Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۸۱-۷۱

Vol. 13 / No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

# مکان‌یابی خطا در خط انتقال مبتنی بر امواج سیار و مورفولوژی ریاضی بدون نیاز به سیستم همزمان‌سازی و پارامترهای خط

نوع مطالعه: پژوهشی

مسلم صالحی[۱]، مربی ، علی اکبر مطیع بیرجندی[۲]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه فنی و حرفه‌ای- تهران- ایران
M-salehi@tvu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران- ایران
motiebirjandi@sru.ac.ir

**چکیده: مکان‌یابی دقیق خطا در یک سیستم خط انتقال برای شرکت‌های برق به منظور تشخیص سریع محل اختلال، بسیار اهمیت دارد. استفاده از یک تکنیک مناسب برای مکان‌یابی دقیق خطا، به طور موثر منجر به کاهش زمان بازیابی خطا و هزینه عملیات سیستم در طول تعمیر و نگهداری می شود. در نتیجه، قابلیت اطمینان و کیفیت تحویل برق بهبود و زیان اقتصادی ناشی از قطعی خطوط کاهش می‌یابد. در این مقاله، یک روش دقیق مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار دو پایانه‌ای برای خطوط انتقال پیشنهاد شده است. در این روش، بر اساس زمان رسیدن امواج سیار اول و دوم ناشی از خطای اتصال کوتاه که به صورت جداگانه در هر دو پایانه خط انتقال اندازه‌گیری می‌شوند، محل خطا و زمان وقوع آن تعیین می‌شود. الگوریتم پیشنهادی به همگام‌سازی داده‌ها، پارامترهای خط انتقال و سرعت موج سیار که منبع خطا در روش‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار هستند، نیاز ندارد. مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار نیازمند اطلاعات دقیق و کامل از سیگنال‌های جریان و ولتاژ ناشی از خطا است. به منظور استخراج بهتر زمان رسیدن امواج سیار و تحلیل سیگنال‌های گذرا ناشی از خطای اتصال کوتاه، فیلتر مورفولوژی ریاضی MMF بکارگرفته شده است. خطاهای مختلفی در یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت به طول ۲۰۰ کیلومتر با استفاده از برنامه EMTP و MATLAB شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه-سازی تأیید می‌کنند که الگوریتم پیشنهادی مستقل از نوع و امپدانس خطا بوده و قادر است با دقت بالا مکان خطا روی خط انتقال را تعیین کند.**

**واژه های کلیدی: مکان‌یابی خطا، خطوط انتقال، امواج سیار، مورفولوژی ریاضی**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : مسلم صالحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

تشخیص سریع و دقیق محل خطا، اطلاعات بسیار مهمی را در اختیار بهره‌بردارن شبکه جهت تعمیر و بازیابی منابع تغذیه قرار می‌دهد که باعث بهبود پایداری گذرا، قابلیت اطمینان و کاهش هزینه های بهره‌برداری سیستم قدرت می‌گردد (Lin, Weng, & Wang, 2009; Spoor, & Zhu, 2006; Hamidi, & Livani, 2017). بنابراین در دهه های اخیر روش های متعددی برای تشخیص خطا و مکان آن گزارش شده است (Saha, Izykowski, & Rosolowski, 2010).

روش های مختلفی برای مکان‌یابی خطا وجود دارد. اما همه این روش‌ها به طور کلی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: تمام روش‌هایی که مبتنی بر فرکانس اصلی سیستم قدرت هستند، به عنوان روش‌های مبتنی بر امپدانس یا فرکانس اصلی شبکه (Das, Santoso, Gaikwad, & Patel, 2014) در یک دسته و روش‌هایی که مبتنی بر فرکانس بالا هستند، تحت عنوان روش‌های مبتنی بر امواج سیار (Lin, Weng, & Wang, 2009; Spoor & Zhu, 2006; Hamidi & Livani, 2017) در دسته دوم قرار می‌گیرند. دسته سوم شامل روش‌هایی هستند که مبتنی بر هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی، یادگیری ماشین و غیره (Zhang, Liu, Liu, Tong, Chen, & Zhang, 2020) می‌باشند. روش‌های مبتنی بر امپدانس و فرکانس اصلی شبکه دارای هزینه سخت افزاری و فرکانس نمونه‌برداری کم برای پردازش داده‌ها هستند، اما دقت و عملکرد این روش‌ها تحت تاثیر عواملی مانند نوع و امپدانس خطا، جریان و عدم قطعیت بار، اشباع ترانسفورماتور های اندازه‌گیری و جهت پخش توان قرار می‌گیرد (Schweitzer, 1990; Lee, & Mousa, 1996).

روش های مبتنی بر امواج سیار دارای سرعت و دقت بالایی می‌باشند که مستقل از ساختار شبکه، نوع و امپدانس خطا بوده و تنها نیازمند فرکانس نمونه برداری بالا و همگام سازی زمان هستند (Rui et al., 2016; Lopes, 2016). به همین دلیل در تحقیقات اخیر این روش‌ها به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها دو گروه هستند: در گروه اول که به روش‌های تک پایلنه‌ای معروفند، وسایل اندازه‌گیری و پردازش اطلاعات در یک طرف خط انتقال قرار می‌گیرند و با استفاده از زمان رسیدن امواج سیار رفت و برگشت به یک پایانه خط انتقال، مکان خطا تعیین می‌گردد (Kawady & Stenzel, 2003). این روش‌ها نیاز به سیستم همزمان سازی مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)[1] ندارند ولی نیازمند تشخیص دقیق امواج سیار اول، دوم و سوم در یک پایانه خط هستند که در بعضی موارد تشخیص دقیق امواج سیار دوم به بعد مشکل است. برای رفع این مشکل در (Pereira, & Zanetta, 2004) یک روش تک پایانه‌ای ارائه شده است ولی این روش نیازمند داشتن سرعت امواج سیار است. در (Naidu & Pradhan, 2021) نیز یک روش تک پایلنه‌ای مبتنی بر امواج سیار پیشنهاد شده است که نه تنها نیازمند سرعت امواج سیار برای تعیین مکان خطا است، بلکه نیازمند داشتن زمان رسیدن امواج سیار اول، دوم و سوم به انتهای خط انتقال است.

در گروه دوم که به روش های دو پایانه‌ای معروفند، وسایل اندازه‌گیری در دو انتهای خط انتقال قرار می‌گیرند و بر اساس اطلاعات بدست آمده از هر دو انتهای خط، مکان خطا تعیین می شود (Lopes, Dantas, Silva, & Costa, 2018). در این روش ها معمولاً از زمان رسیدن اولین موج سیار به دو انتهای خط استفاده می‌کنند ولی نیازمند سیستم همزمان‌سازی و مرجع زمانی مشترک هستند (Korkali, & Abur, 2013; Salehi, Birjandi, & Dong, 2021). الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار دو پایانه‌ای، مستقل از پارامترهای خط و همگام سازی زمانی در (Lopes, 2016; Lopes, Dantas, Silva, Costa, 2018) گزارش شده‌اند. با این حال، نرم افزار و دستگاهی جهت اجرا و پیاده سازی این الگوریتم‌ها وجود ندارد. به منظور رفع این مشکلات، در (Lopes et al., 2019) یک روش دو پایانه‌ای ارائه شده است که نیازمند سرعت امواج سیار، پارامترهای خط انتقال و سیستم همزمان سازی نیست ولی در این روش از هر دو مود هوایی و زمینی امواج سیار برای تعیین مکان خطا استفاده شده است بنابراین، فقط برای خطا های اتصال زمین می‌توانند بکار گیرد. در(Wang & Zhang, 2022) نیز یک روش مبتنی بر امواج سیار دوپایانه‌ای برای مکان‌یابی خطا روی خطوط انتقال HVDC پیشنهاد شده است که نیازمند سرعت امواج سیار نیست اما از امواج سیار اول، دوم و سوم در دو پایانه خط انتقال استفاده می‌کند. در (Poudineh-Ebrahimi, & Ghazizadeh-Ahsaee, 2018) روشی برای مکان‌یابی خطا روی خطوط انتقال با استفاده از الگوریتم اکتشافی بهینه سازی مبتنی بر یاددهی – یادگیری (TLBO) ارائه شده است. در بعضی از تحقیقات (Silva, Coury, Oleskovicz, & Segatto, 2010; Ngu & Ramar, 2011) روش های ترکیبی مبتنی بر امپدانس و امواج سیار پیشنهاد شده است. اما همانطور که قبلا ذکر شد، قابلیت اطمینان روش های مبتنی بر فازور یا امپدانس به دقت تخمین فازور در طول دوره گذرا، نوع خطا و امپدانس خطا بستگی دارد.

به منظور رفع مشکلات و محدودیت‌ها در روش‌های ذکر شده، در این مقاله روشی برای مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار دو پایانه‌ای ارائه شده است. در این روش، مکان خطا روی خط انتقال بدون نیاز به داشتن سرعت موج سیار، پارامترهای خط انتقال و سیستم همزمان سازی، فقط با استفاده از زمان‌های رسیدن امواج سیار اول و دوم در هر دو انتهای خط تعیین می‌گردد. در بیشتر روش‌های مبتنی بر امواج سیار برای پردازش سیگنال‌های گذرا و تشخیص امواج سیار از تبدیل موجک (Rathore & Shaik, 2017; Rafinia, & Moshtagh, 2014; Guillen, et al., 2015) استفاده می شود. از آنجا که تشخیص دقیق زمان رسیدن امواج سیار در دقت و عملکرد الگوریتم مکان‌یابی خطا بسیار موثر است، لذا در روش پیشنهادی از

مورفولوژی ریاضی (MM)[۲] برای پردازش سیگنال‌های امواج سیار ناشی از خطای اتصال کوتاه و تشخیص زمان رسیدن امواج سیار با دقت و سرعت بالا و حجم محاسباتی کم استفاده شده است.

## ۲- روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

امواج سیار ولتاژ و جریان ناشی از وقوع اتصال کوتاه روی یک خط انتقال با سرعتی نزدیک سرعت نور منتشر می‌شوند که با ثبت و تحلیل اطلاعات مربوط به سیگنال‌های فرکانس بالا ناشی از امواج سیار، خطا تشخیص داده می‌شود، همچنین نوع و مکان آن تعیین می‌گردد (Peng et al., 2020; Naidu, & Pradhan, 2018). یک خط انتقال با طول $l$ متصل بین دو شین M و N مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. مکان‌یاب‌های خطا در هر دو انتهای خط نصب شده‌اند. با فرض اینکه یک خطای اتصال کوتاه در نقطه F روی خط انتقال M-N رخ دهد و $d$ فاصله نقطه خطا تا شین M باشد، دو حالت ممکن برای مکان خطا وجود دارد که این حالت‌ها با توجه به دیاگرام زمان – مکان در این بخش بررسی می‌شوند.

### ۲-۱- حالت ۱: خطا در نیمه اول خط انتقال $0 < d \le \frac{l}{2}$

در این حالت که خطا در نقطه F با فاصله $d$ از شین M رخ می‌دهد، با توجه به شکل ۱ (الف) می‌توان معادلات زیر را نوشت:

$$t_{M1} = t_0 + \frac{d}{v} \quad (۱)$$

$$t_{M2} = t_0 + \frac{3d}{v} \quad (۲)$$

$$t_{N1} = t_0 + \frac{l-d}{v} \quad (۳)$$

$$t_{N2} = t_0 + \frac{l+d}{v} \quad (۴)$$

که در معادلات فوق، $t_0$ زمان شروع خطا، $t_{M1}$ و $t_{N1}$ به ترتیب زمان رسیدن اولین موج‌های سیار از نقطه خطا تا شین‌های M و N در دو انتهای خط، $t_{M2}$ و $t_{N2}$ به ترتیب زمان رسیدن دومین موج‌های سیار به شین‌های M و N، همچنین $v$ و $d$ به ترتیب سرعت انتشار موج سیار و فاصله نقطه خطا تا شین M می‌باشند. با ترکیب معادلات (۱) تا (۴) می‌توان زمان شروع و فاصله خطا را به صورت زیر بدست آورد:

$$t_0 = \frac{1}{2} t_{ms} t_{md} \quad (۵)$$

$$d = \frac{t_{md}}{(t_{ns} - t_{ms} + 2t_{md})} l \quad (۶)$$

که در روابط فوق، $t_{ms} = t_{M1} + t_{M2}$، $t_{ns} = t_{N1} + t_{N2}$ و $t_{md} = t_{M2} - t_{M1}$.

### ۲-۲- خطا در نیمه دوم خط انتقال $\frac{l}{2} < d \le l$

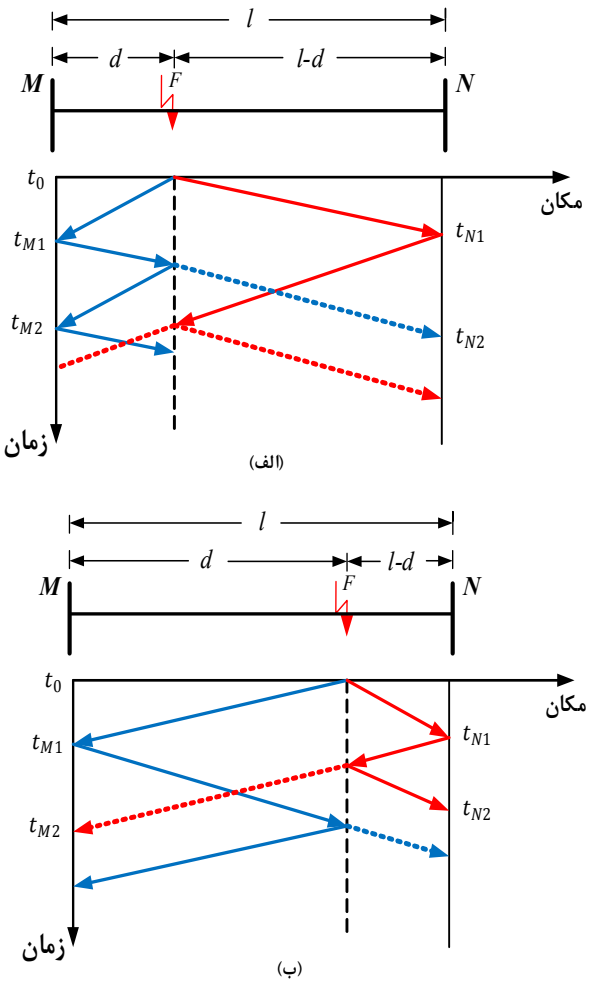
اگر خطا در نیمه دوم خط انتقال رخ دهد، مطابق شکل ۱ (ب) می‌توان معادلات زیر را نوشت:

$$t_{M1} = t_0 + \frac{d}{v} \quad (۷)$$

$$t_{M2} = t_0 + \frac{2l-d}{v} \quad (۸)$$

$$t_{N1} = t_0 + \frac{l-d}{v} \quad (۹)$$

$$t_{N2} = t_0 + \frac{3(l-d)}{v} \quad (۱۰)$$




**شکل ۱. دیاگرام مکان – زمان برای خطا روی خط انتقال (الف) خطا در نیمه اول خط $0 < d \le \frac{l}{2}$ (ب) خطا در نیمه دوم خط $\frac{l}{2} < d \le l$**

با ترکیب معادلات (۷) تا (۱۰)، زمان شروع و فاصله خطا از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$t_0 = \frac{1}{2} t_{ns} - t_{nd} \quad (۱۱)$$

$$d = (1 - \frac{t_{nd}}{(t_{ms} - t_{ns} + 2t_{nd})}) l \quad (۱۲)$$

که در روابط فوق $t_{nd} = t_{n2} - t_{n1}$. بنابراین از معادلات (۵)، (۶)، (۱۱) و (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که با داشتن فقط زمان‌های رسیدن اولین و دومین موج سیار در هر دو انتهای خط انتقال، زمان شروع و فاصله خطا بدست می‌آیند. مهمترین مزایای روش پیشنهادی این است که بر خلاف روش‌های موجود، نیازی به سرعت موج سیار و در نتیجه پارامتر های خط انتقال و همچنین سیستم زمانی مرجع برای همگام سازی زمان نیست زیرا زمان‌های رسیدن امواج سیار در هر دو انتهای خط انتقال به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند.

## ۳-۲- تشخیص زمان رسیدن امواج سیار با استفاده از مورفولوژی ریاضی (MM)

عملکرد دقیق مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار، نیازمند یک ابزار مناسب برای پردازش سیگنال‌های گذرا است. مورفولوژی ریاضی یک تکنیک غیرخطی با دقت بالا و حجم محاسباتی کم، می‌تواند برای استخراج اطلاعات سیگنال‌های فرکانس بالا مربوط به امواج سیار به کار رود. تمرکز آن بر روی شکل و اندازه سیگنال در حوزه زمان است و به پنجره اطلاعاتی کوچک‌تری نیازمند است (Wu, Zhang, & Zhang, 2003; Namdari, & Salehi, 2017; Salehi, & Namdari, 2018). مورفولوژی ریاضی یک عنصر ساختاری (SE) برای استخراج ویژگی‌های لازم سیگنال استفاده می‌کند (Heijmans, 1994). مورفولوژی ریاضی دارای دو عملگر اساسی فرسایش[۳] و گشایش[۴] است که بر اساس این دو عملگر، عملگرهای ترکیبی دیگری مانند عملگر باز[۵] و بسته[۶] تعریف می‌شوند. با فرض آن‌که $f(n)$ سیگنال ورودی که یک تابع گسسته تعریف‌شده در دامنه $D_f = \{0,1,2,\dots,N-1\}$ باشد و $g(m)$ عنصر ساختاری (SE) که در دامنه $D_g = \{0,1,2,\dots,M-1\}$ تعریف شده‌باشد، آنگاه گشایش سیگنال $f$ توسط $g$ با $(f \oplus g)$ و فرسایش سیگنال $f$ توسط $g$ با $(f \ominus g)$ نشان داده و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_{dil}(n) = (f \oplus g)(n) = max\{f(n-m) + g(m)\} \quad (۱۳)$$

$$f_{ero}(n) = (f \ominus g)(n) = max\{f(n+m) - g(m)\} \quad (۱۴)$$

که در آن $n \in D_f$ و $n \in D_f$ است. بر اساس () و () با ترکیب دو عملگر فوق، دو عملگر دیگر به‌نام عملگر باز و بسته به دست می‌آیند. عمل باز سیگنال $f$ توسط سیگنال $g$ با $f \circ g$ نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_{open}(n) = (f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (۱۵)$$

همچنین عمل بسته سیگنال $f$ توسط سیگنال $g$ با $f \bullet g$ نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_{close}(n) = (f \bullet g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (۱۶)$$

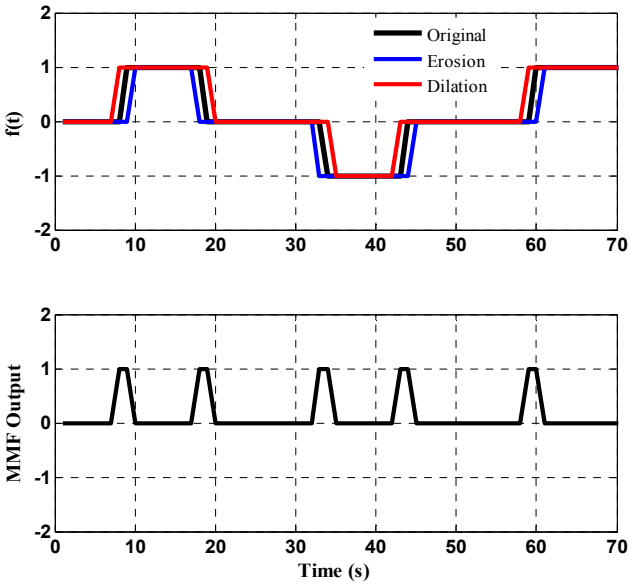
که $\bullet$ نشان‌دهنده عملگر بسته و $\circ$ نشان‌دهنده عملگر باز است. با ترکیب چهار عملگر گفته شده، فیلتر مورفولوژی ریاضی ($MMF_1$) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MMF_1(n) = f_{close}(n) - f_{open}(n) = (f \bullet g)(n) - (f \circ g)(n) \quad (۱۷)$$

این فیلتر قادر است تغییرات گذرا در یک سیگنال را به خوبی تشخیص دهد. در شکل ۲، یک نمونه سیگنال $f(t)$ با تغییرات پله‌ای شبیه سازی شده‌است. نتایج حاصل از اعمال عملگرهای فرسایش (Erosion) و گشایش (Dilation) و فیلتر $MMF_1$ بر سیگنال $f(t)$ در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. با توجه به شکل واضح است که فیلتر $MMF_1$ به خوبی و با دقت بالا تغییر در دامنه سیگنال را تشخیص می‌دهد. در بعضی از طرح‌های حفاظتی علاوه بر تشخیص زمان رسیدن و دامنه امواج سیار، تشخیص پلاریته امواج سیار نیز لازم است. با توجه به ویژگی‌های فیلتر $MMF_1$، می‌توان آن را به صورت زیر تعریف کرد که علاوه بر دامنه، پلاریته سیگنال را نیز با کمک آن تشخیص داد:

$$MMF_2(n) = \begin{cases} +MMF_1; & \text{اگر } |f_{close}(n)| - |f_{open}(n)| > 0 \\ -MMF_1; & \text{اگر } |f_{close}(n)| - |f_{open}(n)| < 0 \end{cases} \quad (۱۸)$$

فیلتر $MMF_2$ قادر است دامنه و پلاریته سیگنال را به خوبی تشخیص دهد که در این مقاله برای تشخیص جهت خطا روی خط انتقال از آن استفاده می‌شود.



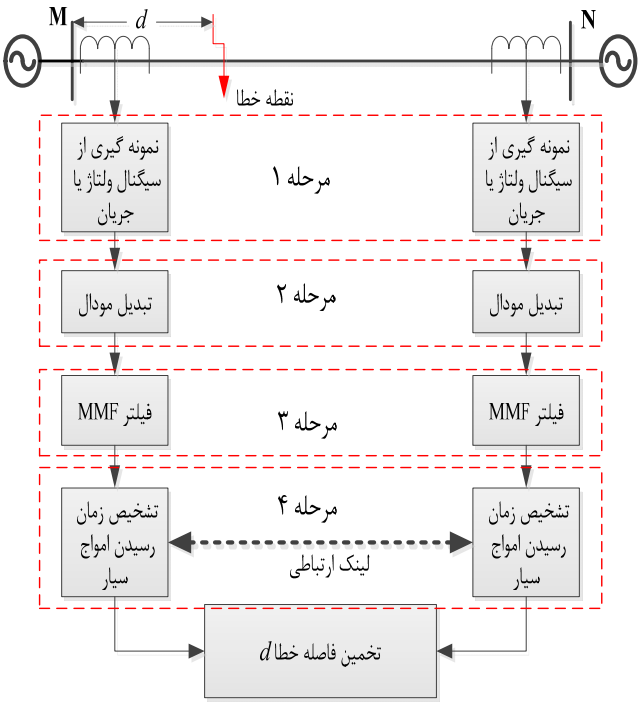

**شکل ۲. پردازش سیگنال $f(t)$ با فیلتر $MMF_1$**

## ۴-۲- تبدیل مودال

به‌منظور حذف اثر کوپلینگ بین فازها در سیستم قدرت سه‌فاز و استفاده از روش امواج سیار با یک سرعت یکسان، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در حوزه فاز توسط رابطه زیر به مؤلفه‌های مودال مجزا تبدیل می‌شوند[۲۰]:

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_\alpha \\ M_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

که $M_a$، $M_b$ و $M_c$ ولتاژها یا جریان‌های فاز هستند. $M_0$ مؤلفه مود زمینی[۷]، $M_\alpha$ و $M_\beta$ مؤلفه‌های مود هوایی[۸] هستند. که در اینجا از مؤلفه مود هوایی به علت دقت بالا استفاده شده است.




**شکل ۳. ساختار و فلوچارت طرح پیشنهادی مکان‌یابی خطا**

ساختار و مراحل الگوریتم پیشنهادی مکان‌یابی خطا در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل (۳)، مراحل اجرای روش پیشنهادی به صورت زیر هستند:

مرحله ۱: ابتدا سیگنال‌های گذرای ولتاژ یا جریان ناشی از خطای اتصال کوتاه اندازه‌گیری می‌شوند

مرحله ۲: سیگنال‌ها گذرای ولتاژ یا جریان با کمک رابطه (۱۸) به مؤلفه‌های مودال تبدیل می‌شوند.

مرحله ۳: مؤلفه‌های مود هوایی ولتاژ یا جریان توسط فیلتر $MMF_1$ مورد پردازش قرار می‌گیرند

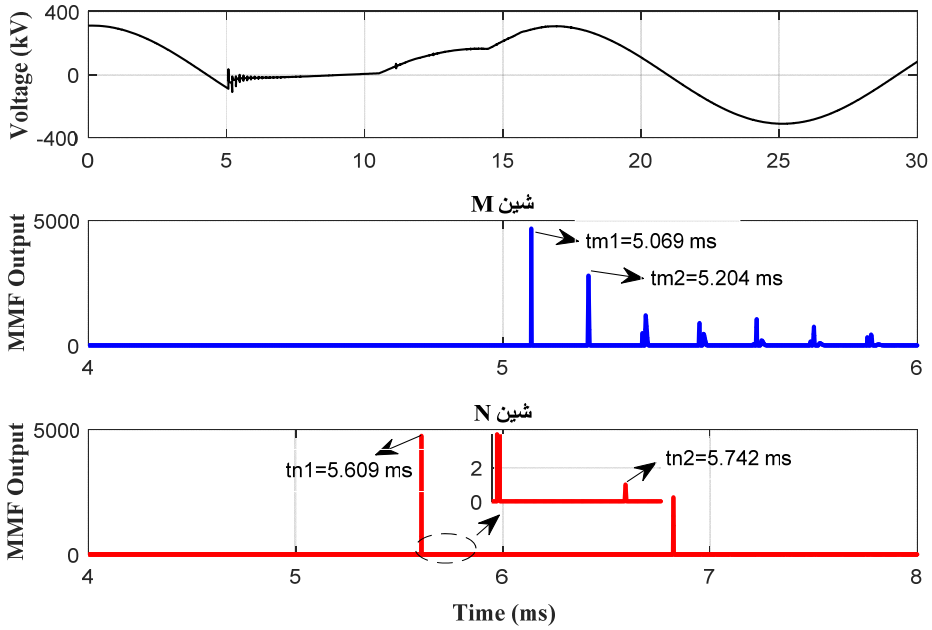
مرحله ۴: زمان رسیدن امواج سیار به دو انتهای خط انتقال تشخیص داده می‌شوند.

مرحله ۵: در نهایت، با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) مکان دقیق و زمان وقوع خطا تعیین می‌گردد.

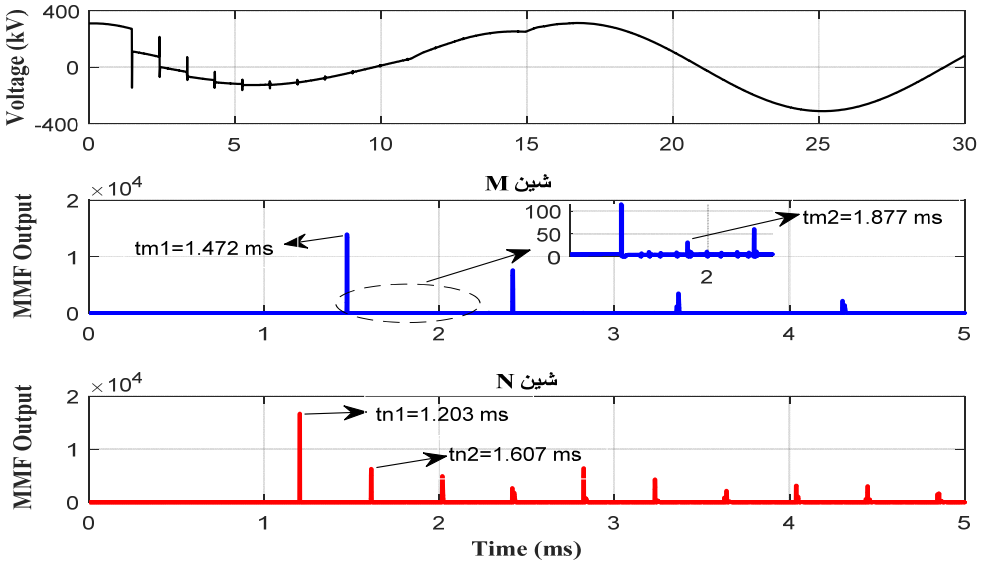
## ۳- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک سیستم ۴۰۰ kV، Hz ۵۰ شامل یک خط انتقال به طول ۲۰۰ km مطابق شکل ۳ در نرم‌افزار EMTP شبیه سازی شده است. سیگنال‌های ولتاژ ابتدا به مؤلفه‌های مودال تبدیل شده و سپس مؤلفه مود هوایی در نرم افزار MATLAB توسط فیلتر $MMF_1$ مورد پردازش قرار می‌گیرند. در تمام شبیه‌سازی‌ها، فاصله خطا از شین M ($d$) تخمین داده می‌شود و اندازه درصد خطای نسبی %Error از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\%Error = \frac{\left| \text{فاصله تخمینی خطا} - \text{فاصله واقعی خطا} \right|}{\text{طول خط}} \times 10 \quad (۱۹)$$




**شکل ۴. مؤلفه مود هوایی ولتاژ و تشخیص زمان رسیدن امواج سیار به شین‌های M و N توسط فیلتر $MMF_1$ برای خطای اتصال کوتاه در فاصله ۲۰ km از شین M**




**شکل ۵. مؤلفه مود هوایی ولتاژ و تشخیص زمان رسیدن امواج سیار به شین‌های M و N توسط فیلتر $MMF_1$ برای خطای اتصال کوتاه در فاصله ۱۴۰ km از شین M**

در سناریوی اول فرض می شود که یک خطای اتصال کوتاه تکفاز به زمین AG در لحظه ۵ ms با امپدانس ۲۰ Ω و در فاصله ۲۰ km از شین M ( نیمه اول خط انتقال ) رخ دهد. شکل موج مود هوایی ولتاژ و نتایج پردازش سیگنال با فیلتر MMF برای هر دو شین M و N در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل زمان رسیدن اولین و دومین موج سیار به شین‌های M و N با دقت توسط فیلتر $MMF_1$ مشخص شده است. بنابراین زمان شروع و فاصله خطا مطابق (۵) و (۶) به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$t_0 = \frac{1}{2}t_{ms} - t_{md} = \frac{1}{2} \times 10.273 - 0.135 = 5.001\ ms$$

$$d = \frac{t_{md}}{(t_{ns} - t_{ms} + 2t_{md})} l$$

$$= \frac{0.135}{(11.351 - 10.273 + 2 \times 0.135)} = 20.029\ km$$

که در این حالت درصد خطای نسبی برابر است با:

**جدول ۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا در شرایط مختلف خطا**

| نوع خطا | امپدانس خطا (Ω) | فاصله واقعی خطا (km) | فاصله تخمینی خطا $d$ (km) | درصد نسبی خطا %Error |
|---|---|---|---|---|
| AG | ۰ | ۵ | ۵/۰۱۱ | ۰/۰۰۵ |
| | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰/۰۲۹ | ۰/۰۱ |
| | ۵۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰/۰۱۴ | ۰/۰۰۷ |
| | ۱۰۰ | ۱۹۰ | ۱۸۹/۹۸۵ | ۰/۰۰۷ |
| ABG | ۰ | ۱۰ | ۱۰/۰۲۸ | ۰/۰۱ |
| | ۲۰ | ۳۰ | ۲۹/۹۸۴ | ۰/۰۰۸ |
| | ۵۰ | ۱۳۰ | ۱۳۰/۰۱۸ | ۰/۰۰۹ |
| | ۱۰۰ | ۱۸۰ | ۱۸۰/۰۲۲ | ۰/۰۱ |
| AB | ۰ | ۲۰ | ۲۰/۰۲۹ | ۰/۰۱ |
| | ۲۰ | ۴۰ | ۳۹/۹۸۸ | ۰/۰۰۶ |
| | ۵۰ | ۱۲۰ | ۱۲۰/۰۱۹ | ۰/۰۰۹ |
| | ۱۰۰ | ۱۶۰ | ۱۶۰/۰۳۵ | ۰/۰۱۷ |
| ABCG | ۰ | ۲۰ | ۲۰/۰۲۹ | ۰/۰۱ |
| | ۲۰ | ۵۰ | ۴۹/۹۷۸ | ۰/۰۱ |
| | ۵۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰/۰۱۴ | ۰/۰۰۷ |
| | ۱۰۰ | ۱۸۰ | ۱۷۹/۹۸۱ | ۰/۰۱۴ |

**جدول ۲. تاثیر زاویه شروع خطا بر عملکرد روش پیشنهادی**

| نوع خطا | زاویه شروع خطا (درجه) | فاصله واقعی خطا (km) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ۵ | ۲۰ | ۱۴۰ | ۱۹۰ |
| | | درصد نسبی خطا %Error | | | |
| AG | ۰ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۷ |
| | ۴۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۷ |
| | ۹۰ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۷ |
| | ۱۰۰ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۷ |

$$\%Error = \frac{|20-20.029|}{200} \times 100 = 0.01$$

در سناریوی دوم فرض می‌شود یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین ABCG در لحظه ۱ ms با امپدانس ۵۰ Ω و در فاصله km ۱۴۰ از شین M (نیمه دوم خط انتقال) رخ دهد. شکل موج مود هوایی ولتاژ و نتایج پردازش سیگنال با فیلتر $MMF_1$ برای هر دو شین M و N در شکل ۵ نشان داده شده است. بنابراین، زمان شروع و فاصله خطا مطابق (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$t_0 = \frac{1}{2}t_{ns} - t_{nd} = \frac{1}{2} \times 2.81 - 0.404 = 1.001\ ms$$

$$d = \left(1 - \frac{t_{nd}}{(t_{ms} - t_{ns} + 2t_{nd})}\right) l = \left(1 - \frac{0.404}{(3.349 - 2.81 + 2 \times 0.404)}\right) \times 200 = 140.014\ km$$

در این حالت درصد خطای نسبی برابر است با:

$$\%Error = \frac{|140-140.014|}{200} \times 100 = 0.007$$

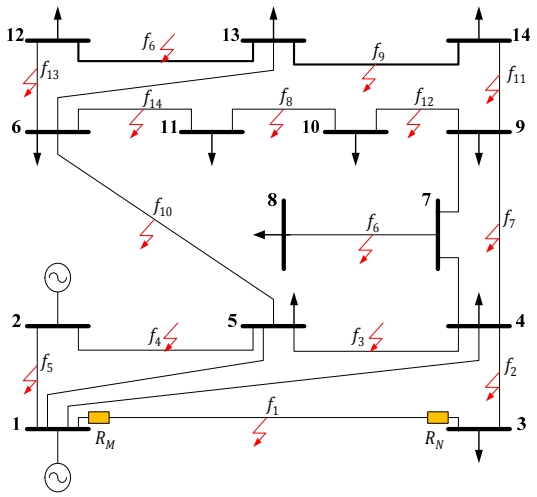
نتایج فوق نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با دقت بالا زمان شروع و فاصله خطا را تعیین می‌کند. به منظور ارزیابی دقیق‌تر روش پیشنهادی شبیه‌سازی‌های متعددی برای شرایط مختلف خطا با تغییر امپدانس خطا از ۰ تا ۱۰۰ اهم، مکان خطا از ۵ تا ۱۹۰ km از شین M و نوع خطا شامل خطاهای تکفاز به زمین AG، دو فاز به زمین ABG، دو فاز AB و خطای سه فاز به زمین ABCG انجام گرفته است و نتایج در جدول ۱ آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا، در شرایط مختلف خطا با دقت بالا، زمان شروع و فاصله خطا را تعیین می‌کند و مستقل از امپدانس و نوع خطا است.

## ۳-۱- تاثیر زاویه شروع خطا بر عملکرد روش پیشنهادی

به منظور بررسی تاثیر زاویه شروع خطا بر دقت و عملکرد روش پیشنهادی، خطای اتصال کوتاه ( تک‌فاز به زمین AG ) با زوایای شروع مختلف ( ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه ) و فواصل مختلف ۵ تا ۱۹۰ km از شین M در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. نتایج این جدول نشان می‌دهند که زاویه شروع خطا تاثیری بر عملکرد و دقت روش پیشنهادی ندارد زیرا تغییر زاویه شروع خطا باعث تغییر دامنه امواج سیار می شود ولی تاثیری بر زمان رسیدن امواج سیار که روش پیشنهادی بر اساس آن عمل می‌کند، ندارد.

## ۳-۲- عملکرد روش پیشنهادی برای وقوع خطا در خطوط انتقال مجاور

روش پیشنهادی برای یک خط انتقال که در دو پایانه خط، وسایل اندازه‌گیری و رله‌ها نصب شده‌اند، ارائه شده است و با فرض اینکه که خطای اتصال کوتاه در داخل خط انتقال رخ دهد، مکان خطا تعیین می‌گردد. اما اگر خطای اتصال کوتاه خارج از خط انتقال و روی یک خط انتقال مجاور رخ دهد، فیلتر $MMF_2$ با پردازش سیگنال های جریان و تعیین پلاریته امواج سیار اولیه در دو پایانه خط، جهت خطا یعنی خطا در داخل یا خارج از خط انتقال را به درستی تشخیص می‌دهد. اگر پلاریته امواج سیار ناشی از جریان اتصال کوتاه در دو پایانه خط انتقال برای رله‌ها یکسان باشند، خطا در داخل خط انتقال و اگر پلاریته‌ها مخالف هم باشند، خطا در خارج خط انتقال تشخیص داده می شود. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این شرایط، شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE در محیط نرم‌افزار EMTP شبیه سازی شده است. نمودار تک خطی این شبکه در شکل ۶ نشان داده شده است. این شبکه دارای دو ژنراتور سه‌فاز ۴۰۰ kV با امپدانس توالی مثبت ۰/۴۵ + j۰/۵ Ω و امپدانس توالی منفی j۰/۷۵ Ω + ۰/۶۷۵ است. سایر اطلاعات شبکه شامل امپدانس و طول خطوط انتقال، توان اکتیو و راکتیو بارها و غیره در ( Gopakumar, Reddy, Mohanta, 2015) ارائه شده است. وسایل اندازه‌گیری جهت تحلیل و پردازش سیگنال‌های امواج سیار جریان (رله‌های $R_M$ و $R_N$) در دو پایانه خط انتقال ۳-۱ با طول ۲۰۰ km نصب شده‌اند. خطاهای اتصال کوتاه در داخل خط انتقال ۳-۱ ($f_1$) با فواصل مختلفی از شین ۱ و خارج از خط انتقال ۳-۱ (نقاط $f_2$ تا $f_{14}$) در نظر گرفته‌شده‌اند. بعضی از نتایج شبیه سازی در جدول ۳ آمده است. مطابق جدول، پلاریته سیگنال‌های امواج سیار جریان برای همه خطاهای $f_2$ تا $f_{14}$، در دو پایانه خط انتقال ۳-۱، توسط رله‌های $R_M$ و $R_N$ تشخیص داده می شوند. برای خطاهای خارج از خط انتقال ۳-۱، پلاریته امواج سیار در دو پایانه خط، مخالف هم و برای خطاهای داخل خط انتقال ۳-۱، پلاریته امواج سیار یکسان هستند.



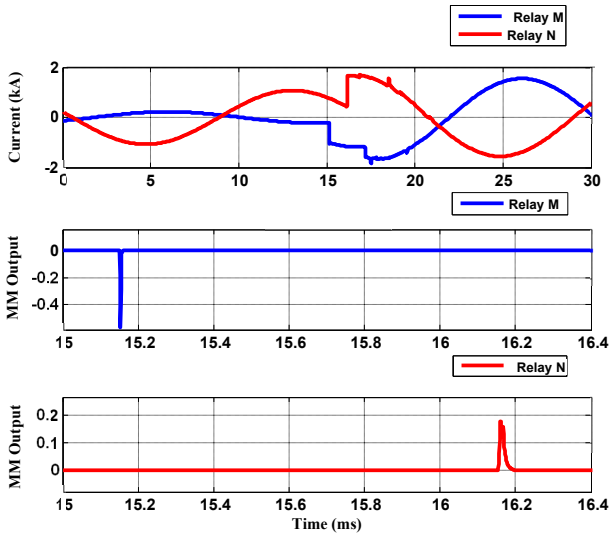

**شکل ۶. نمودار تک خطی شبکه ۱۴ شینه IEEE**

**جدول ۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا در شبکه ۱۴ شینه IEEE**

| تخمین مکان خطا | پلاریته $R_N$ | پلاریته $R_M$ | مکان واقعی خطا |
|---|---|---|---|
| داخل خط انتقال، ۱۹/۹۷۷ km | + | + | $f_1$، ۲۰km |
| داخل خط انتقال، ۴۹/۰۱۱ km | + | + | $f_1$، ۵۰Km |
| داخل خط انتقال، ۷۹/۹۸۱ km | - | - | $f_1$، ۸۰Km |
| داخل خط انتقال، ۱۱۰/۰۱۴ km | + | + | $f_1$، ۱۱۰Km |
| داخل خط انتقال، ۱۴۹/۹۷۶ km | + | + | $f_1$، ۱۵۰Km |
| داخل خط انتقال، ۱۷۹/۰۱۷ km | - | - | $f_1$، ۱۸۰Km |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_2$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_3$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_4$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_5$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_6$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_7$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_8$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_9$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_{10}$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | + | - | $f_{11}$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_{12}$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_{13}$ |
| خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ | - | + | $f_{14}$ |

به عنوان نمونه، نتایج پردازش سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله $R_M$ و $R_N$ توسط فیلتر پیشنهادی $MMF_2$ برای خطای تک‌فاز به زمین AG در لحظه ۱۵ میلی‌ثانیه با فاصله ۳۰

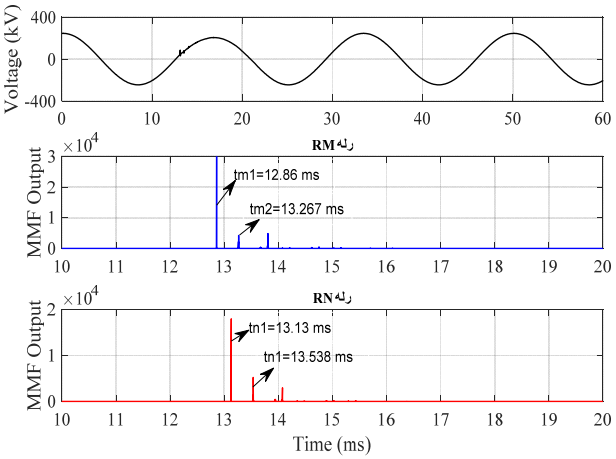
کیلومتر از شین N در نقطه $f_2$، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود پلاریته سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله $R_M$ و $R_N$ مخالف هم هستند. بدین ترتیب خطا خارج از خط انتقال ۳-۱ تشخیص داده می شود. برای خطاهای داخل خط انتقال ۳-۱، فاصله خطا از شین ۱ نیز با استفاده از روش پیشنهادی با دقت بالایی تعیین شده است.




**شکل ۷. سیگنال‌های جریان مربوط به رله‌های $R_M$ و $R_N$ و پردازش آنها با فیلتر $MMF_2$ هنگام بروز خطا در نقطه $f_2$**

## ۳-۳- وقوع خطا با زاویه شروع صفر درجه از سیگنال ولتاژ

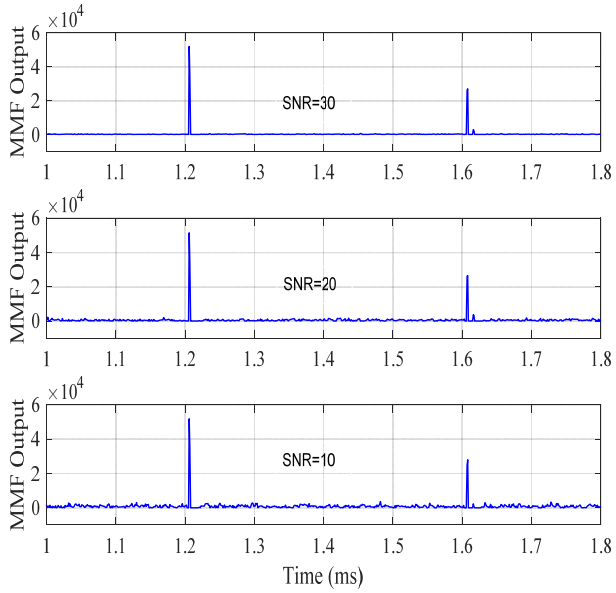
هنگامی که خطا در لحظه عبور سیگنال ولتاژ از نقطه صفر و با امپدانس بالا رخ می‌دهد، دامنه امواج سیار ایجاد شده کوچک بوده و تشخیص آنها به راحتی امکان‌پذیر نیست. بیشتر الگوریتم‌های موجود ممکن است در این شرایط عملکرد نادرستی داشته باشند. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این شرایط، فرض می‌شود که یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز روی خط ۳-۱ در فاصله ۶۰ km از شین ۱ در لحظه ms ۱۲/۶۵۵ (لحظه عبور سیگنال ولتاژ از نقطه صفر) با امپدانس ۱۵۰ Ω اهم رخ دهد. شکل موج مود هوایی ولتاژ و نتایج پردازش سیگنال با فیلتر $MMF_1$ برای هر دو رله $R_M$ و $R_N$ در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل واضح است که زمان رسیدن امواج سیار به خوبی توسط فیلتر تشخیص داده شده‌اند. با توجه به مقادیر این زمان‌ها و استفاده از معادلات (۵) و (۶)، فاصله خطا از شین ۱ برابر km ۶۰/۰۷۳ و زمان شروع خطا ms ۱۲/۶۵۶ بدست می‌آیند. بنابراین، در این شرایط نیز روش پیشنهادی عملکرد خوبی دارد.




**شکل ۸. مؤلفه مود هوایی ولتاژ و پردازش آن با فیلتر $MMF_1$ برای خطای اتصال کوتاه روی خط ۳-۱ در زاویه شروع صفر درجه از سیگنال ولتاژ**

## ۴-۳- تاثیر نویز بر عملکرد روش پیشنهادی

وجود نویز در سیگنال‌های ولتاژ و جریان می‌تواند تاثیر منفی بر دقت الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا داشته باشد. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حضور نویز، سطوح مختلف نویز (SNR=۳۰dB، SNR=۲۰dB و SNR=۱۰ dB) به سیگنال ولتاژ در شکل ۵ اضافه شده است. نتایج حاصل از پردازش توسط فیلتر $MMF_1$ در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق با شکل واضح است که نویز تاثیر منفی زیادی بر عملکرد روش پیشنهادی ندارد و در حضور نویز زمان رسیدن امواج سیار با دقت بالا تشخیص داده می‌شوند، زیرا فیلتر پیشنهادی تاثیر زیادی در کاهش نویز سیگنال دارد.




**شکل ۹. پردازش سیگنال و تشخیص زمان رسیدن امواج سیار توسط فیلتر $MMF_1$ با وجود نویز در سطوح مختلف**

## ۵-۳- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود

در این بخش قابلیت‌های روش پیشنهادی با سایر روش‌ها ( مبتنی بر فرکانس اصلی ( Poudineh-Ebrahimi & Ghazizadeh-Ahsaee, 2018)، تک پایانه‌ای (Lopes, Dantas, Silva, & Costa, 2018) و دو پایانه‌ای (Wang & Zhang, 2022) مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۴ آمده است. این مقایسه نشان می‌دهد که دقت روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها بالاتر است. علاوه بر آن، روش پیشنهادی دارای مزایای دیگری از جمله عدم نیاز به پارامترهای خط انتقال، سرعت موج سیار و سیستم همزمان سازی داده‌ها می‌باشد.

**جدول ۴. مقایسه قابلیت های روش پیشنهادی با سایر روش‌ها**

| روش | پارامترهای خط | سرعت موج سیار | سیستم همزمان-سازی | لینک ارتباطی | حداکثر خطا (٪) |
|---|---|---|---|---|---|
| (Poudineh-Ebrahimi & Ghazizadeh-Ahsaee, 2018) | ✓ | × | × | ✓ | ۰/۰۹ |
| (Lopes, Dantas, Silva, & Costa, 2018) | ✓ | ✓ | × | × | ۰/۱۳ |
| (Wang & Zhang, 2022) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ۰/۵ |
| روش پیشنهادی | × | × | × | ✓ | ۰/۰۱۷ |

✓ نیاز

× عدم نیاز

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای مکان‌یابی خطا روی خط انتقال مبتنی بر امواج سیاردو پایانه‌ای پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی فقط بر اساس زمان رسیدن اولین و دومین موج سیار به هر دو پایانه خط انتقال، یک دسته معادلات خطی برای تعیین محل خطا و زمان شروع خطا بدست می‌آید. با استفاده از این معادلات و بدون نیاز به پارامترهای خط انتقال، سرعت موج سیار و سیستم همزمان سازی داده‌ها، محل دقیق و زمان شروع خطا تعیین می شود. برای استخراج بهتر زمان رسیدن امواج سیار و پردازش سیگنال‌ها از فیلتر MMF با دقت بالا و حجم محاسباتی کم استفاده شده است. عملکرد روش پیشنهادی برای یک سیستم نمونه در محیط نرم افزار EMTP و برای شرایط مختلف خطا مورد تست و ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که این روش قادر است محل دقیق خطا روی خط انتقال و همچنین زمان وقوع آن را تعیین کند. علاوه بر آن، شرایط مختلف خطا شامل امپدانس، نوع، زاویه شروع و فاصله خطا تاثیر منفی بر عملکرد آن ندارند. از آنجا که روش پیشنهادی از معادلات خطی و فیلتر MMF برای پردازش سیگنال استفاده می‌کند، در مقایسه با سایر روش‌ها محدویت‌های کمتر و دقت بالاتری دارد.

## مراجع


Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A., & Patel, M. (2014). Impedance-based fault location in transmission networks: Theory and application. *IEEE Access*, 2, 537–557.

Gopakumar, P., Reddy, M. J. B, & Mohanta, D. K. (2015). Adaptive fault identification and classification methodology for smart power grids using synchronous phasor angle measurements, IET Gener. Transm. Distrib., 9(2), 133–145.

Guillen, D., Paternina, M.R.A., Zamora, A., *et al.* (2015). Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and Euclidean norm. IET Gener. Transm. Distrib., 9(15), 2294–2302.

Hamidi, R. J., & Livani, H. (2017). Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithm for Hybrid Multiterminal Circuits. IEEE Trans. on Power Del, 32(1), 135-144.

Heijmans, H. J. A. M. (1994). Morphological Image Operators. New York, NY, USA: Academic.

Kawady, T., & Stenzel, J. (2003). A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data. IEEE Trans. Power Del, 18(4), 1166-1173.

Korkali, M., & Abur, A. (2013). Optimal deployment of widearea synchronized measurements for fault-location observability. IEEE Trans Power Syst, 28(1), 482-489.

Lee, H., & Mousa, A. (1996). GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes. IEEE Trans. Power Del, 11(3), 1214–1223.

Lin, X., Weng, H., & Wang, B. (2009). A generalize method to improve the location accuracy of the single-ended sampled data and lumped parameter model based fault locators. Int. J. Electr. Power Energy Syst, 31(5), 201-205.

Lopes, F.V. (2016). Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. IEEE Trans. Power Del, 31(5), 2296–2298.

Lopes, F. V., Dantas, K. M., Silva, K. M., & Costa, F. B. (2018). Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. IEEE Trans. Power Del, 33(2), 873-880.

Lopes, F. V., Lima, P., Ribeiro, J. P. G., Tiago, R. H., Silva, K. M., Leite Jr, E. J. S., Neves, W. L. A., & Rocha, G. (2019). Practical methodology for two-terminal traveling wave-based fault location eliminating the need for line parameters and time synchronization. IEEE Trans. Power Del, 34(6), 2123-2134.

Naidu, O. D., & Pradhan, A. K. (2018). A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements. IEEE Trans. Power Del, 34(2), 505-513.

Naidu, O.D., & Pradhan, A. K. (2021). Precise Traveling Wave Based Transmission Line Fault Location Method Using Single-Ended Data. IEEE Trans.Ind. Inform, 17(8), 5197 – 5207.

Namdari, F., & Salehi, M. (2017). A high-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology. IEEE Trans. Power Del, 32(1), 246–53.

Ngu, E. E., & Ramar, K. (2011). A combined impedance and traveling wave based fault location method for the multi-terminal transmission line. Int. J. Elect. Power Energy Syst, 33(10), 1767-1775.

Salehi, M., & Namdari, F. (2018) Fault location on branched networks using mathematical morphology. IET Gen., Transm. Distrib., 12(1), 207–216.

Schweitzer III, E. O. (1990, Oct). A review of impedance-based fault locating experience. 14th Annual Iowa-Nebraska System Protection Seminar, Omaha, Nebraska.

Silva, M. da., Coury, D.V., Oleskovicz, M., & Segatto, E.C. (2010). Combined solution for fault location in three-terminal lines base on wavelet transforms. IET Gen., Transm. Distrib., 4(1), 94-103.

Spoor, D., & Zhu, J. G. (2006). Improved single-ended traveling-wave fault location algorithm based on experience with conventional substation transducers. IEEE Trans. Power Del, 23(3), 1714-1720.

Wang, J., & Zhang, Y. (2022). Traveling Wave Propagation Characteristic-Based LCC-MMC Hybrid HVDC Transmission Line Fault Location Method. IEEE Trans. Power Del, 37(1), 208–218.

Wu, Q. H. . Zhang, J. F., & Zhang, D. J. (2003). Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology. IEEE Trans. Power Del, 18(4), 1127–1133.

Zhang, F., Liu, Q., Liu, Y., Tong, N., Chen, S., & Zhang, C. (2020). Novel fault location method for power systems based on attention mechanism and double structure GRU neural network. IEEE Access 8, 75237–75248.

Peng, R. N., Zhou, L., Meng, X., Hu,Y., Shen,Y., & Xue, X. (2020). Fault Location Method in Power Network by Applying Accurate Information of Arrival Time Differences of Modal Traveling Waves. IEEE Trans. Ind. Inform, 16(5), 3124-3132.

Pereira, C.E.M., & Zanetta, Jr., L.C. (2004). Fault location in transmission lines using one-terminal post fault voltage data. IEEE Trans. Power Del, 19(2), 570- 575.

Poudineh-Ebrahimi, F., & Ghazizadeh-Ahsaee, M. (2018). Accurate and comprehe nsive fault location algorithm for two-terminal transmission lines. IET Gen., Transm. Distrib., 12(19), 4334 – 4340.

Rafinia, A., & Moshtagh, J. (2014). A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS. Int. J. Elect. Power Energy Syst, 55, 261–274.

Rathore, B., & Shaik, A.G. (2017). Wavelet-alienation based transmission line protection scheme. IET Gen., Transm. Distrib., 11(4), 995–1003.

Rui, L., Fei, W., Guoqing, F., Xue, X., & Ruib, Z. (2016). A general fault location method in complex power grid based on wide-area traveling wave data acquisition. Int. J. Elect. Power Energy Syst, 83, 213–218.

Saha, M. M., Izykowski, J., & Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks, ser. Power Systems. London: Ed. Springer.

Salehi, M., Birjandi, A. A. M., & Dong, X. (2021). Determining minimum number and placement of fault detectors in transmission network for fault location observability. Int. J. Electr. Power Eng, 124, 106386.

## زیرنویس‌ها

[1] Global Positioning System
[2] Mathematical Morphology
[3] Erosion
[4] Dilation
[5] Opening
[6] Closing
[7] Ground-Mode
[8] Aerial-Mode