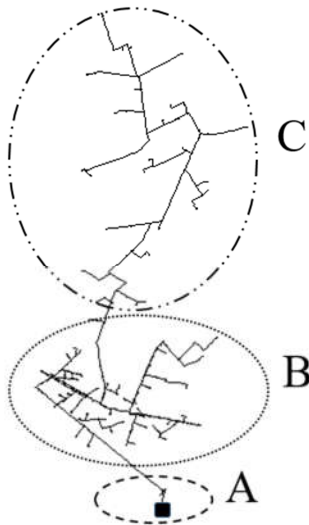
برای نشان دادن تأثیر نوع خطا بر روی میزان انحراف معیار خطا در فواصل مختلف، الگوریتم مکان‌یابی احتمالاتی خطا اجرا می‌شود. با توجه به شکل (۱۶) هرچه فاصله از پست فوق توزیع بیشتر می‌شود، برای همه انواع خطا، انحراف معیار بیشتر می‌شود. در این زمینه، برای خطای سه‌فاز، بیشترین انحراف معیار به دست می‌آید. در این میان برای خطای دو‌فاز، به زمین انحراف معیار کمتری نسبت به خطای سه‌فاز به دست آمده است. کمترین انحراف معیار مربوط به خطای تک‌فاز به زمین است. لذا در صورت رخ دادن خطای تک‌فاز به زمین انتظار می‌رود فضای جست‌وجو برای گروه اعزامی اتفاقات کمتر باشد. مهم‌ترین مزیت مکان‌یابی احتمالاتی خطا به دست آوردن احتمال مشاهده محل خطا به ازای هر فاصله از محل پیش‌بینی خطا توسط الگوریتم مکان‌یابی خطا می‌باشد. با توجه به اینکه تابع توزیع احتمال مکان پیش‌بینی خطا به صورت گاوسی و حول میانگین آن است. لذا می‌توان گفت برای فاصله ۳۰۰ متری از پست فوق توزیع و برای خطای سه‌فاز احتمال وقوع خطا در شعاع ۱۰۰ متری از محل پیش‌بینی خطا برابر ۶۸٪ است. این رقم برای شعاع ۲۰۰ متری از محل پیش‌بینی خطا برابر ۹۵٪ و برای شعاع ۳۰۰ متری از محل پیش‌بینی خطا برابر ۹۹/۷٪ است؛ به عبارتی، گروه اتفاقات اگر در چنین شرایطی بخواهد فضای جست‌وجوی محل خطای خود را

## مکان یابی خطای بهبود یافته با به کارگیری نشانگرهای خطا و مدل احتمالاتی بار ۳۷

هرگونه باری هستند. بارهای موجود در این فیدر در سه ناحیه A، B و C تقسیم بندی شده اند. در این راستا به ترتیب تعداد ۵ و ۱۴۵ و ۳۸ نقطه بار در نواحی مذکور وجود دارد. میزان همبستگی بار در ناحیه A برابر ۰/۱، در ناحیه B برابر ۰/۳ و در ناحیه C برابر ۰/۲ است.

جدول (۵): انحراف معیار بر حسب متر به ازای فواصل مختلف و برای مقادیرهای مختلف همبستگی بین بارها

Dis (m)	Correlation									
	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۳۰۰	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۹۹	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۷۲
۶۰۰	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۵۳
۹۰۰	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۳
۱۲۰۰	۱/۰۲	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۵۵	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۱	۰/۱۶
۱۵۰۰	۱/۰۸	۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۵۱	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۱۷
۱۸۰۰	۲/۶۳	۲/۵۴	۲/۴۸	۲/۵۸	۲/۸۳	۳/۰۱	۳/۳۸	۳/۹۰	۴/۴۹	۵/۱۶
۲۱۰۰	۹/۴۶	۸/۹۷	۸/۶۹	۸/۸۶	۹/۶۱	۱۰/۷۷	۱۲/۲۷	۱۴/۶۲	۱۷/۰۸	۱۹/۹۱
۲۴۰۰	۱۶/۵۴	۱۵/۶۰	۱۵/۵۵	۱۵/۲۸	۱۶/۵۳	۱۸/۶۴	۲۱/۶۷	۲۵/۴۵	۲۹/۷۹	۳۴/۷۹
۲۷۰۰	۳۸/۳۳	۳۷/۳۹	۳۸/۳۵	۴۱/۷۰	۴۷/۱۴	۵۳/۹۴	۶۱/۵۳	۶۹/۶۷	۷۸/۸۱	۸۸/۲۸
۳۰۰۰	۶۴/۴۳	۶۲/۷۵	۶۴/۶۹	۶۹/۹۴	۷۸/۵۴	۸۸/۳۳	۹۸/۳۵	۱۰۸/۰۸	۱۱۶/۵۷	۱۲۲/۹۱
۳۳۰۰	۱۰۷/۵۷	۱۰۴/۵۳	۱۰۶/۸۷	۱۱۴/۹۴	۱۲۷/۰۴	۱۴۰/۸۰	۱۵۴/۹۰	۱۶۷/۵۶	۱۷۷/۹۲	۱۸۴/۲۵



شکل (۱۸): شبکه توزیع ۳۰۶ باسه شهری کرمان

یکی از مشکلات و چالش های مهم در مکان یابی خطا، در شبکه های توزیع واقعی، جواب های چندگانه است. این موضوع به دلیل انشعابات متعدد موجود در آنهاست. بر طبق شکل (۱۹)، اگر خطایی در شاخه ۱۶۸ از شبکه ۳۰۶ باس رخ دهد، بعد از مکان یابی خطا ۶ نقطه به عنوان کاندید محل خطا وجود خواهد داشت. در این راستا می توان از آشکارسازهای خطای موجود در این شبکه ها برای کاهش جواب های چندگانه استفاده کرد؛ برای مثال اگر در مسیر خطای واقعی ایجاد شده آشکارساز خطا وجود می داشت، آن آشکارساز بعد از خطا فعال شده و ۵ جواب از ۶

اطلاعات این جدول، هرچه میزان پارامتر انحراف معیار در تابع توزیع نرمال گاوسی برای بارهای احتمالاتی افزایش یابد، میزان انحراف معیار خروجی افزایش می یابد. همچنین مطابق سناریوهای قبل، هرچه میزان فاصله از پست فوق توزیع بیشتر شود. میزان انحراف معیار خروجی نیز بیشتر می شود.

از آنجا که بارها در شبکه های برق معمولاً با یکدیگر همبستگی دارند، میزان و نحوه تأثیر همبستگی بارها بر روی انحراف معیار خروجی از موارد مهم و جذاب برای محققان به شمار می رود. برای نشان دادن این اثر میزان همبستگی بین بارها از میزان ۰ تا ۰/۹ بالا برده می شود. میزان پارامتر انحراف معیار تابع توزیع نرمال گاوسی برای بارهای احتمالاتی، مقدار ۰/۳۵ در نظر گرفته می شود. میزان انحراف معیار خروجی برای حالت های مختلف این سناریو در جدول (۵) آورده شده است. در این راستا مقدار مقاومت خطا ۱۰۰ اهم و نوع خطا تک فاز به زمین فرض شده است.

جدول (۴): انحراف معیار خطا بر حسب متر به ازای فواصل مختلف برای مقادیر متفاوت انحراف معیار تابع توزیع نرمال گاوسی در پیش بینی بار

Dis (m)	STD in gaussian PDF				
	۰/۱	۰/۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۵
۳۰۰	۱/۷۲۶۶	۰/۹۶۵۵۱	۱/۰۱۴۱	۱/۰۱۸۲	۰/۸۴۸۵۷
۶۰۰	۱/۷۲۵۳	۰/۹۵۶۶۶	۰/۹۹۱۵۵	۰/۹۸۱۶	۰/۸۰۳۳۵
۹۰۰	۱/۷۲۳۸	۰/۹۴۷۶۳	۰/۹۶۹۳۵	۰/۹۴۸۳۳	۰/۷۷۲۹۹
۱۲۰۰	۱/۷۲۱۹	۰/۹۳۸۱۷	۰/۹۴۷۷۲	۰/۹۱۹۳۱	۰/۷۶۱۲۴
۱۵۰۰	۱/۷۱۹۷	۰/۹۲۸۳۴	۰/۹۲۶۹۲	۰/۸۹۵۶۷	۰/۷۷۱۰۴
۱۸۰۰	۱/۸۴۶۶	۱/۱۵۰۸	۱/۵۶۶۸	۲/۰۵۰۱	۲/۵۰۷۸
۲۱۰۰	۱/۹۲	۱/۸۴۷۵	۴/۰۴۷۷	۶/۳۷۵۴	۸/۰۳۲
۲۴۰۰	۲/۰۰۷۱	۲/۶۷۰۷	۶/۰۰۷۳	۱۰/۸۶۵۵	۱۵/۰۴۴۱
۲۷۰۰	۳/۴۶۱۴	۶/۱۸۹۶	۱۶/۰۹۸	۲۷/۵۴۵۱	۳۹/۶۷۹۲
۳۰۰۰	۴/۹۳۲۲	۱۰/۹۰۹۳	۲۹/۰۳۸۱	۴۷/۵۰۱۷	۶۶/۶۴۴۴
۳۳۰۰	۷/۱۱۸۴	۱۷/۶۲۴۵	۴۹/۰۶۶۸	۷۹/۹۴۴۳	۱۱۰/۱۴۰۷

بر اساس این اطلاعات، اگرچه حالت همبسته به میزان ۰/۱ از حالت مستقل انحراف معیار کمتری را نشان می دهد، در ادامه با افزایش میزان همبستگی، میزان انحراف معیار خروجی بیشتر می شود. به نظر می رسد در حالت مستقل بارها اثر یکدیگر را خنثی می کنند. برای مثال اگر کاهش یک بار باعث افزایش خطا شده است، کاهش بار دیگر آن افزایش خطا را تعدیل می کند؛ حال آنکه در شرایط بارهای همبسته این چنین نیست.

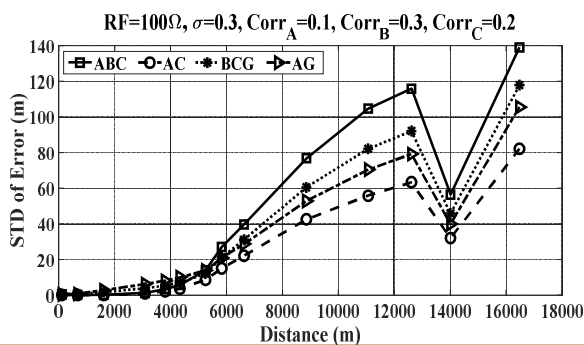
### ۵.۲. شبکه واقعی ۳۰۶ باسه

فیدر ۳۰۶ باسه شهری کرمان در شکل (۱۸) به نمایش گذاشته شده است. طول این شبکه ۱۶ کیلومتر و میزان بار پیک فیدر ۱۲۰ آمپر اندازه گیری شده است. تعداد ۱۸۸ باس آن دارای بار و مابقی فاقد

جواب خروجی حذف می‌شد.

در حال حاضر، در شرکت‌های توزیع نیروی برق ایران مکان‌یابی بهینه برای آشکارسازهای خطا بدون در نظر گرفتن وجود مکان‌یاب خطا محاسبه می‌شود. در این مقاله فرض شده است که مکان‌یابی آشکارسازهای خطا در شبکه ۳۰۶ باسه واقعی شهر کرمان با در نظر گرفتن وجود مکان‌یاب خطا انجام شده است.

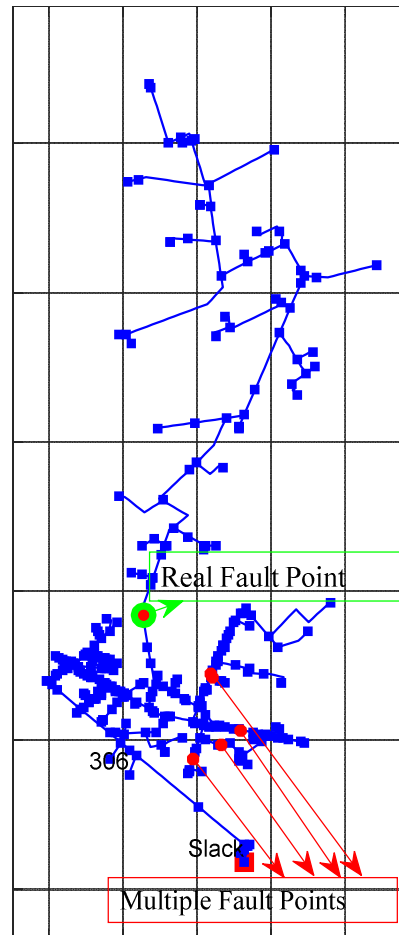
واقعی می‌باشد، به‌عنوان خروجی مکان‌یاب خطا در نظر گرفته شده است. نمودارهای شکل (۲۰) تأثیر نوع خطا بر میزان انحراف معیار خروجی برای شبکه واقعی ۳۰۶ باسه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، خطای سه‌فاز بیشترین انحراف معیار را به خود اختصاص داده است. همچنین خطای دوفاز به زمین، خطای دوفاز و خطای تک‌فاز به زمین بعد از خطای سه‌فاز در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در نتیجه برای هر دو شبکه ۱۱ باس و ۳۰۶ باس، انحراف معیار خطای تک‌فاز به زمین کمترین مقدار و خطای سه‌فاز، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این موضوع یعنی در شرایط یکسان برای خطای سه‌فاز فضای جست‌وجوی خطا برای گروه اتفاقات بیشتر از خطای تک‌فاز خواهد بود.



شکل (۲۰): انحراف معیار خطا بر حسب متر برای هر نوع خطا به‌ازای فواصل مختلف از پست فوق توزیع

تأثیر میزان مقاومت خطا بر روی انحراف معیار خروجی در شکل (۲۱) به تصویر کشیده شده است. بر اساس نمودارهای این شکل، هرچه میزان مقاومت خطا بیشتر باشد، انحراف معیار خروجی بیشتر خواهد شد. برای مشخص شدن تأثیر میزان انحراف معیار در تابع چگالی احتمال نرمال گاوسی بار بر روی انحراف معیار خروجی، یک فاصله مشخص به میزان ۱۶۴۷۸ متر از پست فوق توزیع به‌عنوان محل خطا در نظر گرفته شده است. حال با افزایش انحراف معیار در تابع چگالی، احتمال ۱۸۸ نقطه بار از صفر تا مقدار یک، میزان انحراف معیار خروجی مکان‌یاب خطا، در نمودار شکل (۲۲) به نمایش گذاشته می‌شود. بر اساس این نمودار مشخص می‌شود که میزان انحراف معیار خروجی به‌صورت خطی نسبت به انحراف معیار تابع چگالی احتمال بارها تغییر می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت در یک شبکه واقعی با تعدادی مشخص از نقطه بار، و سرخط‌های متعدد می‌توان انتظار داشت که انحراف معیار خروجی نسبت به انحراف معیار تابع چگالی احتمال بار به‌صورت خطی عمل کند.

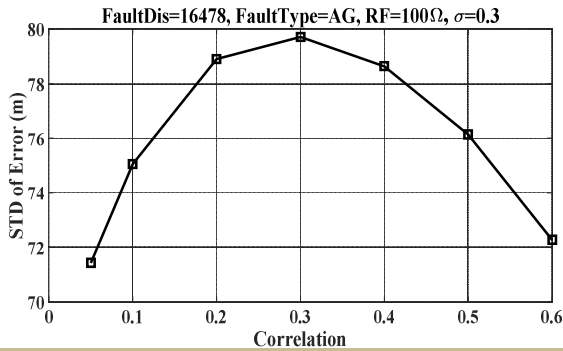
در ادامه با توجه به اینکه در عمل، بارهای موجود در سیستم قدرت، همواره از میزانی همبستگی برخوردارند، تأثیر این همبستگی بر انحراف معیار خروجی الگوریتم مکان‌یابی خطا در شبکه‌های



شکل (۱۹): جواب‌های چندگانه در صورت بروز خطا در شاخه ۱۶۸ از شبکه ۳۰۶ باسه واقعی شهر کرمان

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده برای شبکه ۳۰۶ باسه مشخص شد تعداد جواب‌های چندگانه در صورت وجود خطا در ناحیه B بیشترین میزان را داشته است. این در حالی است که در صورت وجود خطا در ناحیه C تعداد جواب‌های چندگانه کاهش می‌یابد و این بدان دلیل است که تعداد انشعابات و در نتیجه تعداد نقاط با تصویر یکسان از پست فوق توزیع کاهش پیدا می‌کند. در صورت وجود خطا در ناحیه A کمترین میزان جواب چندگانه توسط مکان‌یاب خطا مشخص شد. در ادامه، برای بررسی پارامترهای مختلف بر روی مکان‌یابی خطا در شبکه توزیع واقعی ۳۰۶ باسه شهر کرمان، تنها جوابی از مکان‌یاب خطا که در نزدیکی جواب

توزیع بررسی می‌شود. در این راستا میزان همبستگی تمام بارها، از مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۶ تغییر داده می‌شود. میزان انحراف معیار تابع توزیع چگالی احتمال بارهای موجود در شبکه ۳۰۶ با سه ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی برای یک فاصله مشخص از پست فوق توزیع و به میزان ۱۶۴۷۸ متر در نظر گرفته می‌شود. برای خطای تک‌فاز به زمین و میزان مقاومت خطای ۱۰۰ اهم نتیجه شبیه‌سازی به صورت شکل (۲۳) خواهد شد. از شکل مشخص است که تأثیر همبستگی به صورت غیرخطی در خروجی ظهور پیدا کرده است. در این زمینه ابتدا میزان انحراف معیار خروجی افزایش داشته، اما بعد از مقدار همبستگی، ۰/۳ این مقدار به صورت نزولی نمایان شده است. در این راستا تأثیر همبستگی در میزان انحراف معیار خروجی مشهود است که البته تأثیر آن به صورت غیرخطی ظاهر شده است.



شکل (۲۳): انحراف معیار خطا به‌ازای همبستگی‌های مختلف بین بارها

جدول (۶): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین

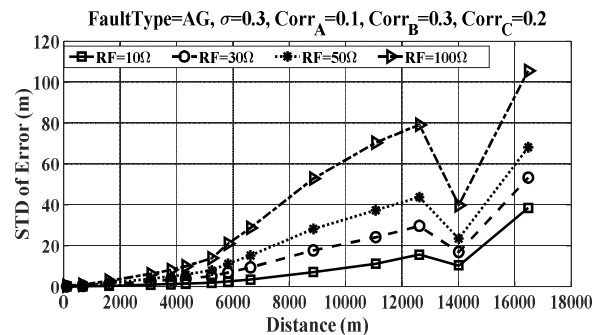
روش پیشنهادی	Gabr 2017		Nouri 2011		Salim 2009	
	بیشترین انحراف	تعداد از جواب واقعی بر حسب متر	بیشترین انحراف	تعداد از جواب واقعی بر حسب متر	بیشترین انحراف	تعداد از جواب واقعی بر حسب متر
۱	۰/۹	۱	۱/۳	۱	۳/۱	۱
۲	۱۵/۶	۲	۱۷/۹	۲	۲۵/۱	۱
۴	۲۶/۱	۳	۲۹/۶	۳	۵۱/۲	۱
۶	۷۳/۸	۶	۷۰/۳	۶	۱۸۱/۶	۱
۸	۱۸۴/۲	۵	۱۸۲/۱	۵	۲۵۱/۲	۱
۱۰	۲۷۳/۹	۶	۲۸۰/۳	۶	۲۸۷/۵	۲
۱۲	۳۵۶/۴	۵	۳۶۱/۲	۵	۳۴۰/۴	۱
۱۴	۱۷۷/۶	۴	۱۸۰/۱	۴	۱۸۰/۱	۲
۱۶	۴۲۸/۷	۱	۴۲۸/۷	۱	۴۲۸/۷	۱

در این راستا، روش‌های پیشین به دلیل ماهیت قطعی بودن خروجی مکان‌یاب، برای خطاهایی که در نقاط انتهایی فیدر قرار دارند، در حالت‌های متعدد تخمین بار واگرا می‌شوند. از سوی دیگر، در روش پیشنهادی به دلیل اینکه از اطلاعات آشکارسازهای خطا برای تعیین نقطه خطا استفاده می‌شود، تعداد جواب‌های چندگانه کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، کارشناس اتاق کنترل توزیع بدون وقفه می‌تواند فرمان‌های لازم برای جدا کردن قسمت خطادار را صادر کند تا به دیگر قسمت‌های شبکه، کمترین خاموشی اعمال شود.

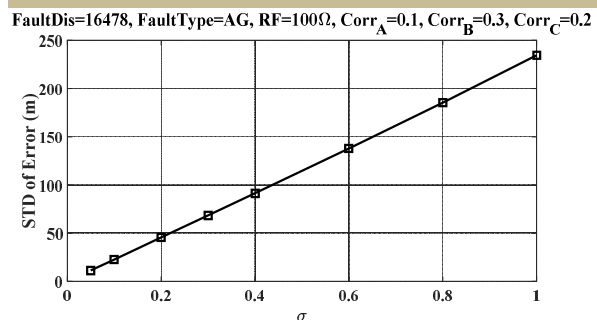
## ۷. نتیجه‌گیری

مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع امروزی از اهمیت ویژه‌ای

توزیع بررسی می‌شود. در این راستا میزان همبستگی تمام بارها، از مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۶ تغییر داده می‌شود. میزان انحراف معیار تابع توزیع چگالی احتمال بارهای موجود در شبکه ۳۰۶ با سه ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی برای یک فاصله مشخص از پست فوق توزیع و به میزان ۱۶۴۷۸ متر در نظر گرفته می‌شود. برای خطای تک‌فاز به زمین و میزان مقاومت خطای ۱۰۰ اهم نتیجه شبیه‌سازی به صورت شکل (۲۳) خواهد شد. از شکل مشخص است که تأثیر همبستگی به صورت غیرخطی در خروجی ظهور پیدا کرده است. در این زمینه ابتدا میزان انحراف معیار خروجی افزایش داشته، اما بعد از مقدار همبستگی، ۰/۳ این مقدار به صورت نزولی نمایان شده است. در این راستا تأثیر همبستگی در میزان انحراف معیار خروجی مشهود است که البته تأثیر آن به صورت غیرخطی ظاهر شده است.



شکل (۲۱): انحراف معیار خطا به‌ازای فواصل مختلف برای هر مقاومت خطا



شکل (۲۲): انحراف معیار خطا به‌ازای انحراف معیارهای مختلف از تابع توزیع نرمال گاوسی برای بارهای احتمالاتی

## ۶. مقایسه با روش‌های قبلی

برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی، مقایسه‌ای بین نتایج مقاله حاضر با مقالات سلیم [۲۲]، نوری [۳۸]، گبر [۳۹] انجام شده است. برای این ارزیابی از شبکه واقعی ۳۰۶ باس شرف‌آباد کرمان استفاده شده است. در این راستا پارامتر انحراف معیار در مدل احتمالی بار نرمال گاوسی، برابر ۰/۳، میزان مقاومت خطا برابر ۱۰۰ اهم، میزان همبستگی بارهای احتمالاتی



مکان‌یابی ارزیابی شد. در این راستا مکان‌یابی احتمالاتی خطا فضای جست‌وجو را برای گروه اعزامی اتفاقات مشخص می‌کند. در این زمینه، فضای جست‌وجو همراه با احتمال وقوع خطا به اپراتور شبکه توزیع ارسال می‌شود. روش مکان‌یابی احتمالاتی خطا بر روی شبکه واقعی ۳۰۶ باسه شهر کرمان پیاده‌سازی شد. نتایج حاکی از عملیاتی بودن روش پیشنهادی بوده است. در مکان‌یابی احتمالاتی خطا برای خطاهای با امپدانس بالا که در شاخه‌های انتهایی اتفاق می‌افتد، همانند روش‌های قطعی مکان‌یابی خطا، واگرایی در جواب نهایی اتفاق نمی‌افتد؛ لذا مکان‌یابی احتمالاتی خطا روشی کامل‌تر، با مزیت همگرایی بیشتر نسبت به روش‌های قطعی است.

برخوردار است. در این راستا برای بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع، عملکرد دقیق مکان‌یاب خطا تأثیر ویژه‌ای خواهد گذاشت. لذا با توجه به ذات شبکه‌های توزیع مشکلات پیش روی مکان‌یابی خطا از مهم‌ترین چالش‌ها در این شبکه‌هاست. مشکل جواب‌های چندگانه مکان‌یاب خطا در شبکه‌های توزیع توسط دریافت سیگنال از آشکارسازهای خطا که به‌صورت بهینه در طول فیدر جانمایی شده‌اند، تا حد امکان کاهش می‌یابد. در ادامه با توجه به اینکه اندازه بار مصرفی توسط مصرف‌کننده تحت کنترل شرکت‌های برق نیست و از طرفی همواره بحث پیش‌بینی بار مصرفی با انحرافات از مقدار واقعی روبه‌روست، مکان‌یابی احتمالاتی خطا در شبکه‌های توزیع راهکار مناسبی برای

## مراجع

- [1] Abessi, A., Vahidinasab, V. and Ghazizadeh, M. S., "Distributed Reactive Power Control by Considering End-Consumers", Energy: Engineering & Management, Vol. 5, No. 1, pp. 14-23, 2015.
- [2] Jalilian, a. and Alizadeh, M. R., "Improving Fault Ride-through Capability of Inverter-Based Distributed Generations Using Fault Current Limiter", Energy: Engineering & Management, Vol. 5, No. 1, pp. 2-13, 2015.
- [3] Bahmanyar, A., Jamali, S., Estebarsari, A. et al., "A Comparison Framework for Distribution System Outage and Fault Location Methods", Electric Power Systems Research, Vol. 145, pp. 19-34, 2017.
- [4] Jia, K., Yang, B., Dong, X. et al., "Sparse Voltage Measurement-Based Fault Location Using Intelligent Electronic Devices", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 1, pp. 48-60, 2019.
- [5] Sun, H., Yi, H., Fang, Z. et al., "Precise Fault Location in Distribution Networks Based on Optimal Monitor Allocation", IEEE Transactions on Power Delivery, 2019.
- [6] Thomas, D. W., Carvalho, R. J. and Pereira, E. T., "Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Wave", Vol. 2, p. 5, 2003.
- [7] Jia, Q., Dong, X. and Mirsaedi, S., "A Traveling-Wave-Based Line Protection Strategy against Single-Line-to-Ground Faults in Active Distribution Networks", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 107, pp. 403-411, 2019.
- [8] Shi, S., Zhu, B., Lei, A. et al., "Fault Location for Radial Distribution Network Via Topology and Reclosure-Generating Traveling Waves", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 6, pp. 6404 - 6413, 2019.
- [9] Borghetti, A., Bosetti, M., Di Silvestro, M. et al., "Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Networks: Definition of Mother Wavelets Inferred from Fault Originated Transients", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 380-388, 2008.
- [10] Magnago, F. H. and Abur, A., "Fault Location Using Wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1475-1480, 1998.
- [11] Magnago, F. H. and Abur, A., "A New Fault Location Technique for Radial Distribution Systems Based on High Frequency Signals", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 426-431, 1999.
- [12] Magnago, F. H. and Abur, A., "A New Fault Location Technique for Radial Distribution Systems Based on High Frequency Signals", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 426-431, 1999.
- [13] Usman M. U., Ospina J. and Faruque M. O., "Fault Classification and Location Identification in a Smart Distribution Network Using ANN", IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-6, 2018.
- [14] Dashtdar, M., "Fault Location in Distribution Network Based on Fault Current Analysis Using Artificial Neural Network", Journal of Electrical & Computer Engineering, Vol. 1, pp. 18-32, 2018.
- [15] Das, R., Sachdev, M. and Sidhu, T., "A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 443-448, 2000.
- [16] Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A. et al., "Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application", IEEE Access, Vol. 2, pp. 537-557, 2014.
- [17] Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M. et al., "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Transactions on Power apparatus and systems, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2892-2898, 1982.
- [18] Eriksson, L., Saha, M. M. and Rockefeller, G., "An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-End Infeed", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 2, pp. 423-436, 1985.
- [19] Zhu, J., Lubkeman, D. L. and Girgis, A. A., "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 801-809, 1997.
- [20] Choi, M.-S., Lee, S.-J., Lee, D.-S. et al., "A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 35-41, 2004.
- [21] Senger, E. C., Manassero, G., Goldemberg, C. et al., "Automated Fault Location System for Primary

- Distribution Networks*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1332-1340, 2005.
- [22] Salim, R. H., Resener, M., Filomena, A. D. *et al.*, "Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems", IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 508-516, 2009.
- [23] Lotffard, S., Kezunovic, M. and Mousavi, M. J., "A Systematic Approach for Ranking Distribution Systems Fault Location Algorithms and Eliminating False Estimates", IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 28, No. 1, pp. 285-293, 2013.
- [24] De Almeida, M., Costa, F., Xavier-de-Souza, S. *et al.*, "Optimal Placement of Faulted Circuit Indicators in Power Distribution Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 2, pp. 699-706, 2011.
- [25] Dzafic, I., Mohapatra, P. and Neisius, H., "Composite Fault Location for Distribution Management Systems", Conference Proceedings IPEC, pp. 795-800, 2010.
- [26] Dzafic, I. and Mohapatra, P., "Impedance Based Fault Location for Weakly Meshed Distribution Networks", ISGT, pp. 1-6, 2011.
- [27] Johns, A., Lai L., El-Hami, M. *et al.*, "New Approach to Directional Fault Location for Overhead Power Distribution Feeders", IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 138, No. 4, pp. 351-357, 1991.
- [28] Baldwin, T., Renovich, F. and Saunders, L. F., "Directional Ground-Fault Indicator for High-Resistance Grounded Systems", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 39, No. 2, pp. 325-332, 2003.
- [29] Vukojevic, A., Frey, P. and Smith, M., "Making a Smart Grid Case: Fault Circuit Indicators", IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2013.
- [30] Ho, C.-Y., Lee, T.-E. and Lin, C.-H., "Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 38-45, 2011.
- [31] Usida, W. F., Coury, D. V., Flauzino, R. A. *et al.*, "Efficient Placement of Fault Indicators in an Actual Distribution System Using Evolutionary Computing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 1841-1849, 2012.
- [32] Acosta, J. S., López, J. C. and Rider, M. J., "Optimal Multi-Scenario, Multi-Objective Allocation of Fault Indicators in Electrical Distribution Systems Using a Mixed-Integer Linear Programming Model", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp. 426-431, 2018.
- [33] Farajollahi, M., Fotuhi-Firuzabad, M. and Safdarian, A., "Simultaneous Placement of Fault Indicator and Sectionalizing Switch in Distribution Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 2278-2287, 2018.
- [34] Dzafic, I., "Method and Device for Capturing a Fault in an Electrical Supply Grid," Google Patents, 2012.
- [35] Džafić, I., Jabr, R. A., Henselmeyer S. *et al.*, "Fault Location in Distribution Networks through Graph Marking", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1345-1353, 2016.
- [36] Lee, S.-J., Choi, M.-S., Kang, S.-H. *et al.*, "An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems", IEEE transactions on power delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 524-532, 2004.
- [37] Salim, R. H., de Oliveira, K. R. C., Filomena, A. D. *et al.*, "Hybrid Fault Diagnosis Scheme Implementation for Power Distribution Systems Automation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 1846-1856, 2008.
- [38] Nouri, H. and Alamuti, M. M., "Comprehensive Distribution Network Fault Location Using the Distributed Parameter Model", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, pp. 2154-2162, 2011.
- [39] Gabr, M. A., Ibrahim, D. K., Ahmed, E. S. *et al.*, "A New Impedance-Based Fault Location Scheme for Overhead Unbalanced Radial Distribution Networks", Electric Power Systems Research, Vol. 142, No.1, pp. 153-162, 2017.
- [40] Srinivasan, K. and Jacques, A. S.-. "A New Fault Location Algorithm for Radial Transmission Lines with Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1676-1682, 1989.
- [41] PowerFactory, D., "Digsilent Powerfactory 15 User Manual", DlgSILENT GmbH, May-2014, 2013.
- [42] Aien, M., Khajeh, M. G., Rashidinejad, M. *et al.*, "Probabilistic Power Flow of Correlated Hybrid Wind-Photovoltaic Power Systems", IET Renewable Power Generation, Vol. 8, No. 6, pp. 649-658, 2014.