# تمایز میان عیوب مکانیکی سیمپیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریانهای هجومی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش ترکیبی

سجاد باقری'، دانشجوی دکتری؛ زهرا مروج'، دانشیار؛ گئورک قرهپتیان"، استاد

s.bagheri@semnan.ac.ir – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه سمنان – سمنان – ایران – ایران zmoravej@semnan.ac.ir – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه سمنان – سمنان – ایران – grptian@aut.ac.ir – ۳– دانشکده مهندسی برق – دانشگاه صنعتی امیرکبیر – تهران – ایران – ایران – ۲

چکیده: در این مقاله، روش ترکیبی کارا جهت تمایز عیوب مکانیکی سیمپیچ از جریان های خطای گذرای ترانسفورماتورها و جریان هجومی پیشنهاد شده است. در این روش، از ابزار پردازش سیگنال و هوش مصنوعی بهطور همزمان استفاده خواهد شد. ابتدا، عیبهای مکانیکی سیمپیچ ترانسفورماتورها بر روی یک نمونه آزمایشگاهی (سیمپیچ ترانسفورماتور ۱/۶ مگاولت آمپری) بررسی می گردد. سپس، پارامترهای مدل مشروح سیمپیچ ترانسفورماتور در نرمافزار MATLAB توسط الگوریتم ژنتیک تخمین و جهت اعتبارسنجی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می سیمپیچ ترانسفورماتور در نرمافزار MATLAB توسط الگوریتم ژنتیک تخمین و جهت اعتبارسنجی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود. در مرحله بعد، عیوب مکانیکی سیمپیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان هجومی ترانسفورماتور با استفاده از نرمافزار EMTP/ATP بهمنظور استخراج سیگنالهای جریان دیفرانسیل شبیهسازی می گردد. بعد از آن، برخی ویژگیهای بارز توسط تبدیل ویولت از سیگنالهای بهدستآمده تحلیل می گردد. درنهایت، این ویژگیها جهت آموزش شبکه عصبی در نظر گرفته شده و پیشامدها از یکدیگر تفکیک می گردند. روش پیشنهادی قابلیت تمایز عیوب مکانیکی سیمپیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان هجومی در ترانسفورماتور را استفاده از سیگنالهای بهدست آمده

**واژههای کلیدی:** حفاظت دیفرانسیل، استخراج ویژگی، تمایز پیشامدها، تغییر شکل شعاعی، جابجایی محوری.

# Discrimination between Winding Mechanical Defects, Internal and External Electrical Faults and Inrush Currents in Transformers using Hybrid Method

S. Bagheri<sup>1</sup>, PhD Student; Z. Moravej<sup>2</sup>, Associate Professor; G. B. Gharehpetian, Professor<sup>3</sup>

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: s.bagheri@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: zmoravej@semnan.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: grptian@aut.ac.ir

**Abstract:** In this paper, an efficient method is suggested for distinguishing winding mechanical defects from transient fault currents and inrush current. In this method, a signal processing and artificial intelligence tool are simultaneously utilized. Firstly, the transformers winding mechanical defects are investigated on the real model of a 1.6-MVA transformer winding. Then, the parameters of the detailed model of the transformer winding are estimated in MATLAB software by Genetic Algorithm and compared with experimental results for validation. Thereafter, the winding mechanical defects, internal and external electrical faults and the inrush current is stimulated using ATP/EMPT software in order to obtain the differential currents. Afterwards, distinctive features are extracted using the wavelet transform. Finally, these features are used to train an ANN classifier and the disturbances are distinguished. The proposed method is able to distinguish among winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush current in transformers with a good accuracy.

Keywords: Differential protection, feature extraction, discrimination of disturbances, radial deformation, axial displacement.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۵ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱ نام نویسنده مسئول: زهرا مروج نشانی نویسنده مسئول: ایران – سمنان – دانشگاه سمنان – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

#### ۱ – مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از تجهیزات گرانقیمت صنعت بـرق محسـوب شده که معیوب شدن آنها وقفههای طولانیمدتی را بـه دنبـال دارد و ترمیم و رفع عیب آن نیز هزینههای بالایی را میطلبد.

علاوه بر این، تعمیر ترانسفورماتور، پرهزینه و وقتگیر میباشد و هرگونه جایگزینی خصوصاً مرتبط با خطاهای سیمپیچ میتواند چندین ماه به طول بینجامد. لذا حفاظت از آن، یکی از مسائل مهم و حیاتی به شمار میآید.

یک سیستم حفاظتی مناسب، باید در شرایط خطا عمل نماید و از صدور فرمان قطع در شرایط غیرخط اجتناب کند. برای حفاظت ترانسفورماتورها، رلههای دیفرانسیل درصدی ارائه شدهاند. رله دیفرانسیل زمانی عمل میکند که در آن جریان دیفرانسیل از یک درصد تعیین شده از جریان آستانه بیشتر گردد. از سوی دیگر در حین برقدار کردن ترانسفورماتورهای قدرت، جریان هجومی مغناطیسی از منبع به سمت ترانسفورماتور، جریان می یابد که مقدار آن گاهی به بزرگی دہ برابر جریان بار کامل بودہ و میتواند منجر به عملکرد نادرست رله شود [۱، ۲]. همچنین، اشباع ترانسفورماتورهای جریان در هنگام خطاهای داخلی و خارجی [۳]، از جمله مواردی هستند که می تواند موجب عملکرد نادرست رلههای دیفرانسیل درصدی گردند. لذا روشهای مختلفی برای شناسایی الگوهای جریان دیفرانسیل در مورد خطاهای الکتریکی ارائه شدهاند که میتوان به روشهای ترکیبی اشاره نمود. در [۴]، استفاده از روش های هوشمند و تحلیلی بهطور همزمان جهت تشخیص خطا از روی تفکیک و طبقهبندی نمودن اطلاعات استخراجشده از سیگنالهای ولتاژ و جریان مورد توجه قرار گرفته است. در سالهای اخیر، از روشهای هوشمند مختلفی جهت تشخیص و طبقهبندی انواع خطاها از جمله روشهای درخت تصميم گيري (DT) <sup>۱</sup> [۵]، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) <sup>۲</sup> [۴، ۶]، ماشین بردار پشتیبان (SVM)<sup>۳</sup> [۷]، الگوریتم سنجش فازی [۸] و جهت استخراج بردار ويژگىها از تبديلات هوشمند مانند تبديل ويولت [۹، ۱۰]، تبدیل S [۱۹–۱۱]، تبدیل زمان-زمان [۱۴]، تبدیل چیرپلت<sup>†</sup> [۱۵]، تبدیل فوریه [۱۶] و غیره که دارای قابلیت یـادگیری و تعمیمیذیری خوبی هستند، استفاده شده است.

در [۱۷]، روشهای مختلفی جهت کلاسهبندی خطاهای الکتریکی در ترانسفورماتورها مد نظر قرار گرفته است. ایـن خطاهـای الکتریکـی شامل شکست عایقی یا اتصال کوتـاه الکتریکـی، تخلیـه جزئـی، قـوس الکتریکی و جرقه میباشند؛ اما آنچه در این مقاله مشـهود اسـت، ایـن است که تمام نمونهها تنها مربوط به خطاهای الکتریکی است و بحثی از خطاهای مکانیکی به میان نیامده است.

برخی مقالات نیز به تفکیک و تشخیص خطاهای مکانیکی ترانسفورماتورهای قدرت پرداختهاند. در [۱۸]، از شاخصهای آماری برای تشخیص و مکانیابی خطاهای مکانیکی در ترانسفورماتورها استفاده شده است. در این کار، مکانیابی از دقت بالایی برخوردار نبوده

و همچنین، فقط خطاهای مکانیکی مدنظر بوده و خطاهای الکتریکی مدنظر قرار نگرفته است.

در [۱۹]، از روش تطبیق برداری<sup>ه</sup> (VF)، جهت تفکیک خطاهای مکانیکی سیمپیچ ترانسفورماتورها با دقت بالایی استفاده شده است، اما این روش فاقد دقت مورد نیاز برای تشخیص شدت جابهجایی یا مکان تغییر شکل شعاعی است. همچنین، تمام نمونهها فقط مربوط به عیوب مکانیکی است و باز هم بحثی از خطاهای الکتریکی به میان نیامده است.

در [۲۰]، از روش تطبیق برداری و شبکه عصبی احتمالاتی<sup>7</sup> (PNN) بهصورت ترکیبی جهت تشخیص نوع خطاهایی شامل خطاهای تغییر شکل شعاعی، جابجایی محوری، اتصال کوتاه دیسک به دیسک و تغییر فاصله دیسکها استفاده شده است. در [۲۰]، بحثی از خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان هجومی نشده است.

در این مقاله، ابتدا عیوب مکانیکی سیمپیچ ترانسفورماتورها از جمله تغییر شکل مکانیکی در راستای شعاعی (RD) و جابجایی مکانیکی در راستای محوری (AD) در آزمایشگاه بر روی سیمپیچ مورد مطالعه بررسی و مدلسازی خواهد شد. سپس، با تخمین پارامترهای مدل مشروح سیمپیچ ترانسفورماتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرمافزار Matlab و با تغییر این پارامترها به تناسب خطاهای مکانیکی صورت گرفته در نرمافزار پارامترها به تناسب خطاهای دیفرانسیل نمونهبرداری شده ترانسفورماتور را استخراج مینماییم. سپس، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و پدیده جریان هجومی را بر روی سیستم مورد مطالعه شبیهسازی مینماییم. در مرحله بعد، با استفاده از خانواده ویولت (دابچی ۴)، سیکنالهای جریان دیفرانسیل مورد تجزیه و تحلیل قرار میگیرند و ویژگیهای بارز آنها استخراج میگردد. درنهایت، این ویژگیهای استخراجشده جهت آموزش شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتمهای آموزشی مختلف مورد استفاده قرار گرفته و پیشامدها از یکدیگر تفکیک میگردند.

# ۲- بررسی عیوب مکانیکی سیمپیچ ترانسفورماتورها

بسیاری از خطاهای عایقی ترانسفورماتور نتیجه مستقیم کاهش قدرت عایقی بهعلت خطاه ای مکانیکی سیمپیچ ترانسفورماتور هستند. بهعبارت دیگر تغییر شکل سیمپیچ باعث کاهش قدرت عایقی آن می گردد. از طرفی، در قسمتهای مختلف ترانسفورماتور از انواع عایقها مانند کاغذ، روغن و سرامیک استفاده شده است. بزر گترین مانع در تشخیص به موقع خطاهای مکانیکی سیمپیچ، آن است که این نوع خطاها هیچ تأثیری در مشخصهها و عملکرد ترانسفورماتور در حالت کار نمی گذارند و به همین علت، تشخیص سریع آنها کار آسانی نیست. عیوب مکانیکی سیمپیچ را میتوان بهوسیله فرموله ای ریاضی مورد مطالعه قرار داد و این امر، محقق را قادر می سازد تا بهراحتی درجات مختلف عیوب مکانیکی سیمپیچ را مدل سازی نماید و تأثیر عیوب

میگردد را بر روی تابع تبدیل (TF) ترانسفورماتور مشاهده نمایـد. در این مقالـه، دو نـوع خطـای مکـانیکی AD و RD در آزمایشـگاه مـورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۱- بررسی نیروهای شعاعی سیمپیچ ترانسفورماتورها

هنگامی که یک حلقه رسانا (مانند هر دور سیمپیچ) در معرض میدان مغناطیسی موازی محور حلقه قرار گیرد، در آن نیروی شعاعی ایجاد میشود که بسته به جهت میدان میتواند درون-سو یا برون-سو باشد. در ترانسفورماتورها این میدان توسط جریانی که از خود سیمها میگذرد، ایجاد شده و باعث وارد شدن نیرو به سیمپیچهای دیگر (که حاوی جریان مخالف هستند) میشود. در ترانسفورماتورها، فاصله بین دو سیمپیچ (دارای میدان مغناطیسی) کم است درنتیجه این میدانها، سیمپیچ داخلی دچار فشردگی و سیمپیچ خارجی دچار کشیدگی شعاعی میشوند. سیمپیچ داخلی، نیروی شعاعی رو به خارج تحمل می کند در حالی که سیمپیچ داخلی، نیروی رو به داخل را متحمل میشود. سیمپیچ داخلی نیروی شعاعی رو به داخل را متحمل در حالی که سیمپیچ داخلی نیروی رو به داخل را متحمل در حالی که سیمپیچ داخلی نیروی رو به داخل را متحمل میشود. شمل شعاعی سیمپیچ به دو دسته تغییر شکل اجباری<sup>۴</sup> و تغییر شکل آزاد<sup>۱۰</sup> تقسیمبندی میگردند[۲۰، ۲۱].

در [۲۲]، یک روش ساده جهت مدل سازی تغییر شکل شعاعی سیمپیچ بهصورت یک منحنی سینوسی ارائه شده است که در ادامه بیان میشود.



شکل ۱: درجات مختلف تغییر شکل شعاعی سیم پیچ فشارقوی

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود شکل تورفتگی سیم پیچ دارای منحنی سینوسی با عمق و گستردگی مشخص می باشد. این حالت باعث افزایش خازن بین سیم پیچها و کاهش خازن بین سیم پیچ فشارقوی و زمین خواهد شد. تغییر شکل ( $r(\Theta)$  می تواند به صورت زیر مدل گردد:

$$r(\theta) = \begin{cases} r_0 + \frac{d}{2}(\cos(s\theta - 1)) & \text{for } 0 \prec \theta \prec \frac{2\Pi}{s} \\ r_0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
(1)

در اینجا d نشان<br/>دهنده عمق تغییر شکل و s نشان<br/>دهنده پهنای تغییر  $r_0$  فر میبان گستردگی تغییر شکل و  $r_0$ 

شعاع سیمپیچ در حالت سالم میباشد. شکل ۲، چگونگی اعمال این عیب را بر روی سیمپیچ ترانسفورماتور مورد مطالعه در آزمایشگاه نشان میدهد.



شکل ۲: اعمال خطای تغییر شکل شعاعی بر روی سیمپیچ مورد مطالعه

در مدل مشروح، خازن موازی نشاندهنده میدان الکتریکی بین دیسکها با یکدیگر و یا با زمین هستند. در حالت معیوب، خازن موازی *Ci* از طریق معادله زیر که در [۲۲] آورده شده است، محاسبه می گردد:

$$C_{i} = \sum_{\theta=0}^{2\Pi} \left[ \frac{2\Pi \varepsilon_{0} \varepsilon_{r}}{Ln(\frac{r_{0}}{r(\theta)})} \right] \Delta\theta$$
(Y)

نتایج تحقیقات تجربی و عددی [۲۴–۱۸]، رابطه بین تغییر پارامترهای مدل مشروح و تغییر شکل مکانیکی سیم پیچ را تأیید میکند.

#### ۲-۲- بررسی نیروهای محوری سیمپیچ ترانسفورماتورها

نیروی محوری در اثر عمل متقابل جریان سیمپیچی و مؤلف عمودی شار پراکندگی به وجود میآید که در جهت محوری سیمپیچ عمل میکند. این نیرو میتواند باعث فشرده شدن و در موارد شدیدتر خم شدن سیمپیچ در جهت محوری و شکسته شدن کلمپ بالا و پایین سیمپیچ از یک نقطه گردد.

برای مدلسازی خطای جابهجایی محوری سیمپیچ، فرض میشود که سیمپیچ فشارقوی بهتدریج در راستای محورش تغییر مکان داده شود. شکل ۳، چگونگی اعمال این خطا در آزمایشگاه را نشان داده است.



شکل ۳: اعمال خطای جابهجایی محوری بر روی سیمپیچ مورد مطالعه

با توجه به مطالعات صورت گرفته در [۲۲، ۲۳]، بدیهی است که جابهجایی محوری، اجزاء ماتریس اندوکتانس (M) را که توصیفکننده اندوکتانسهای متقابل بین اجزاء سیمپیچ هستند، تغییر خواهد داد.

#### ۳- روش ارائەشدە

روش ارائهشده در ایـن مقالـه شـامل سـه مرحلـه مـیباشـد. مرحلـه تشخیص، مرحله استخراج ویژگی با استفاده از تبدیل ویولت و مرحلـه تمایز با استفاده از روش ANN، که در قسمتهای بعد بررسی میگردد.

#### ۳-۱- مرحله اول

در مرحله اول، جهت جلوگیری از عملکرد اشتباه حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورها، یک مرحله تشخیص برای آن در نظر میگیریم. به اینصورت که یک جریان آستانه (ithr) بهصورت رابطه ۳ در نظر گرفته میشود. هنگامی که جریان دیفرانسیل از مقدار جریان آستانه بیشتر شد، بهعنوان یک جریان خطای داخلی شناسایی می شود. در غیر این صورت، بهعنوان یک خطای خارجی تشخیص داده خواهد شد. مقدار جریان آستانه (ithr) از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۵]:

$$i_{thr} = k \cdot \frac{(i_{sec\,ct} + i_{prict})}{2} + I_0 \tag{(7)}$$

در رابطه فوق، ithr دامنه جریان آستانه، Io حداقل جریان عملکردی که مقدار آن بین ۲۰ تا ۴۰ درصد بوده، K شیب مشخصه عملکردی رلـه دیفرانسیل درصدی که بر اساس استاندارد IEEE برابر ۰/۱ تا ۰/۴ بوده، iprict جریان اولیه CTها و isect جریان ثانویه عبوری از CTها میباشند.

#### ۲-۳- مرحله دوم

مرحله مهم در روشهای الگوشناسی، استخراج ویژگیهای مهم از اطلاعات مشاهدهشده در حالات و شرایط مختلف میباشد. جهت بهبود عملکرد روش طبقهبندی پیشنهادی در مرحله کلاسهبندی، از تبدیل ویولت بهمنظور تحلیل سیگنالهای نمونهبرداریشده استفاده مینماییم. این تبدیل از یک پنجره که عرض آن متناسب با فرکانس تغییر مییابد استفاده مینماید، بنابراین یک وضوح خوب زمان-فرکانس بهدست میدهد.

تبدیل موجک پیوسته بهعنوان یک راه حل مناسب جهت غلبه بر مشکل تفکیک پذیری در تبدیل فوریه زمان کوتاه ایجاد گردید. تحلیل موجک به روشی مشابه تحلیل تبدیل فوریه زمان کوتاه عمل می کند بهشکلی که سیگنال در یک تابع ضرب می شود که آن تابع موجک می باشد. تبدیل فوریه زمان کوتاه برای تمام زمان ها تفکیک پذیری ثابتی را ارائه می دهد. در حالی که تبدیل موجک، تفکیک پذیری متغیری ارائه می دهد. به این صورت که فرکانس های بالا در حوزه زمان و فرکانس های پایین در حوزه فرکانس بهتر بازیابی می شود و برعکس مؤلفه فرکانس بالا در حوزه زمان بهتر تشخیص داده می شود و برعکس مؤلفه فرکانس پایین در مقایسه با مؤلفه فرکانس بالا در حوزه فرکانس بهتر قرار می گیرد. علت این امر واضح است. چون در یک بازه زمانی

برابر، بخش فرکانس بالای یک سیگنال، تعداد نمونههای بیشتری در مقایسه با بخش فرکانس پایین همان سیگنال دارد. همچنین، در روش تبدیل موجک، مسئله تقسیم سیگنال به بخشهای مختلف با استفاده از مقیاس گذاری و انتقال دادن یک تابع حل می شود. ویژگی اصلی تبدیل موجک در مقابل تبدیل فوریه زمان کوتاه این است که تمامی توابع پایه از انتقال و مقیاس یک تابع (موجک مادر) بهدست می آیند [18].

تبدیل موجک پیوسته بهصورت زیر تعریف میشود:

$$CWT^{\psi}_{X}(\tau,s) = \psi_{x}^{\psi}(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^{*}(\frac{t-\tau}{s}) dt \quad (\mathfrak{f})$$

بارامترهای مقیاس و انتقال و  $\psi$  ویولت مادر میباشد. au,s

تبدیل موجک گسسته نیز، اطلاعاتی در مورد تجزیه و ترکیب سیگنالها ارائه میکند و نسبت به تبدیل موجک پیوسته جهت پیادهسازی سادهتر میباشد [۹، ۱۰]. عملکرد تبدیل موجک گسسته به اینصورت است که سیگنال جریان دیفرانسیل از یک فیلتر پایین گذر عبور میکند و سیگنال جریان دیفرانسیل از یک فیلتر پایین فیلتر بالاگذر، سیگنال جزئیات بهدست میآید. طول این دو سیگنال از نصف سیگنال اصلی است. در مرحله بعد با سیگنال تقریب مانند سیگنال اصلی برخورد میشود و سیگنالهای تقریب و جزئیات مرحله دوم بهدست میآید که این سیگنال جزئیات، ویژگیهای دقیقتری از سیگنال اصلی را در بر دارد. تبدیل موجک گسسته بهصورت زیر تعریف میشود:

$$DWT_{x} f(m,n) = \sum_{k} f(k) x^{*}_{m,n}(k)$$
 ( $\Delta$ )

که در آن،  $x_{mn}$  ویولت مادر گسسته میباشد. انتخاب مناسبترین موجک در تحلیل سیستمهای قدرت گذرا از اهمیت بسیاری برخوردار است. این انتخاب مناسب، به استخراج بردار ویژگیهای مطلوب بهمنظور آموزش صحيح و دقيق روشهاى طبقهبندى كننده، تشخيص دقیق تر پیشامدها در ترانسفورماتور مورد مطالعه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم کمک بسیاری مینماید. بنابراین، با توجه به [۱۴]، «دابچی ۴» بهدلیل نتایج مناسب در تشخیص پیشامدها، بهعنوان ويولت مادر انتخاب مىشود. به اينصورت كه ابتدا سيگنالهاى جريان دیفرانسیل نمونهبرداری شده در هر پیشامد توسط EMTP را استخراج کرده و به محیط متلب میبریم. سپس با استفاده از دابچی ۴، سطوح انرژی سیگنالهای جزئیات را در بهترین ناحیه فرکانسی جهت شناسایی ماهیت گذرای جریانهای خطای داخلی و خارجی و جریان هجومي بهدست مي آوريم. درنهايت، بهترين ويژگي هاي استخراج شده توسط سطوح انرژی ضریب جزئیات (d1-d4) به عنوان بردار ویژگی ها، به ابزار طبقهبندی پیشنهادی جهت تفکیک رویدادهای مختلف اعمال مىنماييم. ۰,۰۱

اكتشافى

1 . . .

1×1.

#### ۳-۳- مرحله سوم

در [۴، ۶، ۲۰، ۲۳]، از شبکههای عصبی مصنوعی جهت طبقهبنـدی و تمایز پیشامدهای مختلف در سیستمهای قدرت بهره گرفتهاند.

ANN این تحقیقات نشان داد که الگوریتمهایی که بر اساس روش ANN طراحی شدهاند، جهت ارزیابی، پایش وضعیت، تشخیص و طبقهبندی نمودن پیشامدهای مختلف موفق بوده است.

در این مقاله، جهت تمایز پیشامدهای مختلف در ترانسفورماتورها، از روش شبکه عصبی ولی با تغییر الگوریتم آموزشی آن استفاده می شود. فلوچارت روش ارائه شده به منظور تفکیک پیشامدها به صورت شکل ۴ مشخص می گردد.



شکل ۴: فلوچارت روش ارائەشدە

بهطورکلی، هر جا که نیاز به تخمین، تشخیص الگو و یا طبقهبندی باشد، میتوان از شبکههای عصبی مصنوعی استفاده نمود. آموزش اکثر شبکههای عصبی با استفاده از زوج بردارهای نمونه صورت می گیرد، بهطوری که به هر بردار ورودی یک بردار خروجی مشخص نسبت داده میشود. با ارائه این مجموعه بردارها به شبکه، وزنها بر اساس الگوریتم ماهری شبکه اصلاح می گردند. از الگوریتمهای آموزشی ANN، یادگیری شبکه اصلاح می گردند. از الگوریتمهای آموزشی ANN، میتوان به الگوریتم پسخوران پیش-انتشار "LM الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم انتشار به عقب "(BP) که در این مقاله مورد استفاده قرا گرفته است، اشاره نمود [۶].

در تحقیقات صورت گرفته [۴، ۶، ۲۰، ۲۳] بهوسیله روش ANN، عملکرد بهینه و مطلوب آن از طریق آزمون و خطا بهدست میآید. بهعبارتدیگر، باید آزمونهای مختلفی صورت گیرد تا تعداد لایههای میانی و نورونهای آنها مشخص گردد. در این تحقیقات، روش ANN جهت طبقهبندی خطاها بهصورت موفقی نتیجه داده است.

در جداول ۱ و ۲، مشخصات پارامترهای استفادهشده در الگوریتم ژنتیک و الگوریتم انتشار به عقب ارائه شده است.

مقدار	پارامتر
ميانگين مربعات خطا	تابع ارزيابي
1	اندازه جمعيت
چرخه رولت	تابع انتخابی <sup>۱۳</sup>
يكنواخت"	تابع جهش

#### جدول ۱: پارامترهای الگوریتم ژنتیک

#### جدول ۲: پارامترهای الگوریتم انتشار به عقب

مقدار	پارامتر
گرادیان نزولی	تابع يادگيرى
سيگموئيد تانژانت <sup>۱۶</sup>	تابع انتقال لايه پنهان
سيگموئيد لگاريتمي <sup>١٧</sup>	تابع انتقال لايه خروجي
میانگین مربعات خطا	تابع ارزيابي
1	بيشينه تكرار

#### ٤- سيستم تحت مطالعه

نرخ جهش

تابع کراس اور ۱۵

توليد

آستانه

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم نشاندادهشده در شکل ۵، در نرمافزار EMTP/ATP مدلسازی شده است. ترانسفورماتور شبیهسازیشده یک ترانسفورماتور سهفاز، ۱/۶ MVA،۲۰/۰۴ kv، ۵۰ Hz ،D/Yg میباشد.



شکل ۵: سیستم مورد مطالعه

همچنین، سیم پیچ فشارقوی این ترانسفورماتور ساخته شده از ۳۸ دیسک است که ۸ دیسک ابتدایی و ۸ دیسک انتهایی ۲۰ دوره و ۲۲ دیسک میانی دارای ۲۱ حلقه می باشند. سیم پیچ فشار ضعیف نیز از دو لایه ۱۳ حلقه ای که هر حلقه از سه هادی که در راستای ارتفاع سیم پیچ

بهصورت موازی نسبت به هم قرار دارند، تشکیل شده است. بـرخلاف ساختمان سیمپیچ ترانسفورماتورهای توزیع با قدرتهای کم و با توجـه به سفارش، سیمپیچ آن بهصورت زوج دیسک واژگون پیچیده شده است.

لذا با توجه به نوع سیمپیچ، قابل مقایسه با سیمپیچ ترانسفورماتورهای بزرگ میباشد. مشخصات ابعاد هندسی سیمپیچ ترانسفورماتور مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

ابعاد (mm)	توصيف	ابعاد (mm)	توصيف
Ψ/ΨΔ×11/λ	سطح مقطع هادی فشار ضعیف	٩٣	شعاع داخلي سيم پيچ فشار ضعيف
Υ/ Ι Υ×Λ/Δ	سطح مقطع هادي فشارقوي	1.8	شعاع خارجي سيمپيچ فشار ضعيف
• /۵	ضخامت كاغذ عايقي	۴	كانال بين دولايه سيم پيچ فشار ضعيف
۵۳۶	ارتفاع سيم پيچ فشار ضعيف	۱۲/۵	کانال بین دولایه سیمپیچ فشار ضعیف و قوی
494	ارتفاع سيمپيچ فشارقوي	۱۱۸/۵	شعاع داخلي سيمييچ فشارقوي
٩٠	شعاع هسته	۱۲۶/۵	شعاع خارجي سيمپيچ فشارقوي

جدول ٣: مشخصات ابعاد سيم پيچ ترانسفورماتور مورد مطالعه

# ۴-۱- نحوه مدلسازی سیمپیچ ترانسفورماتور

در تحقیقات انجامشده قبلی [۱۱، ۱۲، ۱۴]، جهت مدلسازی برخی خطاهای الکتریکی سیمپیچ ازجمله خطاهای دوربهدور و دوربهزمین، از زیرمجموعه شناختهشده BCTRANS در محیط EMTP که سیمپیچ را بهصورت یک ماتریس6×RL6 مدل مینماید، استفاده شده است؛ اما این مدل، جهت بررسی خطاهای مکانیکی سیمپیچ مناسب نمیباشد.

در این مقاله، از مدل مشروح ۱٬ [۲۲] استفاده می گردد.

# ۲-۴- نحوه مدلسازی ترانسفورماتورهای جریان

بهمنظور بررسی رفتار واقعی ترانسفورماتورهای جریان در شرایط مختلف ازجمله خطاهای داخلی، خطاهای خارجی و در لحظه کلیدزنی ترانسفورماتور، نیاز به مدل دقیق CTها می باشد. در [۲۶]،

یک مدل دقیق ریاضی برای ترانسفورماتورهای جریان جهت پیش-بینی عملکرد گذرا ارائه شده است.

در این مقاله، از زیرمجموعه اشباع و پسماند مغناطیسی در نرمافزار EMTP کـه در [۱۱] توضـیح داده شـده اسـت، جهـت مدلسـازی ترانسفورماتورهای جریان استفاده می گردد.

# ۵- نتایج شبیهسازی و بحث

# ۵-۱- نتایج حاصل از تغییر شکل شعاعی سیمپیچ

در این مقاله، تغییر شکل شعاعی از نوع اجباری مورد مطالعه قرار گرفت. این تغییر شکل شعاعی میتواند درجه یک، درجه دو، درجه سه و درجه چهار باشـد کـه همـه ایـن مـوارد بـر روی سـیم پیچ مـورد مطالعـه در آزمایشگاه صورت گرفت. در این مجموعه، از نظر طولی هر شش دیسک مجاور یا بهعبارتی هر سه زوج دیسک مجاور بهعنوان یک واحـد بـرای اعمال قرشدگی مدنظر قرار گرفت. در این حالت مقادیر عمق و پهنـای اعمال قرشدگی مدنظر قرار گرفت. در این حالت مقادیر عمق و پهنـای نیییر شکل، مطابق شـکل ۱ بهصورت  $O.2r_0 = b$  و  $5^{\circ} = 0$ فرض گردید. این خطا عمدتاً باعث تغییر ظرفیت الکتریکی بـین لایـه بیرونی سیم پیچ فشارقوی و تانک میشود. بنـابراین بـرای ایـن خطـا، ظرفیت الکتریکی مـوازی بـین سیم پیچ فشـارقوی و زمـین بـرای

قسمتهای معیوب با توجه به رابطه ۲، برای درجات مختلف محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

### جدول ۴: ظرفیت الکتریکی موازی بین سیمپیچ HV و زمین برای زوج دیسکهای معیوب [۲۲]

ظرفیت الکتریکی محاسبهشده (pF)	درجه تغيير شكل شعاعي
٢/٧٩٢١۵	در حالت سالم
۲/۷۲۲۵۴	درجه ۱ (تغییر شکل از یک طرف)
T/8839F	درجه ۲ (تغییر شکل از دو طرف)
۲/۵۹۹۴۸	درجه ۳ (تغییر شکل از سه طرف)
7/57591	درجه ۴ (تغییر شکل از چهار طرف)

پس از جایگذاری این ظرفیتها بهجای ظرفیتهای سالم در مدل مشروح در نرمافزار EMTP، خطای مکانیکی ناشی از تغییر شکل شعاعی با درجات مختلف را مدلسازی مینماییم. سپس، جریانهای دیفرانسیل نمونهبرداریشده را بهازای درجات مختلف تغییر شکل شعاعی بهصورت شکل ۶ نشان میدهیم. زمان شبیهسازی برابر ۴۰ میلیثانیه (۲۰۰ نمونه) فرض شده است.

همان طور که از شکل ۶ مشخص است، جریان دیفرانسیل فقط بهازای تغییر شکل شعاعی درجه ۳ و ۴ بزرگتر از جریان آستانه میباشد. پس این دو حالت نمایانگر خطای مکانیکی سیم پیچ و تغییر شکل شعاعی درجه ۱ و ۲ نمایانگر عیب مکانیکی سیم پیچ به شمار میروند. به همین دلیل، فقط سیگنالهای نمونه برداری شده بهازای خطاهای مکانیکی سیم پیچ (درجه ۳ و ۴) جهت استخراج ویژگی به تبدیل ویولت و سپس جهت آموزش، به شبکه عصبی اعمال خواهند شد. این دو سیگنال، به چهار سطح (4d-1d) تجزیه می شوند. این ویژگیهای استخراج شده توسط سطوح انرژی ضریب جزئیات (4d-1d) به عنوان بردار ویژگیها، به ابزار طبقه بندی کننده پیشنهادی جهت تمایز رویدادهای مختلف اعمال می گردد. شکل ۷، جریان دیفرانسیل به ازای RD درجه ۴ و ضریب جزئیات تا سطح چهارم را نشان می دهد.



شکل ۶: سیگنالهای جریان دیفرانسیل نمونهبرداریشده از ترانسفورماتور در حالت خطای مکانیکی از نوع تغییر شکل شعاعی



شکل ۷: تجزیه جریان دیفرانسیل بهازای تغییر شکل شعاعی درجه ۴ با استفاده از خانواده ویولت در چهار سطح

#### ۵-۲- نتایج حاصل از جابهجایی محوری سیمپیچ

در هنگام خطاهای مکانیکی ناشی از نیروهای محوری، ممکن است سیمپیچ HV نسبت به LV بالا بزند [۲۲] و یا LV نسبت به HV بالا بزند [۱۹] و یا هردو آنها اتفاق بیفتد. لذا، با توجه به [۲۲]، مطالعه خود را معطوف به حالت اول مینماییم.

جهت بررسی این نوع خطا، سیمپیچ فشارقوی نسبت به سیمپیچ فشارضعیف بهصورت مرحلهای جابهجا می شود. این جابهجایی ها با گامهای ۱۵میلی متری بهتر تیب تا ۶۰ میلی متر به سمت بالا مطابق شکل ۳، انجام گردید. سپس، تابع تبدیل امپدانسی ولتاژ ورودی به

جریان زمینِ سمت فشارقوی، در آزمایشگاه، برای مجموعه مورد مطالعه اندازه گیری شد. این اندازه گیری ها توسط دستگاه امپدانس آنالایزر که در شکل ۸ به همراه سیم پیچ مورد مطالعه نشان داده شده است، صورت گرفت. سپس، در هر یک از این حالات، القاهای متقابل بین واحدهای سیم پیچ HV, LV دستخوش تغییرات گردید که مقادیر این پارامترها توسط الگوریتم ژنتیک و در محیط نرمافزار متلب محاسبه شد. در [۲۳، (۲۳]، پاسخ فرکانسی سیم پیچ مورد مطالعه توسط روش تحلیل پاسخ فرکانسی و دستگاه امپدانس آنالایزر اندازه گیری و نتایج شبیه سازی نیز مرکانسی و دستگاه امپدانس آنالایزر اندازه گیری و نتایج شبیه سازی نیز به دست آمده، مقایسه بین نتایج شبیه سازی و اندازه گیری های عملی محاسبه شده برای القاهای متقابل<sup>۱۰</sup> بین برخی واحدهای HV,LV سیم پیچ در خطای جابه جایی محوری در جدول ۵ آمده است.



شکل ۸: سیم پیچ تحت تست و دستگاه امپدانس آنالایزر

۶۰ میلیمتر	۴۵ میلیمتر	۳۰ میلیمتر	۱۵ میلیمتر	حالت سالم	MHV,LV(µH)	
٨/۴۵۰	۲/۷۳۱	१/• ४९	٩/٣٨۴	٩/۶٨٩	M15,1	بخش بالایی سیمپیچ
17/481	1 3/ • 4 1	13/14	14/418	۱۵/۱۸۹	M15,5	
۲۶/۹۴۰	29/180	W1/277	<b>TT/977</b>	۳۵/۸۳۵	M15,10	
11/216	17/847	۱۲/۹۲۵	۱۳/۵۵۵	14/748	M10,1	بخش میانی سیمپیچ
201400	۲۱/۸۹۷	22/212	20/222	۲۷/۳۶۳	M10,5	
۲۸/۵۵۲	78/401	74/47.	۲۲/۷۴۸	۲۱/۲۱۳	M10,10	
۳۰/۴۴۷	37/181	۳۴/۴۹۰	<u> ۳۴/۸۳۳</u>	۳۳/۶۰۸	M1,1	بخش پايينى سيمپيچ
۲۰/۹۶۶	۱٩/۵۶۳	۱۸/۳۱۳	14/194	۱۶/۱۹۱	M1,5	
1 • / <b>۵</b> • Y	۱۰/۰۹۰	٩/٧٠٣	٩/٣۴٣	٩/٠٠٧	M1,10	

جابهجايي محوري	. HV سیم ییچ در	واحدهای LV ,	بين برخي	لقاهاي متقابل	جدول ۵: اا
	J &			0. 0	

پس از جایگذاری القاهای متقابل سیم پیچها ناشی از جابهجایی محوری بهجای القاهای متقابل بین سیم پیچها در حالت سالم در مدل مشروح به وسیله نرم افزار EMTP، خطای مکانیکی سیم پیچها ناشی از جابه جایی محوری را مدل سازی می نماییم.

جریانهای دیفرانسیل نمونهبرداری شده به ازای جابجاییهای محوری مختلف، در شکل ۹ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۹، جریان دیفرانسیل فقط به ازای جابهجایی محوری ۴۵ و ۶۰ میلیمتر، بزرگتر از جریان آستانه میباشد. پس مجدداً این دو حالت نمایانگر خطای مکانیکی سیمپیچ از نوع جابهجایی محوری در نظر گرفته میشوند. بههمیندلیل، فقط این دو جریان دیفرانسیل نمونهبرداریشده جهت استخراج ویژگی به تبدیل ویولت و سپس جهت آموزش، به شبکه عصبی اعمال خواهند شد.

مطابق شکل ۱۰، جریان دیفرانسیل نمونهبرداری شده بهازای AD با گام ۶۰ میلیمتری و ضریب جزئیات تا سطح چهارم جهت استخراج بردار ویژگیها نشان داده شده است.



شکل ۹: سیگنالهای جریان دیفرانسیل نمونهبرداریشده از ترانسفورماتور در حالت خطای مکانیکی از نوع جابهجایی محوری



شکل ۱۰: تجزیه جریان دیفرانسیل بهازای جابهجایی محوری با گام۶۶ میلیمتر با استفاده از خانواده ویولت در چهار سطح

# ۵-۳- نتایج حاصل از خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و پدیده جریان هجومی

در این قسمت، چندین شرایط عملکردی مختلف ترانسفورماتور ازجمله خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و پدیده جریان هجومی بر روی سیستم تحت مطالعه شبیهسازی گردید. مطابق شکلهای ۱۱ و ۱۲، نمونهای از سیگنالهای جریان دیفرانسیل نمونهبرداری شده بههمراه ویژگیهای استخراجشده توسط تبدیل ویولت نشان داده می شود.

در این مقاله، خطاه ای الکتریکی در ترمینال فشارقوی شامل خطای فازبهفاز، فازبهزمین و سهفاز، در نظر گرفته شده است. جریان دیفرانسیل نمونهبرداریشده در هنگام خطای فاز *A*به زمین در ترمینال فشارقوی ترانسفورماتور مورد مطالعه و ضریب جزئیات تا سطح چهارم جهت استخراج بردار ویژگیها و آموزش شبکه عصبی مطابق شکل ۱۱ نشان داده شده است. این خطا در لحظه ۱۳ میلی ثانیه اتفاق افتاده است.

نتایج بررسی پدیده جریان هجومی بر روی ترانسفورماتور مورد مطالعه مطابق شکل ۱۲نشان داده شده است. در این شکل، سیگنال جریان دیفرانسیل نمونهبرداریشده فاز A، در هنگام برقدار کردن ترانسفورماتور در لحظه ۱۸ میلیثانیه و ضریب جزئیات تا سطح چهارم جهت استخراج بردار ویژگیها نشان داده شده است. زاویه فاز A برابر ۹۰ درجه در لحظه برقدار کردن است و ترانسفورماتور ۵۰٪ بار نامی را تغذیه میکند. همچنین، زمان شبیهسازی برابر ۶۰ میلیثانیه (۳۰۰ نمونه) فرض شده است.

نتایج برای خطای خارجی به ازای خطای فاز A به زمین در خط انتقال سمت ثانویه نیز بررسی گردید.

با توجه به مرحلـه تشـخیص، چـون قبـل و بعـد از خطـا، ithr>idiff گردیـد، سـیگنال جریـان دیفرانسـیل نمونـهبرداریشـده بـهمنظور آموزشANN، به تبدیل ویولت جهت استخراج ویژگیها اعمال نگردید.



زمین در ترمینال HV ترانسفورماتور با استفاده از خانواده ویولت در چهار سطح





شکل ۱۲: تجزیه جریان دیفرانسیل برای یک جریان هجومی با استفاده از خانواده ویولت در چهار سطح

#### ۵-۴- نتایج حاصل از مرحله طبقه بندی پیشامدها

ورودیهای ANN، ویژگیهای مختلف تولیدشده توسط تبدیل ویولت و خروجیهای آنها، نوع خطا که شامل درجات مختلف خطاهای مکانیکی سیمپیچ (جابهجایی محوری و تغییر شکل شعاعی)، خطاهای الکتریکی داخلی (خطاهای ترمینال) و جریان هجومی هستند، میباشد. بهعبارتدیگر، با توجه به تعداد سیگنالهای بهدست آمده برای هر پیشامد در مرحله شبیه سازی، ۱۲ مجموعه ویژگی برای تغییر شکل شعاعی، ۴ مجموعه ویژگی برای جابه جایی محوری، ۲۸ مجموعه ویژگی برای خطاهای ترمینال و ۱۵ مجموعه ویژگی برای جریانهای هجومی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۶، ۵۹ حالت مختلف شبیه سازی شده توسط نرمافزار EMTP را نشان داده است. هدف از این

در ساختار روش ANN، در مرحله کلاسهبندی، یک ساختار سه لایه تکثیری پرسپترون ۲۰ که در جعبهابزار شبکه عصبی MATLAB در دسترس است، بهعنوان ANN مورد استفاده قرار گرفته است. این موتور کلاسهبندی از سه لایه ورودی، پنهان و خروجی تشکیل شده است. لایه ورودی از ۵۹ نورون، یک لایه میانی متشکل از ۱۰ نورون و لایه خارجی متشکل از چهار نورون که مشخص کننده نوع خطا میباشد، تشکیل یافته است. ساختار کلی این موتور کلاسهبندی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



الگوریتم مورد استفاده برای آموزش ANN، الگوریتم پسخوران پیش-انتشار Levenberg-Marqurd میباشد. مطابق جدول ۷، نتایج بهدستآمده بر مبنای ساختار ANNپیشنهادی ارائه میشود.

همچنین، جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه با سایر روشها، مطابق [۶]، نتایج روش طبقهبندی کننده ANN ارائهشده، زمانی که با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم انتشار به عقب (BP) آموزش داده میشود، در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است.

مطابق جدول ۶، جهت بالا بردن دقت طبقهبندی، ۱۲ حالت مختلف برای تغییر شکل شعاعی، ۴ مجموعه ویژگی برای جابهجایی محوری، ۲۸ مجموعه ویژگی برای خطاهای ترمینال و ۱۵ مجموعه ویژگی برای جریانهای هجومی شبیهسازی گردید. پس از استخراج ویژگیهای برتر توسط تبدیل ویولت (دابچی ۴) که نمونهای از آنها در شکلهای ۱۰و ۱۱و ۱۲ نشان داده شد، به روش ۸NN پیشنهادی اعمال گردید. نتایج بهدستآمده مطابق جداول ۷ الی ۹ نشان میدهد که روش ۸NN پرسپترون تکثیری سه لایه با آموزش الگوریتم پس خوران پیش-انتشار ML و استخراج ویژگی توسط ویولت و محینین آموزش بهوسیله GA، قادر هستند پیشامدهای مختلف را با همچنین آموزش بهوسیله GA، قادر میتند پیشامدهای مختلف را با مریان هجومی و خطای الکتریکی در ترمینال فشارقوی از دقت بالاتری جریان هجومی و خطای الکتریکی در ترمینال فشارقوی از دقت بالاتری در هر سه ساختار برخوردار است و این امر را میتوان به تعداد بیش تر

همچنین، کمترین دقت مقدار خروجی نتایج شبیهسازیها نسبت به مقادیر هدف برای پیشامدهای مختلف، مربوط به تشخیص خطای مکانیکی سیمپیچ از نوع جابجایی محوری میباشد. علت این امر را نیز میتوانیم به تعداد کمتر نمونههای این کلاس (۴ نمونه) در مقایسه با تعداد نمونههای پیشامدهای دیگر نسبت داد.

از طرف دیگر، روش ANN آموزش دیده با BP، نتایج مختلفی را در هـر مرحلـه شبیهسازی تولیـد مـیکنـد. بـهعلاوه، همگرایـی روش آموزش دیده توسط BP، در حـین آموزش نسبت بـه مقادیر اولیـهی وزنها حساس میباشد و ممکن است نتایج در یک کمینه یا ماکزیمم محلی گرفتار شوند. درصورتی که به دلیل اسـتخراج ویژگیهای برتـر توسط ویولت و آموزش به وسیله LM و حتـی GA، اشـکالات ذکرشـده BP برطرف و نتایج ثابتی را در هر مرحله شبیه سازی تولیـد مـیکنـد. این امر، در حفاظت مطلـوب تر ترانسـفور ماتورها نقـش بسـزایی را ایفا کرده و قابلیت اطمینان سیستم را در شرایط کاری مختلف بالا خواهـد برد.

			11 11 1				
درجه تغيير	شماره سه_زوج ديسک	ميزان	زاويه فاز A		مقدار	زاويه فاز	خطاهای الکتریکی در ترمینال
شكل	متوالی (بخش آخر	جابەجايى	در هنگام	جريان هجومي	مقاومت	A در	فشارقوی (۲۸ نمونه)
(۱ الی ۴)	شامل۴_زوج دیسک	محورى	خطا (درجه)	(۱۵ نمونه)	خطا	هنگام خطا	
	میباشد)- (۱۲ نمونه)	(میلیمتر)- (۴			(اهم)	(درجه)	
		نمونه)					
٣	١	۴۵	•	جریان هجومی (٪۵۰ تحت بار)	•	•	خطای فاز A به زمین
۴	١	۵۰	۳۰	جریان هجومی (٪۵۰ تحت بار)	١	۴۵	خطای فاز A به زمین
٣	٢	۵۵	۱۵۰	جریان هجومی (٪۵۰ تحت بار)	۵	۶.	خطای فاز A به زمین
۴	٢	۶.	•	جریان هجومی (٪۷۵ تحت بار)	١٠	۱۳۵	خطای فاز A به زمین
٣	٣		۴۵	جریان هجومی (٪۷۵ تحت بار)	•	•	خطای فاز <i>B</i> به زمین
۴	٣		۱۳۰	جریان هجومی (٪۷۵ تحت بار)	١	۴۵	خطای فاز <i>B</i> به زمین
٣	۴		•	جریان هجومی (٪۹۰ تحت بار)	۵	۶.	خطای فاز <i>B</i> به زمین
۴	۴		۴۵	جریان هجومی (٪۹۰ تحت بار)	١٠	۱۳۵	خطای فاز <i>B</i> به زمین
٣	۵		۱۳۵	جریان هجومی (٪۹۰ تحت بار)	•	•	خطای فاز <i>C</i> به زمین
۴	۵		•	جریان هجومی (بدون بار)	١	40	خطای فاز <i>C</i> به زمین
٣	۶		٣٠	جریان هجومی (بدون بار)	۵	۶.	خطای فاز <i>C</i> به زمین
۴	۶		۴۵	جریان هجومی (بدون بار)	١٠	۱۳۵	خطای فاز <i>C</i> به زمین
			٩٠	جریان هجومی (بدون بار)	•	•	خطای دوفاز A,B به زمین
			١٣۵	جریان هجومی (بدون بار)	١	40	خطای دوفاز A,B به زمین
			۱۵۰	جریان هجومی (بدون بار)	۵	۶.	خطای دوفاز A,B به زمین
					١٠	۱۳۵	خطای دوفاز A,B به زمین
					•	•	خطای دو فاز A,B
					١	۴۵	خطای دو فاز A,B
					۵	۶.	خطای دو فاز A,B
					١٠	۱۳۵	خطای دو فاز A,B
					•	•	خطای دو فاز <i>B,C</i>
					١	۴۵	خطای دو فاز <i>B,C</i>
					۵	۶.	خطای دو فاز B,C
					١٠	۱۳۵	خطای دو فاز B,C
					•	•	خطای سه فاز A,B,C
					١	40	خطای سه فاز A,B,C
					۵	۶.	خطای سه فاز A,B,C
					۱.	۱۳۵	خطای سه فاز A,B,C

جدول Y: نتايج ANN آموزش دادهشده با الگوريتم LM-feed forward Back Propagation جهت تمايز پيشامدها

ریکی در ترمینال	خطاهای الکت	کی سیمپیچ از نوع	خطای مکانی	سيمپيچ از نوع	جریان هجومی خطای مکانیکی سیمپیچ از نو		جريا	إيط نرمال	شر
ىارقوى	فش	ئايى محورى	جابهج	ہی (درجہ ۳ الی	تغییر شکل شعاعی (درجه ۳ الی				
		ل ۶۰میلیمتر)	(۴۵الی ۶۰میلیمتر)		(۴				
مقدار خروجی ANN	مقدار هدف	مقدار خروجی ANN	مقدار هدف	مقدار خروجی ANN	مقدار هدف	مقدار خروجی ANN	مقدار هدف	مقدار خروجی ANN	مقدار هدف
۴/۸×۱۰ <sup>-۱۸</sup>	•	$\cdot / \Delta \Lambda \times 1 \cdot - \Delta$	•	•/••١٢٧	•	2×1.	•	•/•••۴	•
•/٩٩٧۶	١	•/••&Y	•	$1/\gamma \times 1 \cdot \gamma$	•	•/••١•	•	• / • • • Y	•
۲/٩×۱٠ <sup>-۱۴</sup>	•	٠/٨٨٩٠	١	٠/٩۵٩٩	١	1/7×1+ <sup>-4</sup>	•	۰/۰۱۴۹	•
1/1×1+-17	•	•/٩•۴٩	١	٣/۶×1.	•	٠/٩٩٨٩	١	•/••• ١	•

خطاهای الکتریکی در ترمینال		خطای مکانیکی سیمپیچ از نوع		خطای مکانیکی سیمپیچ از		جريان هجومي		شرايط نرمال					
ىشارقوى	ė	ىحورى (۴۵ الى ۶۰	جابەجايى ،	نوع تغيير شكل شعاعي		نوع تغيير شكل شعاعي							
			میلیمتر)		(درجه ۳ الی ۴)								
مقدار خروجي	مقدار	مقدار خروجي	مقدار	مقدار خروجي	مقدار	مقدار خروجي	مقدار	مقدار خروجى	مقدار				
ANN	هدف	ANN	هدف	ANN	هدف	ANN	هدف	ANN	هدف				
•	٠	٠/٠٠٩١	•	*	•	٧/٩×١٠ <sup>-٢۵.</sup>	•	•	•				
١	١	۲/۵×۱۰-۱.	•	*	•	٣/۵×1+-110	•	•	•				
١	١	١	١	١	١	۱/۵×۱۰ <sup>-۱</sup> ۰۰	•	•	•				
•	•	•/٩٩٩٨	١	•	•	١	١	•	•				

جدول A: نتایج ANN آموزش دادهشده با GA جهت تمایز پیشامدها [۶]

		يشامدها [7]	هت تمايز پ	ن داده شده با BP جم	ANN أموزن	جدول ۹: تتايج			
خطای مکانیکی سیم پیچ از نوع خطاهای الکتریکی در		خطای مکانیکی سیمپیچ از نوع		جريان هجومي		شرايط نرمال			
لل فشارقوى	ترمين	جابهجایی محوری (۴۵ الی ۶۰ تر		تغییر شکل شعاعی (درجه ۳الی۴)					
		میلیمتر)							
مقدار خروجى	مقدار	مقدار خروجی ANN	مقدار	مقدار خروجی ANN	مقدار	مقدار خروجي	مقدار	مقدار خروجي	مقدار
ANN	هدف		هدف		هدف	ANN	هدف	ANN	هدف
•/•••٨	•	۳/۶×۱۰-۳	•	۳×۱۰ <sup>-۱۲</sup>	•	۲/۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	•	•/• \ \ •	•
•/9847	١	•/•• <b>\Y</b>	•	$\Delta/V \times 1 \cdot 1^{-1}$	•	۱/٣×۱۰ <sup>-۵</sup>	•	./.710	•
•/9199	١	۰/۸۵۶۹	١	•/٩٩٩۶	١	•/••٢٩	•	•/•••٣	•
A/9×1+-9	•	•/٨٩٨•	١	$1/4 \times 1 + -4$		•/99/	١	•/•• •	

#### ۶- نتیجهگیری

این مقاله بر روی تمایز خطاهای مکانیکی سیمپیچ، خطاهای الکتریکی در ترمینال فشارقوی، خطاهای خارجی و جریان هجومی ترانسفورماتورها بهعنوان مهمترين نوآوري مقاله تمركز ميكند.

جهت شناسایی الگوهای جریان دیفرانسیل و استخراج ویژگیهای برتر، از خانواده ویولت (دابچی ۴) و جهت تفکیک نمودن رویدادهای مختلف از روش شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتمهای آموزشی مختلف که به روش ترکیبی موسوم است، استفاده گردید.

در این روش ترکیبی، تشخیص شکل موجهای جریان دیفرانسیل در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول با استفاده از مناسبترین موجک، سیگنالها مورد تجزیهوتحلیل قرار گرفتند و ویژگیهای بارز آنها استخراج گردید و سپس در مرحله دوم این ویژگیهای استخراجشده جهت آموزش و طبقهبندی مناسب و دقیق تر پیشامدهای مختلف به ANN اعمال گردید.

نتایج حاصل از شبیهسازیهای صورت گرفته نشان داد که روش ANN با الگوريتم آموزشي LM و GA نسبت به الگوريتم آموزشـي BP از دقت بالاتری در تفکیک پیشامدها در شرایط عملکردی مختلف برخوردار است. موفق ترین نتایج خروجی مربوط به پیشامدهای خطاهای الکتریکی در ترمینال فشارقوی و جریان هجومی ترانسفورماتور میاشد. علت این امر تعداد نمونههای بیشتر شبیهسازیها و نحوه آموزش الگوریتم میباشد.

همچنین، نتایج حاصل از اندازه گیریهای صورت گرفته در محیط آزمایشگاه نشان داد که بررسی و مدلسازی عیوب مکانیکی سیمییچ

ترانسفورماتورها شامل جابهجایی محوری و تغییر شکل شعاعی و تفکیک نمودن آنها از پیشامدهای دیگر، کمک زیادی به تعمیر و نگهداری، ارزیابی و پایش وضعیت، حفاظت مطلوبتر ترانسفورماتورها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم در شرایط کاری مختلف مینماید.

# مراجع

- [1] A. Hosny and V. K. Sood, "Transformer differential protection with phase angle difference based inrush restraint," Electr. Power Syst. Res, vol. 115, pp. 57-64, 2014
- [2] H. Dashti, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand and H. Lesani, "Discriminating transformer large inrush currents from fault currents," Int. J. Electr. Power Energy Syst, vol. 75, pp. 74-82, 2016.
- [3] M. Stanbury and Z. Djekic, "The Impact of Current-Transformer Saturation on Transformer Differential Protection," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 30, no. 3, pp. 1278-1287, 2015.
- [4] Z. Moravej, D. N. Vishwakarma and S. P. Singh, "Application of radial basic function neural network for differential relaying of a power transformer," Comput. Electr Eng, vol. 29, no. 3, pp. 421-434, 2003.
- [5] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Power transformer protection based on decision tree approach," IET Electr. Power Appl, vol. 8, no. 7, pp. 251–256, 2014.
- [6] H. Balaga, N. Gupta and D. N. Vishwakarma, "GA trained parallel hidden layered ANN based differential protection of three phase power transformer," Int. J. Electr. Power Energy Syst, vol. 67, pp. 286–297, 2015.
- [7] N. Loganathan and A. Pavithra, "Distinguishing the Various Faults in transformer and Its Protection Using Support Vector Machine," Int. J. Adv. Res. Elec, vol. 4, no. 2, pp. 568-573, 2015.

Mechanical Faults," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 25, no. 4, pp. 2544-2555, 2010.

- [19] P. Karimifard, G.B. Gharehpetian, A.J. Ghanizadeh and S. Tenbohlen, "Estimation of Simulated Transfer Function to Discriminate Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Winding," Int. J. Computation and Math. Electr. Electron. Eng (COMPEL), vol. 31, no. 4, pp. 1277-1292, 2012.
- [20] M. Bigdeli, M. Vakilian and E. Rahimpour, "A Probabilistic Neural Network Classifier-based Method for Transformer Winding Fault Identification Through its Transfer Function Measurement," Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 23, no. 3, pp.392-404, 2011.
- [21] K. Ludwikowski and K. Siodla, "Investigation of Transformer Model Winding Deformation Using Sweep Frequency Response Analysis," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 19, no. 6, pp. 1957-1961, 2012.
- [22] A. J. Ghanizadeh and G. B. Gharehpetian, "Application of Characteristic Impedance and Wavelet Coherence Technique to Discriminate Mechanical Defects of Transformer Winding," Electr. Power Compon. Syst, vol. 41, no. 9, pp. 868–878, 2013.
- [23] A. J. Ghanizadeh and G. B. Gharehpetian, "ANN and Cross-correlation based Features for Discrimination between Electrical and Mechanical Defects and their Localization in Transformer Winding," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 21, no. 5, pp. 2374-2382, 2014.
- [24] Z. Zhao, C. Yao, X. Zhao, N. Hashemnia and S. Islam, "Impact of Capacitive Coupling Circuit on Online Impulse Frequency Response of a Power Transformer," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 23, no. 3, pp. 1285-1293, 2016.
- [25] IEEE Standard C37.91: *IEEE Guide for Protecting Power Transformers*, 2008.

[۲۶] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و سیدقدرت اله سیف السادات، «تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالتهای گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، جلد ۴۱، صفحه ۸۷-۷۷، ایران، ۱۳۹۰.

[27] M. M. Shabestary, A. J. Ghanizadeh, G. B. Gharehpetian and M. Agha-Mirsalim, "Ladder Network Parameters Determination Considering Nondominant Resonances of the Transformer Winding," IEEE Trans. Power Deliv, vol. 29, no. 1, pp.108-117, 2014.

<sup>17</sup> Logistic sigmoid (logsig)

- <sup>19</sup> Mutual Inductances
- <sup>20</sup> Three-layered multiplier perceptron

[۸] امید قادری و محمدرضا فیضی، «روش جدید برای تخمین عمر باقیمانده ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۱، جلد ۳۹، صفحه ۳۶–۲۵، ایران، ۱۳۸۸.

- [9] H. O. Mota, F. H. Vasconcelos and C. L. de Castro, "A Comparison of Cycle Spinning Versus Stationary Wavelet Transform for the Extraction of Features of Partial Discharge Signals," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 23, no. 2, pp. 1106-1118, 2016.
- [10] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Transformer differential protection using wavelet transform," Electr. Power Syst. Res, vol. 114, pp. 60–67, 2014.
- [11] A. Ashrafian, M. Rostami and G.B. Gharehpetian, "Hyperbolic S-transform-based method for classification of external faults, incipient faults, inrush currents and internal faults in power transformers," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 6, no. 10, pp. 940-950, 2012.
- [12] A. Ashrafian, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "Characterization of internal disturbances and external faults in transformers using an S-transform-based algorithm," Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci, vol. 21, no. 2, pp.330-349, 2013.
- [13] Z. Moravej, A. A. Abdoos and M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection scheme based on timefrequency analysis," Int. Trans. Electr. Energy Syst, vol. 23, no. 4, pp. 473–493, 2013.
- [14] A. Ashrafian, B. Vahidi and M. Mirsalim, "Time-timetransform application to fault diagnosis of power transformers," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 8, no. 6, pp. 1156-1167, 2014.
- [15] S. K. Murugan, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, K. Sundareswaran and N. P. Padhy, "Power transformer protection using chirplet transform," IET Gener. Transm. Distrib, vol. 10, no. 10, pp. 2520-2530, 2016.
- [16] E. Al-Ammar, G. G. Karady and H. J. Sim, "Novel Technique to Improve the Fault Detection Sensitivity in Transformer Impulse Test," IEEE. Power. Eng. Society, vol. 23, no. 2, pp. 717-725, 2008.
- [17] P. Rajmani and S. Chakravorti, "Identification of Simultaneously Occurring Dynamic Disc-to-disc Insulation Failures in Transformer Winding under Impulse Excitation," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 19, no. 2, pp. 443-453, 2012.
- [18] E. Rahimpour, M. Jabbari and S. Tenbohlen, "Mathematical Comparison Methods to Assess Transfer Functions of Transformers to Detect Different Types of

<sup>1</sup> Decision Tree (DT)

- <sup>2</sup> Artificial Neural Network (ANN)
- <sup>3</sup> Support Vector Machine (SVM)
- <sup>4</sup> Chirplet Transform
- <sup>5</sup> Vector Fitting method (VF)
- <sup>6</sup> Probabilistic Neural Network (PNN)
- <sup>7</sup> Radial Deformation
- <sup>8</sup> Axial Displacement
- 9 Forced
- <sup>10</sup> Free
- <sup>11</sup> Levenberg-Marquardt (LM) feed forward back propagation
- 12 Back Propagation (BP)
- <sup>13</sup> Selection function
- 14 Uniform

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Crossover function

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Tangent sigmoid (tansig)

<sup>18</sup> Detailed Model