

# روشی دقیق برای تعیین فاصله خط در خطوط انتقال چند پایانه‌ای مبتنی بر امواج سیار و الگوریتم ژنتیک

مهدی قاضی‌زاده احسائی<sup>۱</sup>

۱- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه زابل - زابل- ایران

[ghazizadeh@uoz.ac.ir](mailto:ghazizadeh@uoz.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین دقیق فاصله‌ی خط در خطوط انتقال دارای چند پایانه ارائه شده است. این روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بوده و از اطلاعات همزمان ثبت شده در پایانه‌ها استفاده می‌نماید و دارای دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول، با استفاده از روش مقایسه‌ای ارائه شده بخشی از خط انتقال که دچار خطا شده تعیین می‌شود. در مرحله دوم، نیز فاصله دقیق خطا با بکارگیری الگوریتم ژنتیک مشخص می‌گردد. این روش دارای دقت بالایی نسبت به روش‌های قبلی که برای خطوط انتقال چند پایانه‌ای ارائه شده، می‌باشد زیرا از مدل گسترده‌ی خط در حوزه زمان که ظرفیت خازنی خط را نیز بطور کامل مدل سازی می‌کند استفاده می‌نماید و به دلیل بهره‌گیری از نمونه‌های ثبت شده در پایانه‌ها، هامونیک‌های موجود در شکل موج پایانه‌ها بر عملکرد آن تأثیری ندارد. نتایج شبیه‌سازی دقت بالای روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های قبلی در شرایط مختلف خط نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** خطوط انتقال چند پایانه‌ای، مدل گسترده خط، اطلاعات همزمان، فاصله‌یابی خطا، حفاظت خط انتقال.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی قاضی‌زاده احسائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - زابل - کیلومتر ۳ جاده بنجار - پردیس جدید دانشگاه زابل - دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

حفاظت و مکان یابی خطا در شبکه های قدرت از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و توجه محققان و پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است [۱-۲۵].

با توسعه سیستم های قدرت مدرن، شبکه های قدرت پیچیده تر شده اند و خطوط انتقال چند پایانه ای نیز در سیستم های قدرت بوجود آمده اند. این خطوط خطاهای مختلفی را تجربه می کنند که می تواند ناشی از عوامل خارجی یا داخلی باشد. برای تداوم سرویس دهی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، به روش های مکان یابی خطای دقیقی احتیاج می باشد. اما، مکان یابی خطا در چنین خطوطی از پیچیدگی بیشتری نسبت به خطوط معمولی برخوردار است. از طرفی، روش های مکان یابی خطای تک پایانه ای [۸-۴] و دو پایانه ای [۱۳-۹] قادر به تعیین بخش خطا دیده از خط انتقال چند پایانه ای نیستند و روش های معدودی برای مکان یابی خطا در این نوع خطوط ارائه شده است [۲۳-۱۴]. این روش های چند پایانه ای از مقاومت خطا و امپدانس تونن سیستم های خارجی تاثیر کمتری می پذیرند و از لحاظ تئوری دقیق ترند. در ضمن، تکنولوژی مخابراتی موجود استفاده از اطلاعات نمونه گیری شده در چند پایانه خط را فراهم می آورد. مرجع [۱۴] از اطلاعات ولتاژ و جریان همه پایانه ها بصورت همزمان استفاده می نماید. این مرجع بخش خطا دار را تعیین نموده و سپس، با استفاده از روشی مبتنی بر توان راکتیو مکان خطا را پیدا می کند. مرجع [۱۵] از تفاضل جریان پایانه ها برای مکان یابی خطا استفاده می نماید. در مرجع [۱۶]، از جریان های همزمان که از پایانه ها وارد می شود استفاده شده و از دو روش متفاوت برای تعیین مکان خطا بهره گیری شده است. روش ارائه شده در [۱۸] بر اساس یک الگوریتم دو پایانه ای مکان خطا را تعیین می نماید و از اطلاعات همزمان پایانه ها بهره برده است. روش های پیشنهادی در [۲۰-۱۹] با محاسبه فاصله زمانی بین امواج رفت و برگشتی از محل خطا، مکان خطا را تعیین می نمایند که نیاز به فرکانس نمونه برداری بالا دارند و دقت این روش ها به فرکانس نمونه برداری وابسته است. از طرفی، برای خطاهایی که نزدیک پایانه ها و یا گره ها اتفاق می افتد درصد خطای مکان یابی به شدت افزایش می یابد [۱۹]. مرجع [۲۱] روش مناسبی ارائه داده است که تنها از ولتاژهای اندازه گیری شده در ترمینالهای خط استفاده می کند. اما،

بایستی حتما امپدانس معادل تونن پایانه های خط مشخص باشد. البته، در روش ارائه شده در مرجع [۲۲]، نیز امپدانس معادل تونن پایانه ها بایستی معلوم باشد. در مرجع [۲۳]، روشی ارائه شده که دارای بار محاسباتی کمی است و به امپدانس معادل تونن پایانه ها وابستگی ندارد. اما، از مدل فشرده خط بهره برده است که برای مکان یابی خطا در خطوط بلند از دقت کافی برخوردار نیست.

در این مقاله، روشی برای تعیین دقیق محل خطا در خطوط انتقال چند پایانه ای بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه شده است که برخلاف برخی از روش های قبلی نیاز به امپدانس معادل تونن پایانه های خط ندارد. همچنین، به دلیل استفاده از مدل گسترده ای خط انتقال در حوزه زمان که خاصیت خازنی خط را بطور کامل مدل سازی می کند، دارای دقت بالاتری نسبت به روش های قبلی می باشد. از طرفی، برای سرعت بیشتر در حل مساله بهینه سازی بدست آمده برای مکان یابی خطا از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. حداکثر قدر مطلق خطای روش پیشنهادی به ۰/۰۵ درصد محدود می گردد، در حالی که روش های ارائه شده قبلی دارای خطای بالاتری نسبت به روش ارائه شده در این مقاله می باشند.

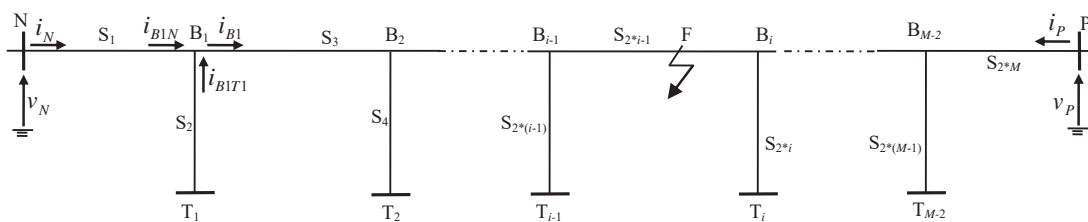
در ادامه در بخش ۲- به روش پیشنهادی مکان یابی خطا پرداخته شده است. در این قسمت روش ارائه شده در دو مرحله آورده شده است. در زیر بخش ۲-۱ روش پیشنهادی برای خطوط تک فاز توضیح داده شده و در زیر بخش ۲-۲ برای خطوط سه فاز شرح داده شده است. در بخش ۳- نیز روش ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش ۴- نیز نتیجه گیری انجام شده است.

## ۲- روش پیشنهادی مکان یابی خطا

برای سادگی، ابتدا روش پیشنهادی برای خط انتقال چند پایانه ای تک فاز ارائه می شود. سپس، این روش به خط انتقال سه فاز قابل تعمیم می باشد.

### ۲-۱- خط انتقال چند پایانه ای تک فاز

یک سیستم انتقال دارای  $M$  پایانه و تک فاز را در نظر بگیرید (شکل (۱)) که خطایی در آن اتفاق افتاده است. فرض کنید ولتاژها و جریان های تمامی پایانه ها ثبت شده و بصورت همزمان در اختیار می



شکل (۱): دیاگرام سیستم انتقال چند پایانه ای

باشد.

$$i_{BIN}(t) = ((Z_c + R_{S1}/4) \cdot [v_N(t + \tau_{S1}) - (Z_c + R_{S1}/4) \cdot i_N(t + \tau_{S1})] - (Z_c - R_{S1}/4) \cdot [v_N(t - \tau_{S1}) + (Z_c - R_{S1}/4) \cdot i_N(t - \tau_{S1})]) - \frac{R_{S1}}{4} \cdot [2 \cdot v_N(t) - \frac{R_{S1}}{2} \cdot i_N(t)] / 2Z_c^2 \quad (2)$$

همچنین، با استفاده از رابطه (۲) جریان ورودی به گره B<sub>1</sub> از سمت S<sub>2</sub> محاسبه می‌شود. حال می‌توان جریان ورودی از گره B<sub>1</sub> به بخش S<sub>3</sub> (i<sub>B1</sub>) را بصورت زیر بدست آورد:

$$i_{B1}(t) = i_{BIN}(t) + i_{BIT1}(t) \quad (3)$$

همچنین، می‌توان ولتاژ گره B<sub>2</sub> را با بکارگیری ولتاژ گره B<sub>1</sub> (v<sub>B1N</sub>) و جریان خروجی از آن (i<sub>B1</sub>)، و با استفاده از رابطه (۱) بدست آورد (v<sub>B2B1</sub>). به همین صورت، ولتاژ گره B<sub>2</sub> با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه T<sub>2</sub> نیز قابل محاسبه است (v<sub>B2T2</sub>). حال، با مقایسه‌ی v<sub>B2B1</sub> و v<sub>B2T2</sub> می‌توان فهمید که آیا خطا در بخش‌های S<sub>3</sub> یا S<sub>4</sub> رخ داده است یا خیر.

این روش ادامه می‌یابد تا دو ولتاژ محاسبه شده برای گره B<sub>i</sub> با یکدیگر مساوی نباشد. در این شرایط می‌توان گفت که خطا یا در بخش S<sub>2i-1</sub> یا در بخش S<sub>2i</sub> رخ داده است. اگر دو ولتاژ بدست آمده با یکدیگر برابر باشد تا M-2 گردد در این صورت خطا قطعاً در بخش S<sub>2M</sub> اتفاق افتاده است.

حال، دو بخشی که در یکی از آنها خطا رخ داده است مشخص گردید. برای تعیین بخشی که قطعاً در آن خطا اتفاق افتاده است، از روش مقایسه‌ی دیگری برای ولتاژها استفاده می‌کنیم. ابتدا، بایستی ولتاژ صحیح گره B<sub>i</sub> را با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه‌های T<sub>i+1</sub>، T<sub>i+2</sub>، ...، T<sub>M-1</sub> و P و با بکارگیری روشی مشابه با روشی که قبلاً برای بدست آوردن ولتاژ هر کدام از گره‌ها (مثلاً ولتاژ گره B<sub>2</sub> (v<sub>B2B1</sub>)) استفاده شد محاسبه نمود. نکته اینکه، دلیل عدم وقوع خطا بین گره B<sub>i</sub> و پایانه‌های T<sub>i+1</sub>، T<sub>i+2</sub>، ...، T<sub>M-1</sub> و P، ولتاژ بدست آمده برای گره B<sub>i</sub> (v<sub>Bi-True</sub>) صحیح می‌باشد. اگر ولتاژ گره B<sub>i</sub> بدست آمده با استفاده از اطلاعات گره B<sub>i-1</sub> (v<sub>BiB(i-1)</sub>) با ولتاژ صحیح گره B<sub>i</sub> (v<sub>Bi-True</sub>) برابر نباشد آنگاه خطا در بخش S<sub>2i-1</sub> رخ داده است و گرنه اگر ولتاژ محاسبه شده برای گره B<sub>i</sub> با بکارگیری اطلاعات گره T<sub>i</sub> (v<sub>BiTi</sub>) با ولتاژ v<sub>Bi-True</sub> برابر نباشند آنگاه خطا در بخش S<sub>2i</sub> رخ داده است.

حال، بخش خطادار از خط مشخص گردید. در ادامه (مرحله دوم) به مکان‌یابی خطا پرداخته شده است.

روش پیشنهادی مکان‌یابی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول بخش خطادار از خط مشخص می‌گردد و در مرحله دوم فاصله‌ی خطا تعیین می‌شود. روش پیشنهادی در ادامه آورده شده است.

## ۲-۱-۱-۲- تعیین بخش خطادار

برای تعیین بخش خطادار ولتاژهای تمامی گره‌ها با استفاده از ولتاژها و جریان‌های پایانه‌ها محاسبه می‌شود. با مقایسه ولتاژهای محاسبه شده در گره‌های مختلف، بخش خطادار مشخص می‌شود. در این روش، از باس N شروع کرده و ولتاژ گره B<sub>1</sub> با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه N بدست می‌آید [۲۴]:

$$v_{BIN}(t) = ((Z_c + R_{S1}/4)^2 \cdot [v_N(t + \tau_{S1}) - (Z_c + R_{S1}/4) \cdot i_N(t + \tau_{S1})] + (Z_c - R_{S1}/4)^2 \cdot [v_N(t - \tau_{S1}) + (Z_c - R_{S1}/4) \cdot i_N(t - \tau_{S1})]) - \frac{(Z_c + R_{S1}/4)}{4} \cdot [\frac{R_{S1}/2}{(Z_c + R_{S1}/4)} \cdot v_N(t) + 2 \cdot (Z_c - R_{S1}/4) \cdot i_N(t)] / 2Z_c^2 \quad (1)$$

که:

v<sub>B1N</sub>: ولتاژ محاسبه شده برای گره B<sub>1</sub> با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه N،

v<sub>N</sub>: به ترتیب ولتاژ و جریان پایانه N،

τ<sub>S1</sub>: زمان مورد نیاز برای موج سیار برای طی مسیر از گره N تا

B<sub>1</sub>

Z<sub>c</sub>: امپدانس مشخصه،

R<sub>S1</sub>: مقاومت خط مربوط به بخش S<sub>1</sub>.

همچنین، ولتاژ گره B<sub>1</sub> را می‌توان با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه T<sub>1</sub> با بکارگیری معادله (۱) بدست آورد (شکل (۱) را ببینید). با در نظر گرفتن شکل (۱) می‌توان اینگونه بیان نمود که:

اگر v<sub>B1N</sub> و v<sub>BIT1</sub> باهم مساوی باشند، آنگاه در بخش‌های S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> خطا رخ نداده است. در این شرایط ولتاژ بدست آمده برای گره B<sub>1</sub> صحیح است و این ولتاژ برای محاسبه‌ی ولتاژ گره بعدی بکار گرفته می‌شود.

جریان وارد شده به گره B<sub>1</sub> از بخش S<sub>1</sub> (i<sub>B1N</sub>) همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است در حوزه‌ی زمان بصورت زیر به‌دست می‌آید:

## ۲-۱-۲ - مرحله دوم: روش مکان‌یابی خطا

در این مرحله، یک روش مکان‌یابی دو پایانه‌ای با لحاظ نمودن مدل گسترده‌ی خط انتقال برای مکان‌یابی خطا مورد استفاده قرار گرفته است. با این هدف، ولتاژ و جریان دو طرف بخش خطادار بایستی مشخص باشد. نکته اینکه، تمامی ولتاژها و جریان‌های گره‌ها بجز جریان خروجی از گره  $B_i$  به سمت خطا ( $i_{Bi}$ ) قبلاً در مرحله اول محاسبه شده است. جریان‌های ورودی به گره  $B_i$  با استفاده از ولتاژ و جریان انتهایی بخش‌های متناظر بدست می‌آید و جریان  $i_{Bi}$  با جمع دو جریان ورودی به گره  $B_i$  محاسبه می‌شود.

به عنوان مثال، فرض کنید خطا در بخش  $S_{2i-1}$  رخ داده باشد. جریان ورودی به گره  $B_i$  از بخش  $S_{2i}$  ( $i_{BiTi}$ ) با استفاده از ولتاژ و جریان پایانه  $T_i$  (با بکارگیری رابطه (۲)) محاسبه می‌شود. همچنین، جریان ورودی به  $B_i$  از بخش  $S_{2i+1}$  ( $i_{BiBi+1}$ ) و با بکارگیری رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید. حال، می‌توان جریان خروجی از گره  $B_i$  ( $i_{Bi}$ ) به سمت خطا را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$i_{Bi}(t) = i_{BiTi}(t) + i_{BiBi+1}(t) \quad (۴)$$

اکنون، بخش خطادار  $S_{2i-1}$  را در نظر بگیرید. ولتاژ و جریان دو انتهایی آن مشخص شد. ولتاژ محل خطا را می‌توان با استفاده از ولتاژ گره  $B_i$  و جریان خروجی از گره  $B_i$  بصورت ذیل محاسبه نمود:

$$v_{FBi}(t) = ((Z_c + R_{BiF} / 4)^2 \cdot [v_{Bi}(t + \tau_{BiF}) - (Z_c + R_{BiF} / 4) \cdot i_{Bi}(t + \tau_{BiF})] + (Z_c - R_{BiF} / 4)^2 \cdot [v_{Bi}(t - \tau_{BiF}) + (Z_c - R_{BiF} / 4) \cdot i_{Bi}(t - \tau_{BiF})]) - \frac{(Z_c + R_{BiF} / 4) \cdot R_{BiF} / 2}{4} \cdot [v_{Bi}(t) + 2 \cdot (Z_c - R_{BiF} / 4) \cdot i_{Bi}(t)] / 2Z_c^2 \quad (۵)$$

که:  $i_{Bi}$  و  $v_{Bi}$  به ترتیب ولتاژ  $B_i$  و جریان خروجی از گره  $B_i$  و  $v_{FBi}$ : ولتاژ محاسبه شده برای نقطه  $F$  با استفاده از ولتاژ  $B_i$  و جریان خروجی از  $B_i$ .  
 $\tau_{BiF}$ : زمان لازم برای عبور موج سیار از  $B_i$  تا  $F$ .  
 $R_{BiF}$ : مقاومت خط از  $B_i$  تا  $F$ .  
همچنین، ولتاژ نقطه‌ی  $F$  با بکارگیری ولتاژ گره  $B_{i-1}$  و جریان خروجی از گره  $B_{i-1}$  قابل محاسبه است:

$$v_{FBi-1}(t) = ((Z_c + R_{Bi-1F} / 4)^2 \cdot [v_{Bi-1}(t + T - \tau_{BiF}) - (Z_c + R_{Bi-1F} / 4) \cdot i_{Bi-1}(t + T - \tau_{BiF})] + (Z_c - R_{Bi-1F} / 4)^2 \cdot [v_{Bi-1}(t - T + \tau_{BiF}) + (Z_c - R_{Bi-1F} / 4) \cdot i_{Bi-1}(t - T + \tau_{BiF})]) - \frac{(Z_c + R_{Bi-1F} / 4) \cdot R_{Bi-1F}}{4} \cdot [v_{Bi-1}(t) + 2 \cdot (Z_c - R_{Bi-1F} / 4) \cdot i_{Bi-1}(t)] / 2Z_c^2 \quad (۶)$$

که:

$v_{Bi-1}$ : ولتاژ گره  $B_{i-1}$ .

$i_{Bi-1}$ : جریان خروجی از گره  $B_{i-1}$ .

$v_{FBi-1}$ : ولتاژ محاسبه برای نقطه  $F$  با استفاده از ولتاژ گره  $B_{i-1}$  و

جریان خروجی از  $B_{i-1}$ .

$T$ : زمان لازم برای عبور موج سیار از گره  $B_i$  تا گره  $B_{i-1}$ .

$R_{Bi-1F}$ : مقاومت خط از  $B_{i-1}$  تا  $F$ .

فرض کنید که خطا باعث قطعی در خط انتقال نشده است. لذا،

$v_{FBi}$  و  $v_{FBi-1}$  با یکدیگر برابرند:

$$v_{FBi}(t) = v_{FBi-1}(t) \quad (۷)$$

بنابراین، با مساوی قرار دادن (۵) و (۶)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, t, \tau_{BiF}, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F}) = 0 \quad (۸)$$

نمونه‌های ثبت شده در پنجره اطلاعاتی بایستی معادله (۸) را ارضا کند. لذا (۸) گسسته سازی می‌شود:

$$f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, k, n, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F}) = 0 \quad (۹)$$

که:

$$k \cdot \Delta t = t$$

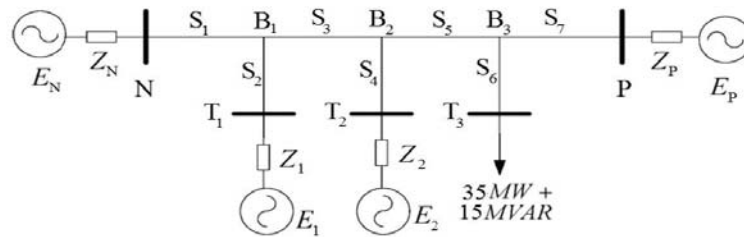
$$n \cdot \Delta t = \tau_{BiF}$$

$\Delta t$ : فاصله زمانی نمونه برداری،

$n, k$ : اعداد دلخواه.

برای  $K$  نمونه ثبت شده حین خطا،  $K$  معادله و یک متغیر مجهول  $n$  وجود دارد که متناسب با مکان خطا می باشد. برای تعیین مکان خطا ( $x$ )، بایستی تابع بهینه سازی زیر را حل نمود:

$$\text{Min } J(n) = \text{Min}_n \sum_{k=1}^K |f(v_{Bi}, i_{Bi}, v_{Bi-1}, i_{Bi-1}, k, n, Z_c, T, R_{BiF}, R_{Bi-1F})| \quad (۱۰)$$



شکل (۲): خط انتقال دارای پنج پایانه

مورد نظر اعمال می‌شود، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم تشکیل می‌شود. در این الگوریتم عملگرهای انتخاب، برش و جهش کاربرد عمده‌ای دارند. در روش‌های انتخاب، افرادی که دارای تابع برازندگی بهتری هستند ترجیح داده می‌شوند. این روش ادامه می‌یابد تا در یکی از نسل‌ها، الگوریتم همگرا شده و یا تعداد تکرار به حد معینی برسد.

### ۳- ارزیابی روش پیشنهادی

یک سیستم قدرت ۵۰۰ KV و ۶۰ Hz که دارای ۵ پایانه می‌باشد (همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است) برای ارزیابی روش ارائه شده در نرم‌افزار MATLAB مدل سازی شده است. این سیستم نمونه‌ای شبیه‌سازی شده را می‌توان برای اثبات صحت عملکرد روش مکان‌یابی پیشنهادی بکار برد. پارامترهای مربوط به سیستم شبیه‌سازی شده در جدول (۱) آورده شده است. مطالعات شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط مختلف سیستم و خطا انجام گرفته است. خطای مکان‌یابی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{درصد خطای مکان یابی} = 100 \times (\text{طول بخش خطا دیده} / \text{فاصله واقعی خطا} - \text{فاصله محاسبه شده}) \quad (12)$$

بخش خطادار با بهره‌گیری از مرحله‌ی اول از روش ارائه شده تعیین می‌گردد. همانگونه که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، پس از تعیین ولتاژ و جریان همه‌ی گره‌ها، تابع بهینه‌سازی (۱۱) برای یافتن محل خطا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. برای حل تابع (۱۱) از Global Optimization Toolbox™ در نرم‌افزار MATLAB برای اجرای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های زیادی برای بررسی اعتبار روش پیشنهادی انجام شده که در ذیل به برخی از آنها پرداخته شده است.

تابع (۱۰) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی موجود از جمله الگوریتم ژنتیک قابل حل است.

تا اینجا روش ارائه شده برای خطوط انتقال چند پایانه‌ای تک فاز شرح داده شد. نکته اینک، روش ارائه شده برای خطوط انتقال چندپایانه‌ای سه فاز نیز قابل استفاده می‌باشد که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۲-۲- خط انتقال چند پایانه‌ای سه فاز

خط انتقالی چند پایانه‌ای و سه فاز که دیگرام تک خطی آن شبیه شکل (۱) می‌باشد را در نظر بگیرید. فرض کنید خطایی در بخش  $S_{2i-1}$  رخ داده است. برای خطوط انتقال سه فاز، ابتدا بایستی معادلات دیفرانسیل جزئی که در حوزه فاز نوشته شده است به حوزه مودال تبدیل شود [۲۵]. به ازای هر کدام از سه مود می‌توان ۱۰ معادله به شکل معادلات (۱) تا (۱۰) نوشت. بدلیل اینکه اولین مود در انواع خطاها موجود است، می‌توان آنرا برای تعیین مکان خطا بکار برد. بنابراین، تابع بهینه‌سازی زیر مشابه (۱۰) برای اولین مود به‌دست می‌آید:

$$\text{Min } J(n^{(1)}) = \text{Min}_{n^{(1)}} \sum_{k=1}^K |f(v_{Bi}^{(1)}, i_{Bi}^{(1)}, v_{Bi-1}^{(1)}, i_{Bi-1}^{(1)}, k, n^{(1)}, Z_c^{(1)}, T^{(1)}, R_{BiF}^{(1)}, R_{Bi-IF}^{(1)})| \quad (11)$$

در تابع (۱۱) پارامترهای با بالانویس (۱) مربوط به اولین مود می‌باشند. با حل تابع (۱۱) با بکارگیری الگوریتم ژنتیک،  $n^{(1)}$  که متناسب با مکان خطا می‌باشد محاسبه می‌شود. الگوریتم ژنتیک، روشی مبتنی بر تئوری تکامل است و بر اساس مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که یک جمعیت را تشکیل می‌دهند کار می‌کند. جمعیت اولیه با استفاده از یک رویکرد تصادفی تولید می‌شود. برای همه‌ی کروموزوم‌های نسل اول، مقدار برازش با توجه به تابع برازش تعیین می‌شود. با بکارگیری مجموعه‌ای از عملگرهای ژنتیکی که به جمعیت

برای مطالعه تاثیر محل خطا بر روش مکان‌یابی پیشنهادی، جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای اعمال شده به قسمت N-P مربوط به خط را نشان می‌دهد. انواع مختلف خطا با مقاومت خطای  $10\Omega$  و زاویه‌ی شروع خطای  $90^\circ$  در فواصل مختلف از پایانه P اعمال شده و اطلاعات ولتاژ و جریان سه فاز ثبت شده در پایانه‌ها برای مکان‌یابی خطا ارسال شده است. این اطلاعات به عنوان ورودی به برنامه پیشنهادی داده شده و درصد خطای مکان‌یابی در جدول (۲) مشخص شده است. همچنین، این خطاها به بخش‌های S2، S4 و S6 نیز اعمال شده و نتایج مکان‌یابی خطا در جدول (۳) نمایش داده شده است. با بررسی جداول (۲) و (۳) می‌توان مشاهده نمود که بخش خطادار از خط به درستی توسط روش پیشنهادی تعیین شده و همچنین روش ارائه شده با تغییر مکان خطا دارای دقت بالایی بوده و وابستگی پایینی به تغییر مکان خطا دارد. به طوری که حداکثر قدرمطلق خطا کمتر از  $0.05/0$  درصد می‌باشد.

جدول (۱): پارامترهای خط انتقال شبیه سازی شده

بخش	طول	پارامترهای توالی مثبت و منفی	پارامترهای توالی صفر
$S_1$	130	$R_1=0.0275(\Omega/km)$ $L_1=1.002768(mH/km)$ $C_1=13(nF/km)$	$R_0=0.275(\Omega/km)$ $L_0=3.4505998(mH/km)$ $C_0=8.5(nF/km)$
$S_2$	120		
$S_3$	80		
$S_4$	100		
$S_5$	110		
$S_6$	50		
$S_7$	70		

جدول (۲): نتایج حاصل از تخمین محل خطا در فواصل مختلف خطا روی بخش N-P

نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه P (Km)	تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
3LG	40	✓	-0.0405
	100	✓	-0.0061
	160	✓	-0.0336
	250	✓	0.0096
	300	✓	0
	350	✓	-0.0227
SLG	40	✓	-0.0205
	100	✓	-0.0484
	160	✓	0.0287
	250	✓	0.0096
	300	✓	0
	350	✓	-0.0227
DLG	40	✓	-0.0405
	100	✓	-0.0061
	160	✓	0.0287
	250	✓	0.0096
	300	✓	0
	350	✓	-0.0227
LL	40	✓	-0.0405
	100	✓	-0.0484
	160	✓	0.0287
	250	✓	0.0096
	300	✓	0
	350	✓	-0.0227

برای بررسی تاثیر مقاومت خطا بر روش ارائه شده، مکان‌های مختلف روی خط چند پایانه‌ای در نظر گرفته شده و خطاهایی با مقاومت‌های  $10\Omega$ ،  $100\Omega$  و  $1000\Omega$  و زاویه شروع خطای  $45^\circ$  در این مکان‌ها به سیستم انتقال اعمال شده و نتایج اجرای روش پیشنهادی برای بخش N-P در جدول (۴) مشاهده می‌شود. در این جدول نیز حداکثر قدرمطلق خطا مقداری ناچیز بوده و به مقدار  $0.04/0$  درصد محدود می‌گردد. نتیجه اینکه، روش ارائه شده به مقاومت خطا حساسیت پایینی از خود نشان داده و دقت آن با تغییر مقاومت خطا تغییرات بسیار کمی را از خود نشان داده است.

زاویه‌ی شروع خطا یکی از عواملی است که دقت روش‌های سنتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای نشان دادن تاثیر زاویه‌ی شروع خطا بر روش پیشنهادی در این مقاله، خطاهای گوناگون با زوایای شروع خطای مختلف و در مکان‌های مختلف شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده از اجرای روش ارائه شده به ازای خطای تک فاز به زمین با زوایای شروع خطای  $0^\circ$ ،  $35^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $100^\circ$  با مقاومت خطای  $10\Omega$  در جدول (۵) آورده شده است. از نتایج بدست آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که برخلاف روش‌های سنتی زاویه‌ی شروع خطا تاثیر کمی بر روش پیشنهادی دارد.

بررسی جداول (۲) تا (۵) و نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی در حالت‌های گوناگون نشان می‌دهد که حداکثر قدر مطلق خطا در همه‌ی حالت‌های مورد مطالعه کمتر از  $0.05/0$  درصد بوده است. برای مقایسه‌ی روش پیشنهادی با روش‌های قبلی [۲۳-۱۴]، شبکه موجود در مرجع [۲۳] (که بالاترین دقت را در بین مراجع قبلی

جدول (۳): نتایج تخمین محل خطا در فواصل متفاوت خطا روی بخش‌های S2، S4 و S6

نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه (Km) $T_i$	تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
3LG	50	✓	-0.0487
	100	✓	-0.0266
	40	✓	0.0455
	70	✓	0
	20	✓	-0.0105
	350	✓	-0.0227
SLG	50	✓	-0.0487
	100	✓	-0.0266
	40	✓	0.0455
	70	✓	0
	20	✓	-0.0105
	350	✓	-0.0227
DLG	50	✓	-0.0487
	100	✓	-0.0266
	40	✓	0.0455
	70	✓	0
	20	✓	-0.0105
	350	✓	-0.0227
LL	50	✓	-0.0487
	100	✓	-0.0266
	40	✓	0.0455
	70	✓	0
	20	✓	-0.0105
	350	✓	-0.0227

گزارش کرده) انتخاب شده و برای شبیه‌سازی بکار برده شده است. پس از اجرای روش پیشنهادی به ازای شرایط مختلف خطای اعمالی به این شبکه، دقت بالای روش پیشنهادی مجدداً مورد تایید قرار گرفت و حداکثر قدرمطلق خطا در حالت‌های مختلف کمتر از ۰/۰۴ درصد بدست آمد، در حالی که در [۲۳] در بهترین حالت، حداکثر قدرمطلق خطا ۰/۱ درصد گزارش شده و این موضوع اثبات کننده دقت بالاتر

جدول (۴): نتایج حاصل از تخمین محل خطا با مقاومت‌های مختلف

خطا روی بخش N-P			
نوع خطا	فاصله واقعی خطا از پایانه P (Km)	مقاومت خطا (اهم)	تعیین بخش خطا دیده
3LG	180	1	✓
		10	✓
		100	✓
	330	1	✓
		10	✓
		100	✓
SLG	180	1	✓
		10	✓
		100	✓
	330	1	✓
		10	✓
		100	✓
DLG	180	1	✓
		10	✓
		100	✓
	330	1	✓
		10	✓
		100	✓
LL	180	1	✓
		10	✓
		100	✓
	330	1	✓
		10	✓
		100	✓

روش پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی خصوصاً برای خطوط طولانی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش دقیقی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال چند پایانه‌ای بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه شده که از اطلاعات ولتاژ و جریان همزمان پایانه‌ها استفاده می‌نماید. این روش از دو مرحله برای مکان‌یابی خطا بهره می‌برد. در مرحله اول، بخش خطادار تعیین شده و در مرحله دوم، الگوریتم مکان‌یابی اجرا می‌شود. در مقایسه با روش‌های قبلی، روش پیشنهادی دارای دقت بالاتری است و این بدلیل استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان در روش پیشنهادی می‌باشد، بطوری‌که حداکثر قدر مطلق خطا با اجرای روش ارائه شده به ۰/۰۵ درصد محدود می‌گردد.

جدول (۵): نتایج تخمین محل خطا با زوایای شروع ۰°، ۳۵°، ۷۵° و ۱۰۰° با مقاومت خطای ۱۰Ω در فواصل متفاوت خطا

زاویه شروع خطا	فاصله واقعی خطا (Km)		تعیین بخش خطا دیده	خطای فاصله‌یابی به درصد
	N	T <sub>1</sub>		
۰°	65	N	✓	0.0125
	45	T <sub>1</sub>	✓	-0.037
	55	T <sub>2</sub>	✓	0.0279
	30	T <sub>3</sub>	✓	0.0347
	45	P	✓	0.0143
۳۵°	65	N	✓	0.02
	45	T <sub>1</sub>	✓	0.019
	55	T <sub>2</sub>	✓	0
	30	T <sub>3</sub>	✓	0.012
	45	P	✓	-0.026
۷۵°	65	N	✓	0.016
	45	T <sub>1</sub>	✓	-0.037
	55	T <sub>2</sub>	✓	-0.017
	30	T <sub>3</sub>	✓	-0.036
	45	P	✓	-0.03
۱۰۰°	65	N	✓	0.025
	45	T <sub>1</sub>	✓	0.015
	55	T <sub>2</sub>	✓	-0.015
	30	T <sub>3</sub>	✓	0.036
	45	P	✓	-0.04

#### مراجع

- [۱] حسین عسکریان ایبانه، هدا شریفیان، رضا محمدی چینلو، فرزاد رضوی، "روشی نو در بدست آوردن کمترین نقاط شکست به کمک الگوریتم ژنتیک"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۰.
- [۲] حسان واحدی، رضا نوروزیان، ابوالفضل جلیلود، گنورگ قره پتیان، "ارائه روشی نوین برای بهره برداری و تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۸، شماره ۲، ۱۳۹۰.
- [۳] محسن حمزه، شاهرخ فرهنگی، مجید صنایع‌پسند، "روشی جدید در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی در حالت جزیره‌ای چند اینورتری"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره دوم، صص ۱۸-۱۱، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.
- [۴] رحمن دشتی، جواد ساده، "ارائه روشی اجرایی و نوین جهت شناسایی بخش خطا در شبکه های توزیع"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۰، شماره ۱، ۱۳۹۲.
- [5] Takagi, K., Yomakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T., "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, Aug. 1982.

- measurements”, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1325–1331, Apr. 2005.
- [22] Brahma, S. M., “New fault-location method for a single multiterminal transmission line using synchronized phasor measurements”, IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1148–1153, Jul. 2006.
- [23] Jiang, Q., Wang, B., Li, X., “An Efficient PMU-based fault-location technique for multiterminal transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 4, Aug. 2014.
- [24] Sadeh, J., Hadjsaid, N. A., Ranjbar, M., Feuillet, R., “Accurate fault location for series compensated transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 3, pp. 1027–1033, Jul. 2000.
- [25] Ibe, A. O., Cory, B. J., “A travelling wave-based fault locator for two and three terminal networks”, IEEE Trans. Power Del., vol. 1, no. 2, pp. 283–288, Apr. 1986.
- [6] Eriksson, L., Saha, M. M., Rockefeller, G. D., “An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end indeed”, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 2, pp. 424–436, Feb. 1985.
- [7] Xin Zhou, D., Shen Xing, S., “Optimizing solution of fault location using single terminal quantities”, Sci. China Ser. E-Tech Sci., vol. 51, no. 6, pp. 761–772, Jun. 2008.
- [8] Izykowski, J., Rosolowski, E., Saha, M. M., “Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end”, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib., vol. 151, no. 2, pp. 268–273, Mar. 2, 2004.
- [9] Novosel, D., Hart, D. G., Udren, E., Garitty, J., “Unsynchronized two-terminal fault location estimation”, IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 1, pp. 130–138, Jan. 1996.
- [10] Gopalakrishnan, A., Kezunovic, M., McKenna, S.M., Hamai, D.M., “Fault location using distributed parameter transmission line model”, IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 4, pp. 1169–1174, Oct. 2000.
- [11] Jiang, J.-A., Yang, J.-Z., Lin, Y.-H., Liu, C.-W., Ma, J.-C., “An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines-part I: Theory and algorithms”, IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 486–493, Apr. 2000.
- [12] Silveira, E. G., Pereira, C., “Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization”, IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 498–499, Jan. 2007.
- [13] Ghazizadeh-Ahsae, M., “Accurate NHIF locator utilizing two-end unsynchronized measurements”, IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, pp. 419–426, Jan. 2013.
- [14] Abe, M., Otsuzuki, Emura, N. T., Takeuchi, M., “Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 1, pp. 159–168, Jan. 1995.
- [15] Nagasawa, T., Abe, M., Otsuzuki, N., Emura, T., Jikihara, Y., Takeuchi, M., “Development of a new fault location algorithm for multiterminal two parallel transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 7, no. 3, pp. 1516–1532, Jul. 1992.
- [16] Funabashi, T., Otoguro, H., Mizuma, Y., Dube, L., Ametani, A., “Digital fault location algorithm for parallel double-circuit multi-terminal transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 531–537, Apr. 2000.
- [17] Sanderson, J. V. H., Santana, R. G. R., Al-Fakri, B., “Improved directional comparison based algorithm for protection of multi-terminal transmission lines”, in Proc. 5th Int. Conf. Develop. Power Syst. Protect., 1993, vol. 368, pp. 153–156.
- [18] Liu, C.-W., Lien, K.-P., Chen, C.-S., Jiang, J.-A., “A universal fault location technique for N-terminal ( $N \geq 3$ ) transmission lines”, IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, pp. 1366–1373, Jul. 2008.
- [19] Ngu, E.E., Ramar, K. “A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines”, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 33, no. 10, pp. 1767–75, 2011.
- [20] Yongli, Z., Xinqiao, F., “Fault location scheme for a multi-terminal transmission line based on current traveling waves”, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 53, pp. 367–374, 2013.
- [21] Brahma, S. M., “Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage